UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DOUGLAS CAETANO DOS SANTOS

AUTOMATIZAÇÃO DO CÁLCULO E DA ANÁLISE DE RISCO DA NORMA ABNT NBR 5419:2015

Porto Alegre

2017

DOUGLAS CAETANO DOS SANTOS

AUTOMATIZAÇÃO DO CÁLCULO E DA ANÁLISE DE RISCO DA NORMA ABNT NBR 5419:2015

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Orientador: Prof. Me. Igor Pasa Wiltuschnig

Porto Alegre

2017

DOUGLAS CAETANO DOS SANTOS

AUTOMATIZAÇÃO DO CÁLCULO E DA ANÁLISE DE RISCO DA NORMA ABNT NBR 5419:2015

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi analisado e julgado adequado para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

_____

Prof. Me. Igor Pasa Wiltuschnig – Prof. Orientador

_____

Prof. Dr. Ály Flores Ferreira Filho – Prof. Chefe do DELET

Aprovado em ____ / ____ / _____

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Me. Igor Pasa Wiltuschnig – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

_____

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

_____

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais, João e Ivani, e aos meus irmãos, Guilherme e João Vitor.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, João e Ivani, pelo suporte fundamental que me deram e seguem dando ao longo dessa jornada, de forma incondicional.

Ao meu irmão, Guilherme, pelo companheirismo e pelas longas conversas sobre a vida, o universo e tudo o mais.

Aos meus diversos amigos, pelo apoio técnico e moral nas horas difíceis e por me ajudarem a curtir a vida nas fáceis.

Ao meu chefe e amigo Felipe Damasio, pela compreensão e pelo suporte ao longo desse período em que estivemos trabalhando juntos.

Ao Prof. Me. Igor Pasa Wiltuschnig, pela ideia e pelo suporte ao longo do desenvolvimento desse projeto.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica, pelo esforço e pela dedicação em fornecer um ensino de qualidade, mesmo quando as condições não eram propícias a isso.

“Tudo que é realmente grande e inspirador é criado pelo indivíduo que pode trabalhar em liberdade”
– Albert Einstein

RESUMO

A norma ABNT NBR 5419, que trata da proteção contra descargas atmosféricas, recebeu uma grande atualização no ano de 2015. Em especial, a análise de risco de perdas devido a descargas atmosféricas recebeu a maior ampliação nessa atualização, passando a compor uma das quatro partes dessa versão. O novo método de análise passou a considerar dezenas de novos parâmetros da estrutura, dentre os quais as próprias medidas de proteção. Ainda mais, o número de cálculos e os novos conceitos envolvidos, como o de categorização de perdas e danos, tornaram esse método muito mais completo e preciso que o anterior, porém ao custo do aumento de sua complexidade e extensão. Para um iniciante no assunto, o estudo dessa parte da norma pode ser extenuante, uma vez que, para aplicá-la na prática e obter os valores de risco à mão, é necessário tê-la estudado por completo devido à ligação entre os cálculos e entre os conceitos envolvidos. Em sala de aula, por exemplo, o ensino da norma fica muito prejudicado, pois normalmente não há tempo disponível para uma apresentação adequada do conteúdo. Buscando facilitar esse estudo, desenvolveu-se um programa computacional de cunho didático que automatize os cálculos e a análise de risco desse método. Essa automatização permite que o usuário possa obter os resultados dessa análise durante seu estudo. Todos os valores envolvidos na obtenção do valor de risco final, incluindo os cálculos intermediários, são apresentados em um relatório interativo. Assim, o estudo da norma pode ser acompanhado da observação prática do passo a passo do procedimento, bem como é possível realizar experimentos práticos que auxiliem na assimilação dos conceitos aprendidos. No exemplo da sala de aula, professor e alunos podem dar mais atenção à interpretação da norma do que aos cálculos propriamente ditos.

Palavras-chave: Engenharia elétrica. Descargas atmosféricas. ABNT NBR 5419:2015. Gerenciamento de risco. Automatização.

ABSTRACT

The ABNT NBR 5419 standard, which deals with lightning protection, has received a big revision in 2015. In special, the analysis of risk of losses due to lightning has received the biggest expansion in this revision, becoming one of four parts of this version. The new analysis method now considers dozens of new structure parameters, among which the protection measures themselves. Even more, the number of calculations and the new concepts involved, like losses and damages categorization, have made this method more complete and precise than its predecessor, but at the cost of increasing its complexity and extension. For a newbie in the subject the study of this standard's part may be extenuating, as, to be possible to apply it in practice and get the results by hand, it is necessary to have studied it completely due to the connection between the several calculations and between the involved concepts. In classroom, for example, the teaching of the standard is strongly degraded, because normally there is not enough time for an adequate presentation of the contents. Seeking to facilitate this studying process, a didactic computational program was developed that automates the risk calculations and analysis of this method. This automation allows the user to obtain the analysis results during his or her studies. All values involved in obtaining the final risk value, including the intermediate calculations, are presented in an interactive report. That way, the study of the standard can be followed by the practical observation of the procedure's steps, as well as being possible to make practical experiments that help in the assimilation of the learned concepts. In the classroom example, teacher and students can give more attention to the standard's interpretation than to the calculations themselves.

Keywords: Electrical engineering. Lightning. ABNT NBR 5419:2015. Risk assessment. Automation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do procedimento de análise do risco. 21
Figura 2 – Fluxograma do procedimento de uso do programa..... 38
Figura 3 – Edifício de escritórios: valores de risco total no programa. 46
Figura 4 - Edifício de escritórios: análise de risco no programa..... 46
Figura 5 – Edifício de escritórios: valores de risco para a zona de arquivo. 47
Figura 6 - Edifício de escritórios: valores de risco total da solução 1 no programa..... 48
Figura 7 - Edifício de escritórios: valores de risco total da solução 2 no programa..... 48
Figura 8 – Hospital: valores de risco total no programa. 52
Figura 9 - Hospital: análise de risco no programa. 53
Figura 10 – Hospital: valores de risco para a zona do bloco de apartamentos. 53
Figura 11 - Hospital: parâmetros da linha de energia no relatório. 56
Figura 12 - Hospital: valores de risco total da solução 1 no programa. 56
Figura 13 - Hospital: valores de risco total da solução 2 no programa. 57
Figura 14 - Hospital: valores de risco total da solução 3 no programa. 57
Figura 15 – Área de exposição equivalente AD de uma estrutura retangular. 60
Figura 16 – Área de exposição equivalente AD, sal sobreposta à área de exposição de uma estrutura retangular. 60
Figura 17 – Tela da planilha de entrada “Estrutura” – parte esquerda. 74
Figura 18 – Tela da planilha de entrada “Estrutura” – parte direita. 75
Figura 19 – Tela da planilha de entrada “Linha de energia” – parte esquerda..... 76
Figura 20 – Tela da planilha de entrada “Linha de energia” – parte direita. 76
Figura 21 – Tela da planilha de entrada “Linha de sinal” – parte esquerda. 77
Figura 22 – Tela da planilha de entrada “Linha de sinal” – parte direita. 77
Figura 23 – Tela da planilha de entrada “Zonas” – parte esquerda. 78
Figura 24 – Tela da planilha de entrada “Zonas” – parte direita. 79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Descrição das quatro partes da norma ABNT NBR 5419:2015. 17
Quadro 2 – Tipos de perda. 21
Quadro 3 – Tipos de dano. 22
Quadro 4 – Fontes de dano. 22
Quadro 5 – Risco para o tipo de perda de vida humana (L1). 23
Quadro 6 – Risco para o tipo de perda de serviço ao público (L2). 23
Quadro 7 – Risco para o tipo de perda de patrimônio cultural (L3). 24
Quadro 8 – Risco para o tipo de perda de valor econômico (L4). 24
Quadro 9 – Componente de risco RA. 25
Quadro 10 – Componente de risco RU. 25
Quadro 11 – Componente de risco RB. 25
Quadro 12 – Componente de risco RV. 26
Quadro 13 – Componente de risco RC. 26
Quadro 14 – Componente de risco RM. 26
Quadro 15 – Componente de risco RW. 27
Quadro 16 – Componente de risco RZ. 27
Quadro 17 – Número de eventos ND. 28
Quadro 18 – Número de eventos NM 28
Quadro 19 – Número de eventos NL. 28
Quadro 20 – Número de eventos NI. 28
Quadro 21 – Número de eventos NDJ 29
Quadro 22 – Probabilidade PA 30
Quadro 23 – Probabilidade PU. 30
Quadro 24 – Probabilidade PB. 30
Quadro 25 – Probabilidade PV 31
Quadro 26 – Probabilidade PC 31
Quadro 27 – Probabilidade PM 31
Quadro 28 – Probabilidade PW. 32
Quadro 29 – Probabilidade PZ 32
Quadro 30 – Significado dos valores de cada tipo de perda. 33

Quadro 31 – Perdas consequentes LA e LU. 33
Quadro 32 – Perdas consequentes LB e LV. 34
Quadro 33 – Perdas consequentes LC, LM, LW e LZ. 34
Quadro 34 – Valores de risco toleráveis por tipo de risco. 35
Quadro 35 – Fatores que influenciam os componentes de risco. 35
Quadro 36 – Edifício de escritórios: informações da estrutura. 42
Quadro 37 – Edifício de escritórios: informações da linha de energia. 43
Quadro 38 – Edifício de escritórios: informações da linha de sinal. 43
Quadro 39 – Edifício de escritórios: informações da zona da área externa da entrada..... 43
Quadro 40 – Edifício de escritórios: informações da zona do jardim externo..... 44
Quadro 41 – Edifício de escritórios: informações da zona de arquivo. 44
Quadro 42 – Edifício de escritórios: informações da zona de salas de escritório. 45
Quadro 43 – Edifício de escritórios: informações da zona do centro de informática. 45
Quadro 44 – Edifício de escritórios: alterações nos parâmetros para a solução 1. 47
Quadro 45 – Edifício de escritórios: alterações nos parâmetros para a solução 2. 48
Quadro 46 – Hospital: informações da estrutura. 49
Quadro 47 – Hospital: informações da linha de energia. 49
Quadro 48 – Hospital: informações da linha de sinal. 50
Quadro 49 – Hospital: informações da zona da área externa. 50
Quadro 50 – Hospital: informações da zona do bloco de apartamentos. 51
Quadro 51 – Hospital: informações da zona do bloco cirúrgico. 51
Quadro 52 – Hospital: informações da zona da UTI. 52
Quadro 53 – Hospital: alterações nos parâmetros para a solução 1. 54
Quadro 54 – Hospital: alterações nos parâmetros para a solução 2. 55
Quadro 55 – Hospital: alterações nos parâmetros para a solução 3. 55
Quadro 56 – Probabilidade PMS 66
Quadro 57 – Definição das zonas de explosão. 71
Quadro 58 – Definição das quantidades de risco de incêndio. 72
Quadro 59 – Fator relativo da zona FZ para o tipo de perda de vida humana (L1). 72
Quadro 60 – Fator relativo da zona FZ para o tipo de perda de serviço ao público (L2). 72
Quadro 61 – Fator relativo da zona FZ para o tipo de perda de patrimônio cultural (L3). 73
Quadro 62 – Fator relativo da zona FZ para o tipo de perda de valor econômico (L4). 73

Quadro 63 – Dados de entrada na tela “Estrutura”. 80
Quadro 64 – Dados de entrada nas telas “Linha de Energia” e “Linha de Sinal”. 80
Quadro 65 – Dados de entrada na tela “Zonas”. 81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fator CD de localização da estrutura. 62
Tabela 2 – Fator CI de instalação da linha. 62
Tabela 3 – Fator CT de tipo de linha. 62
Tabela 4 – Fator CE ambiental de linha. 62
Tabela 5 – Probabilidade PTA de dano a seres vivos devido a uma descarga na estrutura conforme medidas de proteção adicionais. 63
Tabela 6 – Probabilidade PB de dano físico à estrutura devido a uma descarga na estrutura. 63
Tabela 7 – Probabilidade PTU de dano a seres vivos devido a uma descarga em uma linha conforme medidas de proteção adicionais. 63
Tabela 8 – Probabilidade PEB de dano na existência de DPS conforme o nível de proteção projetado. 64
Tabela 9 – Probabilidade $PSPD$ de dano na existência de DPS coordenado conforme o nível de proteção projetado. 64
Tabela 10 – Probabilidade PLD de dano devido a descarga na linha conforme as características da linha e dos equipamentos a ela ligados. 64
Tabela 11 – Probabilidade PLI de dano devido a descarga próxima à linha conforme as características da linha e dos equipamentos a ela ligados. 64
Tabela 12 – Fatores CLD e CLI de blindagem, aterramento e isolamento da linha para descargas na linha e próximas a ela. 65
Tabela 13 – Fator $KS3$ de fiação interna. 67
Tabela 14 – Valores típicos de perda LT, LF e LO para perdas de vida humana (L1). 68
Tabela 15 – Valores típicos de perda LF e LO para perdas de serviço ao público (L2). 68
Tabela 16 – Valores típicos de perda LF para perdas de patrimônio cultural (L3). 69
Tabela 17 – Valores típicos de perda LT, LF e LO para perdas de valor econômico (L4). 69
Tabela 18 – Fator de redução rt de tipo de superfície do solo ou piso. 70
Tabela 19 – Fator de redução rp de medidas de prevenção de incêndio. 70
Tabela 20 – Fator de redução rf de risco de incêndio ou explosão na estrutura. 70
Tabela 21 – Fator de aumento hz de perigos especiais. 71

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surtos
ELAT	Grupo de Eletricidade Atmosférica
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MPS	Medidas de Proteção contra Surtos
NBR	Norma Brasileira
NP	Nível de Proteção
SPDA	Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas
VBA	*Visual Basic for Applications*
ZPR	Zona de Proteção contra Raios

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15

2 NORMA ABNT NBR 5419:2015 17

2.1 DIFERENÇAS NO CÁLCULO E NA ANÁLISE DE RISCO ENTRE AS VERSÕES DE 2005 E 2015 18

3 CÁLCULO E ANÁLISE DE RISCO CONFORME A NORMA ABNT NBR 5419:2015 20

3.1 CATEGORIZAÇÃO DE PERDAS E DANOS 21

3.2 CÁLCULO DO RISCO 22

3.2.1 Componentes de risco 24

3.2.2 Número médio anual de eventos perigosos (N_X) 27

3.2.3 Probabilidade de um evento causar dano (P_X) 30

3.2.4 Perda consequente ao dano (L_X) 32

3.3 ANÁLISE DO RISCO 34

4 AUTOMATIZAÇÃO DO CÁLCULO E DA ANÁLISE DE RISCO CONFORME A NORMA ABNT NBR 5419:2015 37

4.1 SELEÇÃO DA PLATAFORMA DE DESENVOLVIMENTO 37

4.2 ENTRADA DE DADOS 38

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DOS CÁLCULOS E DA ANÁLISE 40

4.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS 41

5 ESTUDOS DE CASO 42

5.1 EDIFÍCIO DE ESCRITÓRIOS 42

5.2 HOSPITAL 48

6 CONCLUSÃO 58

REFERÊNCIAS 59

APÊNDICE A – CÁLCULO DAS ÁREAS DE EXPOSIÇÃO EQUIVALENTE 60

APÊNDICE B – FATORES APLICADOS ÀS EQUAÇÕES DE NÚMERO MÉDIO DE EVENTOS 62

APÊNDICE C – FATORES APLICADOS ÀS EQUAÇÕES DE PROBABILIDADE DE DANOS 63

APÊNDICE D – DETERMINAÇÃO DA PROBABILIDADE PMS 66

APÊNDICE E – VALORES RELATIVOS MÉDIOS TÍPICOS DE PERDA CONSEQUENTE 68

APÊNDICE F – FATORES APLICADOS ÀS EQUAÇÕES DE PERDAS CONSEQUENTES 70

APÊNDICE G – TELAS DO PROGRAMA 74

APÊNDICE H – DADOS DE ENTRADA E VARIÁVEIS AFETADAS 80

1 INTRODUÇÃO

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou, em 2015, uma nova revisão da sua norma ABNT NBR 5419, que trata da proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. A ampliação da abrangência da norma fez com que esta fosse estendida de quarenta e duas páginas na versão anterior de 2005 para trezentos e nove páginas na versão atual, as quais foram divididas em quatro partes. A análise de risco de perdas por descargas atmosféricas, em especial, que representava apenas dez por cento do conteúdo da norma, passou a integrar uma parte exclusiva dentre as quatro da nova versão, sendo responsável por um terço de todo o seu conteúdo. Essa ampliação da análise de risco fez ampliar, por consequência, sua complexidade, como reconhecido por Sueta (2015a).

A análise de risco da versão de 2005 era realizada com base em três cálculos e em menos de dez parâmetros de entrada, e se limitava a determinar a necessidade ou não de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) e seu nível de proteção (ABNT, 2005, p. 29-36). A nova versão, no entanto, apresenta um método que define cerca de trinta equações e considera cerca de cinquenta parâmetros de entrada. O SPDA deixa de ser a única medida de proteção e se junta a outras apresentadas nas demais partes da norma. Além disso, as medidas de proteção aplicáveis passaram a fazer parte dos parâmetros de entrada, tornando os cálculos iterativos. Foi essa iteração que permitiu determinar não somente a necessidade de proteção, como na versão anterior, mas também quais medidas de proteção aplicar (ABNT, 2015b).

A ampliação da análise de risco e de sua complexidade fizeram aumentar, também, a dificuldade de compreensão do método de determinação da necessidade de medidas de proteção. No âmbito acadêmico, por exemplo, o ensino desse conteúdo pode ficar prejudicado, pois o tempo normalmente disponível em aula exige que o assunto seja muito resumido, não recebendo a devida atenção. Ademais, mesmo livros didáticos na área de instalações elétricas, como Mamede Filho (2017), não conseguiram expressar o método de análise de risco de maneira mais didática, limitando-se a reproduzi-lo conforme a norma.

Buscando facilitar o estudo e o entendimento da norma, portanto, desenvolveu-se, neste trabalho, um programa computacional cujo objetivo é automatizar os cálculos e a análise de risco apresentados, relatando os passos intermediários de cada cálculo. Essa automatização permite que o usuário possa obter os resultados dessa análise durante seu

estudo sem a necessidade de compreender, previamente, todo o método envolvido. Ao mesmo tempo, espera-se que a experimentação prática através da observação da influência das entradas (características da estrutura) sobre as saídas (riscos), paralelamente à leitura da norma, auxilie a compreensão dos conceitos envolvidos. No exemplo acadêmico já citado, professor e alunos poderão dar mais atenção à interpretação dos conhecimentos contidos na norma do que aos cálculos propriamente ditos.

O programa foi desenvolvido utilizando-se o *software* Microsoft Excel, através da construção de planilhas e do uso de código VBA (*Visual Basic for Applications*). O relatório final gerado pelo programa apresenta os valores obtidos nas tabelas da norma a partir das entradas do usuário, as variáveis intermediárias e os riscos finais. Os valores nesse relatório podem ser modificados pelo usuário, e o relatório pode ser impresso ou exportado para um novo arquivo independente do programa.

Um estudo detalhado da parte de gerenciamento de risco da norma foi realizado para balizar o desenvolvimento desse programa. A análise de risco é apresentada utilizando uma abordagem ligeiramente diferente da usada na norma, em uma tentativa de tornar mais didática a apresentação dos conceitos.

No capítulo 2 deste relatório, uma introdução da norma ABNT NBR 5419:2015 é realizada, e as diferenças da análise de risco entre as duas versões são descritas. No capítulo 3 , a parte de Gerenciamento de Risco da norma é apresentada, explicando quais são os cálculos envolvidos e detalhando a análise de risco conforme o novo método. No capítulo 4 , é apresentado o programa desenvolvido, descrevendo como o mesmo foi construído e quais as decisões de projeto tomadas ao longo de seu desenvolvimento. Por fim, no capítulo 5 , os estudos de caso dados como exemplo na norma são utilizados para demonstrar o uso do programa.

2 NORMA ABNT NBR 5419:2015

A norma ABNT NBR 5419:2015 fornece diretivas para a implementação de medidas de proteção contra descargas atmosféricas, buscando manter a integridade da estrutura alvo, das pessoas que a frequentam e do seu conteúdo, bem como a continuidade das atividades nela realizadas. Essa norma é de extrema importância no Brasil, pois o país tem, conforme o Grupo de Eletricidade Atmosférica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (ELAT/INPE), a maior incidência de descargas atmosféricas no mundo devido a sua localização e sua geografia: são 50 milhões de raios anuais (INPE, 2017).

A versão de 2015 da norma, devido à sua grande abrangência, foi dividida em quatro partes, descritas no Quadro 1, fato que demonstra a grande densidade de conteúdo dessa norma. De modo geral, a norma descreve e parametriza as descargas atmosféricas em detalhes, fornece subsídios para determinar a necessidade de proteção de uma estrutura e especifica proteções para evitar os danos causados pelas descargas.

Quadro 1 – Descrição das quatro partes da norma ABNT NBR 5419:2015.

Parte 1: **Princípios gerais**	Define parâmetros e efeitos de descargas atmosféricas, requisitos para determinar a necessidade de proteção, medidas de proteção aplicáveis e critérios básicos para proteção de estruturas.
Parte 2: **Gerenciamento de risco**	Define o método de análise de risco.
Parte 3: **Danos físicos a estruturas e perigos à vida**	Define um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) para reduzir danos físicos e perigos à vida.
Parte 4: **Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura**	Define Medidas de Proteção contra Surtos (MPS) para reduzir falhas de sistemas elétricos e eletrônicos em uma estrutura.

Fonte: adaptado de ABNT (2015a).

As principais medidas de proteção definidas pela norma são o Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) e as Medidas de Proteção contra Surto (MPS). Um SPDA busca preservar a integridade física da estrutura e, por conseguinte, a vida das pessoas que a frequentam. Já as MPS são uma série de medidas visando a proteção de sistemas internos na estrutura e de vidas quando estas dependem desses sistemas (ABNT, 2015c, 2015d).

É importante observar que não é objetivo deste projeto esclarecer conceitos apresentados nas demais partes desta norma, mas apenas daqueles contidos na segunda parte, “Gerenciamento de Risco”.

2.1 DIFERENÇAS NO CÁLCULO E NA ANÁLISE DE RISCO ENTRE AS VERSÕES DE 2005 E 2015

A análise de risco descrita na versão de 2005 inclui apenas a realização de três cálculos para determinar a necessidade de proteção de uma estrutura. Esses cálculos se baseiam na densidade de descargas atmosféricas para a terra por quilômetro quadrado e por ano, nas dimensões da estrutura e em cinco fatores, a saber, o tipo de ocupação da estrutura, seu tipo de construção, seu conteúdo, sua localização e a topografia da região (ABNT, 2005, p. 29-34).

Obtido o valor de risco final, compara-se o mesmo a dois limites para determinar a necessidade de um SPDA para a estrutura: se estiver abaixo do limite inferior, não há a necessidade de um projeto de SPDA; se estiver acima do limite superior, há a necessidade desse projeto; e, se estiver entre os dois limites, a necessidade do projeto fica a cargo do projetista, conforme análise técnica (ABNT, 2005, p. 32).

Após definir a necessidade de um SPDA, o nível de proteção a ser aplicado é determinado de forma discricionária com base em uma tabela de exemplos de estruturas e seus respectivos níveis de proteção, fornecida pela norma (ABNT, 2005, p. 35).

Não há previsão, na versão de 2005, de Medidas de Proteção contra Surtos (MPS), pois esta não considera os efeitos eletromagnéticos das descargas atmosféricas.

A partir da versão de 2015, a análise de risco passa a depender de uma série de cálculos e parâmetros que vão muito além dos fatores definidos na versão anterior. A análise passa a considerar não somente o número de descargas atmosféricas a que a estrutura está submetida, mas também os danos causados por essas descargas e as perdas consequentes a esses danos (ABNT, 2015b, p. 24).

Outra novidade é que as medidas de proteção a serem aplicadas, bem como seu nível de proteção, passam a fazer parte dos cálculos do risco total. Isso torna os cálculos iterativos, ou seja, a busca pela redução de risco exige que os cálculos sejam refeitos a cada alteração realizada nas medidas de proteção a serem aplicadas. Apesar do trabalho extra, essa iteração permite que o projetista defina de forma objetiva quais medidas e qual nível de proteção aplicar na estrutura.

O risco obtido através desses cálculos é comparado a um valor de risco tolerável. Se o risco estiver acima do limite, novas medidas de proteção precisam ser aplicadas, e, se estiver abaixo do limite, as medidas de proteção já aplicadas são suficientes para proteger a estrutura

alvo (ABNT, 2015b, p. 20). Isso elimina a indefinição existente na versão anterior quando o valor de risco estava entre os dois limites especificados.

Além disso, a norma se preocupa em definir diferentes tipos de perda que podem ocorrer na estrutura. Valores de risco devem ser calculados para cada tipo de perda, os quais são comparados a limites de risco tolerável definidos igualmente por tipo de perda (ABNT, 2015b, p. 14-15).

Dado que uma estrutura possivelmente não tenha características homogêneas em toda a sua extensão, a norma inclui a possibilidade de sua divisão em zonas com características semelhantes. Com isso, medidas de proteção específicas podem ser aplicadas em cada zona, reduzindo o custo total do projeto ao mesmo tempo em que mantém a proteção necessária ou desejada (ABNT, 2015b, p. 28).

Por fim, é especificado um método para análise de custo-benefício das medidas de proteção, o qual pode ser usado quando houver interesse em evitar perdas significativas de valor econômico. Essa análise, no entanto, não é obrigatória, e fica a critério do projetista e do proprietário da estrutura fazê-la ou não, justificando-se quando o risco de perdas for maior que o custo de se aplicar e manter medidas de proteção que possam reduzi-lo (ABNT, 2015b, p. 21).

3 CÁLCULO E ANÁLISE DE RISCO CONFORME A NORMA ABNT NBR 5419:2015

O método de cálculo e análise de risco é descrito por ABNT (2015a, 2015b). Perdas, danos e riscos são inicialmente categorizados. Em seguida, são determinados os cálculos de risco e seus componentes, com base nessa categorização. Por fim, é dado o procedimento para avaliação da necessidade de proteção da estrutura.

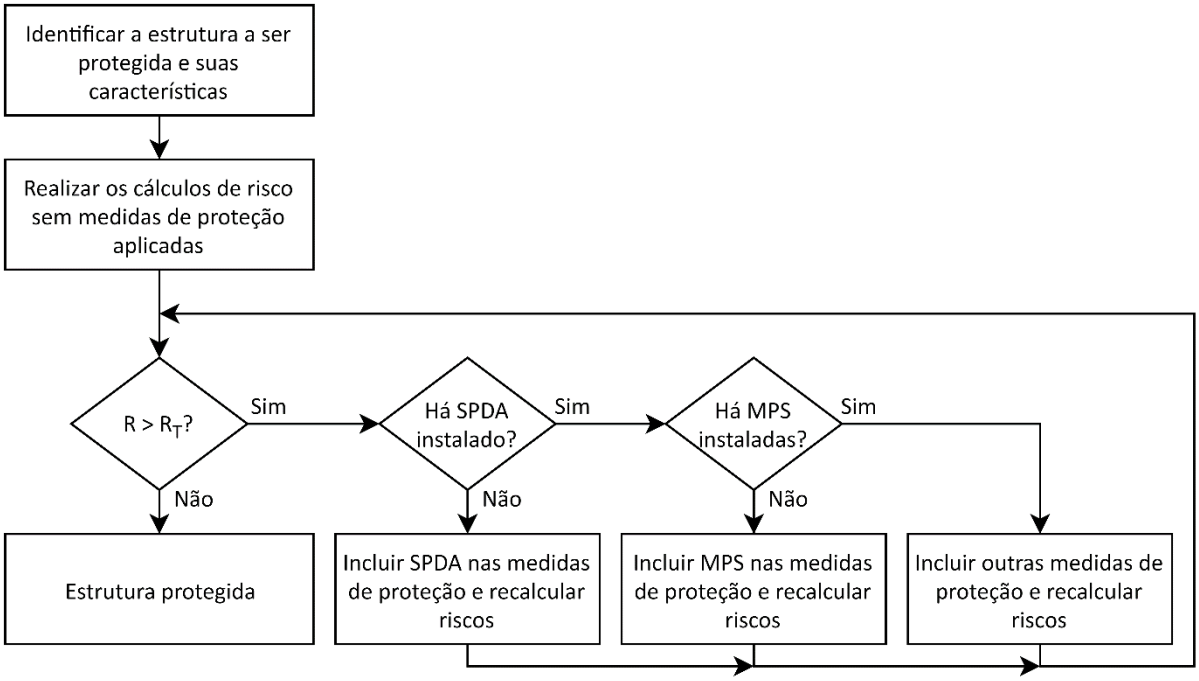
As perdas são divididas em quatro tipos – perda de vida humana, perda de serviço ao público, perda de patrimônio público e perda de valor econômico – e os danos, em três tipos – dano a seres vivos, dano físico à estrutura e dano por falha de sistemas internos. As fontes desses danos são divididas conforme o ponto de impacto das descargas atmosféricas – diretamente na estrutura ou próximo a ela, e em linhas de energia e sinal que adentram a estrutura ou próximo a essas linhas. O risco total é dividido em componentes parciais de risco, os quais são definidos para cada relação entre tipo e fonte de dano (ABNT, 2015b, p. 14-19).

Para cada tipo de perda, um valor de risco deve ser calculado levando em conta as características daquele tipo. Assim, ao fim dos cálculos, são obtidos até quatro valores de risco que devem ser analisados (ABNT, 2015b, p. 15). O procedimento para essa análise pode ser visualizado através do fluxograma da Figura 1, que evidencia o aspecto iterativo dos cálculos.

Como uma estrutura pode não ser homogênea em suas características, a norma permite dividi-la em zonas com características semelhantes (ABNT, 2015b, p. 28). Isso permite que medidas de proteção de mais alto custo, por exemplo, possam ser aplicadas localmente apenas nas zonas que as necessitam, reduzindo o custo final do projeto sem reduzir sua eficácia.

Importante observar que a abordagem utilizada na apresentação dos conceitos e definições deste capítulo é ligeiramente diferente da utilizada por ABNT (2015b). Nesta, os conceitos de fonte de dano, tipo de dano, tipo de perda e tipo de risco são primeiramente apresentados em separado para, só então, serem associados. Também, a ordem de associação dos conceitos, partindo das fontes de dano, pareceu tornar mais difícil a visualização da composição dos riscos. Assim, neste relatório, a apresentação é feita na ordem inversa da norma, partindo do conceito de tipos de perda, passando pelos tipos de dano e, então, chegando às fontes de dano, associando-os ao longo da apresentação.

Figura 1 – Fluxograma do procedimento de análise do risco.



Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 22).

3.1 CATEGORIZAÇÃO DE PERDAS E DANOS

As perdas causadas por descargas atmosféricas são divididas em quatro tipos, conforme o Quadro 2.

Quadro 2 – Tipos de perda.

Perda de vida humana (L1)	Vítimas fatais e ferimentos permanentes.
Perda de serviço ao público (L2)	Usuários não atendidos por serviços cuja interrupção é inaceitável. A norma define como serviço ao público, exclusivamente, o suprimento de água, gás e energia e os serviços de fornecimento de sinais de TV e de telecomunicações.
Perda de patrimônio cultural (L3)	Perda de patrimônio considerado cultural e insubstituível. A norma sugere, mas não limita, que locais como museus, galerias, sítios arqueológicos e igrejas estão suscetíveis a esse tipo de perda
Perda de valor econômico (L4)	Perda econômica devida à perda de vida animal produtiva, a danos à estrutura e/ou aos seus conteúdos e interrupção de atividades.

Fonte: adaptado de ABNT (2015a, 2015b).

Os tipos de perda de vida humana, de serviço ao público e de patrimônio cultural são consideradas perdas de valor social e sua análise é obrigatória. A análise do tipo de perda de valor econômico é opcional, ficando a critério do projetista (ABNT, 2015a, p. 12-13).

Esses tipos de perda são consequência de diferentes tipos de dano causados pelas descargas. Esses danos são classificados conforme o Quadro 3.

Quadro 3 – Tipos de dano.

Dano a seres vivos (D1)	Danos devidos a choques por tensões de passo e toque. Pode causar perda de vida humana (L1) e de valor econômico (L4), este último caso haja animais produtivos na estrutura.
Dano físico à estrutura (D2)	Danos por incêndios, explosões, destruição mecânica e liberação de produtos químicos. Pode causar todos os tipos de perda.
Dano por falha de sistemas internos (D3)	Danos causados indiretamente por falha de sistemas internos devida a surtos de tensão nas linhas de energia ou sinal que adentram a estrutura. Pode causar perda de serviço ao público (L2) e de valor econômico (L4), bem como de vida humana (L1) quando há risco de explosão ou se essas falhas puderem causar imediato perigo à vida humana (ex. hospitais).

Fonte: adaptado de ABNT (2015a, 2015b) e Sueta (2015b).

Por fim, as descargas atmosféricas que causam esses danos são classificadas pelo ponto de impacto e são chamadas fontes de dano. O Quadro 4 descreve essa classificação.

Quadro 4 – Fontes de dano.

Descarga atmosférica na estrutura (S1)	Descarga que atinge diretamente a estrutura. Pode gerar todos os tipos de dano.
Descarga atmosférica próxima à estrutura (S2)	Descarga que atinge um local próximo suficiente à estrutura para causar surtos de tensão nas linhas de energia e sinal. Pode gerar danos por falha de sistemas internos (D3).
Descarga atmosférica nas linhas de energia e sinal (S3)	Descarga que atinge diretamente uma das linhas de energia ou de sinal que adentram a estrutura. Pode gerar todos os tipos de dano.
Descarga atmosférica próxima às linhas de energia e sinal (S4)	Descarga que atinge um local próximo o suficiente a uma das linhas de energia ou de sinal para causar surtos de tensão nessas linhas. Pode gerar danos por falha de sistemas internos (D3).

Fonte: adaptado de ABNT (2015b).

3.2 CÁLCULO DO RISCO

O cálculo de risco é realizado separadamente para cada tipo de perda, ou seja, calculam-se até quatro tipos de risco diferentes. Os riscos para perdas de valor social – perda de vida humana, de serviço ao público e de patrimônio cultural – devem ser obrigatoriamente calculados, quando aplicáveis, para determinar a necessidade de proteção. Já o risco de perda de valor econômico pode ser desconsiderado quando o projetista ou o proprietário da estrutura não verificarem benefício econômico na aplicação de medidas de proteção para redução desse risco (ABNT, 2015a, p. 12-13). Havendo interesse, entretanto, é fornecido um método para determinação do custo-benefício da aplicação de medidas de proteção por ABNT (2015b, p. 30, p. 59-60).

O risco total é dividido em componentes parciais de risco, definidos para cada relação entre tipo e fonte de dano. Esses componentes são definidos em função do número médio de eventos perigosos, da probabilidade de um evento perigoso causar dano e da perda consequente a um dano causado por um evento perigoso. Por sua vez, esses valores dependem das características da estrutura, das linhas que a adentram e da região em que está localizada. As definições dos quatro tipos de risco e a descrição dos seus componentes são apresentadas do Quadro 5 ao Quadro 8, onde também são demonstradas as relações entre tipo de risco, tipo de perda, tipo de dano e fonte de dano (ABNT, 2015b, p. 15-19).

Quadro 5 – Risco para o tipo de perda de vida humana (L1).

Risco para o tipo de perda de vida humana (L1)		
$$L1 \begin{cases} \overbrace{S1 + S3}^{D1} + \overbrace{S1 + S3}^{D2} + \overbrace{S1 + S2 + S3 + S4}^{D3} \end{cases}$$ $$R1 = R_A + R_U + R_B + R_V + R_C + R_M + R_W + R_Z$$		
Componente de risco	**Tipo de dano**	**Fonte de dano**
R_A	Dano a seres vivos (D1)	Descarga atmosférica na estrutura (S1)
R_U		Descarga atmosférica em uma linha (S3)
R_B	Dano físico à estrutura (D2)	Descarga atmosférica na estrutura (S1)
R_V		Descarga atmosférica em uma linha (S3)
R_C	Dano por falha de sistemas internos (D3)	Descarga atmosférica na estrutura (S1)
R_M		Descarga atmosférica próxima à estrutura (S2)
R_W		Descarga atmosférica em uma linha (S3)
R_Z		Descarga atmosférica próxima a uma linha (S4)

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 17).

Quadro 6 – Risco para o tipo de perda de serviço ao público (L2).

Risco para o tipo de perda de serviço ao público (L2)		
$$L2 \begin{cases} \overbrace{S1 + S3}^{D2} + \overbrace{S1 + S2 + S3 + S4}^{D3} \end{cases}$$ $$R2 = R_B + R_V + R_C + R_M + R_W + R_Z$$		
Componente de risco	**Tipo de dano**	**Fonte de dano**
R_B	Dano físico à estrutura (D2)	Descarga atmosférica na estrutura (S1)
R_V		Descarga atmosférica em uma linha (S3)
R_C	Dano por falha de sistemas internos (D3)	Descarga atmosférica na estrutura (S1)
R_M		Descarga atmosférica próxima à estrutura (S2)
R_W	Dano por falha de sistemas internos (D3)	Descarga atmosférica em uma linha (S3)
R_Z		Descarga atmosférica próxima a uma linha (S4)

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 17).

Quadro 7 – Risco para o tipo de perda de patrimônio cultural (L3).

Risco para o tipo de perda de patrimônio cultural (L3)		
$$\boldsymbol{L3}\left\{\overbrace{\boldsymbol{S1}+\boldsymbol{S3}}^{\boldsymbol{D2}}\right.$$ $$\boldsymbol{R3}=\boldsymbol{R_B}+\boldsymbol{R_V}$$		
Componente de risco	**Tipo de dano**	**Fonte de dano**
$\boldsymbol{R_B}$	Dano físico à estrutura (D2)	Descarga atmosférica na estrutura (S1)
$\boldsymbol{R_V}$		Descarga atmosférica em uma linha (S3)

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 17).

Quadro 8 – Risco para o tipo de perda de valor econômico (L4).

Risco para o tipo de perda de valor econômico (L4)		
$$\boldsymbol{L4}\left\{\overbrace{\boldsymbol{S1}+\boldsymbol{S3}}^{\boldsymbol{D1}}+\overbrace{\boldsymbol{S1}+\boldsymbol{S3}}^{\boldsymbol{D2}}+\overbrace{\boldsymbol{S1}+\boldsymbol{S2}+\boldsymbol{S3}+\boldsymbol{S4}}^{\boldsymbol{D3}}\right.$$ $$\boldsymbol{R4}=\boldsymbol{R_A}+\boldsymbol{R_U}+\boldsymbol{R_B}+\boldsymbol{R_V}+\boldsymbol{R_C}+\boldsymbol{R_M}+\boldsymbol{R_W}+\boldsymbol{R_Z}$$		
Componente de risco	**Tipo de dano**	**Fonte de dano**
$\boldsymbol{R_A}$	Dano a seres vivos (D1)	Descarga atmosférica na estrutura (S1)
$\boldsymbol{R_U}$		Descarga atmosférica em uma linha (S3)
$\boldsymbol{R_B}$	Dano físico à estrutura (D2)	Descarga atmosférica na estrutura (S1)
$\boldsymbol{R_V}$		Descarga atmosférica em uma linha (S3)
$\boldsymbol{R_C}$	Dano por falha de sistemas internos (D3)	Descarga atmosférica na estrutura (S1)
$\boldsymbol{R_M}$		Descarga atmosférica próxima à estrutura (S2)
$\boldsymbol{R_W}$		Descarga atmosférica em uma linha (S3)
$\boldsymbol{R_Z}$		Descarga atmosférica próxima a uma linha (S4)

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 17).

A definição dos componentes de risco é idêntica para todos os tipos de risco.

3.2.1 Componentes de risco

Cada componente de risco R_X pode ser descrito, de forma geral, como:

$$R = N.P.L$$

onde N é o número médio anual de eventos perigosos, P é a probabilidade de um evento causar dano e L é a perda consequente ao dano (ABNT, 2015b, p. 24).

A especificação individual de cada valor de N é dada por ABNT (2015b, p. 31-39), de cada valor de P, por ABNT (2015b, p. 40-49), e de cada valor de L, por ABNT (2015b, p. 50-58).

Os componentes de risco são individualmente definidos do Quadro 9 ao Quadro 16. As definições dos respectivos valores N, P e L de cada componente são dadas nos subcapítulos seguintes.

É importante observar que, na existência de múltiplas linhas adentrando a estrutura, os componentes de risco referentes a essas linhas devem ser calculados para cada linha individualmente e somados ao risco total (ABNT, 2015b, p. 28).

Quadro 9 – Componente de risco R_A.

R_A: risco de dano a seres vivos (D1) devido a descargas atmosféricas na estrutura (S1)	
Definição: $R_A = N_D * P_A * L_A$	
Termo	**Descrição**
N_D	Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas atmosféricas na estrutura (S1).
P_A	Probabilidade de dano a seres vivos (D1) devido a descargas atmosféricas na estrutura (S1).
L_A	Perda consequente ao dano a seres vivos (D1).

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 25-27).

Quadro 10 – Componente de risco R_U.

R_U: risco de dano a seres vivos (D1) devido a descargas atmosféricas nas linhas de energia e sinal (S3)	
Definição: $R_U = (N_L + N_{DJ}) * P_U * L_U$	
Termo	**Descrição**
N_L	Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas atmosféricas nas linhas de energia e sinal (S3).
N_{DJ}	Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas atmosféricas em uma estrutura adjacente conectada à estrutura principal através de linhas de energia e sinal, quando houver.
P_U	Probabilidade de dano a seres vivos (D1) devido a descargas atmosféricas nas linhas de energia e sinal (S3).
L_U	Perda consequente ao dano a seres vivos (D1).

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 25-27).

Quadro 11 – Componente de risco R_B.

R_B: risco de dano físico à estrutura (D2) devido a descargas atmosféricas na estrutura (S1)	
Definição: $R_B = N_D * P_B * L_B$	
Termo	**Descrição**
N_D	Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas atmosféricas na estrutura (S1).
P_B	Probabilidade de dano físico à estrutura (D2) devido a descargas atmosféricas na estrutura (S1).
L_B	Perda consequente ao dano físico à estrutura (D2).

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 25-27).

Quadro 12 – Componente de risco R_V.

$\boldsymbol{R_V}$**: risco de dano físico à estrutura (D2) devido a descargas atmosféricas nas linhas de energia e sinal (S3)**	
Definição: $\boldsymbol{R_V = (N_L + N_{DJ}) * P_V * L_V}$	
Termo	**Descrição**
$\boldsymbol{N_L}$	Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas atmosféricas nas linhas de energia e sinal (S3).
$\boldsymbol{N_{DJ}}$	Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas atmosféricas em uma estrutura adjacente conectada à estrutura principal através de linhas de energia e sinal, quando houver.
$\boldsymbol{P_V}$	Probabilidade de dano físico à estrutura (D2) devido a descargas atmosféricas nas linhas de energia e sinal (S3).
$\boldsymbol{L_V}$	Perda consequente ao dano físico à estrutura (D2).

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 25-27).

Quadro 13 – Componente de risco R_C.

$\boldsymbol{R_C}$**: risco de dano por falha de sistemas internos (D3) devido a descargas atmosféricas na estrutura (S1)**	
Definição: $\boldsymbol{R_C = N_D * P_C * L_C}$	
Termo	**Descrição**
$\boldsymbol{N_D}$	Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas atmosféricas na estrutura (S1).
$\boldsymbol{P_C}$	Probabilidade de dano por falha de sistemas internos (D3) devido a descargas atmosféricas na estrutura (S1).
$\boldsymbol{L_C}$	Perda consequente ao dano por falha de sistemas internos (D3).

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 25-27).

Quadro 14 – Componente de risco R_M.

$\boldsymbol{R_M}$**: risco de dano por falha de sistemas internos (D3) devido a descargas atmosféricas próximas à estrutura (S2)**	
Definição: $\boldsymbol{R_M = N_M * P_M * L_M}$	
Termo	**Descrição**
$\boldsymbol{N_M}$	Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas atmosféricas próximas à estrutura (S2).
$\boldsymbol{P_M}$	Probabilidade de dano por falha de sistemas internos (D3) devido a descargas atmosféricas próximas à estrutura (S2).
$\boldsymbol{L_M}$	Perda consequente ao dano por falha de sistemas internos (D3).

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 25-27).

Quadro 15 – Componente de risco R_W.

$\boldsymbol{R_W}$**: risco de dano por falha de sistemas internos (D3) devido a descargas atmosféricas nas linhas de energia e sinal (S3)**	
Definição: $\boldsymbol{R_W = (N_L + N_{DJ}) * P_W * L_W}$	
Termo	**Descrição**
$\boldsymbol{N_L}$	Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas atmosféricas nas linhas de energia e sinal (S3).
$\boldsymbol{N_{DJ}}$	Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas atmosféricas em uma estrutura adjacente conectada à estrutura principal através de linhas de energia e sinal, quando houver.
$\boldsymbol{P_W}$	Probabilidade de dano por falha de sistemas internos (D3) devido a descargas atmosféricas nas linhas de energia e sinal (S3).
$\boldsymbol{L_W}$	Perda consequente ao dano por falha de sistemas internos (D3).

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 25-27).

Quadro 16 – Componente de risco R_Z.

$\boldsymbol{R_Z}$**: risco de dano por falha de sistemas internos (D3) devido a descargas atmosféricas próximas às linhas de energia e sinal (S4)**	
Definição: $\boldsymbol{R_Z = N_I * P_Z * L_Z}$	
Termo	**Descrição**
$\boldsymbol{N_I}$	Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas atmosféricas próximas às linhas de energia e sinal (S4).
$\boldsymbol{P_Z}$	Probabilidade de dano por falha de sistemas internos (D3) devido a descargas atmosféricas próximas às linhas de energia e sinal (S4).
$\boldsymbol{L_Z}$	Perda consequente ao dano por falha de sistemas internos (D3).

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 26-27).

3.2.2 Número médio anual de eventos perigosos (N_X)

O número médio anual de eventos perigosos devido a descargas atmosféricas depende principalmente da característica atmosférica da região onde a estrutura está localizada e da área de exposição equivalente da estrutura, sobre a qual descargas podem causar dano à estrutura (ABNT, 2015b, p. 31). A esses dois valores são aplicados diversos fatores que dependem das características da estrutura, conforme a fonte de dano analisada. As equações dos números de eventos são descritas no Quadro 17 ao Quadro 21.

Quadro 17 – Número de eventos N_D.

N_D: número de eventos devido a descargas atmosféricas na estrutura (S1)	
Definição: $N_D = N_G * A_D * C_D * 10^{-6}$	
Termo	**Descrição**
N_G	Densidade de descargas atmosféricas por quilômetro quadrado, por ano.
A_D	Área de exposição equivalente, em metros quadrados, na qual descargas podem ocorrer na estrutura (S1).
C_D	Fator de localização da estrutura.

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 36).

Quadro 18 – Número de eventos N_M.

N_M: número de eventos devido a descargas atmosféricas próximas à estrutura (S2)	
Definição: $N_M = N_G * A_M * 10^{-6}$	
Termo	**Descrição**
N_G	Densidade de descargas atmosféricas por quilômetro quadrado, por ano.
A_M	Área de exposição equivalente, em metros quadrados, na qual descargas podem ocorrer próximas à estrutura (S2).

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 36-37).

Quadro 19 – Número de eventos N_L.

N_L: número de eventos devido a descargas atmosféricas nas linhas de energia e sinal (S3)	
Definição: $N_L = N_G * A_L * C_I * C_T * C_E * 10^{-6}$	
Termo	**Descrição**
N_G	Densidade de descargas atmosféricas por quilômetro quadrado, por ano.
A_L	Área de exposição equivalente, em metros quadrados, na qual descargas podem ocorrer nas linhas de energia e sinal (S3).
C_I	Fator de instalação da linha.
C_T	Fator de tipo de linha.
C_E	Fator ambiental.

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 37).

Quadro 20 – Número de eventos N_I.

N_I: número de eventos devido a descargas atmosféricas próximas às linhas de energia e sinal (S4)	
Definição: $N_I = N_G * A_I * C_I * C_T * C_E * 10^{-6}$	
Termo	**Descrição**
N_G	Densidade de descargas atmosféricas por quilômetro quadrado, por ano.
A_I	Área de exposição equivalente, em metros quadrados, na qual descargas podem ocorrer próximas às linhas de energia e sinal (S4).
C_I	Fator de instalação da linha.
C_T	Fator de tipo de linha.
C_E	Fator ambiental.

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 38).

Na existência de estruturas adjacentes interligadas à estrutura principal através de linhas de energia ou sinal, calcula-se, também, o número de eventos perigosos devido a descargas atmosféricas para cada estrutura adjacente, conforme Quadro 21.

Quadro 21 – Número de eventos N_{DJ}.

N_{DJ}: número de eventos devido a descargas atmosféricas ocorridas em uma estrutura adjacente conectada à estrutura principal através de linhas de energia ou sinal	
Definição: $N_{DJ} = N_G * A_{DJ} * C_{DJ} * C_T * 10^{-6}$	
Termo	**Descrição**
N_G	Densidade de descargas atmosféricas por quilômetro quadrado, por ano.
A_{DJ}	Área de exposição equivalente, em metros quadrados, na qual descargas ocorrem na estrutura adjacente.
C_{DJ}	Fator de localização da estrutura adjacente.
C_T	Fator de tipo de linha.

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 36).

Esse número de eventos perigosos nas estruturas adjacentes é considerado, para fins de cálculo de risco, como de eventos devidos a descargas nas linhas de energia ou sinal (S3), pois os efeitos das descargas nessas estruturas são propagados à estrutura principal através das linhas que as conectam entre si. Isso pode ser observado nas definições dos componentes de risco R_U (Quadro 10), R_V (Quadro 12) e R_W (Quadro 15), apresentados anteriormente.

A densidade de descargas atmosféricas para a terra, N_G, é dada em número de descargas por quilômetro quadrado e por ano. Esse parâmetro é fornecido, para o território brasileiro, pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (ELAT/INPE). Caso não seja possível obter os dados para a região da estrutura, o valor de N_G pode ser determinado indiretamente por $N_G \cong 0{,}1 * T_D$, onde T_D é o número anual de dias de tempestades naquela região, valor que pode ser obtido através de mapas isoceráunicos (ABNT, 2015b, p. 31).

Os cálculos das áreas de exposição equivalente A_D, A_M, A_L, A_I e A_{DJ}, juntamente com ilustrações dessas áreas de exposição, estão dispostos no Apêndice A deste relatório. Os fatores C_D, C_{DJ}, C_I, C_T e C_E, cujos valores são tabelados, estão dispostos no Apêndice B.

O fator 10^{-6} existente nas definições serve para adequar as diferentes unidades de medida de área na fórmula e tem unidade km²/m².

3.2.3 Probabilidade de um evento causar dano (P_X)

As probabilidades de ocorrência de dano devido a um evento perigoso dependem do tipo e da fonte de dano e suas definições são dadas do Quadro 22 ao Quadro 29.

Deve-se observar que as definições fornecidas são válidas apenas quando as medidas de proteção avaliadas estiverem de acordo com ABNT (2015c, 2015d).

Quadro 22 – Probabilidade P_A.

P_A: probabilidade de dano a seres vivos (D1) devido a descarga atmosférica na estrutura (S1)	
Definição: $P_A = P_{TA} * P_B$	
Termo	**Descrição**
P_{TA}	Probabilidade de dano a seres vivos devido a uma descarga na estrutura dependendo das medidas de proteção adicionais contra choques aplicadas.
P_B	Probabilidade de dano físico à estrutura (e, por conseguinte, a seres vivos) devido a uma descarga na estrutura.

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p.40).

Quadro 23 – Probabilidade P_U.

P_U: probabilidade de dano a seres vivos (D1) devido a descarga atmosférica nas linhas de energia e sinal (S3)	
Definição: $P_U = P_{TU} * P_{EB} * P_{LD} * C_{LD}$	
Termo	**Descrição**
P_{TU}	Probabilidade de dano a seres vivos devido a uma descarga nas linhas de energia e sinal.
P_{EB}	Probabilidade de dano, conforme o nível de proteção projetado, na existência de DPS (cf. ABNT, 2015c).
P_{LD}	Probabilidade de dano devido a descarga na linha conforme as características da linha e dos equipamentos a ela ligados.
C_{LD}	Fator de blindagem, aterramento e isolamento da linha para descargas na linha.

Fonte: adaptado de ABNT (2015, p. 45).

Quadro 24 – Probabilidade P_B.

P_B: probabilidade de dano físico à estrutura (D2) devido a descarga atmosférica na estrutura (S1)
Definição: $P_B = cte$ (valor tabelado)

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 41).

Quadro 25 – Probabilidade P_V.

$\boldsymbol{P_V}$**: probabilidade de dano físico à estrutura (D2) devido a descarga atmosférica nas linhas de energia e sinal (S3)**	
Definição: $\boldsymbol{P_V = P_{EB} * P_{LD} * C_{LD}}$	
Termo	**Descrição**
$\boldsymbol{P_{EB}}$	Probabilidade de dano, conforme o nível de proteção projetado, na existência de DPS (cf. ABNT, 2015c).
$\boldsymbol{P_{LD}}$	Probabilidade de dano devido a descarga na linha conforme as características da linha e dos equipamentos a ela ligados.
$\boldsymbol{C_{LD}}$	Fator de blindagem, aterramento e isolamento da linha para descargas na linha.

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 47).

Quadro 26 – Probabilidade P_C.

$\boldsymbol{P_C}$**: probabilidade de dano por falhas de sistemas internos (D3) devido a descarga atmosférica na estrutura (S1)**	
Definição: $\boldsymbol{P_C = P_{SPD} * C_{LD}}$	
Termo	**Descrição**
$\boldsymbol{P_{SPD}}$	Probabilidade de dano, conforme o nível de proteção projetado, na existência de DPS coordenados (cf. ABNT, 2015d).
$\boldsymbol{C_{LD}}$	Fator de blindagem, aterramento e isolamento da linha para descargas na linha.

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 41).

Quadro 27 – Probabilidade P_M.

$\boldsymbol{P_M}$**: probabilidade de dano por falhas de sistemas internos (D3) devido a descarga atmosférica próxima à estrutura (S2)**	
Definição: $\boldsymbol{P_M = P_{SPD} * P_{MS}}$	
Termo	**Descrição**
$\boldsymbol{P_{SPD}}$	Probabilidade de dano, conforme o nível de proteção projetado, na existência de DPS coordenados (cf. ABNT, 2015d).
$\boldsymbol{P_{MS}}$	Probabilidade de dano conforme blindagens espaciais (externa e internas), blindagem de fiação, a existência de laços de indução (cf. ABNT, 2015d, p. 36) e da tensão suportável de impulso dos equipamentos.

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 43).

Quando sistemas internos contiverem equipamentos não conformes com a suportabilidade de tensão dados nas normas específicas de produto, deve-se considerar $P_M = 1$.

Quadro 28 – Probabilidade P_W.

$\boldsymbol{P_W}$**: probabilidade de dano por falhas de sistemas internos (D3) devido a descarga atmosférica nas linhas de energia e sinal (S3)**	
Definição: $\boldsymbol{P_W = P_{SPD} * P_{LD} * C_{LD}}$	
Termo	**Descrição**
$\boldsymbol{P_{SPD}}$	Probabilidade de dano, conforme o nível de proteção projetado, na existência de DPS coordenados (cf. ABNT, 2015d).
$\boldsymbol{P_{LD}}$	Probabilidade de dano devido a descarga na linha conforme as características da linha e dos equipamentos a ela ligados.
$\boldsymbol{C_{LD}}$	Fator de blindagem, aterramento e isolamento da linha para descargas na linha.

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 48).

Quadro 29 – Probabilidade P_Z.

$\boldsymbol{P_Z}$**: probabilidade de dano por falhas de sistemas internos (D3) devido a descarga atmosférica próxima às linhas de energia e sinal (S4)**	
Definição: $\boldsymbol{P_Z = P_{SPD} * P_{LI} * C_{LI}}$	
Termo	**Descrição**
$\boldsymbol{P_{SPD}}$	Probabilidade de dano, conforme o nível de proteção projetado, na existência de DPS coordenados (cf. ABNT, 2015d).
$\boldsymbol{P_{LI}}$	Probabilidade de dano devido a descarga próxima à linha conforme as características da linha e dos equipamentos a ela ligados.
$\boldsymbol{C_{LI}}$	Fator de blindagem, aterramento e isolamento da linha para descargas próximas à linha.

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 48).

Na existência de múltiplas linhas que adentram a estrutura, as probabilidades P_C e P_M devem ser calculadas por linha e totalizadas da seguinte forma (ABNT, 2015b, p. 29):

$$P_C = 1 - \prod (1 - P_{C,linha})$$

$$P_M = 1 - \prod (1 - P_{M,linha})$$

As tabelas de valores das probabilidades P_{TA}, P_B, P_{TU}, P_{EB}, P_{LD}, P_{SPD} e P_{LI} e dos fatores C_{LD} e C_{LI} estão dispostos no Apêndice C. A determinação da probabilidade P_{MS} é descrita no Apêndice D.

3.2.4 Perda consequente ao dano (L_X)

As perdas consequentes são quantidades relativas médias de perda por evento perigoso, considerando sua extensão e seus efeitos, divididas por tipo de dano. O significado desses valores, dado no Quadro 30, depende do tipo de perda considerado.

Quadro 30 – Significado dos valores de cada tipo de perda.

Tipo de perda	Significado do valor das perdas
Perda de vida humana (L1)	Número relativo de pessoas vitimadas (incluindo ferimentos permanentes) por evento perigoso.
Perda de serviço ao público (L2)	Número relativo de usuários não servidos por evento perigoso.
Perda de patrimônio cultural (L3)	Valor econômico relativo perdido da estrutura e de conteúdo, quando considerados como patrimônio cultural insubstituível, por evento perigoso
Perda de valor econômico (L4)	Valor econômico relativo perdido da estrutura, de suas atividades, de seu conteúdo, de seus sistemas internos e de animais produtivos por evento perigoso

Fonte: adaptado de ABNT (2015a, 2015b).

Os valores relativos típicos médios para as perdas são fornecidos de acordo com os tipos de perda e de dano, e sobre eles se aplicam fatores de redução ou de ampliação. Quando a estrutura é dividida em zonas, aplica-se, ainda, um fator relativo à zona em questão.

A norma recomenda que os valores típicos de perda sejam avaliados e fixados pelo projetista ou pelo proprietário da estrutura durante a realização dos cálculos, para que estejam adequados ao contexto daquela estrutura (ABNT, 2015b, p. 50).

As equações de perdas consequentes são apresentadas, em ABNT (2015b), separadamente por tipo de perda. Neste relatório, porém, elas são apresentadas de forma genérica por serem semelhantes. Além do fator F_Z relativo da zona, que não existe nesse formato na norma, a única diferença entre as equações é a existência do fator h_z no cálculo de L_B e L_V para o tipo de perda de vida humana (L1).

As diferentes perdas são definidas no Quadro 31 ao Quadro 33.

Quadro 31 – Perdas consequentes L_A e L_U.

$\boldsymbol{L_A, L_U}$**: perdas consequentes ao dano a seres vivos (D1)**	
Definição: $\boldsymbol{L_A = L_U = L_T * r_t * F_Z}$	
Termo	**Descrição**
$\boldsymbol{L_T}$	Valor relativo médio típico de perdas por danos a seres vivos (D1).
$\boldsymbol{r_t}$	Fator de redução da perda por dano a seres vivos (D1) conforme o tipo da superfície do solo ou piso.
$\boldsymbol{F_Z}$	Fator relativo da zona.

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 51,55-57).

Quadro 32 – Perdas consequentes L_B e L_V.

$\boldsymbol{L_B, L_V}$**: perdas consequentes ao dano físico à estrutura (D2)**	
Definição: $\boldsymbol{L_B = L_V = L_F * r_p * r_f * h_z * F_Z}$	
Termo	**Descrição**
$\boldsymbol{L_F}$	Valor relativo médio típico de perdas por danos físicos à estrutura (D2).
$\boldsymbol{r_p}$	Fator de redução da perda por danos físicos (D2) conforme as providências tomadas para redução das consequências de incêndios.
$\boldsymbol{r_f}$	Fator de redução da perda por danos físicos (D2) conforme o risco de incêndio ou de explosão na estrutura.
$\boldsymbol{h_z}$	Fator de aumento da perda por danos físicos (D2) conforme a existência de perigo especial. Este fator é aplicado apenas ao tipo de perda de vida humana (L1). Para os demais, considerar $h_z = 1$.
$\boldsymbol{F_Z}$	Fator relativo da zona.

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 51,55-57).

Quadro 33 – Perdas consequentes L_C, L_M, L_W e L_Z.

$\boldsymbol{L_C, L_M, L_W, L_Z}$**: perda devida a dano por falhas de sistemas internos (D3)**	
Definição: $\boldsymbol{L_C = L_M = L_W = L_Z = L_O * F_Z}$	
Termo	**Descrição**
$\boldsymbol{L_O}$	Valor relativo médio típico de perdas por falha de sistemas internos (D3).
$\boldsymbol{F_Z}$	Fator relativo da zona.

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 51,55-57).

Os valores relativos médios típicos L_T, L_F e L_O, as tabelas dos fatores r_t, r_p, r_f e h_z e a definição de F_Z encontram-se no Apêndice D.

3.3 ANÁLISE DO RISCO

Após o cálculo de todos os componentes de risco relevantes, deve-se fazer uma análise dos valores para determinar se medidas de proteção adicionais são necessárias e, quando forem, quais devem ser aplicadas para reduzir o risco total ao qual a estrutura está submetida.

Os valores de risco calculados são comparados aos valores de risco tolerável, conforme seu tipo e listados no Quadro 34, para determinar a necessidade de medidas de proteção adicionais. Deve-se observar que o valor de risco tolerável para perdas de valor econômico é apenas uma sugestão da norma e deve ser usado nas situações em que a análise de custo-benefício não possa ser realizada por falta de dados (ABNT, 2015b, p. 20).

Quadro 34 – Valores de risco toleráveis por tipo de risco.

Tipo de risco	Valor de risco tolerável
Risco de perda de vida humana (R1)	$R_T \leq 10^{-5}$
Risco de perda de serviço ao público (R2)	$R_T \leq 10^{-3}$
Risco de perda de patrimônio cultural (R3)	$R_T \leq 10^{-4}$
Risco de perda de valor econômico (R4)	$R_T \leq 10^{-3}$

Fonte: ABNT (2015b, p. 20).

Concluindo-se que medidas de proteção são necessárias, as medidas a serem aplicadas são determinadas de acordo com os componentes de risco com maior representatividade no risco total, isto é, são selecionadas aquelas medidas que causam redução dos componentes de risco de maior valor. Essa seleção pode ser feita a partir da lista de fatores que influenciam os componentes de risco, apresentada no Quadro 35.

Quadro 35 – Fatores que influenciam os componentes de risco.

Características da estrutura ou dos sistemas internos (medidas de proteção)	R_A	R_U	R_B	R_V	R_C	R_M	R_W	R_Z
Área de exposição equivalente	X	X	X	X	X	X	X	X
Resistividade da superfície do solo	X							
Resistividade do piso	X	X						
Restrições físicas, isolamento, avisos visíveis, equipotencialização do solo	X	X						
SPDA	X	X[b]	X	X[b]	X	X[a]		
Ligação ao DPS	X	X	X	X				
Interfaces isolantes		X		X	X[c]	X[c]	X	X
Sistema coordenado de DPS					X	X	X	X
Blindagem espacial					X	X		
Blindagem de linhas externas		X		X			X	X
Blindagem de linhas internas					X	X		
Precauções de roteamento					X	X		
Sistema de equipotencialização					X			
Precauções contra incêndios			X	X				
Sensores de fogo			X	X				
Perigos especiais			X	X				
Tensão suportável de impulso		X		X	X	X	X	X

[a] Somente para SPDA tipo malha externa.
[b] Devido a ligações equipotenciais.
[c] Somente se o isolamento pertencer ao equipamento.
Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 18-19).

Também pode-se analisar detalhadamente a composição dos componentes de risco para que sejam verificados quais fatores do componente estão contribuindo com maior peso para o risco. Desse modo, aplicam-se medidas de proteção que influenciem diretamente nesses fatores.

O projetista é orientado a selecionar, em primeiro lugar, a instalação de um SPDA para, então, fazer uso de outras medidas de proteção, tendo em vista que muitas das demais medidas dependem da existência de um SPDA (ABNT, 2015a, p. 14-15; 2015b, p. 22, 41-42).

Tendo o projetista determinado quais medidas aplicar, nova análise dos riscos deve ser feita. Alcançados valores de risco abaixo dos limites toleráveis, considera-se que as medidas de proteção aplicadas são suficientes e que a estrutura está protegida.

4 AUTOMATIZAÇÃO DO CÁLCULO E DA ANÁLISE DE RISCO CONFORME A NORMA ABNT NBR 5419:2015

A complexidade de todo o processo envolvido no método de análise de risco apresentado por ABNT (2015b) naturalmente dificulta a sua compreensão. Não obstante a isso, a leitura da norma é, em si, um processo trabalhoso para um iniciante no assunto, pois é um conteúdo denso em conceitos.

A automatização do cálculo e da análise de risco busca tornar mais fácil o estudo da norma ao eliminar a obrigação de se compreender previamente todo o método antes da execução dos cálculos. Espera-se que a experimentação prática pela observação da relação entre as variáveis de entrada e de saída, em paralelo à leitura da norma, auxilie a compreensão e a associação dos conceitos ao longo do estudo. Especialmente no ambiente de aula, professor e alunos podem preocupar-se menos com os cálculos em si e mais com os conceitos a serem ensinados e aprendidos.

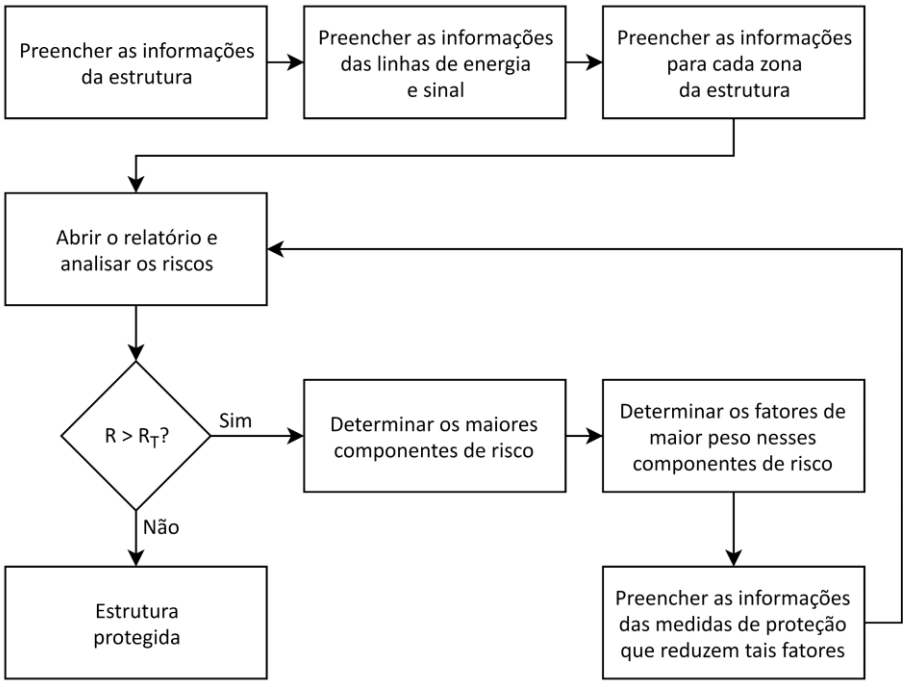
O programa desenvolvido neste projeto tem, assim, um enfoque didático, preocupando-se com uma apresentação clara do processo e com uma abrangência simplificada da norma. Alguns trechos da norma não foram considerados no programa, pois representam conceitos mais avançados e aumentariam a complexidade do programa sem um ganho significativo em seu objetivo final. São conceitos que podem ser vistos à parte, após a compreensão dos conceitos base, sem prejuízo do estudo como um todo.

O fluxograma da Figura 2 demonstra o procedimento básico de uso do programa.

4.1 SELEÇÃO DA PLATAFORMA DE DESENVOLVIMENTO

A plataforma escolhida para o desenvolvimento do programa foi o Microsoft Excel. A escolha se deu devido ao Excel ser um programa voltado à realização de cálculos com muitos dados e, por isso, ter um ambiente de fácil desenvolvimento, tanto da interface como dos cálculos. Além disso, a facilidade de manipulação de valores em planilhas proporciona ao usuário liberdade para modificar valores e observar a construção dos resultados. Por fim, permite a impressão e a exportação dos dados sem a necessidade de programação, uma vez que os resultados são apresentados em uma planilha comum.

Figura 2 – Fluxograma do procedimento de uso do programa



Fonte: o autor.

Durante o desenvolvimento e sempre que possível, os recursos mais simples disponíveis no Excel foram utilizados, procurando-se manter a construção do programa em um nível que não exigisse experiência avançada no uso do Excel. Os recursos mais avançados utilizados nesse programa foram os controles de formulário *ActiveX* e o uso de código VBA (*Visual Basic for Applications*). Os controles *ActiveX* não exigem programação e podem ser controlados apenas através de suas propriedades. Já o código VBA desenvolvido utilizou apenas as funções mais básicas que a linguagem fornece.

4.2 ENTRADA DE DADOS

Os dados de entrada foram agrupados e apresentados nas seguintes planilhas: “Estrutura”, “Linha de Energia”, “Linha de Sinal” e “Zonas”. Figuras demonstrando as telas do programa são apresentadas no Apêndice G.

Apenas duas linhas, de energia e de sinal, estão disponíveis no programa para manter a simplicidade da interface e dos cálculos, ainda que seja possível considerar, pela norma, uma quantidade variável de linhas no projeto.

Alguns valores, tais como os limites de risco tolerável ou as perdas médias, não foram considerados nas planilhas de entrada de dados por serem valores dados na norma, ainda que

esta permita a sua modificação. A inserção de campos para esses valores poluiria essas planilhas sem fornecer um ganho que o justificasse, indo contra o objetivo didático proposto. Contudo, essas alterações podem ser realizadas diretamente no relatório final, possibilidade demonstrada no estudo de caso dado na seção 5.2 .

Para a entrada de informações, foram usados controles de formulário *ActiveX*, pois a utilização de células de planilha não era suficiente para solicitar entradas de múltipla escolha. Além disso, o uso desses componentes facilitou a criação da planilha “Zonas”, que precisava suportar a entrada de múltiplas zonas. Apesar de ser possível a utilização de controles de formulário e de células de planilha simultaneamente, múltiplos formatos de entrada deixariam a interface confusa e sem padrão.

O programa permite a criação de um número arbitrário de zonas sem um limite pré-determinado. Para armazenar as informações de cada zona, foi criada a planilha oculta “Zonas – Lista”. Nessa planilha, as informações de zonas são armazenadas em colunas, e cada linha representa uma zona distinta. Na planilha “Zonas”, dois botões e uma lista foram inseridos para permitir adicionar, remover e listar as zonas. Para diferenciar as zonas na lista, um campo para inserção de um nome para a zona foi criado. Nas demais planilhas de entrada, os valores são obtidos diretamente dos controles.

Alguns controles são habilitados ou desabilitados conforme os valores de outros dos quais dependam, evitando a inserção de valores contraditórios e guiando o usuário no preenchimento dos campos. Por exemplo, na planilha “Estrutura”, o campo “Subsistema de descida” somente é habilitado quando o campo “Estrutura com SPDA” estiver marcado.

A grande maioria das variáveis de entrada têm seus valores tabelados. No entanto, a mera solicitação ao usuário, pelo programa, de seleção de valores nessas tabelas não atende ao objetivo de facilitar a realização dos cálculos, uma vez que diversas tabelas podem depender das mesmas informações para escolha de valores ou que uma tabela pode depender de mais de uma informação simultaneamente. Assim, as informações necessárias foram extraídas das tabelas e sumarizadas. O programa faz, então, a escolha dos valores nas tabelas conforme essas informações.

Os dados de entrada solicitados pelo programa e as respectivas variáveis afetadas por estes dados são listados, para referência, no Apêndice H.

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DOS CÁLCULOS E DA ANÁLISE

Os cálculos foram implementados como fórmulas em células de planilha, de modo que o usuário possa conferir como seus resultados são obtidos. Alguns parâmetros, porém, dependem de outros também de forma lógica, portanto suas respectivas fórmulas contêm condicionais baseadas em suas dependências.

Os valores obtidos em tabelas ou pela entrada do usuário são inseridos numericamente nos seus campos no relatório usando código VBA, de modo a não criar dependência entre a planilha de relatório e os controles de formulário das planilhas de entrada.

Os valores de tabelas são obtidos a partir de funções em VBA que os buscam nas planilhas ocultas “Tabela A”, “Tabela B” e “Tabela C”. Cada função recebe, por argumentos, os dados necessários e retorna o valor consultado na tabela.

Devido à quantidade variável de zonas no programa, um modelo de listagem das variáveis por zona foi criado na planilha oculta “Relatório – Modelo de zonas”. As fórmulas de cálculo das variáveis intermediárias contidas nessa listagem foram inseridas nos campos dessas variáveis diretamente no modelo. Para que essas fórmulas fossem copiadas corretamente ao relatório no momento da cópia do modelo, fez-se uso do recurso de atualização automática de referências do Excel. Assim, os valores globais nessas fórmulas são obtidos por referência absoluta[1] às respectivas células na planilha do relatório, e os valores locais da zona, por referência relativa[2] às células na planilha do modelo. Quando células são movidas ou copiadas, o Excel atualiza apenas as referências relativas.

Da mesma forma, modelos para listagem dos valores de risco e das informações de análise foram criados nas planilhas ocultas “Relatório – Modelo de riscos” e “Relatório – Modelo de análise”, respectivamente. Nesses modelos, também foram inseridas diretamente as fórmulas para cálculo das variáveis neles presentes, com exceção das células dos componentes de risco, pois não se sabe, previamente ao uso do programa, o número de zonas inseridas pelo usuário nem em quais células da planilha de relatório estarão os valores necessários. As fórmulas desses valores, portanto, foram construídas durante a geração do relatório usando código VBA. Como essas células foram preenchidas com fórmulas que

---

[1] Por exemplo, “Relatório!A2” para se referir à célula A2 na planilha “Relatório”.
[2] Por exemplo, “C5” para se referir à célula C5 da mesma planilha.

dependem apenas de outras células, não se criou dependência de código VBA para atualização desses campos caso o usuário altere valores do relatório.

4.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A apresentação dos resultados é feita através de um relatório gerado na planilha “Relatório”. Neste relatório constam os dados de entrada solicitados ao usuário, as variáveis de entrada com os respectivos valores calculados ou obtidos em tabelas, os resultados de cálculos intermediários, os valores finais dos riscos, por zona e para a estrutura, e a análise do risco.

O relatório é dividido em duas colunas: na primeira, são informados os dados globais da estrutura, os riscos totais calculados e a análise dos riscos; e, na segunda, são informados individualmente os dados de cada zona. Essa divisão foi feita para facilitar a construção da listagem dos dados das zonas.

A geração do relatório ocorre na ativação da planilha “Relatório”, quando um código VBA é executado para reconstruir a planilha e inserir os novos valores. A planilha de relatório é sempre totalmente reconstruída a partir dos modelos descritos anteriormente e de um modelo geral do relatório, na planilha oculta “Relatório – Modelo”. Ao ativar a planilha, seu conteúdo é limpo, o modelo geral é copiado e os valores globais da estrutura são preenchidos nos seus respectivos campos. Em seguida, para cada zona inserida no programa, o modelo de zonas é copiado e os campos são preenchidos com os devidos valores locais da zona. Por fim, os modelos de risco e de análise são copiados, por zona e para a estrutura, abaixo dos valores globais da estrutura.

Uma vez que o relatório utiliza fórmulas referenciando apenas células contidas no próprio relatório, o usuário tem liberdade para modificar seus valores, permitindo que este possa levar em consideração fatores não previstos pelo programa e/ou para observar as consequências da alteração de valores de quaisquer das variáveis listadas.

A análise implementada informa, ao lado dos valores dos componentes de risco, seu percentual sobre o risco total, por zona e para a estrutura. Os valores de risco totais para a estrutura são comparados aos limites de risco toleráveis e a informação de que o risco está acima ou abaixo do limite é dada.

5 ESTUDOS DE CASO

Para demonstrar o uso do programa, foram utilizados dois estudos de caso de exemplo apresentados por ABNT (2015b, p. 67-90), escolhidos por sua relativa complexidade: um edifício de escritórios e um hospital.

5.1 EDIFÍCIO DE ESCRITÓRIOS

A primeira estrutura analisada é um edifício de escritórios que contém três áreas internas distintas – um arquivo, salas de escritório e um centro de informática – e um jardim externo. Essa edificação encontra-se em uma região plana sem outras edificações na vizinhança.

Foram definidas as seguintes zonas para essa estrutura:

a) área externa da entrada do edifício;
b) jardim externo;
c) arquivo;
d) salas de escritório;
e) centro de informática.

Os dados para essa edificação encontram-se no Quadro 36 ao Quadro 43.

Quadro 36 – Edifício de escritórios: informações da estrutura.

Parâmetro de entrada	Valor
Densidade de descargas na região	4 descargas/(km².ano)
Dimensões da estrutura	
Comprimento	20 m
Largura	40 m
Altura	25 m
Saliência	Sem saliência
Localização relativa	Estrutura isolada
Número de pessoas na estrutura	200 pessoas

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 67-75).

Quadro 37 – Edifício de escritórios: informações da linha de energia.

Parâmetro de entrada	Valor
Ambiente da linha	Rural
Comprimento da linha	200 m
Tipo de linha	Aérea, de baixa tensão
Linha blindada	Não
Linha conectada a uma estrutura adjacente	Não

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 67-75).

Quadro 38 – Edifício de escritórios: informações da linha de sinal.

Parâmetro de entrada	Valor
Ambiente da linha	Rural
Comprimento da linha	Desconhecido (assume-se 1.000 m)
Tipo de linha	Enterrada
Linha blindada	Não
Linha conectada a uma estrutura adjacente	Não

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 67-75).

Quadro 39 – Edifício de escritórios: informações da zona da área externa da entrada.

Parâmetro de entrada	Valor
Uso da zona	Área externa
Tipo de superfície	Mármore
Risco de incêndio ou explosão	Nenhum
Perigo especial	Nenhum
Proteção contra choques por descargas na estrutura	Nenhuma
Proteção contra choques por descargas nas linhas	Nenhuma
Providências contra incêndio	Nenhuma
Número de pessoas na zona	4 pessoas
Tempo de permanência de pessoas na zona	8760 h/ano
Linha de energia	
Sistemas internos independentes ou inexistentes	Sim (Inexistentes)
Linha de sinal	
Sistemas internos independentes ou inexistentes	Sim (Inexistentes)

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 67-75).

Quadro 40 – Edifício de escritórios: informações da zona do jardim externo.

Parâmetro de entrada	Valor
Uso da zona	Área externa
Tipo de superfície	Agricultura (Grama)
Risco de incêndio ou explosão	Nenhum
Perigo especial	Nenhum
Proteção contra choques por descargas na estrutura	Restrições físicas
Proteção contra choques por descargas nas linhas	Restrições físicas
Providências contra incêndio	Nenhuma
Número de pessoas na zona	2 pessoas
Tempo de permanência de pessoas na zona	8760 h/ano
Linha de energia	
Sistemas internos independentes ou inexistentes	Sim (Inexistentes)
Linha de sinal	
Sistemas internos independentes ou inexistentes	Sim (Inexistentes)

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 67-75).

Quadro 41 – Edifício de escritórios: informações da zona de arquivo.

Parâmetro de entrada	Valor
Uso da zona	Escritórios
Tipo de superfície	Linóleo
Risco de incêndio ou explosão	Incêndio – Alto
Perigo especial	Baixo nível de pânico
Proteção contra choques por descargas na estrutura	Nenhuma
Proteção contra choques por descargas nas linhas	Nenhuma
Providências contra incêndio	Nenhuma
Número de pessoas na zona	20 pessoas
Tempo de permanência de pessoas na zona	8760 h/ano
Linha de energia	
Roteamento das linhas internas	Preocupação para evitar grandes laços
Tensão suportável de impulso	2,5 kV
Linha de sinal	
Roteamento das linhas internas	Sem preocupação para evitar laços
Tensão suportável de impulso	1,5 kV

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 67-75).

Quadro 42 – Edifício de escritórios: informações da zona de salas de escritório.

Parâmetro de entrada	Valor
Uso da zona	Escritórios
Tipo de superfície	Linóleo
Risco de incêndio ou explosão	Incêndio – Baixo
Perigo especial	Baixo nível de pânico
Proteção contra choques por descargas na estrutura	Nenhuma
Proteção contra choques por descargas nas linhas	Nenhuma
Providências contra incêndio	Nenhuma
Número de pessoas na zona	160 pessoas
Tempo de permanência de pessoas na zona	8760 h/ano
Linha de energia	
Roteamento das linhas internas	Preocupação para evitar grandes laços
Tensão suportável de impulso	2,5 kV
Linha de sinal	
Roteamento das linhas internas	Sem preocupação para evitar laços
Tensão suportável de impulso	1,5 kV

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 67-75).

Quadro 43 – Edifício de escritórios: informações da zona do centro de informática.

Parâmetro de entrada	Valor
Uso da zona	Escritórios
Tipo de superfície	Linóleo
Risco de incêndio ou explosão	Incêndio – Baixo
Perigo especial	Baixo nível de pânico
Proteção contra choques por descargas na estrutura	Nenhuma
Proteção contra choques por descargas nas linhas	Nenhuma
Providências contra incêndio	Nenhuma
Número de pessoas na zona	14 pessoas
Tempo de permanência de pessoas na zona	8760 h/ano
Linha de energia	
Roteamento das linhas internas	Preocupação para evitar grandes laços
Tensão suportável de impulso	2,5 kV
Linha de sinal	
Roteamento das linhas internas	Sem preocupação para evitar laços
Tensão suportável de impulso	1,5 kV

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 67-75).

Os valores obtidos com o programa correspondem aos resultados descritos em ABNT (2015b, p. 75), como esperado, com pequenas variações devidas à precisão de cálculo. O programa informa o percentual que cada componente de risco representa em relação ao risco total, mostrado na Figura 3, e apresenta a análise final, mostrada na Figura 4.

Figura 3 – Edifício de escritórios: valores de risco total no programa.

Risco total			
R_{A1}	0,03%	3,26E-08	pessoas/ano
R_{U1}	0,01%	1,09E-08	pessoas/ano
R_{B1}	49,50%	4,78E-05	pessoas/ano
R_{V1}	50,45% - componente de maior risco	4,87E-05	pessoas/ano
R_{C1}	0,00%	0,00E+00	pessoas/ano
R_{M1}	0,00%	0,00E+00	pessoas/ano
R_{W1}	0,00%	0,00E+00	pessoas/ano
R_{Z1}	0,00%	0,00E+00	pessoas/ano
R1	$R1 = R_{A1} + R_{B1} + R_{C1} + R_{M1} + R_{U1} + R_{V1} + R_{W1} + R_{Z1}$	9,65E-05	pessoas/ano
R_{B2}	-	0,00E+00	usuários/ano
R_{V2}	-	0,00E+00	usuários/ano
R_{C2}	-	0,00E+00	usuários/ano
R_{M2}	-	0,00E+00	usuários/ano
R_{W2}	-	0,00E+00	usuários/ano
R_{Z2}	-	0,00E+00	usuários/ano
R2	$R2 = R_{B2} + R_{C2} + R_{M2} + R_{V2} + R_{W2} + R_{Z2}$	0,00E+00	usuários/ano
R_{B2}	-	0,00E+00	R$/ano
R_{V2}	-	0,00E+00	R$/ano
R3	$R3 = R_{B3} + R_{V3}$	0,00E+00	R$/ano

Fonte: o autor.

Figura 4 - Edifício de escritórios: análise de risco no programa.

Análise de risco da estrutura			
Risco de perda de vida humana (R1)			
R_{T1}	Limite de risco tolerável	1,00E-05	pessoas/ano
	Risco está acima do limite tolerável		
RV1	Componente de risco de maior valor	4,87E-05	pessoas/ano
Risco de perda de serviço ao público (R2)			
R_{T2}	Limite de risco tolerável	1,00E-03	usuários/ano
	Risco não calculado		
-	-	-	-
Risco de perda de patrimônio cultural (R3)			
R_{T3}	Limite de risco tolerável	1,00E-04	R$/ano
	Risco não calculado		
-	-	-	-

Fonte: o autor.

Pode-se observar que os campos relativos aos riscos de perda de serviço ao público e de patrimônio cultural são apresentados mesmo sem terem sido calculados, pois seus valores são atualizados caso as informações faltantes no relatório sejam preenchidas.

A partir desses resultados, pode-se determinar quais proteções aplicar com vistas à redução do risco ao limite tolerável. No exemplo, são apontados os componentes R_B e R_V como os principais responsáveis pelo risco, conclusão corroborada pelo programa. A zona onde está presente o maior risco é a zona de arquivo, como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Edifício de escritórios: valores de risco para a zona de arquivo.

Zona 'Arquivos'			
R_{A1}	0,00%	1,10E-09	pessoas/ano
R_{U1}	0,00%	1,12E-09	pessoas/ano
R_{B1}	49,52%	4,40E-05	pessoas/ano
R_{V1}	50,48% - componente de maior risco	4,48E-05	pessoas/ano
R_{C1}	0,00%	0,00E+00	pessoas/ano
R_{M1}	0,00%	0,00E+00	pessoas/ano
R_{W1}	0,00%	0,00E+00	pessoas/ano
R_{Z1}	0,00%	0,00E+00	pessoas/ano
R1	$R1 = R_{A1} + R_{B1} + R_{C1} + R_{M1} + R_{U1} + R_{V1} + R_{W1} + R_{Z1}$	8,88E-05	pessoas/ano

Fonte: o autor.

No exemplo, duas soluções foram propostas:

a) solução 1:
   - instalar um SPDA classe III;

b) solução 2:
   - instalar um SPDA classe IV,
   - instalar um sistema de extinção de incêndio na zona de arquivos.

As alterações necessárias nos parâmetros do programa estão descritas no Quadro 44 e no Quadro 45.

Quadro 44 – Edifício de escritórios: alterações nos parâmetros para a solução 1.

Parâmetro de entrada	Valor
Estrutura	
Nível de proteção da estrutura	Classe III
Estrutura com SPDA	Sim
Subsistema de descida	Subsistema de descida não natural

Fonte: o autor.

Quadro 45 – Edifício de escritórios: alterações nos parâmetros para a solução 2.

Parâmetro de entrada	Valor
Estrutura	
Nível de proteção da estrutura	Classe IV
Estrutura com SPDA	Sim
Subsistema de descida	Subsistema de descida não natural
Zonas – Zona "Arquivos"	
Providências contra incêndios	Instalações de alarmes manuais

Fonte: o autor.

Os resultados para ambas as soluções corresponderam aos do exemplo, novamente como esperado, com pequenas variações devidas à precisão de cálculo. A Figura 6 e a Figura 7 mostram os valores de risco para cada solução.

Figura 6 - Edifício de escritórios: valores de risco total da solução 1 no programa.

Risco total			
R_{A1}	0,05%	3,26E-09	pessoas/ano
R_{U1}	0,01%	5,43E-10	pessoas/ano
R_{B1}	66,21% - componente de maior risco	4,78E-06	pessoas/ano
R_{V1}	33,74%	2,43E-06	pessoas/ano
R_{C1}	0,00%	0,00E+00	pessoas/ano
R_{M1}	0,00%	0,00E+00	pessoas/ano
R_{W1}	0,00%	0,00E+00	pessoas/ano
R_{Z1}	0,00%	0,00E+00	pessoas/ano
R1	$R1 = R_{A1} + R_{B1} + R_{C1} + R_{M1} + R_{U1} + R_{V1} + R_{W1} + R_{Z1}$	7,22E-06	pessoas/ano

Fonte: o autor.

Figura 7 - Edifício de escritórios: valores de risco total da solução 2 no programa.

Risco total			
R_{A1}	0,10%	6,53E-09	pessoas/ano
R_{U1}	0,01%	5,43E-10	pessoas/ano
R_{B1}	79,61% - componente de maior risco	5,16E-06	pessoas/ano
R_{V1}	20,28%	1,31E-06	pessoas/ano
R_{C1}	0,00%	0,00E+00	pessoas/ano
R_{M1}	0,00%	0,00E+00	pessoas/ano
R_{W1}	0,00%	0,00E+00	pessoas/ano
R_{Z1}	0,00%	0,00E+00	pessoas/ano
R1	$R1 = R_{A1} + R_{B1} + R_{C1} + R_{M1} + R_{U1} + R_{V1} + R_{W1} + R_{Z1}$	6,48E-06	pessoas/ano

Fonte: o autor.

5.2 HOSPITAL

A segunda estrutura analisada é a de um hospital com um bloco de apartamentos, um bloco de operação e uma Unidade de Terapia Intensiva (UTI). O hospital encontra-se em uma região plana sem outras estruturas na vizinhança.

Foram definidas as seguintes zonas no hospital:

a) área externa da estrutura;

b) bloco de apartamentos;

c) bloco de operação;

d) UTI.

Os dados para essa edificação encontram-se no Quadro 46 ao Quadro 52.

Quadro 46 – Hospital: informações da estrutura.

Parâmetro de entrada	Valor
Densidade de descargas na região	4 descargas/(km².ano)
Dimensões da estrutura	
Comprimento	50 m
Largura	150 m
Altura	10 m
Saliência	Sem saliência
Localização relativa	Estrutura isolada
Número de pessoas na estrutura	1.000 pessoas

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 76-90).

Quadro 47 – Hospital: informações da linha de energia.

Parâmetro de entrada	Valor
Ambiente da linha	Suburbano
Comprimento da linha	500 m
Tipo de linha	Enterrada, de alta tensão com transformador AT/BT
Linha blindada	Sim
Blindagem interligada ao mesmo barramento de equipotencialização dos sistemas internos	Sim
Resistência da blindagem (R_S)	$R_S \leq 1\Omega/km$
Linha conectada a uma estrutura adjacente	Não

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 76-90).

Quadro 48 – Hospital: informações da linha de sinal.

Parâmetro de entrada	Valor
Ambiente da linha	Suburbano
Comprimento da linha	300 m
Tipo de linha	Enterrada
Linha blindada	Sim
Blindagem interligada ao mesmo barramento de equipotencialização dos sistemas internos	Sim
Resistência da blindagem (R_S)	$1\Omega/km < R_S \leq 5\Omega/km$
Linha conectada a uma estrutura adjacente	Sim
Comprimento	20 m
Largura	30 m
Altura	5 m
Saliência	Sem saliência

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 76-90).

Quadro 49 – Hospital: informações da zona da área externa.

Parâmetro de entrada	Valor
Uso da zona	Área externa
Tipo de superfície	Concreto
Risco de incêndio ou explosão	Nenhum
Perigo especial	Nenhum
Proteção contra choques por descargas na estrutura	Nenhuma
Proteção contra choques por descargas nas linhas	Nenhuma
Providências contra incêndio	Nenhuma
Número de pessoas na zona	10 pessoas
Tempo de permanência de pessoas na zona	8760 h/ano
Linha de energia	
Sistemas internos independentes ou inexistentes	Sim (Inexistentes)
Linha de sinal	
Sistemas internos independentes ou inexistentes	Sim (Inexistentes)

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 76-90).

Quadro 50 – Hospital: informações da zona do bloco de apartamentos.

Parâmetro de entrada	Valor
Uso da zona	Hospital – Outras áreas
Tipo de superfície	Linóleo
Risco de incêndio ou explosão	Incêndio – Normal
Perigo especial	Dificuldade de evacuação
Proteção contra choques por descargas na estrutura	Nenhuma
Proteção contra choques por descargas nas linhas	Nenhuma
Providências contra incêndio	Nenhuma
Número de pessoas na zona	950 pessoas
Tempo de permanência de pessoas na zona	8760 h/ano
Linha de energia	
Roteamento das linhas internas	Preocupação para evitar grandes laços
Tensão suportável de impulso	2,5 kV
Linha de sinal	
Roteamento das linhas internas	Preocupação para evitar grandes laços
Tensão suportável de impulso	1,5 kV

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 76-90).

Quadro 51 – Hospital: informações da zona do bloco cirúrgico.

Parâmetro de entrada	Valor
Uso da zona	Hospital – Bloco cirúrgico ou UTI
Tipo de superfície	Linóleo
Risco de incêndio ou explosão	Incêndio – Baixo
Perigo especial	Dificuldade de evacuação
Proteção contra choques por descargas na estrutura	Nenhuma
Proteção contra choques por descargas nas linhas	Nenhuma
Providências contra incêndio	Nenhuma
Número de pessoas na zona	35 pessoas
Tempo de permanência de pessoas na zona	8760 h/ano
Linha de energia	
Roteamento das linhas internas	Preocupação para evitar grandes laços
Tensão suportável de impulso	2,5 kV
Linha de sinal	
Roteamento das linhas internas	Preocupação para evitar grandes laços
Tensão suportável de impulso	1,5 kV

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 76-90).

Quadro 52 – Hospital: informações da zona da UTI.

Parâmetro de entrada	Valor
Uso da zona	Hospital – Bloco cirúrgico ou UTI
Tipo de superfície	Linóleo
Risco de incêndio ou explosão	Incêndio – Baixo
Perigo especial	Dificuldade de evacuação
Proteção contra choques por descargas na estrutura	Nenhuma
Proteção contra choques por descargas nas linhas	Nenhuma
Providências contra incêndio	Nenhuma
Número de pessoas na zona	5 pessoas
Tempo de permanência de pessoas na zona	8760 h/ano
Linha de energia	
Roteamento das linhas internas	Preocupação para evitar grandes laços
Tensão suportável de impulso	2,5 kV
Linha de sinal	
Roteamento das linhas internas	Preocupação para evitar grandes laços
Tensão suportável de impulso	1,5 kV

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 76-90).

Os valores de risco obtidos no programa para o hospital correspondem aos resultados descritos no exemplo, como esperado, com pequenas variações devidas à precisão de cálculo. Os componentes de risco e seus percentuais em relação ao risco total são mostrado na Figura 8, e a análise final, na Figura 9.

Figura 8 – Hospital: valores de risco total no programa.

Risco total			
R_{A1}	0,01%	9,82E-08	pessoas/ano
R_{U1}	0,00%	1,92E-09	pessoas/ano
R_{B1}	60,89% - componente de maior risco	4,26E-04	pessoas/ano
R_{V1}	13,22%	9,25E-05	pessoas/ano
R_{C1}	17,23%	1,21E-04	pessoas/ano
R_{M1}	4,90%	3,43E-05	pessoas/ano
R_{W1}	3,74%	2,62E-05	pessoas/ano
R_{Z1}	0,00%	0,00E+00	pessoas/ano
R1	$R1 = R_{A1} + R_{B1} + R_{C1} + R_{M1} + R_{U1} + R_{V1} + R_{W1} + R_{Z1}$	7,00E-04	pessoas/ano

Fonte: o autor.

Figura 9 - Hospital: análise de risco no programa.

Análise de risco da estrutura			
Risco de perda de vida humana (R1)			
R_{T1}	Limite de risco tolerável	1,00E-05	pessoas/ano
	Risco está acima do limite tolerável		
RB1	Componente de risco de maior valor	4,26E-04	pessoas/ano

Fonte: o autor.

A partir desses resultados, pode-se determinar quais proteções aplicar com vistas à redução do risco ao limite tolerável. No exemplo, são apontados os componentes R_B, R_C e R_V como os grandes responsáveis pelo risco, conclusão corroborada pelo programa. A zona onde está presente o maior risco é a zona do bloco de apartamentos, como mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Hospital: valores de risco para a zona do bloco de apartamentos.

Zona 'Bloco de apartamentos'			
R_{A1}	0,00%	8,48E-09	pessoas/ano
R_{U1}	0,00%	1,84E-09	pessoas/ano
R_{B1}	65,91% - componente de maior risco	4,24E-04	pessoas/ano
R_{V1}	14,30%	9,21E-05	pessoas/ano
R_{C1}	13,18%	8,48E-05	pessoas/ano
R_{M1}	3,75%	2,41E-05	pessoas/ano
R_{W1}	2,86%	1,84E-05	pessoas/ano
R_{Z1}	0,00%	0,00E+00	pessoas/ano
R1	R1 = $R_{A1} + R_{B1} + R_{C1} + R_{M1} + R_{U1} + R_{V1} + R_{W1} + R_{Z1}$	6,44E-04	pessoas/ano

Fonte: o autor.

O exemplo propôs três soluções:

a) solução 1:
   - instalar um SPDA classe I,
   - instalar DPS coordenados em ambas as linhas com características melhores que NP I ($P_{SPD} = 0{,}005$),
   - instalar, na zona do bloco de apartamentos, um sistema automático de proteção contra incêndio,
   - instalar, nas zonas do bloco cirúrgico e da UTI, uma blindagem espacial interna tipo malha com $w_m = 0{,}5m$;

b) solução 2:
   - instalar um SPDA classe I,
   - instalar DPS coordenados em ambas as linhas com características melhores que NP I ($P_{SPD} = 0{,}001$),

- instalar, na zona do bloco de apartamentos, um sistema automático de proteção contra incêndio;

c) solução 3:

- instalar um SPDA classe I,
- instalar DPS coordenados em ambas as linhas com características melhores que NP I ($P_{SPD} = 0{,}002$),
- instalar, na zona do bloco de apartamentos, um sistema automático de proteção contra incêndio,
- instalar, nas zonas do bloco cirúrgico e da UTI, uma blindagem espacial interna tipo malha com $w_m = 0{,}1m$.

As alterações necessárias nos parâmetros do programa estão descritas no Quadro 53 ao Quadro 55.

Quadro 53 – Hospital: alterações nos parâmetros para a solução 1.

Parâmetro de entrada	Valor
Estrutura	
Nível de proteção da estrutura	Classe I
Estrutura com SPDA	Sim
Subsistema de descida	Subsistema de descida não natural
Linha de energia	
Sistema de DPS coordenados	Sim, melhor que NP I, $P_{SPD} = 0{,}005$[a]
Linha de sinal	
Sistema de DPS coordenados	Sim, melhor que NP I, $P_{SPD} = 0{,}005$[a]
Zonas – Zona "Bloco de apartamentos"	
Providências contra incêndios	Instalações de alarmes automáticos
Zonas – Zona "Bloco cirúrgico"	
Blindagem espacial interna	Sim
Largura	0,5 m
Zonas – Zona "UTI"	
Blindagem espacial interna	Sim
Largura	0,5 m

[a] Informação deve ser inserida diretamente na planilha de relatório, pois foge das especificações padrão.
Fonte: o autor.

Quadro 54 – Hospital: alterações nos parâmetros para a solução 2.

Parâmetro de entrada	Valor
Estrutura	
Nível de proteção da estrutura	Classe I
Estrutura com SPDA	Sim
Subsistema de descida	Subsistema de descida não natural
Linha de energia	
Sistema de DPS coordenados	Sim, melhor que NP I, $P_{SPD} = 0{,}001$[a]
Linha de sinal	
Sistema de DPS coordenados	Sim, melhor que NP I, $P_{SPD} = 0{,}001$[a]
Zonas – Zona "Bloco de apartamentos"	
Providências contra incêndios	Instalações de alarmes automáticos

[a] Informação deve ser inserida diretamente na planilha de relatório, pois foge das especificações padrão.
Fonte: o autor.

Quadro 55 – Hospital: alterações nos parâmetros para a solução 3.

Parâmetro de entrada	Valor
Estrutura	
Nível de proteção da estrutura	Classe I
Estrutura com SPDA	Sim
Subsistema de descida	Subsistema de descida não natural
Linha de energia	
Sistema de DPS coordenados	Sim, melhor que NP I, $P_{SPD} = 0{,}002$[a]
Linha de sinal	
Sistema de DPS coordenados	Sim, melhor que NP I, $P_{SPD} = 0{,}002$[a]
Zonas – Zona "Bloco de apartamentos"	
Providências contra incêndios	Instalações de alarmes automáticos
Zonas – Zona "Bloco cirúrgico"	
Blindagem espacial interna	Sim
Largura	0,1 m
Zonas – Zona "UTI"	
Blindagem espacial interna	Sim
Largura	0,1 m

[a] Informação deve ser inserida diretamente na planilha de relatório, pois foge das especificações padrão.
Fonte: o autor.

Devido à utilização de DPS com especificações diferentes das padronizadas através das classes de nível de proteção, duas características do programa ficam evidentes nesse exemplo: a simplicidade da interface, que evita apresentar muitos campos de entrada ao usuário, e a possibilidade de alteração de parâmetros diretamente no relatório final. Como não há campo

para entrada de valores personalizados para o parâmetro P_{SPD}, que é influenciado pelas características dos DPS utilizados, esse valor deve ser alterado diretamente no seu campo do relatório. Os cálculos são imediatamente refeitos, e os resultados, atualizados, refletindo a nova informação. A Figura 11 mostra a listagem dos parâmetros da linha de energia no relatório, já contendo o valor alterado de P_{SPD} para a solução 1.

Figura 11 - Hospital: parâmetros da linha de energia no relatório.

Parâmetros da linha de energia			
$L_{L,e}$	Comprimento da linha	500	m
$W_{ADJ,e}$	Largura da estrutura adjacente	0	m
$L_{ADJ,e}$	Comprimento da estrutura adjacente	0	m
$H_{ADJ,e}$	Altura da estrutura adjacente	0	m
$H_{P,ADJ,e}$	Altura da saliência da estrutura adjacente	0	m
$C_{I,e}$	Fator de instalação da linha	0,5	
$C_{E,e}$	Fator ambiental da linha	0,5	
$C_{T,e}$	Fator de tipo de linha	0,2	
$P_{SPD,e}$	Prob. em função da existência de DPS coordenado	0,005	

Fonte: o autor.

Os resultados para as três soluções corresponderam aos do exemplo, como esperado, com pequenas variações devidas à precisão de cálculo. Os valores de risco para cada solução são mostrados na Figura 12 à Figura 14.

Figura 12 - Hospital: valores de risco total da solução 1 no programa.

Risco total			
R_{A1}	0,06%	1,96E-09	pessoas/ano
R_{U1}	0,00%	1,92E-11	pessoas/ano
R_{B1}	51,31% - componente de maior risco	1,73E-06	pessoas/ano
R_{V1}	5,57%	1,88E-07	pessoas/ano
R_{C1}	35,61%	1,20E-06	pessoas/ano
R_{M1}	3,58%	1,21E-07	pessoas/ano
R_{W1}	3,87%	1,31E-07	pessoas/ano
R_{Z1}	0,00%	0,00E+00	pessoas/ano
R1	$R1 = R_{A1} + R_{B1} + R_{C1} + R_{M1} + R_{U1} + R_{V1} + R_{W1} + R_{Z1}$	3,38E-06	pessoas/ano

Fonte: o autor.

Figura 13 - Hospital: valores de risco total da solução 2 no programa.

Risco total			
R_{A1}	0,09%	1,96E-09	pessoas/ano
R_{U1}	0,00%	1,92E-11	pessoas/ano
R_{B1}	77,90% - componente de maior risco	1,73E-06	pessoas/ano
R_{V1}	8,45%	1,88E-07	pessoas/ano
R_{C1}	10,84%	2,41E-07	pessoas/ano
R_{M1}	1,54%	3,43E-08	pessoas/ano
R_{W1}	1,18%	2,62E-08	pessoas/ano
R_{Z1}	0,00%	0,00E+00	pessoas/ano
R1	$R1 = R_{A1} + R_{B1} + R_{C1} + R_{M1} + R_{U1} + R_{V1} + R_{W1} + R_{Z1}$	2,22E-06	pessoas/ano

Fonte: o autor.

Figura 14 - Hospital: valores de risco total da solução 3 no programa.

Risco total			
R_{A1}	0,08%	1,96E-09	pessoas/ano
R_{U1}	0,00%	1,92E-11	pessoas/ano
R_{B1}	69,17% - componente de maior risco	1,73E-06	pessoas/ano
R_{V1}	7,51%	1,88E-07	pessoas/ano
R_{C1}	19,23%	4,82E-07	pessoas/ano
R_{M1}	1,93%	4,83E-08	pessoas/ano
R_{W1}	2,09%	5,23E-08	pessoas/ano
R_{Z1}	0,00%	0,00E+00	pessoas/ano
R1	$R1 = R_{A1} + R_{B1} + R_{C1} + R_{M1} + R_{U1} + R_{V1} + R_{W1} + R_{Z1}$	2,50E-06	pessoas/ano

Fonte: o autor.

6 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi desenvolvido um programa computacional que automatizasse o cálculo e a análise de risco de perdas devido a descargas atmosféricas conforme a norma ABNT NBR 5419:2015. Essa automatização teve o objetivo de facilitar o estudo da norma ao permitir que o usuário do programa possa obter resultados da análise de risco sem a necessidade de compreender previamente todo o método envolvido.

Os objetivos propostos para o programa foram satisfatoriamente alcançados. Sua interface despoluída e, em especial, a organização e a sumarização das informações de entrada permitiram seu uso descomplicado, naturalmente a depender dos conceitos já assimilados pelo usuário. A apresentação do relatório contendo as informações da análise de risco, no entanto, ficou ligeiramente aquém do desejado. O número muito grande de informações, junto de uma organização muito espaçada, fez com que ficasse muito extenso. Ainda assim, o relatório cumpre a sua proposta de apresentar todas as informações para observação da relação entre as variáveis da análise.

Quando comparada à sua versão anterior, do ano de 2005, fica evidente que a nova versão dessa norma fornece subsídios melhores para a determinação da necessidade de proteção em estruturas. Sendo o Brasil o país com a maior incidência de descargas atmosféricas no mundo, essa melhoria é de extrema importância, e, portanto, é necessário que seja adequadamente entendida e aplicada. Nesse contexto, espera-se que o programa tenha um importante papel em sala de aula, sendo usado como uma ferramenta para abstrair a complexidade dos cálculos envolvidos e reduzir uma parte significativa das dificuldades no ensino da análise de risco.

Como possíveis trabalhos futuros, sugere-se uma remodelação do relatório final da análise e a implementação de partes da norma que estavam fora do escopo deste trabalho, como, por exemplo, o cálculo do tipo de perda de valor econômico, incluindo a análise de custo-benefício (ABNT, 2015b, p. 30), e a divisão das linhas em seções (ABNT, 2015b, p. 28).

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-1**: proteção contra descargas atmosféricas – parte 1: princípios gerais. Rio de Janeiro, 2015a.

_____. **NBR 5419-2**: proteção contra descargas atmosféricas – parte 2: gerenciamento de risco. Rio de Janeiro, 2015b.

_____. **NBR 5419-3**: proteção contra descargas atmosféricas – parte 3: danos físicos a estruturas e perigos à vida. Rio de Janeiro, 2015c.

_____. **NBR 5419-4**: proteção contra descargas atmosféricas – parte 4: sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura. Rio de Janeiro, 2015d.

_____. **NBR 5419**: proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, 2005.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **ELAT – Grupo de Eletricidade Atmosférica**. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/>. Acesso em: 14 jun. 2017.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**: de acordo com a norma brasileira NBR 5419:2015. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

SUETA, Hélio Eiji. O gerenciamento de risco segundo a parte 2 da ABNT NBR 5419. **O setor elétrico**, São Paulo, v. 10, n. 109, p. 116-117, fev. 2015a.

_____. A revisão da ABNT NBR 5419: proteção contra as descargas atmosféricas. **Boletim ABNT**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 145, p. 16-22, maio/jun. 2015b.

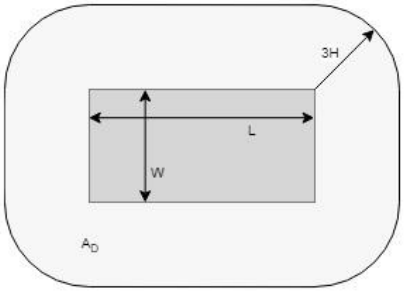
APÊNDICE A – CÁLCULO DAS ÁREAS DE EXPOSIÇÃO EQUIVALENTE

A área de exposição equivalente A_D é obtida através da rotação, ao redor da estrutura, de uma reta de inclinação 1:3 estendida a partir dos pontos mais altos da estrutura até o solo. Para uma estrutura retangular, a área pode ser calculada com a seguinte expressão (ABNT, 2015b, p. 31-32):

$$A_{D,ret} = L * W + 2 * 3H * (L + W) + \pi * (3H)^2$$

onde L é o comprimento, W é a largura e H é a altura da estrutura. A Figura 15 mostra graficamente a área de exposição de uma estrutura retangular.

Figura 15 – Área de exposição equivalente A_D de uma estrutura retangular.



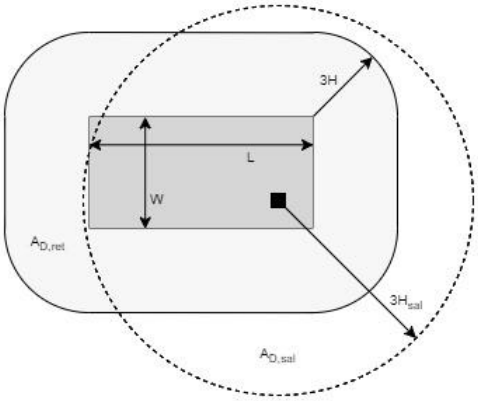
Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 32).

Se uma estrutura for retangular, mas contiver uma saliência em sua cobertura, a área de exposição pode ser aproximada pela seleção do maior valor entre a expressão anterior e a área circular ao redor da saliência, calculado da seguinte forma (ABNT, 2015b, p. 32-34):

$$A_{D,sal} = \pi * (3H_{sal})^2$$

onde H_{sal} é a altura da saliência com relação ao solo. A Figura 16 mostra graficamente as áreas de exposição de uma estrutura retangular com uma saliência.

Figura 16 – Área de exposição equivalente $A_{D,sal}$ sobreposta à área de exposição de uma estrutura retangular.



Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 34).

Para estruturas com formas mais complexas, pode ser necessário utilizar um método gráfico para obtenção da sua área de exposição equivalente.

A área de exposição equivalente A_M é determinada pela extensão de 500 metros ao redor da estrutura, independentemente de sua altura (ABNT, 2015b, p. 36-37). É determinada pela seguinte equação:

$$A_M = 2 * 500 * (L + W) + \pi * 500^2$$

onde L e W são o comprimento e a largura da estrutura, respectivamente.

As áreas de exposição A_L e A_I são determinadas pela extensão de 40 metros e de 4.000 metros, respectivamente, ao redor das linhas que adentram a estrutura (ABNT, 2015b, p. 37-39). São determinadas pelas seguintes equações:

$$A_L = 40 * L_L$$

$$A_I = 4.000 * L_L$$

onde L_L é o comprimento da seção da linha considerada.

Por fim, a área de exposição equivalente A_{DJ} de uma estrutura adjacente pode ser obtida da mesma maneira que a área A_D utilizando as medidas de comprimento, largura e altura da estrutura adjacente em questão.

APÊNDICE B – FATORES APLICADOS ÀS EQUAÇÕES DE NÚMERO MÉDIO DE EVENTOS

O valor dos fatores C_D, C_I, C_T e C_E podem ser obtidos na Tabela 1 à Tabela 4. O valor do fator C_{DJ} é o mesmo de C_D, obtido da Tabela 1.

Tabela 1 – Fator C_D de localização da estrutura.

Localização relativa	$\boldsymbol{C_D}$
Estrutura cercada por objetos mais altos	0,25
Estrutura cercada por objetos da mesma altura ou mais baixos	0,5
Estrutura isolada: nenhum outro objeto nas vizinhanças	1
Estrutura isolada no topo de uma colina ou monte	2

Fonte: ABNT (2015b, p. 36).

Tabela 2 – Fator C_I de instalação da linha.

Roteamento	$\boldsymbol{C_I}$
Aéreo	1
Enterrado	0,5
Cabos enterrados instalados completamente dentro de uma malha de aterramento (cfe. ABNT NBR 5419-4:2015, 5.2)	0,01

Fonte: ABNT (2015b, p. 37).

Tabela 3 – Fator C_T de tipo de linha.

Instalação	$\boldsymbol{C_T}$
Linha de energia ou sinal	1
Linha de energia em AT (com transformador AT/BT)	0,2

Fonte: ABNT (2015b, p. 38).

Tabela 4 – Fator C_E ambiental de linha.

Ambiente	$\boldsymbol{C_E}$
Rural	1
Suburbano	0,5
Urbano	0,1
Urbano com edifícios mais altos que 20 m	0,01

Fonte: ABNT (2015b, p. 38).

APÊNDICE C – FATORES APLICADOS ÀS EQUAÇÕES DE PROBABILIDADE DE DANOS

As probabilidades P_{TA}, P_B, P_{TU}, P_{EB}, P_{SPD}, P_{LD} e P_{LI} podem ser obtidas na Tabela 5 à Tabela 11. Os valores dos fatores C_{LD} e C_{LI} podem ser obtidos na Tabela 12.

Tabela 5 – Probabilidade P_{TA} de dano a seres vivos devido a uma descarga na estrutura conforme medidas de proteção adicionais.

Medida de proteção adicional	$\boldsymbol{P_{TA}}$
Nenhuma medida de proteção	1
Avisos de alerta	10^{-1}
Isolação elétrica[a] das partes expostas[b]	10^{-2}
Equipotencialização efetiva do solo	10^{-2}
Restrições físicas ou estrutura do edifício utilizada como subsistema de descida	0

[a] Por exemplo, de pelo menos 3 mm de polietileno reticulado.
[b] Por exemplo, condutores de descidas.
Fonte: ABNT (2015b, p. 38).

Tabela 6 – Probabilidade P_B de dano físico à estrutura devido a uma descarga na estrutura.

Características da estrutura	**Classe do SPDA**	$\boldsymbol{P_B}$
Estrutura não protegida por SPDA	-	1
Estrutura protegida por SPDA	IV	0,2
	III	0,1
	II	0,05
	I	0,02
Estrutura com subsistema de captação conforme SPDA classe I e uma estrutura metálica contínua ou de concreto armado atuando como um subsistema de descida natural		0,01
Estrutura com cobertura metálica e um subsistema de captação, possivelmente incluindo componentes naturais, com proteção completa de qualquer instalação na cobertura contra descargas atmosféricas diretas e uma estrutura metálica contínua ou de concreto armado atuando como um subsistema de descidas natural		0,001

Fonte: ABNT (2015b, p. 41).

Tabela 7 – Probabilidade P_{TU} de dano a seres vivos devido a uma descarga em uma linha conforme medidas de proteção adicionais.

Medida de proteção	$\boldsymbol{P_{TU}}$
Nenhuma medida de proteção	1
Avisos de alerta	10^{-1}
Isolação elétrica	10^{-2}
Restrições físicas	0

Fonte: ABNT (2015, p. 38).

Tabela 8 – Probabilidade P_{EB} de dano na existência de DPS conforme o nível de proteção projetado.

Nível de proteção	P_{EB}
Sem DPS	1
III - IV	0,05
II	0,02
I	0,01
DPS com melhores características[a]	0,005 – 0,001

[a] DPS com características melhores que NP I podem ser utilizados levando em consideração os requisitos estabelecidos na norma.
Fonte: ABNT (2015b, p. 38).

Tabela 9 – Probabilidade P_{SPD} de dano na existência de DPS coordenado conforme o nível de proteção projetado.

Nível de proteção	P_{EB}
Sem DPS coordenado	1
III - IV	0,05
II	0,02
I	0,01
DPS com melhores características[a]	0,005 – 0,001

[a] DPS com características melhores que NP I podem ser utilizados levando em consideração os requisitos estabelecidos na norma.
Fonte: ABNT (2015b, p. 42).

Tabela 10 – Probabilidade P_{LD} de dano devido a descarga na linha conforme as características da linha e dos equipamentos a ela ligados.

Tipo da linha	Condições de roteamento, blindagem e interligação		Tensão suportável U_W em kV				
			1	1,5	2,5	4	6
Linhas de energia ou sinal	Linha aérea ou enterrada, não blindada ou com a blindagem não interligada ao mesmo barramento de equipotencialização do equipamento		1	1	1	1	1
	Blindada aérea ou enterrada cuja blindagem está interligada ao mesmo barramento de equipotencialização do equipamento	5 Ω/km < R_S ≤ 20 Ω/km	1	1	0,95	0,9	0,8
		1 Ω/km < R_S ≤ 5 Ω/km	0,9	0,9	0,6	0,3	0,1
		R_S ≤ 1 Ω/km	0,6	0,4	0,2	0,04	0,02

Fonte: ABNT (2015b, p. 47).

Tabela 11 – Probabilidade P_{LI} de dano devido a descarga próxima à linha conforme as características da linha e dos equipamentos a ela ligados.

Tipo da linha	Tensão suportável U_W em kV				
	1	1,5	2,5	4	6
Linhas de energia	1	0,6	0,3	0,16	0,1
Linhas de sinais	1	0,5	0,2	0,08	0,04

Fonte: ABNT (2015b, p. 49).

Tabela 12 – Fatores C_{LD} e C_{LI} de blindagem, aterramento e isolamento da linha para descargas na linha e próximas a ela.

Tipo de linha externa	**Conexão na entrada**	C_{LD}	C_{LI}
Linha aérea não blindada	Indefinida	1	1
Linha enterrada não blindada	Indefinida	1	1
Linha de energia com neutro multiaterrado	Nenhuma	1	0,2
Linha enterrada blindada (energia ou sinal)	Blindagem não interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento	1	0,3
Linha aérea blindada (energia ou sinal)	Blindagem não interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento	1	0,1
Linha enterrada blindada (energia ou sinal)	Blindagem interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento	1	0
Linha aérea blindada (energia ou sinal)	Blindagem interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento	1	0
Cabo protegido contra descargas atmosféricas ou cabeamento em dutos para cabo protegido contra descargas atmosféricas, eletrodutos metálicos ou tubos metálicos	Blindagem interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento	0	0
(Nenhuma linha externa)	Sem conexões com linhas externas (sistemas independentes)	0	0
Qualquer tipo	Interfaces isolantes de acordo com a ABNT NBR 5419-4	0	0

Fonte: ABNT (2015b, p. 42-43).

APÊNDICE D – DETERMINAÇÃO DA PROBABILIDADE P_{MS}

A determinação da probabilidade P_{MS} leva em consideração diversas condições que não podem ser expressas de forma matemática em uma única equação e são descritas a seguir. Sua definição é dada por ABNT (2015b, p. 43-45) e sua equação básica é dada no Quadro 56.

As blindagens a que se referem as definições a seguir podem ser as blindagens espaciais das Zonas de Proteção contra Raios (ZPR), que são zonas com medidas de proteção descritas em ABNT (2015d).

Quadro 56 – Probabilidade P_{MS}

Definição: $\boldsymbol{P_{MS} = (K_{S1} * K_{S2} * K_{S3} * K_{S4})^2}$	
Termo	**Descrição**
$\boldsymbol{K_{S1}}$	Fator relativo à eficiência da blindagem por malha da estrutura, do SPDA ou outra blindagem na interface ZPR externa.
$\boldsymbol{K_{S2}}$	Fator relativo à eficiência das blindagens nas interfaces ZPR internas.
$\boldsymbol{K_{S3}}$	Fator relativo à fiação interna.
$\boldsymbol{K_{S4}}$	Fator relativo à tensão suportável nominal de impulso dos sistemas internos.

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 44).

Quando os equipamentos forem providos com interfaces isolantes consistidas de transformadores de isolação com grade aterrada entre enrolamentos ou de cabos de fibra ótica, ou se for utilizado acoplamento ótico, deve-se assumir $P_{MS} = 0$.

Os fatores K_{S1} e K_{S2} dependem da largura da blindagem espacial em forma de grade, da largura dos condutores de descida do SPDA tipo malha, do espaçamento entre as colunas metálicas da estrutura ou do espaçamento entre as estruturas de concreto armado atuando como um SPDA natural. Quando observada a distância de segurança do limite da malha, no mínimo igual à largura da malha, esses fatores podem ser obtidos pelas seguintes equações:

$$K_{S1} = 0{,}12 * w_{m1}$$

$$K_{S2} = 0{,}12 * w_{m2}$$

onde w_{m1} e w_{m2} são dados em metros.

Se alguma blindagem for do tipo metálica contínua, com espessura não inferior a 0,1 mm, pode-se considerar $K_{S1} = 10^{-4}$ ou $K_{S2} = 10^{-4}$, conforme a blindagem em questão.

Havendo uma rede de equipotencialização tipo malha, conforme ABNT (2015d), os valores de K_{S1} e K_{S2} podem ser repartidos ao meio.

No entanto, se laços de indução, como definidos em ABNT (2015d, p. 36-37), estiverem próximos aos condutores do limite da malha de blindagem, numa distância menor que a distância de segurança, os valores de K_{S1} e K_{S2} devem ser aumentados. Esse aumento não é especificado em detalhes pela norma, mas um exemplo é citado: quando a distância da blindagem variar entre 10% e 20% da largura da malha, K_{S1} e K_{S2} devem ser dobrados.

Se existir uma cascata de ZPR, isto é, de blindagens internas, o valor final de K_{S2} será o produto do valor de K_{S2} para cada ZPR.

O fator K_{S3} é obtido a partir da Tabela 13.

Tabela 13 – Fator K_{S3} de fiação interna.

Tipo de fiação interna	$\boldsymbol{K_{S3}}$
Cabo não blindado – sem preocupação no roteamento no sentido de evitar laços[a]	1
Cabo não blindado – preocupação no roteamento no sentido de evitar grandes laços[b]	0,2
Cabo não blindado – preocupação no roteamento no sentido de evitar laços[c]	0,01
Cabos blindados e cabos instalados em eletrodutos metálicos[d]	0,0001

[a] Condutores em laço com diferentes roteamentos em grandes edifícios (área do laço da ordem de 50 m²).
[b] Condutores em laço roteados em um mesmo eletroduto ou condutores em laço com diferentes roteamentos em edifícios pequenos (área do laço da ordem de 10 m²).
[c] Condutores em laço roteados em um mesmo cabo (área do laço da ordem de 0,5 m²).
[d] Blindados e eletrodutos metálicos interligados a um barramento de equipotencialização em ambas extremidades e equipamentos estão conectados no mesmo barramento de equipotencialização.
Fonte: ABNT (2015b, p. 45).

O fator K_{S4} é obtido a partir da tensão suportável nominal de impulso U_W do sistema interno, expressa em kV:

$$K_{S4} = \frac{1}{U_W}$$

Deve-se observar que o valor máximo dos fatores K_{Sn} é 1.

APÊNDICE E – VALORES RELATIVOS MÉDIOS TÍPICOS DE PERDA CONSEQUENTE

Os valores relativos médios típicos de perda L_T, L_F e L_O dependem do tipo de perda considerado e são apresentados na Tabela 14 à Tabela 17.

O tipo de perda de vida humana (L1) considera todos os tipos de dano, porém o valor de L_O é utilizado apenas quando falhas em sistemas internos podem colocar imediatamente em perigo vidas humanas, tal como em hospitais.

Tabela 14 – Valores típicos de perda L_T, L_F e L_O para perdas de vida humana (L1).

Tipos de danos	Valor de perda típico		Tipo da estrutura
D1 ferimentos	L_T	10^{-2}	Todos os tipos
D2 danos físicos	L_F	10^{-1}	Risco de explosão
		10^{-1}	Hospital, hotel, escola, edifício cívico
		$5 * 10^{-2}$	Entretenimento público, igreja, museu
		$2 * 10^{-2}$	Industrial, comercial
		10^{-2}	Outros
D3 falhas de sistemas internos	L_O	10^{-1}	Risco de explosão
		10^{-2}	Unidade de terapia intensiva e bloco cirúrgico de hospital
		10^{-3}	Outras partes de hospital

Fonte: ABNT NBR (2015b, p. 52).

Para o tipo de perda de serviço ao público (L2), o tipo de dano a seres vivos não é considerado, e, portanto, não há valor de L_T para esse tipo de perda.

Tabela 15 – Valores típicos de perda L_F e L_O para perdas de serviço ao público (L2).

Tipos de danos	Valor de perda típico		Tipo de serviço
D2 danos físicos	L_F	10^{-1}	Gás, água, fornecimento de energia
		10^{-2}	TV, linhas de sinais
D3 falhas de sistemas internos	L_O	10^{-2}	Gás, água, fornecimento de energia
		10^{-3}	TV, linhas de sinais

Fonte: ABNT (2015b, p. 55).

Para o tipo de perda de patrimônio cultural (L3), apenas o tipo de dano físico à estrutura é considerando, e, portanto, somente L_F tem valor definido.

Tabela 16 – Valores típicos de perda L_F para perdas de patrimônio cultural (L3).

Tipos de danos	Valor de perda típico		Tipo da estrutura
D2 danos físicos	L_F	10^{-1}	Museus, galerias

Fonte: ABNT (2015b, p. 56).

O tipo de perda de valor econômico (L4) considera todos os tipos de dano, mas o valor de L_T é utilizado somente quando há animais produtivos na estrutura.

Tabela 17 – Valores típicos de perda L_T, L_F e L_O para perdas de valor econômico (L4).

Tipos de danos	Valor de perda típico		Tipo da estrutura
D1 ferimentos	L_T	10^{-2}	Todos os tipos onde somente animais estão presentes
D2 danos físicos	L_F	1	Risco de explosão
		0,5	Hospital, industrial, museu, agricultura
		0,2	Hotel, escola, escritório, igreja, entretenimento público, comercial
		10^{-1}	Outros
D3 falhas de sistemas internos	L_O	10^{-1}	Risco de explosão
		10^{-2}	Hospital, industrial, escritório, hotel, comercial
		10^{-3}	Museu, agricultura, escola, igreja, entretenimento público
		10^{-4}	Outros

Fonte: ABNT (2015b, p. 58).

APÊNDICE F – FATORES APLICADOS ÀS EQUAÇÕES DE PERDAS CONSEQUENTES

Os valores dos fatores r_t, r_p, r_f e h_z estão descritos na Tabela 18 à Tabela 21.

Tabela 18 – Fator de redução r_t de tipo de superfície do solo ou piso.

Tipo de superfície	**Resistência de contato em kΩ**	$\boldsymbol{r_t}$
Agricultura, concreto	≤ 1	10^{-2}
Mármore, cerâmica	1 – 10	10^{-3}
Cascalho, tapete, carpete	10 – 100	10^{-4}
Asfalto, linóleo, madeira	≥ 100	10^{-5}

Fonte: ABNT (2015b, p. 53).

Tabela 19 – Fator de redução r_p de medidas de prevenção de incêndio.

Providências[a]	$\boldsymbol{r_p}$
Nenhuma providência ou estrutura com risco de explosão, independente de providências tomadas	1
Uma das seguintes providências: extintores, instalações fixas operadas manualmente, instalações de alarme manuais, hidrantes, compartimentos à prova de fogo, rotas de escape	0,5
Uma das seguintes providências: instalações fixas operadas automaticamente, instalações de alarme automático[b]	0,2

[a] Se mais de uma providência tiver sido tomada, recomenda-se que o valor de r_p seja tomado com o menor dos valores relevantes.
[b] Somente se protegidas contra sobretensões e outros danos e se os bombeiros puderem chegar em menos de 10min.
Fonte: ABNT (2015b, p. 53).

Tabela 20 – Fator de redução r_f de risco de incêndio ou explosão na estrutura.

Risco	**Quantidade de risco**	$\boldsymbol{r_f}$
Explosão	Zonas 0 e 20 ou explosivos sólidos	1
	Zonas 1 e 21	10^{-1}
	Zonas 2 e 22	10^{-3}
Incêndio	Alto	10^{-1}
	Normal	10^{-2}
	Baixo	10^{-3}
Nenhum	-	0

Fonte: ABNT (2015b, p. 53).

Tabela 21 – Fator de aumento h_z de perigos especiais.

Tipo de perigo especial	h_z
Sem perigo especial	1
Baixo nível de pânico (p. ex., uma estrutura limitada a dois andares e número de pessoas não superior a 100)	2
Nível médio de pânico (p. ex., estruturas designadas para eventos culturais ou esportivos com um número de participantes entre 100 e 1.000 pessoas)	5
Dificuldade de evacuação (p. ex., estrutura com pessoas imobilizadas, hospitais)	5
Alto nível de pânico (p. ex., estruturas designadas para eventos culturais ou esportivos com um número de participantes maior que 1.000 pessoas)	10

Fonte: ABNT (2015b, p. 54).

As zonas de explosão referidas na tabela do fator r_f são definidas no Quadro 57, e as quantidades de risco de incêndio, no Quadro 58.

Quadro 57 – Definição das zonas de explosão.

Zonas de explosão	Definição
Zona 0	Local no qual uma atmosfera explosiva consistindo em uma mistura de ar e substâncias inflamáveis em forma de gás, vapor ou névoa está presente continuamente ou por longos períodos ou frequentemente.
Zona 1	Local no qual uma atmosfera explosiva consistindo em uma mistura de ar e substâncias inflamáveis em forma de gás, vapor ou névoa pode ocorrer em operação normal ocasionalmente.
Zona 2	Local no qual uma atmosfera explosiva consistindo em uma mistura de ar e substâncias inflamáveis em forma de gás, vapor ou névoa não é provável de ocorrer em operação normal, mas, se isto acontecer, irá persistir[a] somente por períodos curtos.
Zona 20	Local no qual uma atmosfera explosiva, na forma de nuvem de poeira combustível no ar, está presente continuamente ou por longos períodos ou frequentemente.
Zona 21	Local no qual uma atmosfera explosiva, na forma de nuvem de poeira combustível no ar, pode ocorrer em operação normal ocasionalmente.
Zona 22	Local no qual uma atmosfera explosiva, na forma de nuvem de poeira combustível no ar, não é provável de ocorrer em operação normal, mas, se isto ocorrer, irá persistir somente por um período curto.

[a] Nesta definição, a palavra "persistir" significa o tempo total durante o qual a atmosfera inflamável irá existir. Isto irá compreender a duração total da ocorrência mais o tempo levado para que a atmosfera inflamável se disperse depois da ocorrência ter cessado.
Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 8-9).

Quadro 58 – Definição das quantidades de risco de incêndio.

Quantidade de risco de incêndio	Definição
Alto	Estruturas feitas de materiais combustíveis ou estruturas com coberturas feitas com materiais combustíveis ou estruturas com uma carga específica de incêndio[a] maior que 800 MJ/m².
Normal	Estruturas com uma carga específica de incêndio[a] entre 800 MJ/m² e 400 MJ/m².
Baixo	Estruturas com uma carga específica de incêndio[a] menor que 400 MJ/m² ou estruturas contendo somente uma pequena quantidade de material combustível.

[a] Carga específica de incêndio é a relação da energia da quantidade total do material combustível em uma estrutura e a superfície total da estrutura.
Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 54).

O fator relativo da zona F_Z depende do número de pessoas na estrutura, do número de usuários servidos, do valor do patrimônio cultural e dos valores econômicos envolvidos, conforme o tipo de perda em questão. As definições são dadas no Quadro ao Quadro.

Quadro 59 – Fator relativo da zona F_Z para o tipo de perda de vida humana (L1).

F_Z: fator relativo da zona para o tipo de perda de vida humana (L1)	
Definição: $$F_Z = \frac{n_z}{n_t} * \frac{t_z}{8.760}$$	
Termo	**Descrição**
n_z	Número de pessoas presentes na zona.
n_t	Número total de pessoas presentes na estrutura.
t_z	Tempo de permanência total de pessoas na estrutura, dado em horas por ano.

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 51).

Quadro 60 – Fator relativo da zona F_Z para o tipo de perda de serviço ao público (L2).

F_Z: fator relativo da zona para o tipo de perda de serviço ao público (L2)	
Definição: $$F_Z = \frac{n_z}{n_t}$$	
Termo	**Descrição**
n_z	Número de usuários servidos pela zona.
n_t	Número total de usuários servidos pela estrutura.

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 55).

Quadro 61 – Fator relativo da zona F_Z para o tipo de perda de patrimônio cultural (L3).

F_Z: fator relativo da zona para o tipo de perda de patrimônio cultural (L3)	
Definição: $F_Z = \frac{c_z}{c_t}$	
Termo	**Descrição**
c_z	Valor do patrimônio cultural na zona.
c_t	Valor total do patrimônio cultural na estrutura.

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 55).

O fator F_Z para o tipo de perda de valor econômico (L4) depende do tipo de dano, pois os diferentes valores considerados não são afetados por todos os tipos.

Quadro 62 – Fator relativo da zona F_Z para o tipo de perda de valor econômico (L4).

F_Z: fator relativo da zona para o tipo de perda de valor econômico (L4)	
Tipo de dano	***Definição***
Danos a seres vivos (D1)	$F_Z = \frac{c_a}{c_t}$
Danos físicos à estrutura (D2)	$F_Z = \frac{c_a + c_b + c_c + c_s}{c_t}$
Danos por falha de sistemas internos (D3)	$F_Z = \frac{c_s}{c_t}$
Termo	**Descrição**
c_a	Valor dos animais na zona.
c_b	Valor da edificação relevante à zona.
c_c	Valor do conteúdo da zona.
c_s	Valor dos sistemas internos, incluindo suas atividades, na zona.
c_t	Valor total da estrutura (soma de todos os valores para todas as zonas).

Fonte: adaptado de ABNT (2015b, p. 55).

APÊNDICE G – TELAS DO PROGRAMA

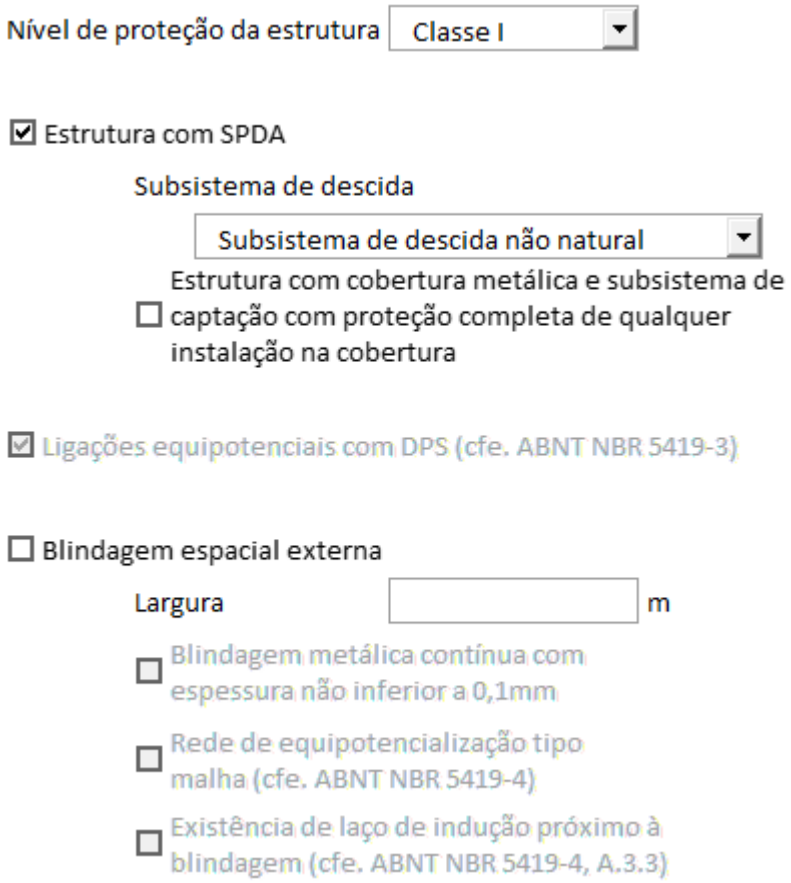
Figura 17 – Tela da planilha de entrada “Estrutura” – parte esquerda.

ESTRUTURA

Densidade de descargas na região	4	descargas/(km².ano)
Dimensões da estrutura		
Comprimento	50	m
Largura	150	m
Altura	10	m
☐ Saliência		m
Localização relativa	Estrutura isolada: nenhum outro objeto nas vizinhanças	
Número de pessoas na estrutura	1000	pessoas
☐ Estrutura fornece serviço ao público		
Tipo de serviço fornecido		
Número de usuários servidos		usuários
☐ Estrutura é e/ou contém patrimônio cultural		
Valor do patrimônio cultural		R$

Fonte: o autor.

Figura 18 – Tela da planilha de entrada “Estrutura” – parte direita.



Fonte: o autor.

Figura 19 – Tela da planilha de entrada “Linha de energia” – parte esquerda.

LINHA DE ENERGIA

Ambiente da linha: Suburbano

Comprimento da linha: 500 m

☐ Desconhecido

Tipo de linha: ○ Aérea ◉ Enterrada

☐ Cabos enterrados e instalados completamente dentro de uma malha de aterramento (cfe. ABNT NBR 5419-4, 5.2)

☑ Linha de energia de Alta Tensão com transformador AT/BT

☐ Neutro multiaterrado

☐ Interfaces isolantes na entrada (cfe. ABNT NBR 5419-4)

Linha blindada: ○ Não ◉ Sim

☑ Blindagem interligada ao mesmo barramento de equipotencialização dos sistemas internos

Resistência da blindagem (Rs): Rs = 1 Ω/km

☐ Proteção contra descargas atmosféricas diretas

Fonte: o autor.

Figura 20 – Tela da planilha de entrada “Linha de energia” – parte direita.

☐ Linha conectada a uma estrutura adjacente

Localização relativa:

Comprimento: m

Largura: m

Altura: m

☐ Saliência: m

☑ Sistema de DPS coordenados (cfe. ABNT NBR 5419-4)

Fonte: o autor.

Figura 21 – Tela da planilha de entrada “Linha de sinal” – parte esquerda.

LINHA DE SINAL

Ambiente da linha: Suburbano

Comprimento da linha: 300 m

☐ Desconhecido

Tipo de linha: ○ Aérea ◉ Enterrada

☐ Cabos enterrados e instalados completamente dentro de uma malha de aterramento (cfe. ABNT NBR 5419-4, 5.2)

☐ Interfaces isolantes na entrada (cfe. ABNT NBR 5419-4)

Linha blindada: ○ Não ◉ Sim

☑ Blindagem interligada ao mesmo barramento de equipotencialização dos sistemas internos

Resistência da blindagem (Rs): 1 Ω/km < Rs = 5 Ω/km

☐ Proteção contra descargas atmosféricas diretas

Fonte: o autor.

Figura 22 – Tela da planilha de entrada “Linha de sinal” – parte direita.

☑ Linha conectada a uma estrutura adjacente

Localização relativa	Estrutura isolada: nenhum outro objeto nas vizinhanças	
Comprimento	20	m
Largura	30	m
Altura	5	m
☐ Saliência		m

☑ Sistema de DPS coordenados (cfe. ABNT NBR 5419-4)

Fonte: o autor.

Figura 23 – Tela da planilha de entrada “Zonas” – parte esquerda.

ZONAS

Adicionar

Remover

Área externa
Bloco de apartamentos
Bloco cirúrgico
UTI

Nome da zona	Bloco cirúrgico	
Uso da zona	Hospital - Bloco Cirúrgico ou UTI	
Tipo de superfície	Linóleo	
Risco de incêndio ou explosão	Incêndio - Baixo	
Perigo especial	Dificuldade de evacuação	
Proteção contra choques por descargas na estrutura	Nenhuma	
Proteção contra choques por descargas nas linhas	Nenhuma	
Providências contra incêndio	Nenhuma	
Número de pessoas na zona	35	pessoas
Tempo de permanência de pessoas na zona	8760	h/ano
Número de usuários servidos pela zona		usuários
Valor do patrimônio cultural na zona		R$

☑ Blindagem espacial interna — Largura 0,1 m

☐ Blindagem metálica contínua com espessura não inferior a 0,1mm

☐ Rede de equipotencialização tipo malha (cfe. ABNT NBR 5419-4:2015)

☐ Existência de laço de indução próximo à blindagem (cfe. ABNT NBR 5419-4, A.3.3)

Fonte: o autor.

Figura 24 – Tela da planilha de entrada “Zonas” – parte direita.

Linha de energia

Roteamento das linhas internas

Preocupação para evitar laços grandes

- ☐ Cabos blindados ou em eletrodutos metálicos
- ☐ Blindagem ligada ao mesmo barramento de equipotencialização dos sistemas internos
- ☐ Sistemas internos independentes ou inexistentes
- ☐ Sistemas internos blindados
- ☐ Existência de equipamentos nos sistemas internos não conformes com a suportabilidade de tensão
- ☐ Equipamentos providos com interfaces isolantes (trafos isolados, conexões óticas, etc.)

Tensão suportável de impulso 2,5 kV

Linha de sinal

Roteamento das linhas internas

Preocupação para evitar quaisquer laços

- ☐ Cabos blindados ou em eletrodutos metálicos
- ☐ Blindagem ligada ao mesmo barramento de equipotencialização dos sistemas internos
- ☐ Sistemas internos independentes ou inexistentes
- ☐ Sistemas internos blindados
- ☐ Existência de equipamentos nos sistemas internos não conformes com a suportabilidade de tensão
- ☐ Equipamentos providos com interfaces isolantes (trafos isolados, conexões óticas, etc.)

Tensão suportável de impulso 1,5 kV

Fonte: o autor.

APÊNDICE H – DADOS DE ENTRADA E VARIÁVEIS AFETADAS

Quadro 63 – Dados de entrada na tela “Estrutura”.

Dado de entrada	Variáveis afetadas
Densidade de descargas na região	N_G
Dimensões da estrutura	L, W, H e H_P
Localização relativa	C_D
Número de pessoas na estrutura	n_t (L1)
Tipo de serviço fornecido	L_F, L_O (L2)
Número de usuários servidos	n_t (L2)
Valor do patrimônio cultural	c_t (L3)
Nível de proteção da estrutura	P_B, P_{SPD} e P_{EB}
Estrutura com SPDA	P_B e P_{TA}[a]
Subsistema de descida	P_B
Estrutura com cobertura metálica	P_B
Ligações equipotenciais com DPS	P_{EB}
Largura da blindagem	w_{m1}
Blindagem metálica contínua	KS_1
Rede de equipotencialização tipo malha	KS_1
Existência de laço de indução próximo à blindagem	KS_1

[a] Afeta P_{TA} quando o subsistema de descida utilizar a estrutura do edifício.
Fonte: o autor.

Quadro 64 – Dados de entrada nas telas “Linha de Energia” e “Linha de Sinal”.

Dado de entrada	Variáveis afetadas
Ambiente da linha	C_E
Comprimento da linha	L_L
Tipo de linha	C_I, C_{LD} e C_{LI}
Linha de energia de alta tensão com transformador AT/BT	C_T
Neutro multiaterrado	C_{LD} e C_{LI}
Interfaces isolantes na entrada	C_{LD} e C_{LI}
Linha blindada	C_{LD}, C_{LI} e P_{LD}
Blindagem interligada ao mesmo barramento de equipotencialização dos sistemas internos	C_{LD}, C_{LI} e P_{LD}
Resistência da blindagem	P_{LD}
Proteção contra descargas atmosféricas diretas	C_{LD} e C_{LI}
Linha conectada a uma estrutura adjacente	C_{DJ} e A_{DJ}
Sistema de DPS coordenados	P_{SPD}

Fonte: o autor.

Quadro 65 – Dados de entrada na tela “Zonas”.

Dado de entrada	Variáveis afetadas
Uso da zona	L_T, L_O (L1); L_F (L1 e L2)
Tipo de superfície	r_t
Risco de incêndio ou explosão	r_f
Perigo especial	h_z
Proteção contra choques por descargas na estrutura	P_{TA}
Proteção contra choques por descargas na linha	P_{TU}
Providências contra incêndio	r_p
Número de pessoas na zona	n_z (L1)
Tempo de permanência na zona	t_z (L1)
Número de usuários servidos pela zona	n_z (L2)
Valor do patrimônio cultural na zona	c_z (L3)
Roteamento das linhas internas	KS_3
Cabos blindados ou em eletrodutos metálicos	KS_3
Blindagem interligada ao mesmo barramento de equipotencialização dos sistemas internos	KS_3
Sistemas internos independentes ou inexistentes	C_{LD} e C_{LI}
Sistemas internos blindados	C_{LD}
Existência de equipamentos nos sistemas internos não conformes com a suportabilidade de tensão	P_M
Equipamentos providos com interfaces isolantes	P_{MS}
Tensão suportável de impulso	U_W
Largura da blindagem	w_{m2}
Blindagem metálica contínua	KS_2
Rede de equipotencialização tipo malha	KS_2
Existência de laço de indução próximo à blindagem	KS_2

Fonte: o autor.