

Metodologia para Avaliação e Recomendação de Dois Circuitos Simples em Vez de Um Circuito Duplo e Afastamento Entre Circuitos

Nota Técnica

nº EPE-DEE-DEA-NT-029/2020-rev0

ONS NT 0034/2020

07 de abril de 2020

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	OBJETIVO	9
3	ABORDAGEM ADOTADA	10
4	ETAPA 1: LEVANTAMENTO DE DADOS	11
4.1	UNIVERSO DA ANÁLISE	11
4.2	DEFINIÇÕES BÁSICAS E CRITÉRIOS ESTATÍSTICOS ADOTADOS	12
4.2.1	<i>DESLIGAMENTO FORÇADO</i>	12
4.2.2	<i>PERTURBAÇÃO</i>	13
4.2.3	<i>ORIGEM INTERNA DA CAUSA DO DESLIGAMENTO</i>	13
4.2.4	<i>CIRCUITOS SIMPLES E CIRCUITOS DUPLOS</i>	13
4.2.5	<i>PERDAS SIMPLES E PERDAS MÚLTIPLAS</i>	13
4.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA	14
4.3.1	<i>ANÁLISE DAS PERTURBAÇÕES</i>	14
4.3.2	<i>ANÁLISE DAS CAUSAS</i>	16
4.3.3	<i>SAZONALIDADE DAS CAUSAS</i>	22
4.3.4	<i>DESLIGAMENTOS CAUSADOS POR CAUSA INDETERMINADA</i>	23
4.3.5	<i>PERTURBAÇÕES ENVOLVENDO CORTE DE CARGA</i>	25
4.3.6	<i>DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E QUEIMADAS</i>	30
4.3.7	<i>ANÁLISE DA DISTÂNCIA ENTRE CIRCUITOS NA OCORRÊNCIA DE PERDAS MÚLTIPLAS</i>	32
4.3.8	<i>CONCLUSÕES DA ANÁLISE ESTATÍSTICA</i>	35
4.4	ANÁLISE DAS REGIÕES COM ALTA INCIDÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E QUEIMADAS	36
4.4.1	<i>CONCLUSÕES DA ANÁLISE DAS REGIÕES COM ALTA INCIDÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E QUEIMADAS</i>	38
4.5	CONCLUSÕES DA ETAPA 1	38
5	ETAPA 2: METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO E RECOMENDAÇÃO	40
5.1	1º PASSO: ANÁLISES ELÉTRICAS	42
5.2	2º PASSO: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE SOCIOAMBIENTAL	43
5.3	3º PASSO: ANÁLISE DE SUSCEPTIBILIDADE À DESLIGAMENTO FORÇADO POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E/OU QUEIMADAS	45
5.4	4º PASSO: ESTUDOS DE DETALHAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	45
5.4.1	<i>ASPECTOS ELÉTRICOS</i>	46

5.4.2	ASPECTOS DE PROJETO.....	48
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	51
7	REFERÊNCIAS	53
8	EQUIPE TÉCNICA	54

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - COMPOSIÇÃO DOS TRECHOS DE LTS DO UNIVERSO ANALISADO	12
FIGURA 2 - ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DAS PERDAS CONSIDERANDO A CONFIGURAÇÃO DOS TRECHOS	15
FIGURA 3 - COMPOSIÇÃO DAS PERDAS EM TRECHOS COM DOIS OU MAIS CIRCUITOS	16
FIGURA 4 - PRINCIPAIS CAUSAS DE PERDAS SIMPLES NOS TRECHOS DE 230 KV	17
FIGURA 5 - PRINCIPAIS CAUSAS DE PERDAS MÚLTIPLAS NOS TRECHOS DE 230 KV.	18
FIGURA 6 - PRINCIPAIS CAUSAS DE PERDAS SIMPLES NOS TRECHOS DE 500 KV	19
FIGURA 7 - PRINCIPAIS CAUSAS DE PERDAS MÚLTIPLAS NOS TRECHOS DE 500 KV	20
FIGURA 8 - EVOLUÇÃO DAS OCORRÊNCIAS DE CAUSA INDETERMINADA AO LONGO DO PERÍODO ANALISADO.....	22
FIGURA 9 - SAZONALIDADE DOS DESLIGAMENTOS PROVOCADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E QUEIMADAS NA REDE BÁSICA - 2014 A OUT/2018	23
FIGURA 10 - SAZONALIDADE DOS DESLIGAMENTOS PROVOCADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E QUEIMADAS NA REDE BÁSICA – 2014 A OUT/2018	24
FIGURA 11 - SAZONALIDADE DOS DESLIGAMENTOS PROVOCADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E QUEIMADAS NA REDE BÁSICA – 2014 E 2015	24
FIGURA 12 - SAZONALIDADE DOS DESLIGAMENTOS PROVOCADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E QUEIMADAS NA REDE BÁSICA – 2016 A OUT/2018	25
FIGURA 13 - REPRESENTATIVIDADE DAS PERTURBAÇÕES COM CORTE DE CARGA	26
FIGURA 14 - DISTRIBUIÇÃO DAS PERTURBAÇÕES QUE PROVOCARAM CORTE DE CARGA, NAS CONDIÇÕES DE CARGA MÍNIMA, LEVE, MÉDIA E PESADA	27
FIGURA 15 - DISTRIBUIÇÃO DAS PRINCIPAIS CAUSAS DAS PERTURBAÇÕES, POR CONDIÇÃO DE CARGA	27
FIGURA 16 - REPRESENTATIVIDADE DAS PERTURBAÇÕES EM TRECHOS COM DOIS OU MAIS CIRCUITOS QUE ENVOLVERAM CORTE DE CARGA.....	28
FIGURA 17 - DISTRIBUIÇÃO DAS PERTURBAÇÕES EM TRECHOS COM DOIS OU MAIS CIRCUITOS QUE PROVOCARAM CORTE DE CARGA, OCORRIDOS NOS PERÍODOS DE CARGA MÍNIMA, LEVE, MÉDIA E PESADA	28
FIGURA 18 - DISTRIBUIÇÃO DAS PRINCIPAIS CAUSAS DAS PERTURBAÇÕES EM TRECHOS COM DOIS OU MAIS CIRCUITOS POR CONDIÇÃO DE CARGA.....	28
FIGURA 19 -REPRESENTATIVIDADE DAS PERTURBAÇÕES QUE CAUSARAM PERDAS MÚLTIPLAS E QUE ENVOLVERAM CORTE DE CARGA.....	29
FIGURA 20 - DISTRIBUIÇÃO DAS PERTURBAÇÕES QUE CAUSARAM PERDAS MÚLTIPLAS E QUE PROVOCARAM CORTE DE CARGA, OCORRIDOS NOS PERÍODOS DE CARGA MÍNIMA, LEVE, MÉDIA E PESADA	29
FIGURA 21 - DISTRIBUIÇÃO DAS PRINCIPAIS CAUSAS ORIGEM DE PERTURBAÇÕES QUE CAUSARAM PERDAS MÚLTIPLAS, POR CONDIÇÃO DE CARGA.....	30
FIGURA 22 – DESTAQUE GEORREFERENCIADO DOS TRECHOS COM MAIORES ÍNDICES DE DESLIGAMENTOS CAUSADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	31

FIGURA 23 – DESTAQUE GEORREFERENCIADO DOS TRECHOS COM MAIORES ÍNDICES DE DESLIGAMENTOS CAUSADOS POR QUEIMADAS.....	31
FIGURA 24 - GEORREFERENCIAMENTO DAS OCORRÊNCIAS DE QUEDA DE TORRE – 2014 A OUT/2018 [6]	32
FIGURA 25 - DISTÂNCIAS OBSERVADAS ENTRE CIRCUITOS PARA PERDAS MÚLTIPLAS CAUSADAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	33
FIGURA 26 - DISTÂNCIAS OBSERVADAS ENTRE CIRCUITOS PARA PERDAS MÚLTIPLAS CAUSADAS POR QUEIMADAS.....	33
FIGURA 27 - DISTÂNCIAS OBSERVADAS ENTRE CIRCUITOS DE TRECHOS COM DOIS OU MAIS CIRCUITOS SIMPLES PARA PERDAS MÚLTIPLAS CAUSADAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	34
FIGURA 28 - DISTÂNCIAS OBSERVADAS ENTRE CIRCUITOS DE TRECHOS COM DOIS OU MAIS CIRCUITOS SIMPLES PARA PERDAS MÚLTIPLAS CAUSADAS POR QUEIMADAS	34
FIGURA 29 – MAPA DE DENSIDADE DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (1998 – 2003).....	37
FIGURA 30 – MAPA DE DENSIDADE DE FOCOS DE CALOR (2002 - 2017)	37
FIGURA 31 – FLUXOGRAMA DECISÓRIO	41

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - CRITÉRIO ADOTADO PARA DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CARGA.....	25
--	----

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, o planejamento da expansão da transmissão da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) optou por recomendar, em algumas situações específicas, dois circuitos simples paralelos, com afastamento mínimo entre cada circuito, em detrimento de soluções com circuito duplo. Essas recomendações visaram prover maior confiabilidade ao sistema, no sentido de evitar ou, ao menos, mitigar a ocorrência de contingências duplas identificadas como de grande impacto sistêmico, as quais poderiam provocar cortes de grandes blocos de carga devido a instabilidades na malha de transmissão.

Recomendações com essas características foram feitas, sobretudo, para os troncos de transmissão que compõem as interligações entre subsistemas, que são os locais do Sistema Interligado Nacional (SIN) com maior potencial de distúrbios de grande magnitude em situações de contingências duplas ou múltiplas.

No entanto, de certa forma essas recomendações implicaram maior complexidade no processo de licenciamento ambiental e de negociação fundiária, que poderiam ser minimizados caso a opção de expansão fosse por uma linha de transmissão em circuito duplo em vez de duas linhas em circuito simples com afastamento mínimo entre circuitos.

Por conseguinte, e em função das dificuldades apresentadas pelas concessionárias de transmissão responsáveis pela implantação dos empreendimentos com esse tipo de característica, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama) apresentou ao Ministério de Minas e Energia (MME) e à Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) questionamentos quanto às justificativas técnicas para a adoção de dois circuitos simples em vez de um circuito duplo nas soluções de planejamento.

O questionamento apresentado pelo órgão ambiental encontra respaldo na Resolução nº 1, de 23 de janeiro de 1986 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), que contém dispositivos tratando da alternativa tecnológica adotada (art. 5º, I; art. 6º, II; art. 9º, II, IV, V e VIII). Por tal motivo, para fins de instrução dos processos de licenciamento, os órgãos licenciadores buscam os elementos necessários no Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA). Durante a elaboração do EIA-RIMA, os empreendedores podem buscar suporte nas análises do relatório de planejamento R1 (viabilidade técnico-econômica e socioambiental) das instalações licitadas, elaborado pela EPE, de modo a justificar a configuração de circuitos recomendada.

Por essa razão, o MME solicitou à EPE e ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) uma avaliação conjunta para o estabelecimento de critério e metodologia para a recomendação de dois circuitos simples com afastamento [1], como forma de fundamentar com objetividade e clareza as condições nas quais a recomendação desse tipo de solução se faz estritamente necessária.

2 OBJETIVO

O objetivo desta Nota Técnica é estabelecer uma metodologia de avaliação e análise, passo a passo, que justifique com objetividade e clareza a recomendação e adoção de dois circuitos simples em detrimento da adoção de circuitos duplos, em situações nas quais é necessária a implantação de dois circuitos simples de mesma classe de tensão interconectados às mesmas subestações terminais, bem como a recomendação de afastamento mínimo entre esses circuitos. Além dessas situações, e em sintonia com o compromisso acordado em [2], o objetivo dessa Nota Técnica também se aplica aos casos particulares dos novos trechos de linha de transmissão oriundos de seccionamentos.

Assim, a metodologia a ser desenvolvida deverá tratar a questão incluindo análises relacionadas aos quatro temas a seguir:

- I. Impactos sobre o Sistema Interligado Nacional (SIN), tais como confiabilidade, disponibilidade e efeitos decorrentes da perda de elementos na rede;
- II. Sensibilidade socioambiental das regiões onde o empreendimento a ser recomendado será implantado;
- III. Suscetibilidade a desligamentos forçados das linhas de transmissão causados por descargas atmosféricas e queimadas, com base em mapeamentos de densidade de descargas e focos de calor, bem como histórico de perturbações na região onde o empreendimento a ser recomendado será implantado; e
- IV. Resiliência das infraestruturas de transmissão de energia, considerando os riscos de desligamentos na região onde o empreendimento a ser recomendado será construído.

3 ABORDAGEM ADOTADA

O presente trabalho encontra-se dividido em duas etapas distintas, a saber:

Etapa 1: consiste no levantamento e tratamento estatístico de dados sobre fatores de riscos ambientais e histórico de perturbações ocorridas no SIN, conforme detalhamento abaixo:

- a) Dados de fatores de riscos ambientais: densidade de descargas atmosféricas, queimadas, ventos extremos e outros que porventura venham a se mostrar relevantes;
- b) Dados históricos de perturbações com desligamentos de linhas de transmissão como consequência, para as diversas regiões do país, com base nas informações disponíveis no Sistema Integrado de Cadastramento de Perturbações - SIPER, do ONS.

Esses dados servem como subsídios para a elaboração da metodologia em questão, trazendo elementos para a correlação entre os fatores ambientais e os riscos de desligamento associados, o que permite diferenciar o desempenho de uma linha de circuito duplo com relação a dois circuitos simples em diferentes localidades, bem como identificar os efeitos de aumento de confiabilidade alcançados a partir do afastamento entre circuitos.

Etapa 2: consiste na elaboração da metodologia de avaliação da necessidade de recomendação de circuitos simples com afastamento em detrimento da solução de circuito duplo, conforme os passos a seguir descritos:

- a) Definição de um processo de avaliação elétrica para determinação do grau de severidade da perda dupla da linha de transmissão (LT) em circuito duplo;
- b) Definição de critérios a serem avaliados para caracterizar regiões de elevada sensibilidade socioambiental;
- c) Definição de um processo de avaliação da susceptibilidade da região de passagem da LT a desligamentos forçados por descargas atmosféricas ou queimadas, os quais auxiliarão na definição da configuração dos circuitos e na necessidade de eventuais reforços de segurança no projeto das linhas de transmissão, nos casos em que a implantação de dois circuitos simples seja inviável;
- d) Definição de um processo de avaliação das situações nas quais serão considerados reforços de projetos nas infraestruturas de transmissão a serem recomendadas como forma de ampliar a segurança elétrica do sistema em avaliação, nos casos em que a implantação de dois circuitos simples seja inviável.

4 ETAPA 1: LEVANTAMENTO DE DADOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma análise estatística de perturbações ocorridas na Rede Básica do Sistema Interligado Nacional – SIN. Além disso, contém uma breve avaliação sobre regiões com maior incidência de descargas atmosféricas e queimadas, fatores que se configuram como os principais causadores de desligamentos forçados em LTs do SIN. Tais análises objetivam subsidiar a elaboração da metodologia de avaliação e recomendação, quando necessário, da implementação de projetos com arranjos de circuitos simples em lugar de circuitos duplos, em situações nas quais são necessários dois circuitos interligando as mesmas subestações terminais.

Serão apresentados dados históricos de perturbações ocorridas no período compreendido entre janeiro de 2014 e outubro de 2018, oriundos dos cadastros de perturbações do Sistema Integrado de Cadastramento de Perturbações – SIPER do ONS, e análise das regiões com alta incidência de descargas atmosféricas e queimadas, proveniente de mapas, em escala nacional, de densidade de descargas atmosféricas e focos de calor.

4.1 Universo da Análise

Foram analisadas 1.115 linhas de transmissão que compõem a Rede Básica nos níveis de tensão de 230, 345, 440 e 500 kV, que encontravam-se em operação no mês de outubro de 2018. Essas 1.115 linhas de transmissão analisadas são compostas por 819 trechos com diferentes arranjos, conforme ilustrado na Figura 1:

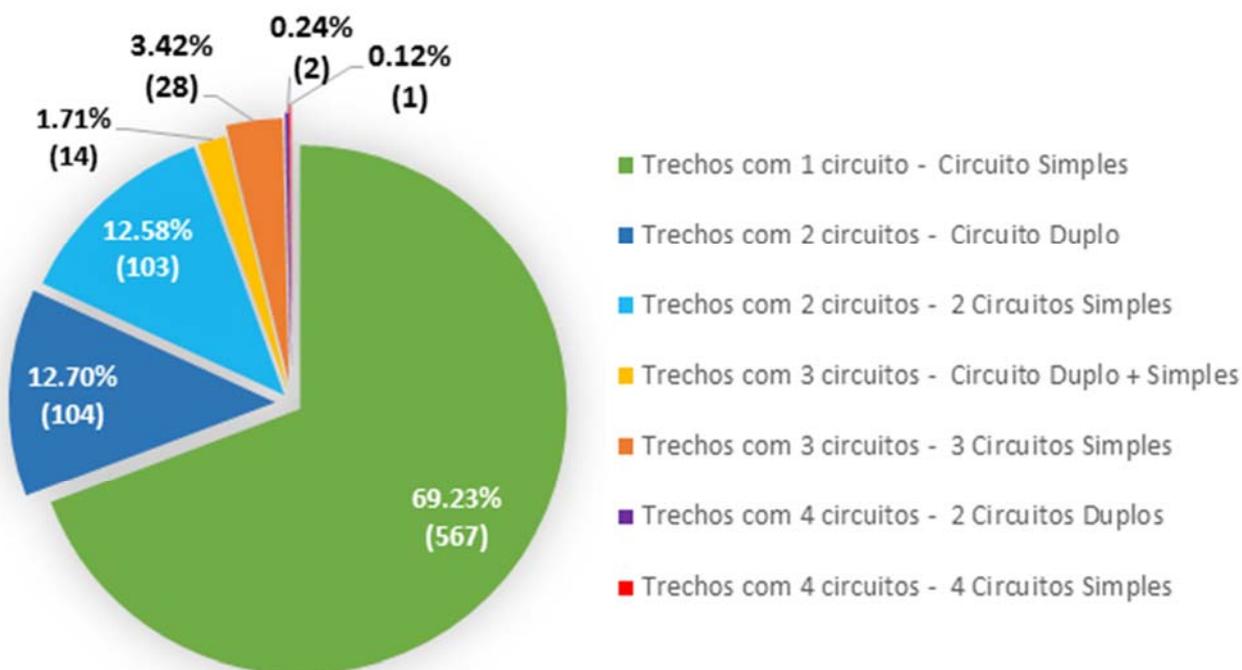


Figura 1 - Composição dos trechos de LTs do universo analisado

Cumpramos ressaltar que foram excluídos deste universo trechos no estado de São Paulo como Centro CTT – Centro CTR C1/C2, Norte – Miguel Reale C1/C2 e Xavantes – Bandeirantes C1/C2/C3. Esses trechos foram excluídos por se tratarem de instalações subterrâneas.

4.2 Definições Básicas e Critérios Estatísticos Adotados

4.2.1 Desligamento forçado

O desligamento forçado se caracteriza pelo ato de retirada de serviço de um componente, em condições não programadas, resultante de falha ou de desligamento de emergência. O desligamento forçado impõe que o equipamento seja desligado automática ou manualmente para evitar riscos à integridade física de pessoas ou do meio ambiente, danos ao equipamento e/ou outras consequências ao sistema elétrico.

No contexto do processo associado ao Submódulo 11.2 dos Procedimentos Rede, também é considerado como forçado o desligamento não programado de caráter indevido, seja ele acidental (sem distúrbio no SIN) ou incorreto (com distúrbio no SIN). Esse conceito é válido tanto para os desligamentos manuais quanto para os automáticos [4].

4.2.2 Perturbação

A perturbação é uma ocorrência no SIN caracterizada pelo desligamento forçado de um ou mais de seus componentes, que acarreta quaisquer das seguintes consequências: corte de carga, desligamento de outros componentes do sistema, danos em equipamentos ou violação de limites operativos [4].

4.2.3 Origem interna da causa do desligamento

A origem da causa do desligamento é classificada como interna quando a causa se relaciona com as partes principais do componente em análise, em geral energizadas, incluindo seus equipamentos terminais (Ex.: isoladores, o lado primário de transformadores de instrumentos, estator, mancal, eixo de um gerador, disjuntores, seccionadoras, etc.) [4].

4.2.4 Circuitos simples e circuitos duplos

São considerados circuitos simples os circuitos de um mesmo trecho que não compartilham uma mesma estrutura, enquanto que no caso dos circuitos duplos há o compartilhamento.

4.2.5 Perdas simples e perdas múltiplas

No contexto deste trabalho, consideram-se perdas simples os desligamentos forçados provocados por uma causa de origem interna, em apenas um circuito de um único trecho, independentemente da quantidade de circuitos que compõem este trecho.

Já para as perdas múltiplas, consideram-se os desligamentos forçados provocados por uma causa de origem interna, em dois ou mais circuitos de um único trecho, com a restrição de que os circuitos estejam desligados ao mesmo tempo, em qualquer instante de tempo dentro do período de duração dos desligamentos.

A seguir estão listados alguns casos para melhor elucidar esses conceitos. Para esses casos, será utilizado como exemplo o trecho Jauru-Vilhena, formado por 3 circuitos em 230 kV, C1, C2 e C3:

- Caso 1 – Desligamento forçado do circuito C1, com religamento do circuito em qualquer instante de tempo após o desligamento: nesse caso, como houve o desligamento apenas de 1 circuito do trecho, portanto, essa perda é classificada como perda simples;

- Caso 2 – Desligamento forçado dos C1 e C2 no mesmo instante de tempo: classifica-se como perda dupla (ou múltipla);
- Caso 3 – Desligamento forçado dos C1, C2 e C3 no mesmo instante de tempo: classifica-se como perda tripla (ou múltipla);
- Caso 4 – Desligamento forçado do C1 e, na sequência, desligamento forçado do C2: neste caso, nota-se que ambos os circuitos C1 e C2 estiveram, em algum instante, desligados ao mesmo tempo, independentemente do início de cada um dos desligamentos. Sendo assim, classifica-se essa perda como perda dupla (ou múltipla);
- Caso 5 – Desligamento forçado do C1; na sequência, desligamento forçado do C2; e ainda, sequencialmente o desligamento do C3: analogamente ao caso anterior, nesse caso, em algum instante de tempo, todos os 3 circuitos estiveram desligados. Sendo assim, classifica-se essa perda como perda tripla (ou múltipla);
- Caso 6 – Desligamento forçado do C1 seguido de religamento do mesmo. Sequencialmente, tem-se um novo desligamento do C1, seguido do desligamento do C2: neste caso, observam-se dois eventos. O primeiro evento é classificado como uma perda simples, e o segundo como uma perda dupla (ou múltipla).

Estes mesmos conceitos apresentados e exemplificados são aplicáveis para a classificação de perdas triplas e quádruplas.

4.3 Análise Estatística

4.3.1 Análise das perturbações

De posse dos dados apresentados na Figura 1 e com base nos conceitos apresentados no item 4.2, foi feita uma análise dos dados de perturbações envolvendo linhas de transmissão da Rede Básica, de causa de origem interna, ocorridas no período compreendido entre janeiro/2014 e outubro/2018.

A Figura 2 ilustra a distribuição das contingências ocorridas por consequência das perturbações na Rede Básica do SIN durante o referido período. Nessa mesma figura, CD corresponde a circuito duplo e CS a circuito simples.

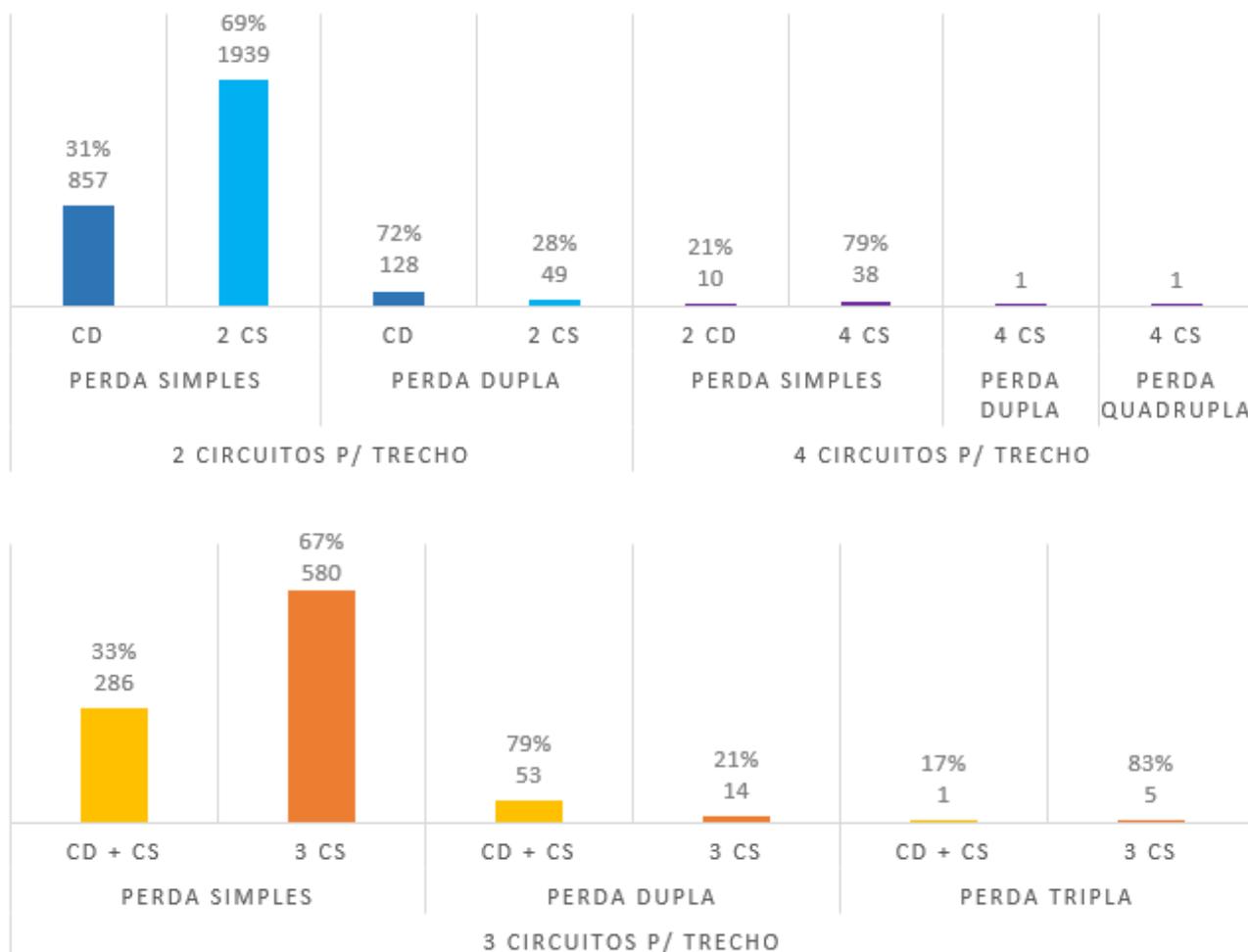


Figura 2 - Análise da distribuição das perdas considerando a configuração dos trechos

Nesta primeira análise, fica evidenciado que os trechos com circuitos duplos estão mais sujeitos às perdas duplas (aproximadamente 75% dos casos), enquanto os trechos formados apenas por dois ou mais circuitos simples estão mais sujeitos às perdas simples (aproximadamente 70% dos casos).

A Figura 3 ilustra a representatividade das perdas duplas em relação às perdas simples, quando analisados apenas os desligamentos em trechos com dois ou mais circuitos. Portanto, neste caso, o universo de linhas de transmissão em questão se refere àquele apresentado na Figura 1, excluindo-se os trechos com apenas um circuito.

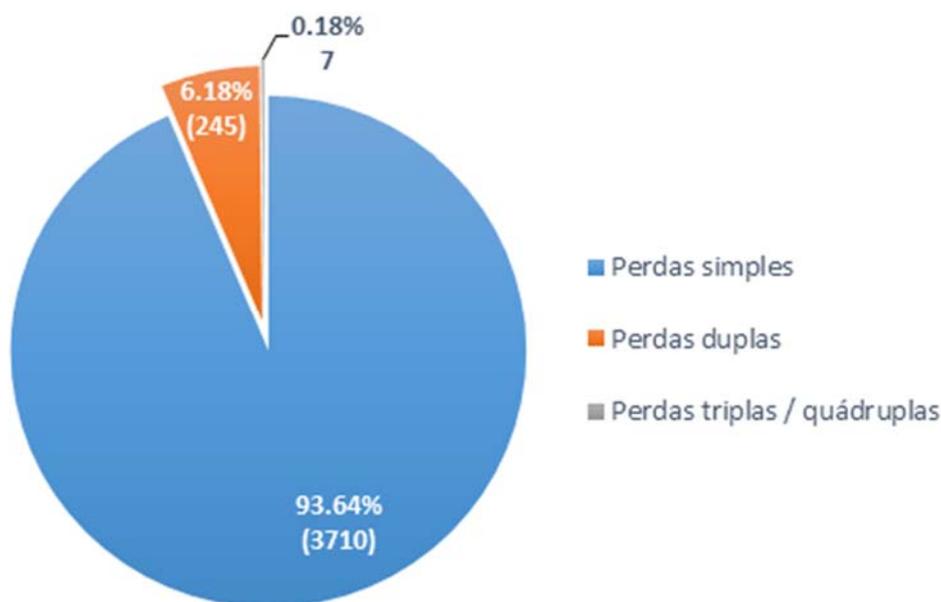


Figura 3 - Composição das perdas em trechos com dois ou mais circuitos

Constata-se, portanto, que perdas duplas são bem menos frequentes (6,18%) do que perdas simples (93,64%) em trechos com dois ou mais circuitos simples.

4.3.2 Análise das causas

Para a análise das principais causas de desligamentos forçados de linhas de transmissão da Rede Básica, foram considerados apenas os níveis de tensão de 230 kV e 500 kV, devido à maior representatividade desses níveis de tensão.

A Figura 4 e a Figura 5 apresentam as principais causas de desligamentos para os trechos de 230 kV, enquanto que a Figura 6 e a Figura 7, para os trechos de 500 kV.

Nota-se que as principais causas que provocaram perdas simples e múltiplas em trechos de linhas de transmissão de 230 kV são as descargas atmosféricas. Nos trechos de 500 kV, as descargas atmosféricas foram predominantes nas perdas duplas de trechos de circuitos duplos e as queimadas nas perdas múltiplas em trechos compostos de 2 ou mais circuitos simples.

CAUSAS DAS PERDAS SIMPLES - 230 KV

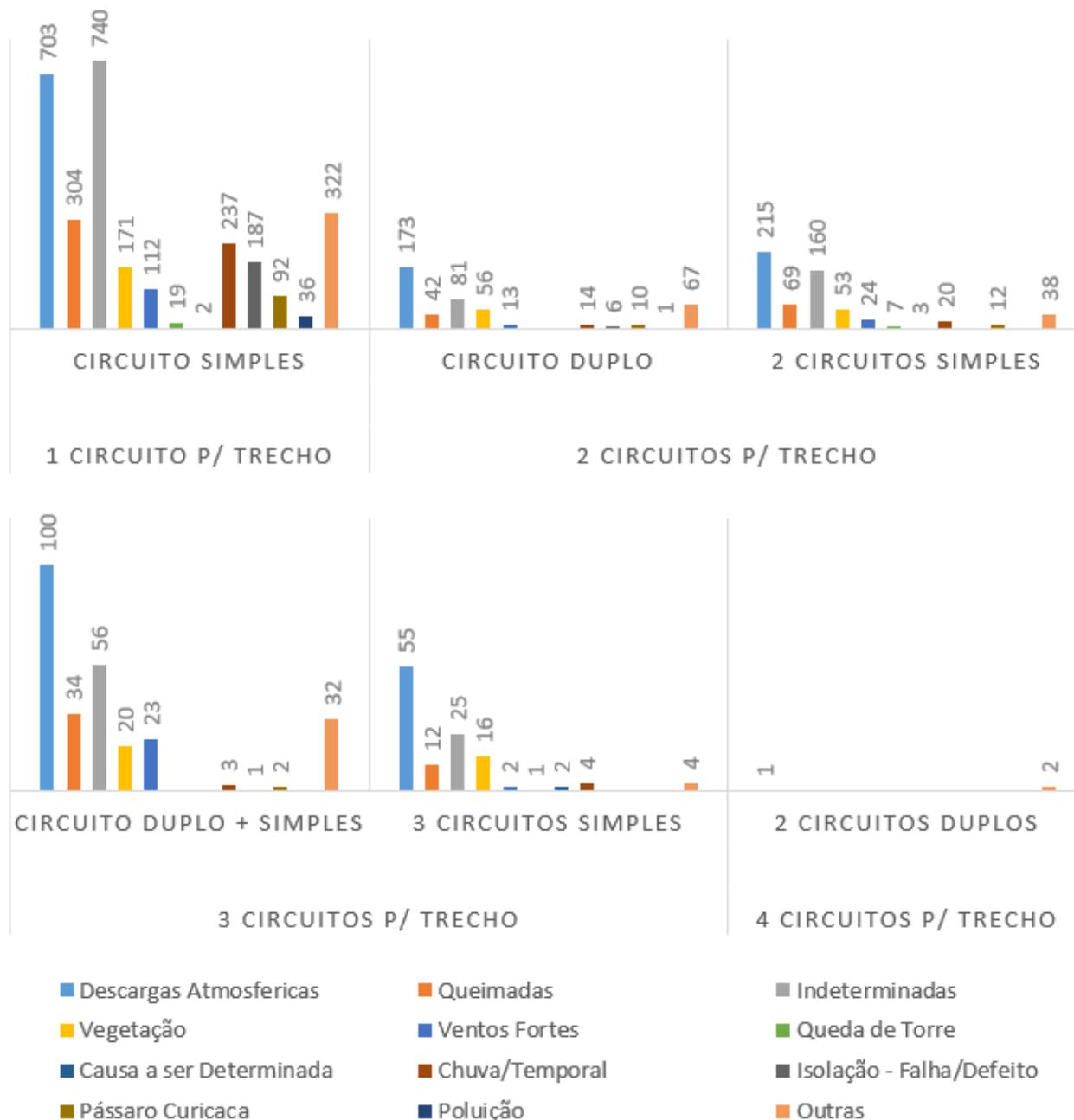


Figura 4 - Principais causas de perdas simples nos trechos de 230 KV

CAUSAS DAS PERDAS MÚLTIPLAS - 230 KV

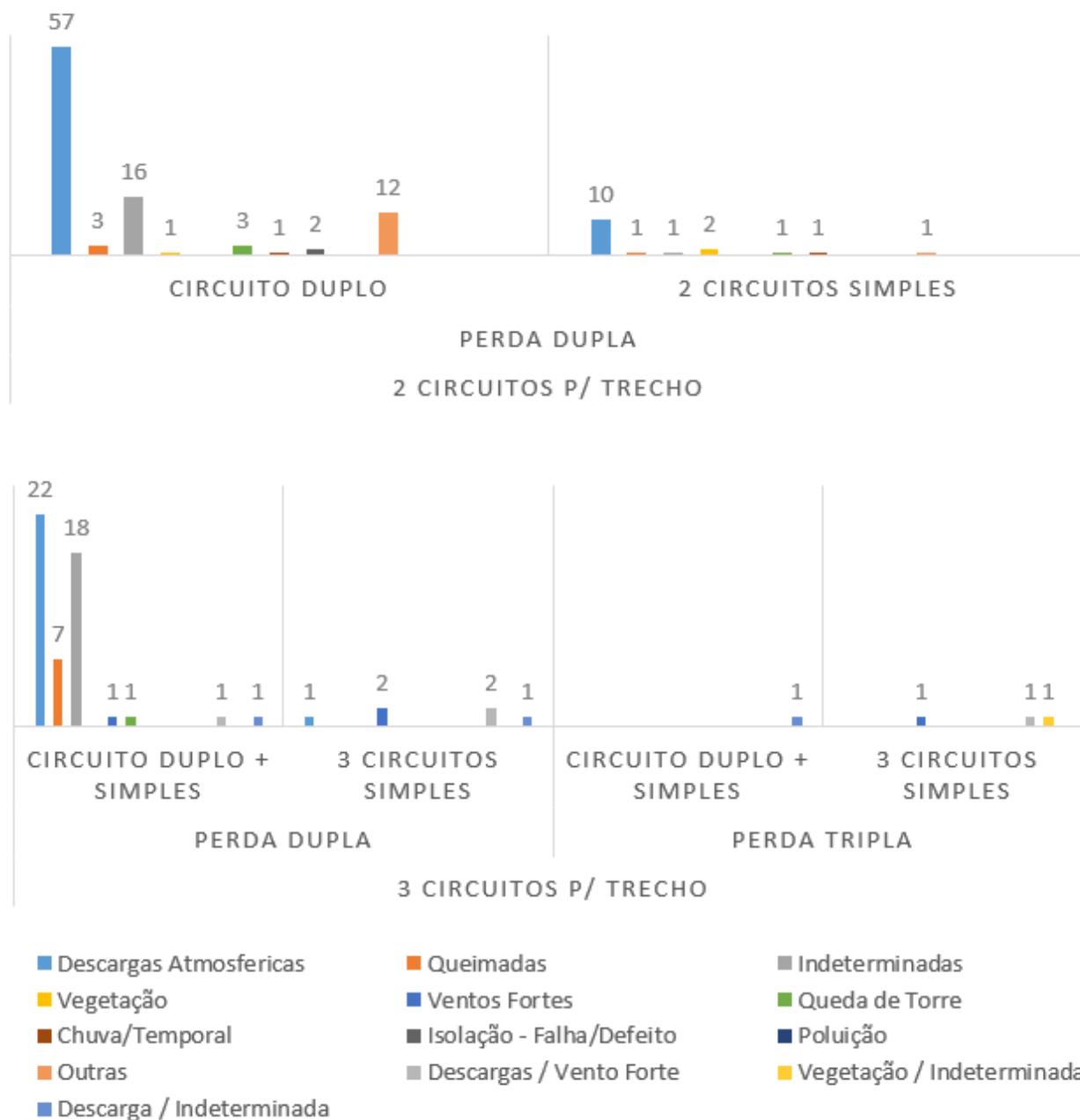


Figura 5 - Principais causas de perdas múltiplas nos trechos de 230 kV.

CAUSAS DAS PERDAS SIMPLES- 500 KV

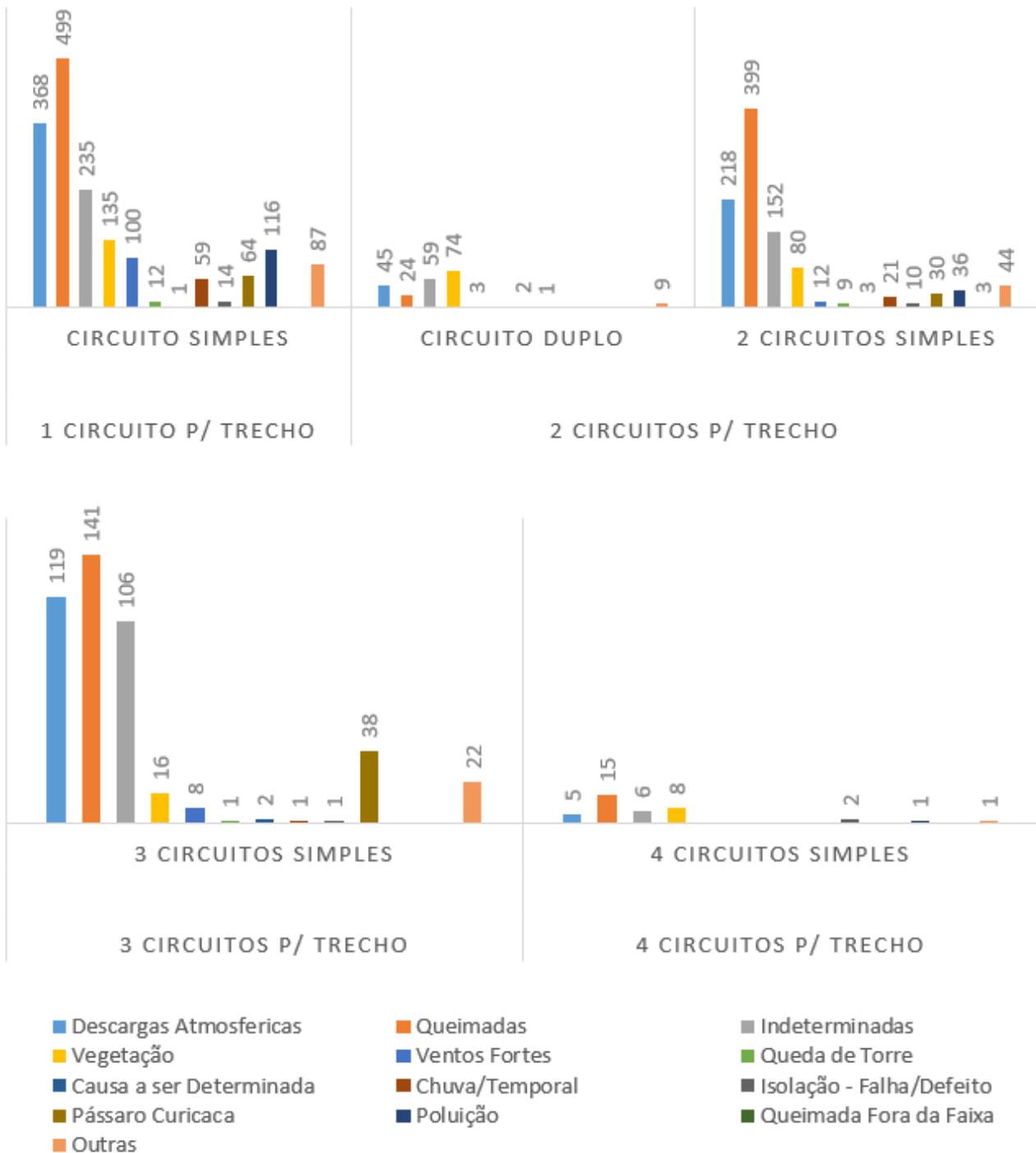


Figura 6 - Principais causas de perdas simples nos trechos de 500 kV

CAUSAS DAS PERDAS MÚLTIPLAS - 500 KV



Figura 7 - Principais causas de perdas múltiplas nos trechos de 500 kV

É possível observar também uma elevada quantidade de desligamentos classificados por “causa indeterminada”, predominantemente nos desligamentos datados de 2014 e 2015. Nos últimos três anos, houve redução gradativa do percentual de participação de causas indeterminadas nos desligamentos de origem interna.

Cumpramos ressaltar que, em 2016, a ANEEL realizou a Campanha de Fiscalização da Classificação de Desligamentos Forçados e Redução de Desligamentos por Falha Humana [1]. Esta campanha tinha como objetivo melhorar os processos de identificação de perturbações e desligamentos forçados nas concessionárias de transmissão e, assim, reduzir o número de desligamentos classificados como causas indeterminadas.

Por meio da Nota técnica nº 031/2016-SFE/ANEEL, de 11 de março de 2016, foram estabelecidas as ações para a execução da Campanha de Fiscalização das transmissoras de energia elétrica no ano de 2016.

Para as transmissoras em geral foram realizadas ações de divulgação dos números setoriais relacionados a desligamentos por falhas humanas e causas indeterminadas, alertando as concessionárias quanto à importância em reduzir esses números.

Para um grupo específico, constituído por 13 transmissoras, além das ações previstas para o grupo geral, realizaram-se reuniões técnicas específicas. Nessas reuniões, a ANEEL solicitou Plano de Melhorias para resolver ou mitigar os desligamentos provocados por falhas humanas e causas indeterminadas.

Toda a metodologia e resultados dessas ações encontram-se no Relatório de Análise Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão Edição 2016 [2]. Como resultado dessa iniciativa, observa-se a significativa redução de perturbações classificadas como causas indeterminadas, redução essa apresentada na Figura 8 a seguir:

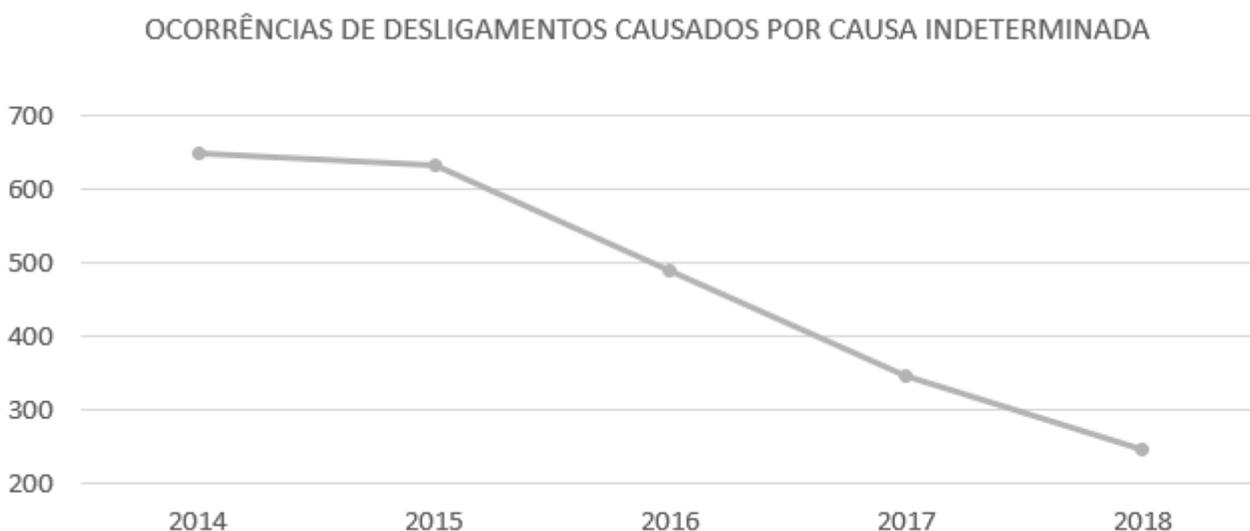


Figura 8 - Evolução das ocorrências de causa indeterminada ao longo do período analisado

4.3.3 Sazonalidade das causas

Com a finalidade de observar a sazonalidade das duas principais causas de desligamentos (descargas atmosféricas e queimadas), foi feita uma análise com os dados acumulados no período em estudo.

Observa-se na Figura 9 uma complementaridade das principais causas de desligamento. No referido gráfico, foram totalizados, por mês, os desligamentos forçados ocorridos no período de janeiro/2014 a outubro/2018. No período chuvoso, compreendido entre os meses de novembro a maio, predomina a ocorrência de desligamentos por descargas atmosféricas, enquanto que no período seco, compreendido entre os meses de junho a outubro, há a predominância das queimadas, conforme esperado.

Pode-se notar um destaque para os desligamentos causados por queimadas no mês de setembro. Isto se deve ao mês de setembro de 2017, onde houve o recorde de desligamentos por queimadas, atingindo um número de 311 desligamentos decorrentes deste tipo de causa.

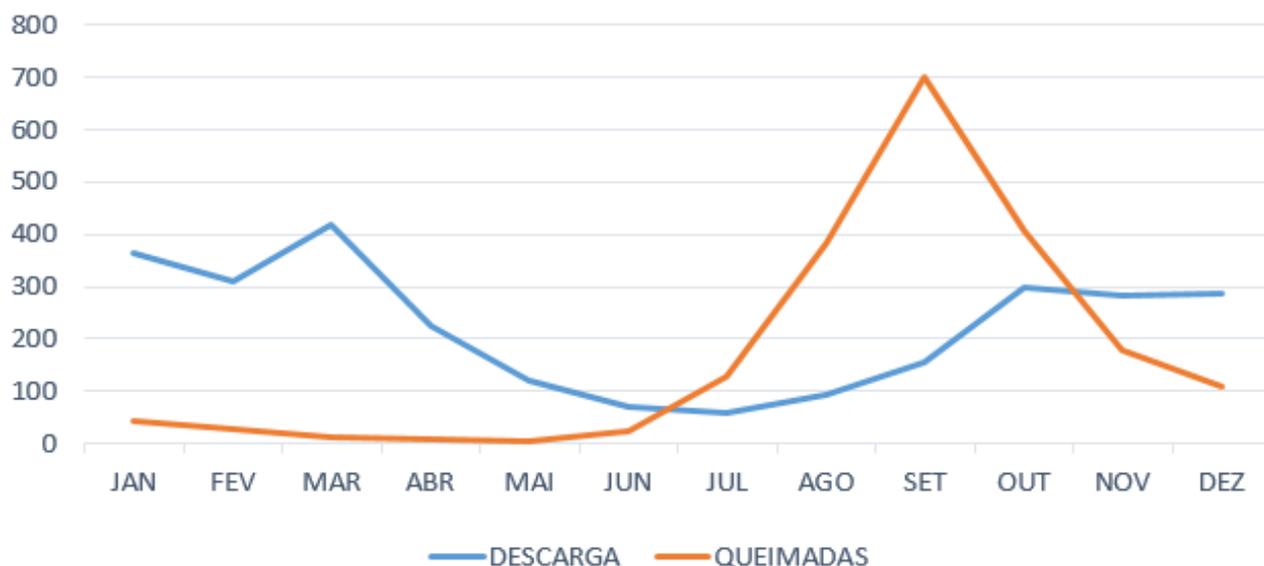


Figura 9 - Sazonalidade dos desligamentos provocados por descargas atmosféricas e queimadas na Rede Básica - 2014 a out/2018

4.3.4 Desligamentos de causas indeterminadas

A fim de investigar os desligamentos provocados por causas indeterminadas, foi feita uma análise desses desligamentos e, ainda, uma comparação com os dados de desligamentos provocados por descargas atmosféricas e queimadas.

Essa análise foi feita em dois períodos: período entre 2014 e 2015; e período entre 2016 a out/2018. Esses períodos foram assim divididos devido à já citada campanha da ANEEL com os agentes para redução de causas indeterminadas. A Figura 10 apresenta os dados acumulados dos dois períodos analisados:

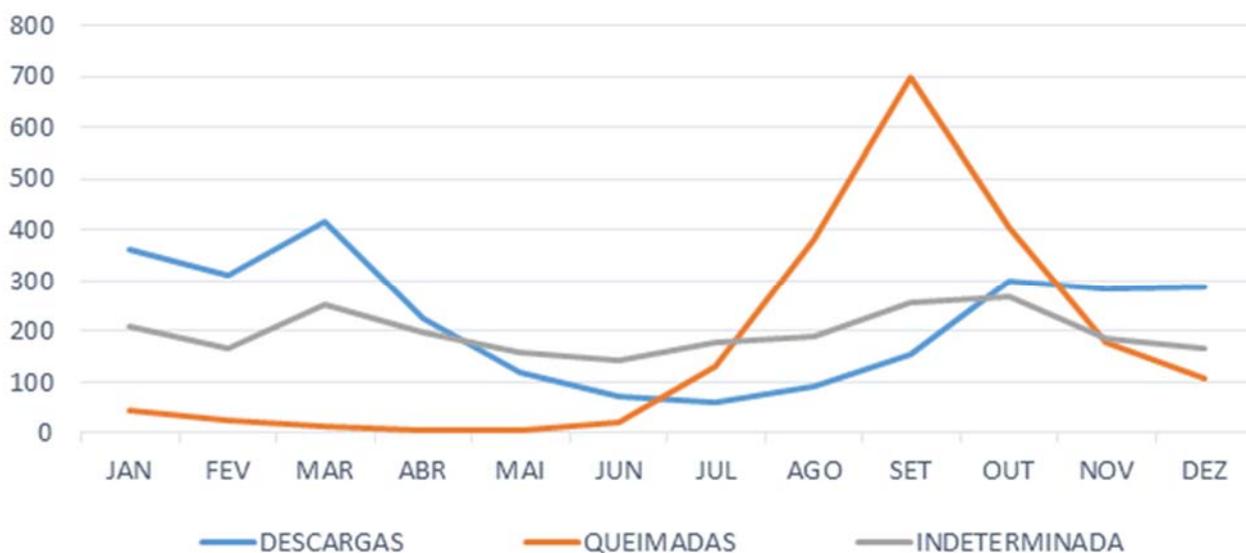


Figura 10 - Sazonalidade dos desligamentos provocados por descargas atmosféricas e queimadas na Rede Básica – 2014 a out/2018

A Figura 11 apresenta os dados dos anos de 2014 e 2015:

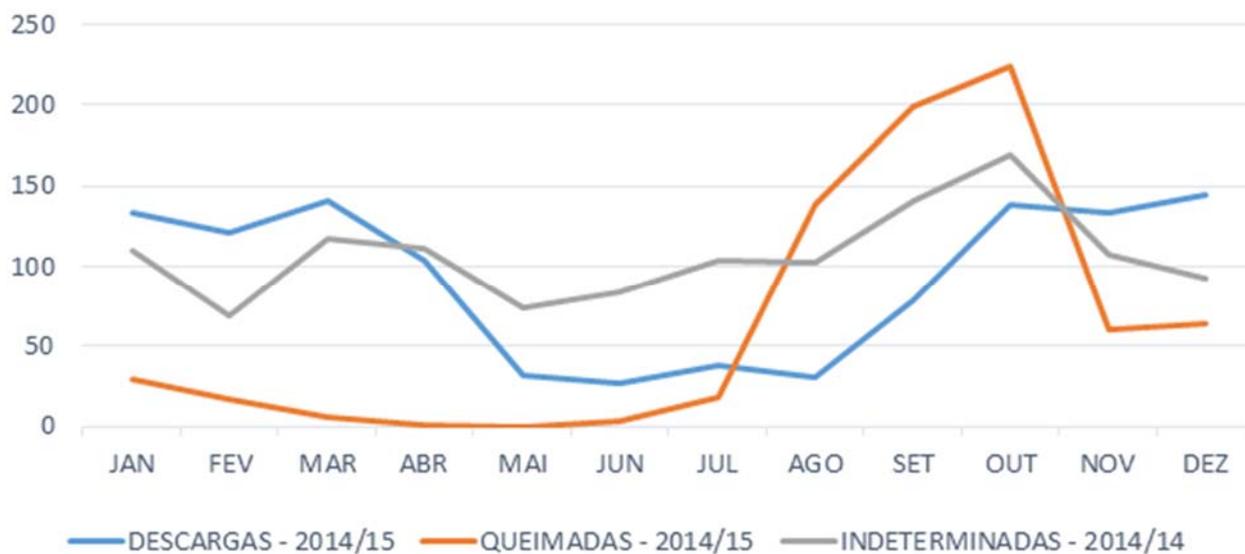


Figura 11 - Sazonalidade dos desligamentos provocados por descargas atmosféricas e queimadas na Rede Básica – 2014 e 2015

A Figura 12 apresenta os dados do período de 2016 a out/2018:

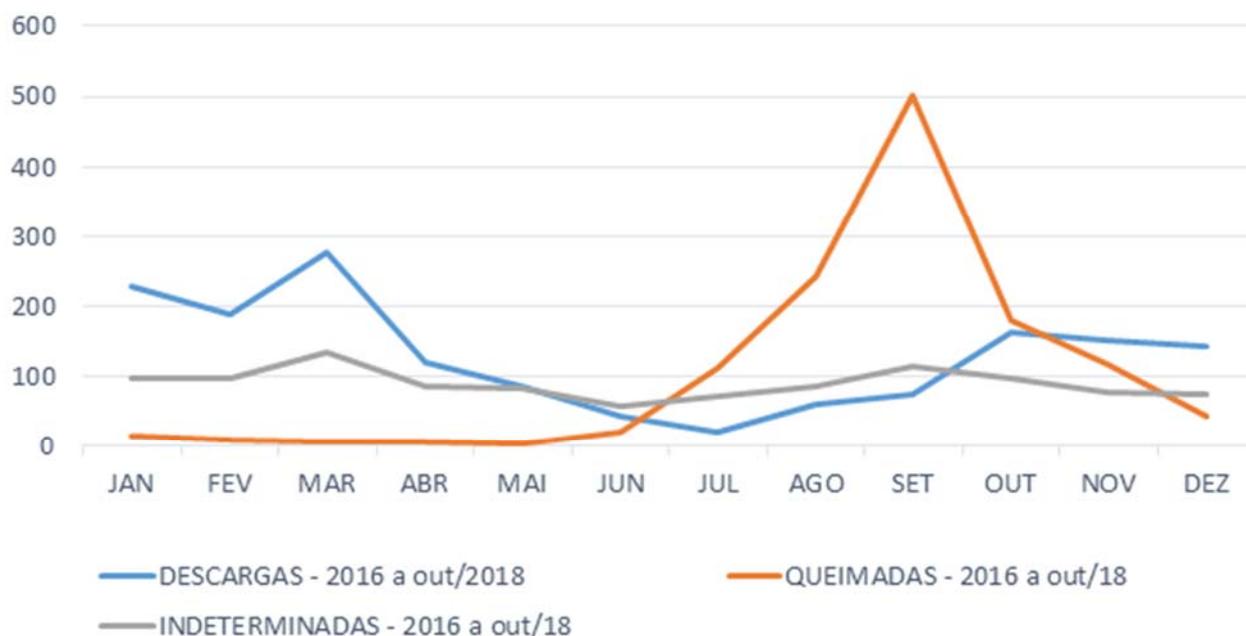


Figura 12 - Sazonalidade dos desligamentos provocados por descargas atmosféricas e queimadas na Rede Básica – 2016 a out/2018

Ao analisar principalmente a Figura 11 e a Figura 12, observa-se uma tendência dos dados de causas indeterminadas acompanharem os dados de descargas atmosféricas.

4.3.5 Perturbações envolvendo corte de carga

O corte de carga caracterizado pela interrupção de suprimento de energia elétrica por meio do desligamento automático ou manual de linhas de transmissão [4], pode trazer grandes prejuízos para a sociedade. Sendo assim, foi feita uma análise mais detalhada das perturbações envolvendo corte de carga no período em questão.

Primeiramente, foi definido um critério para as faixas horárias nas quais estariam inseridas cada uma das condições de carga, a saber: carga mínima, leve, média e pesada. A Tabela 1 apresenta a faixa horária de cada uma destas condições de carga de acordo com o critério adotado:

Tabela 1 - Critério adotado para definição das condições de carga

Condição de Carga	Faixa horária
Mínima	Domingo, a partir das 0h até às 9h
Leve	Segunda a sábado, a partir das 0h até às 9h
Média	Todos os dias, a partir das 9h até às 18h

Pesada

Todos os dias, a partir das 18h até às 0h

Definido o critério para as condições de carga, foram analisados 3 cenários para montagem do universo a ser analisado, os quais são detalhados a seguir.

Perturbações causadas por defeitos internos em linhas de transmissão da Rede Básica, envolvendo corte de carga

Neste cenário, o universo analisado é constituído de todas as perturbações em linhas de transmissão que têm como origem causas internas com corte de carga como consequência. Estão inclusas neste universo as perdas simples e múltiplas em todos os trechos da Rede Básica. A Figura 13 apresenta a representatividade dessas perturbações. Cabe ressaltar que esta pequena representatividade decorre do fato de não estarem inclusas as perturbações cuja origem não seja interna.

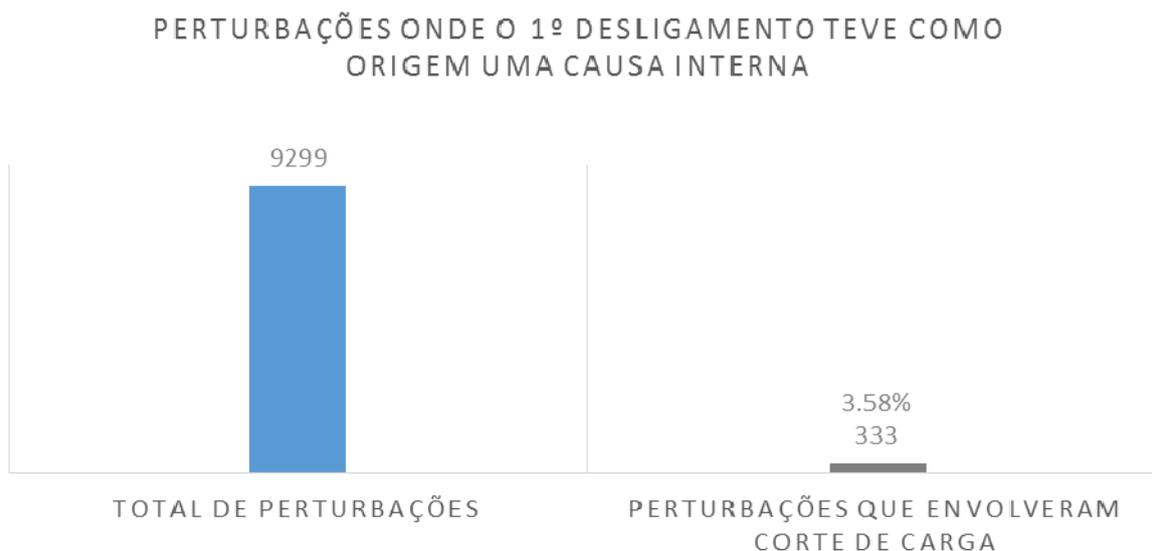


Figura 13 - Representatividade das perturbações com corte de carga

A Figura 14 apresenta a distribuição das 333 perturbações dentro de cada uma das condições de carga definidas na Tabela 1:

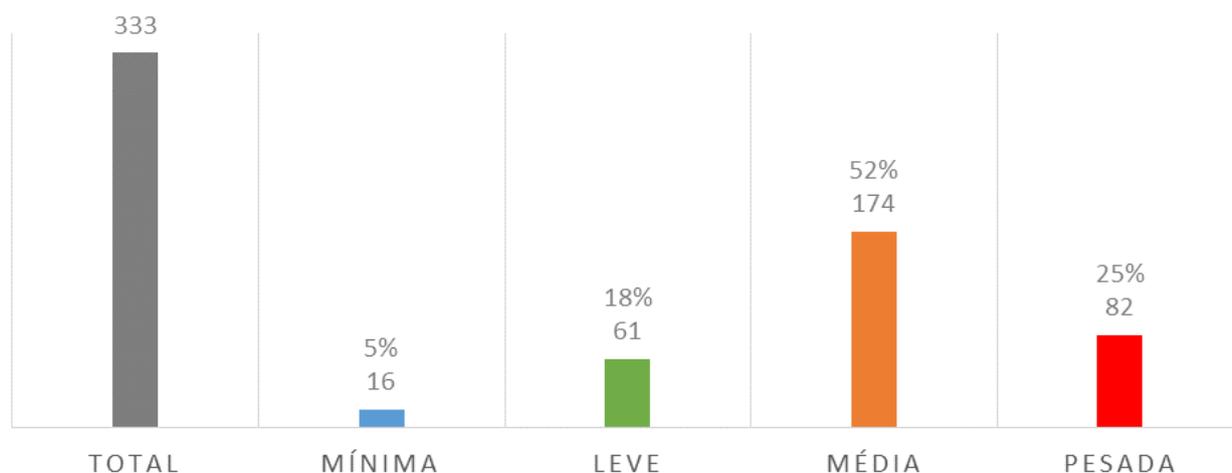


Figura 14 - Distribuição das perturbações que provocaram corte de carga, nas condições de carga mínima, leve, média e pesada

A Figura 15 apresenta a distribuição das principais causas das perturbações que envolveram corte de carga, nas condições de carga do sistema:

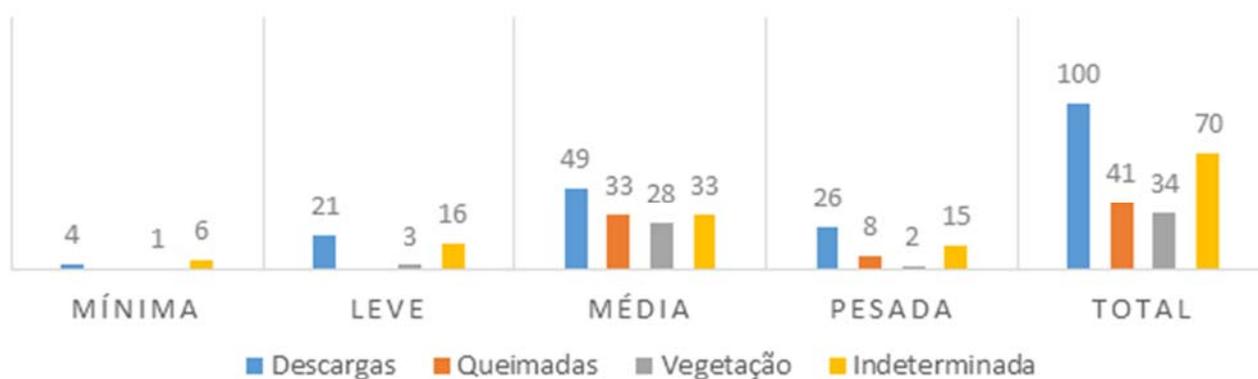


Figura 15 - Distribuição das principais causas das perturbações, por condição de carga

Perturbações apenas em trechos com dois ou mais circuitos, envolvendo corte de carga

Neste cenário, o universo analisado é constituído pelas perturbações de origem interna em trechos de linhas de transmissão formados por dois ou mais circuitos que envolveram corte de carga. Assim sendo, estão inclusas nesse universo todos os tipos de perdas, a saber: simples e múltiplas. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 16, na Figura 17 e na Figura 18 a seguir:

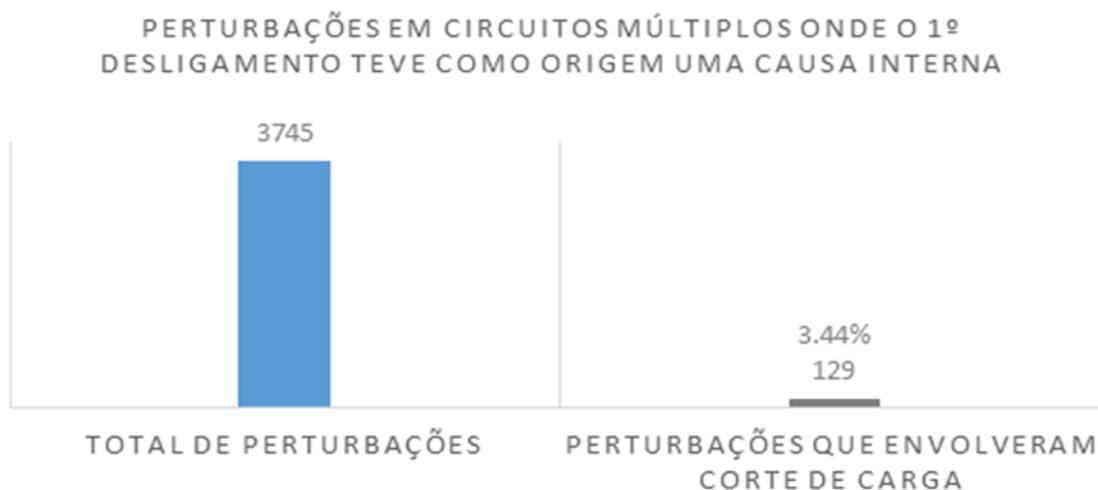


Figura 16 - Representatividade das perturbações em trechos com dois ou mais circuitos que envolveram corte de carga

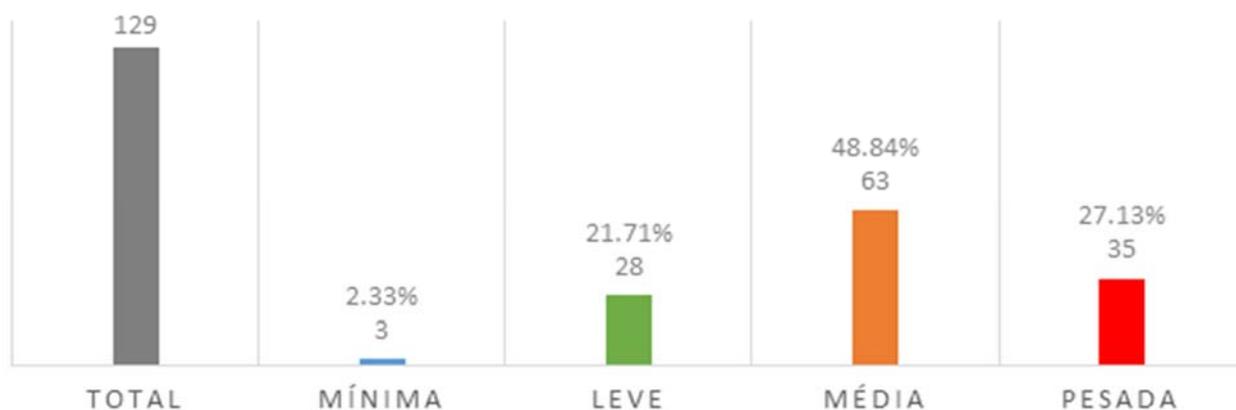


Figura 17 - Distribuição das perturbações em trechos com dois ou mais circuitos que provocaram corte de carga, ocorridos nos períodos de carga mínima, leve, média e pesada



Figura 18 - Distribuição das principais causas das perturbações em trechos com dois ou mais circuitos por condição de carga

Perturbações que ocasionaram perdas múltiplas, envolvendo corte de carga

Neste cenário, o universo analisado é constituído pelas perturbações de origem interna em trechos de linhas de transmissão que ocasionaram apenas perdas múltiplas e envolveram corte de carga. Assim sendo, estão inclusas neste universo apenas as perdas duplas, triplas e quádruplas. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 19, na Figura 20 e na Figura 21 a seguir:

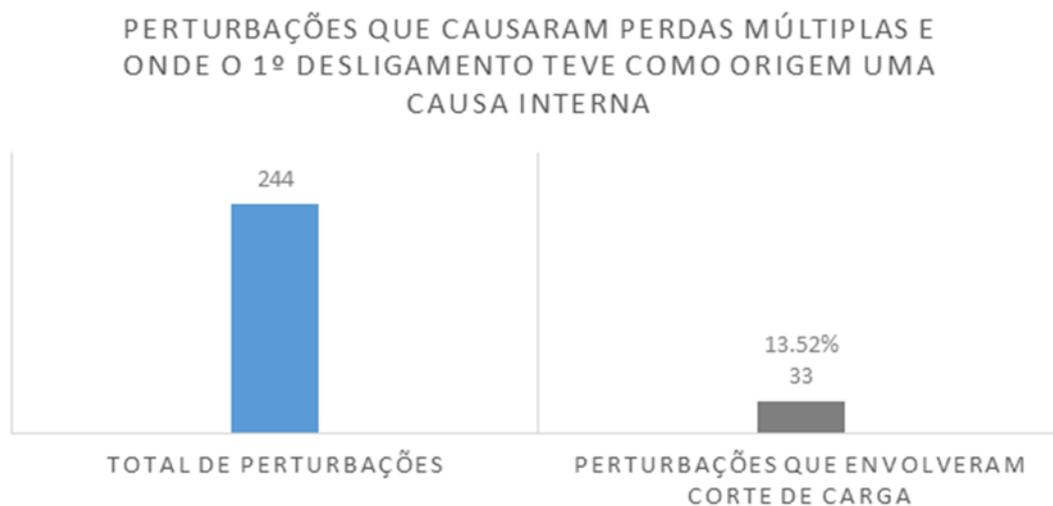


Figura 19 -Representatividade das perturbações que causaram perdas múltiplas e que envolveram corte de carga

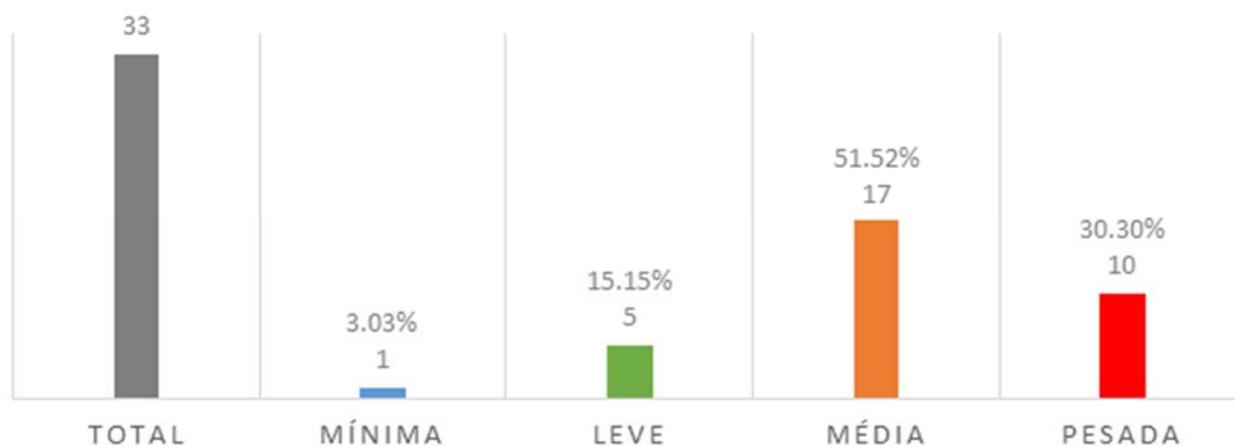


Figura 20 - Distribuição das perturbações que causaram perdas múltiplas e que provocaram corte de carga, ocorridos nos períodos de carga mínima, leve, média e pesada

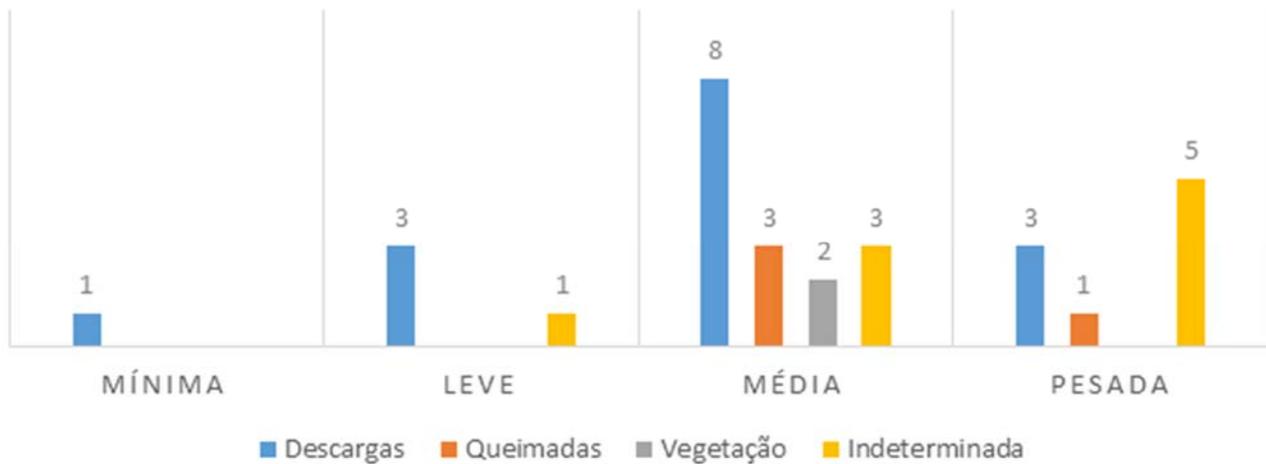


Figura 21 - Distribuição das principais causas origem de perturbações que causaram perdas múltiplas, por condição de carga

4.3.6 Descargas atmosféricas e queimadas

Nas análises de georreferenciamento das principais causas de desligamentos na Rede Básica (descargas atmosféricas e queimadas), observou-se uma concentração de casos de desligamentos causados por descargas atmosféricas na região Centro-Oeste do Brasil e na região da interligação Acre-Rondônia, além de algumas linhas em destaque na interligação Norte - Sudeste. A Figura 22 destaca as linhas de transmissão com as maiores quantidades de desligamentos causados por descargas atmosféricas, incluindo o número de desligamentos por essa causa no período em análise indicado após o nome de cada LT:

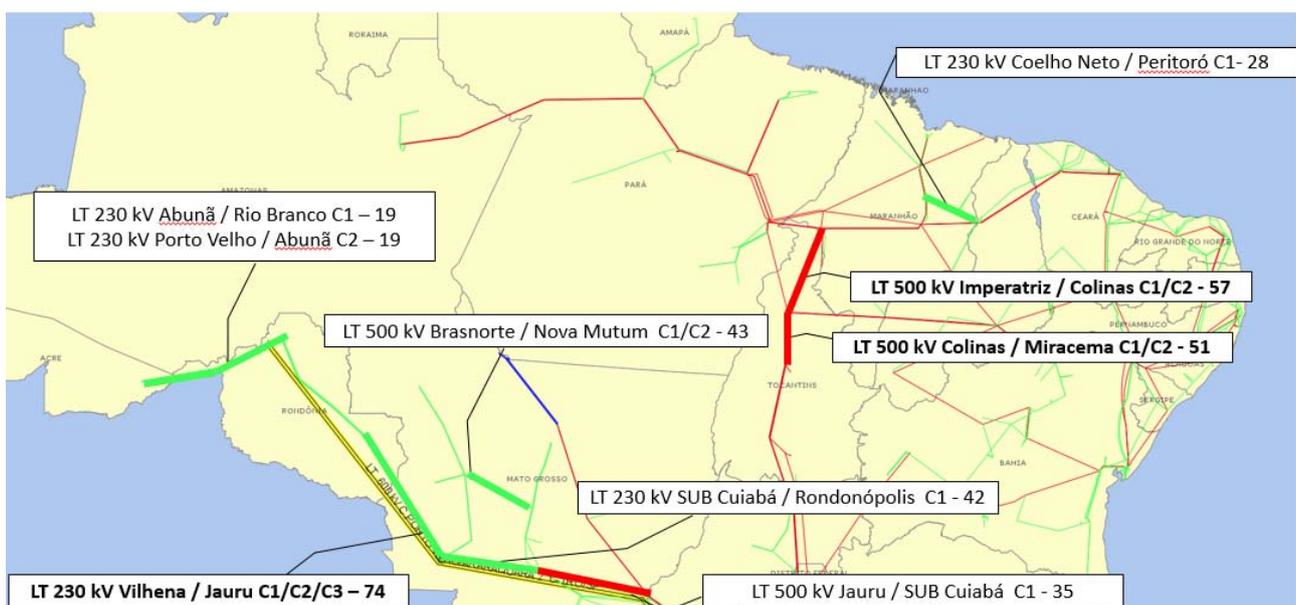


Figura 22 – Destaque georreferenciado dos trechos com maiores índices de desligamentos causados por descargas atmosféricas

Para os desligamentos provocados por queimadas, observou-se uma concentração em trechos de linhas de transmissão da Rede Básica que compõem as interligações Norte – Nordeste e Norte – Sudeste. A Figura 23 destaca as linhas de transmissão com as maiores quantidades de desligamentos causados por queimadas com o número de desligamentos por esta causa no período em análise indicado após o nome da referida linha de transmissão:

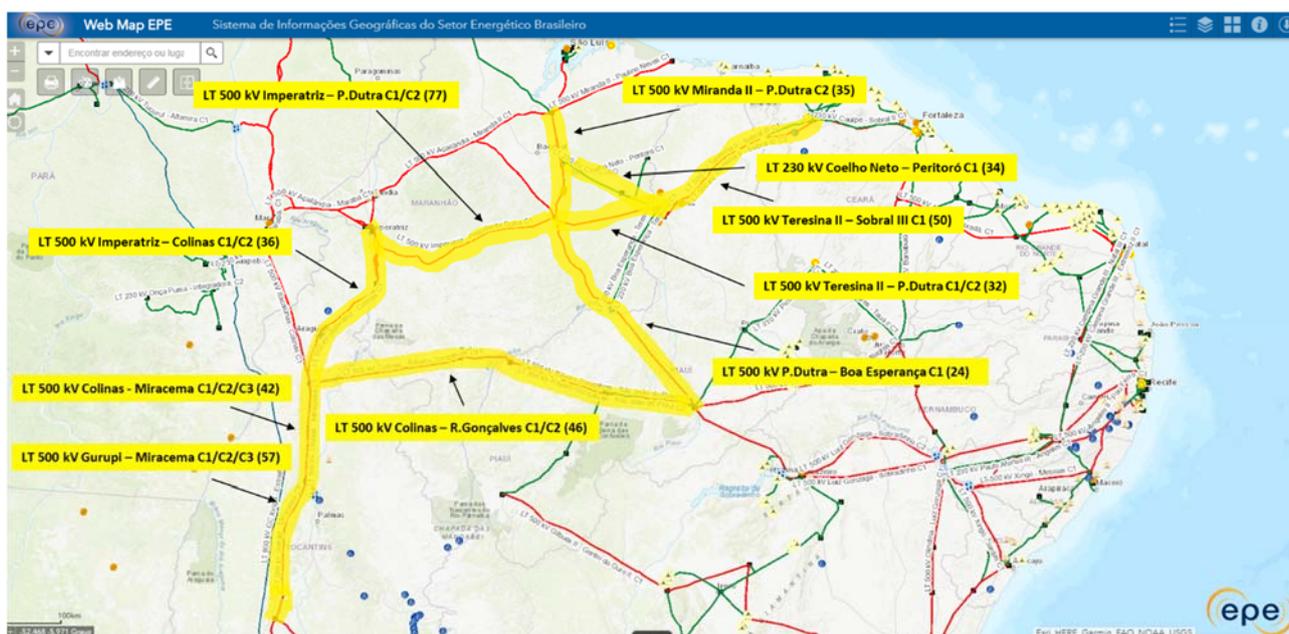


Figura 23 – Destaque georreferenciado dos trechos com maiores índices de desligamentos causados por queimadas

Queda de torre

Além da análise dos desligamentos por descargas atmosféricas e queimadas, foi feita uma análise mais detalhada dos desligamentos causados por quedas de torre. A Figura 24 ilustra todas as ocorrências de quedas de torre na Rede Básica do SIN no período em questão, onde os pontos em preto marcam as posições exatas das ocorrências. Nota-se uma concentração dos casos de queda de torre nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul.

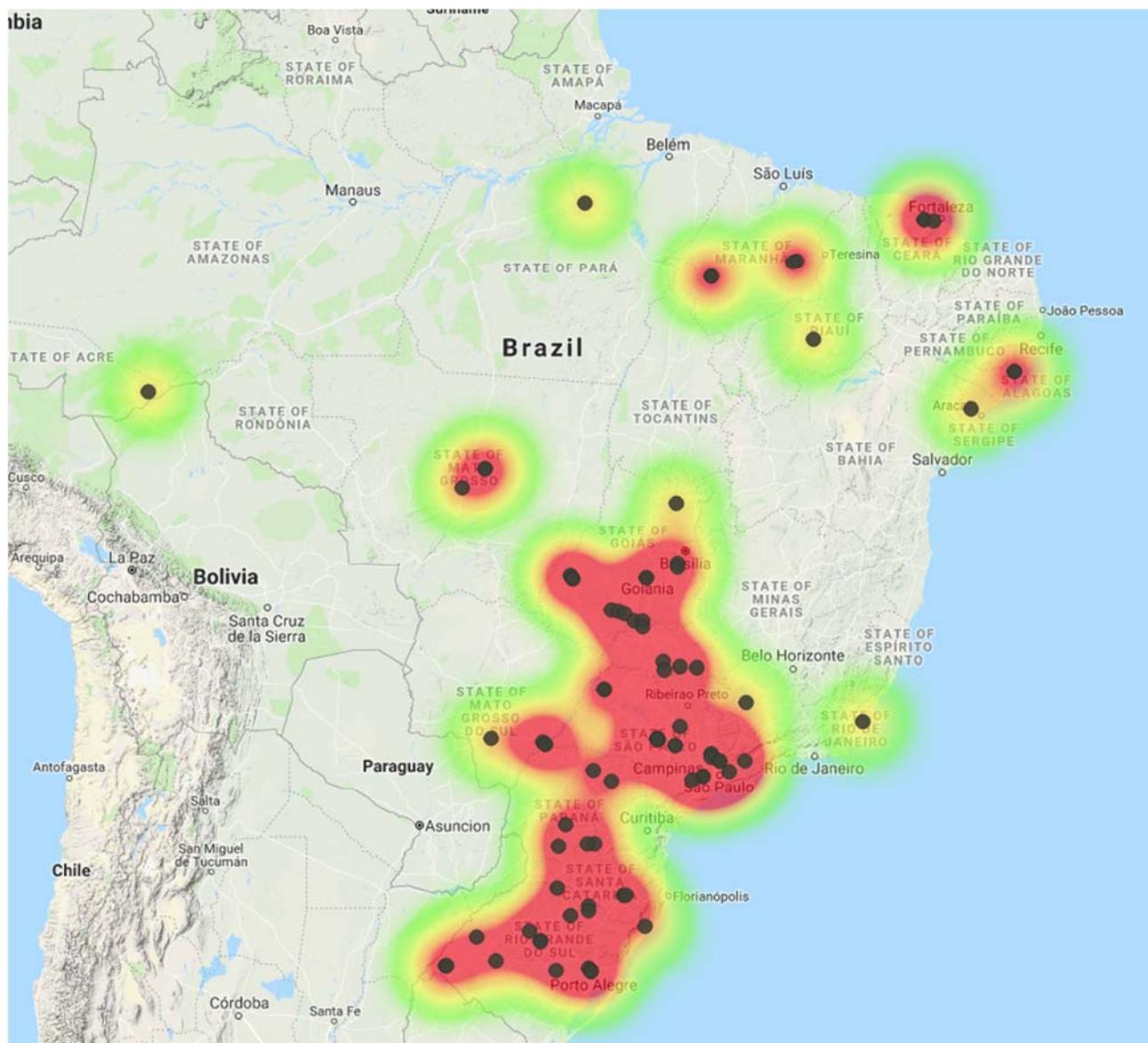


Figura 24 - Georreferenciamento das ocorrências de queda de torre – 2014 a out/2018 [5]

4.3.7 Análise da distância entre circuitos na ocorrência de perdas múltiplas

Análise envolvendo todos os trechos

Com a finalidade de recomendar uma distância mínima segura entre circuitos, foi feita uma análise estatística de todos os desligamentos que envolveram perdas múltiplas (duplas, triplas ou quádruplas) ocorridas de janeiro/2014 a outubro/2018. Foram consideradas nessa análise os desligamentos internos em linhas de transmissão da Rede Básica, causados por descargas

atmosféricas e queimadas, em trechos com dois ou mais circuitos formados apenas por arranjos de circuitos simples, de circuitos duplos e de arranjos mistos considerando circuitos simples e duplos.

A Figura 25 e a Figura 26 ilustram os resultados obtidos, onde no eixo x tem-se o número de eventos analisados, e no eixo y a distância observada entre os circuitos do trecho, medida no ponto de defeito do referido evento:

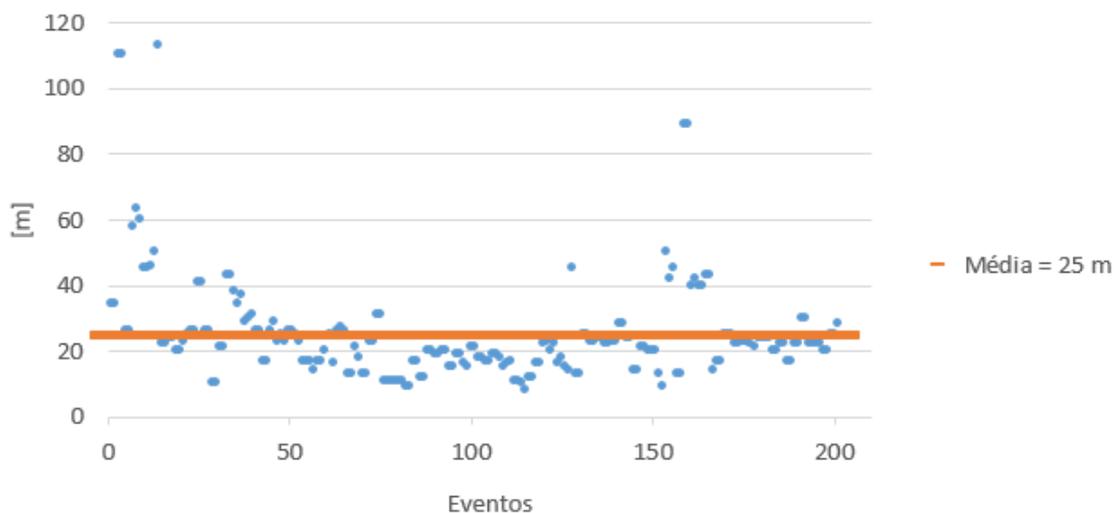


Figura 25 - Distâncias observadas entre circuitos para perdas múltiplas causadas por descargas atmosféricas

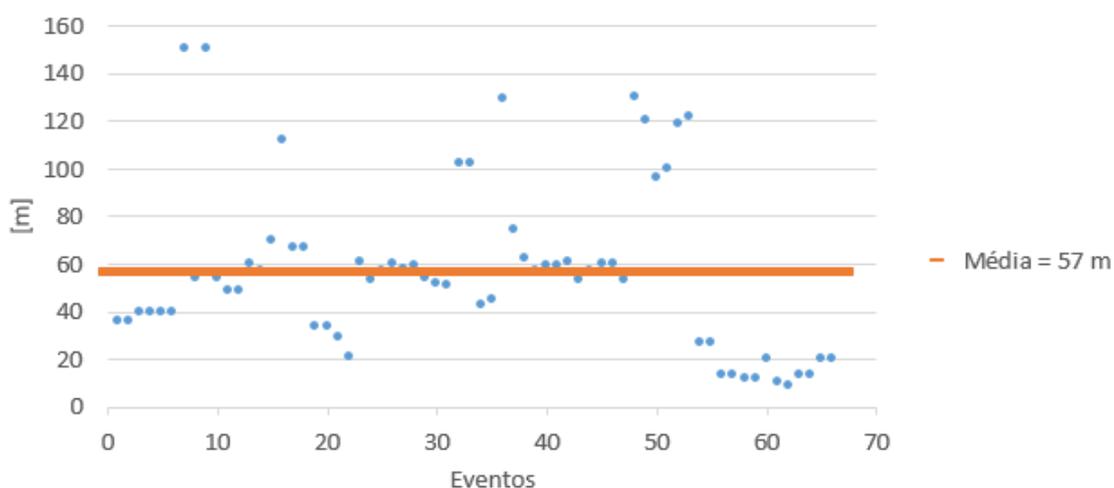


Figura 26 - Distâncias observadas entre circuitos para perdas múltiplas causadas por queimadas

Análise envolvendo apenas os trechos de circuitos simples

Nesta abordagem, foram considerados apenas casos de perdas múltiplas em trechos com dois ou mais circuitos formados somente por arranjos de circuitos simples.

É importante notar a redução na quantidade de eventos causados por descargas atmosféricas e causa indeterminada com relação à análise anterior, o que reforça a ideia de que trechos a circuitos simples em vez de circuitos duplos são menos sujeitos a perdas múltiplas.

As Figura 27 e Figura 28 apresentam os resultados obtidos:

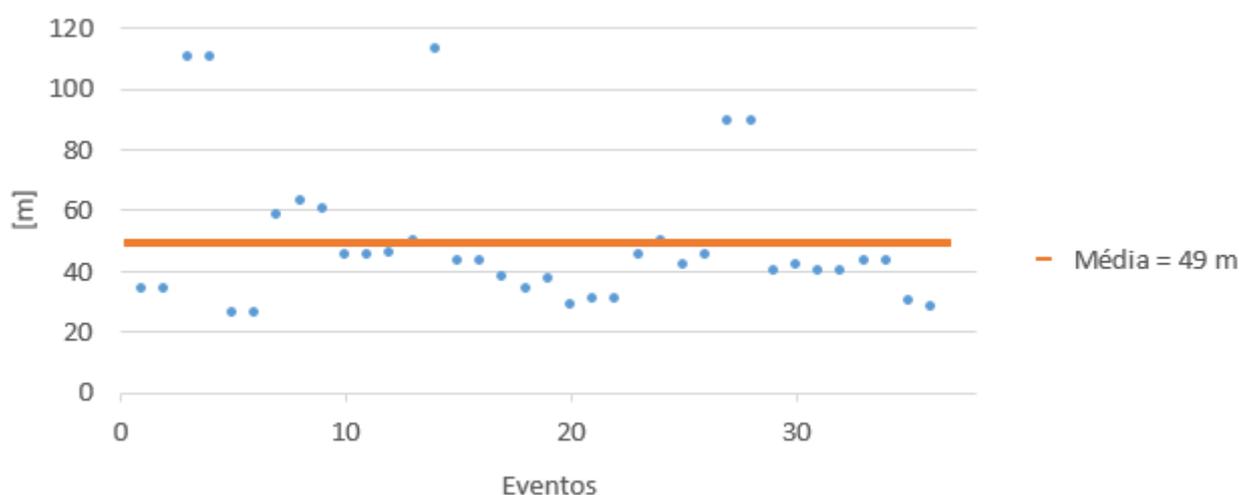


Figura 27 - Distâncias observadas entre circuitos de trechos com dois ou mais circuitos simples para perdas múltiplas causadas por descargas atmosféricas

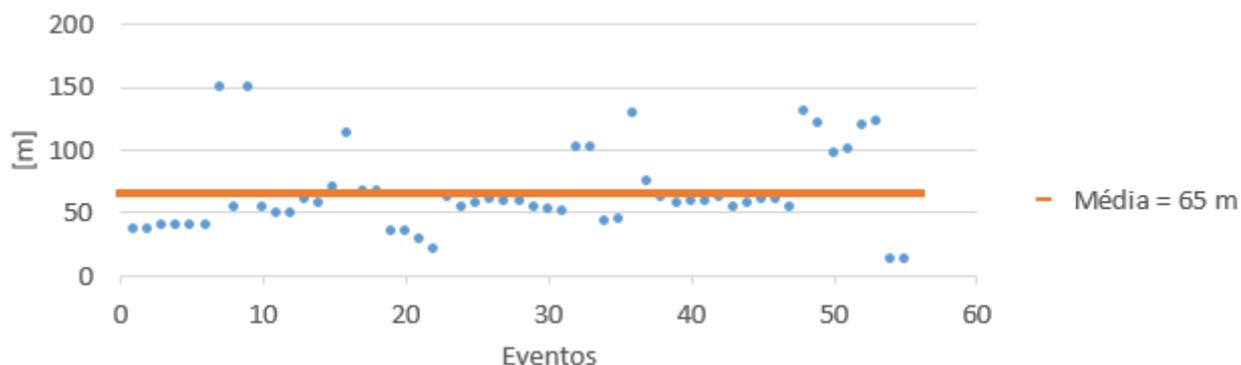


Figura 28 - Distâncias observadas entre circuitos de trechos com dois ou mais circuitos simples para perdas múltiplas causadas por queimadas

4.3.8 Conclusões da análise estatística

Este capítulo apresentou o levantamento estatístico dos dados de configuração dos trechos e dados de perturbações em linhas de transmissão da Rede Básica, por meio do qual chegou-se às seguintes conclusões:

- a) A Rede Básica é composta por aproximadamente 70% de trechos com apenas um circuito, 26% de trechos com dois circuitos, e 4% de trechos com 3 ou 4 circuitos. Dentre os trechos com 2 circuitos, os circuitos simples e duplos respondem pelo mesmo percentual.
- b) Pode-se observar que em trechos com 2 ou mais circuitos, os circuitos que dividem a mesma estrutura estão mais sujeitos a perdas duplas do que a perdas simples, com o percentual de aproximadamente 75% de ocorrências de perdas duplas em circuitos que dividem a mesma estrutura, contra aproximadamente 25% de ocorrências de perdas duplas em circuitos em estruturas separadas. Esse fato evidencia a necessidade de um tratamento diferenciado, quando o impacto da perda dupla causar problemas graves ao desempenho do SIN.
- c) As maiores causas de desligamentos forçados em linhas de transmissão na Rede Básica são descargas atmosféricas e queimadas, sendo evidenciado que os circuitos de 230 kV estão mais sujeitos às descargas atmosféricas, e nos circuitos de 500 kV as descargas atmosféricas são predominantes nas perdas duplas de trechos de circuitos duplos e as queimadas nas perdas múltiplas em trechos compostos de 2 ou mais circuitos simples.
- d) Há uma sazonalidade complementar entre as causas de desligamentos em função de descargas atmosféricas e queimadas. As descargas atmosféricas são a causa principal no período compreendido entre janeiro e abril, e entre outubro e dezembro. Por outro lado, as queimadas tornam-se a principal causa no período compreendido entre julho e outubro.
- e) Foi observado um número elevado de desligamentos causados por queimadas nos trechos que compõem as interligações Norte/Sudeste e Norte/Nordeste.
- f) Ao analisar as distâncias entre trechos com dois ou mais circuitos, formados apenas por dois ou mais circuitos simples, nota-se que a distância de afastamento entre os circuitos destes trechos no ponto de defeito estão em uma faixa média de 50 a 70 m, a depender da causa do desligamento, contudo, não ultrapassam os 150 m.

- g) Dessa forma, considerando a possibilidade de desvios do espaço amostral considerado nas análises, nos casos em que for identificada a necessidade de minimização do risco de perdas múltiplas, indica-se, de forma conservadora, a distância mínima de 200 m de afastamento entre os circuitos no caso de descargas atmosféricas e de 500 m de afastamento no caso de queimadas.

4.4 Análise das regiões com alta incidência de descargas atmosféricas e queimadas

Conforme análise estatística apresentada no item 4.3, as descargas atmosféricas e queimadas figuram como as principais causas de perdas simples e múltiplas.

Os desligamentos de LTs ocasionados pela incidência direta de descargas atmosféricas se devem essencialmente a dois tipos de mecanismos: a descarga disruptiva no isolamento (*flashover*) e a descarga disruptiva de retorno (*backflashover*). Ainda, o desligamento pode ocorrer devido à tensão induzida nas LTs por conta de uma descarga atmosférica que ocorra no seu entorno, porém esse tipo de evento é menos frequente.

Os desligamentos de LTs ocasionados por queimadas se devem a curtos-circuitos fase-fase ou fase-terra, originados pela redução do dielétrico (isolante) do ar entre os condutores e o solo.

O resultado do levantamento das regiões com alta incidência de descargas e queimadas foi obtido a partir dos seguintes produtos:

- i) Mapa em escala nacional de densidade de descargas atmosféricas, a partir de dados públicos disponibilizados no *site* do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O mapa de densidade de descargas (descargas/km²/ano) indica as regiões do país onde há maior ocorrência de descargas atmosféricas.
- ii) Mapa em escala nacional de densidade de focos de calor, a partir de dados públicos disponibilizados no site do INPE, por meio do Banco de Dados de Queimadas, que apresenta focos de queimadas e incêndios florestais detectados em imagens de satélites. O mapa de densidade de focos de calor (focos de calor/km²/ano) indica as regiões do país onde há maior ocorrência de queimadas e incêndios florestais.

Os mapas a seguir apresentam o resultado desse levantamento.

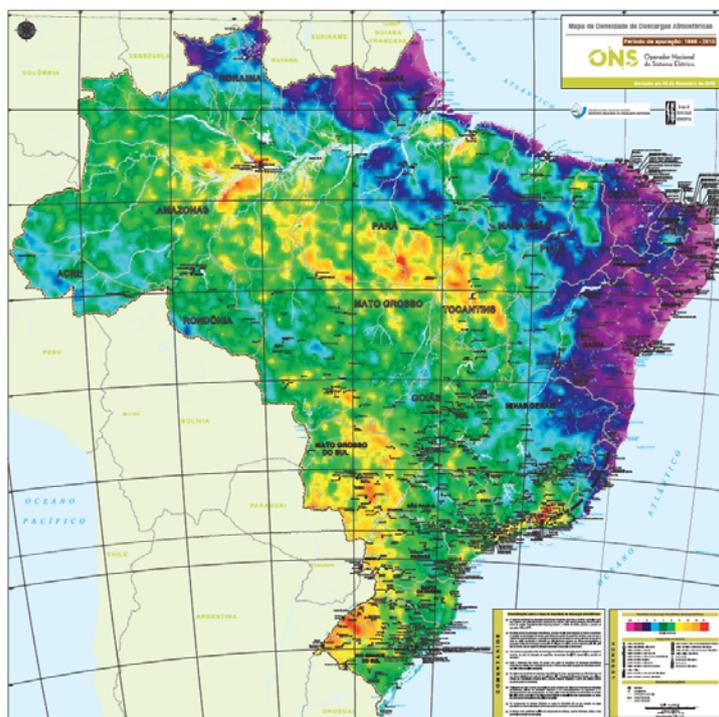


Figura 29 – Mapa de densidade de descargas atmosféricas (1998 – 2003)

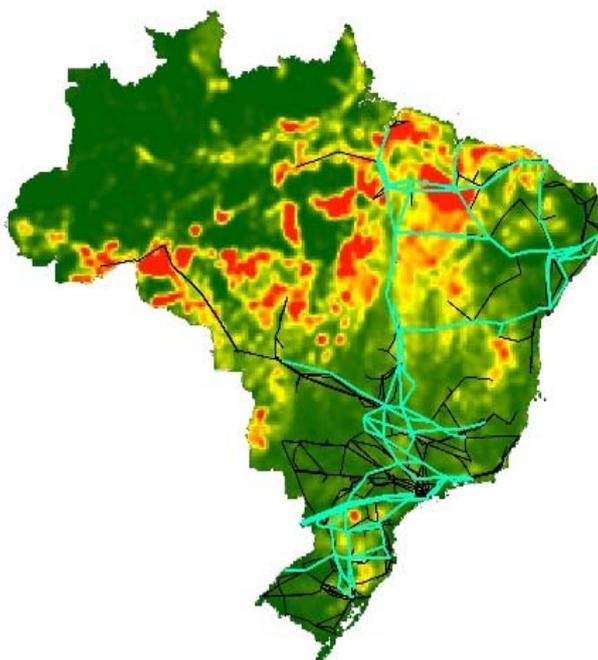


Figura 30 – Mapa de densidade de focos de calor (2002 - 2017)

4.4.1 Conclusões da análise das regiões com alta incidência de descargas atmosféricas e queimadas

Conforme pode ser observado por meio das figuras 29 e 30, de forma geral regiões entre o Centro-Oeste e o Norte brasileiro apresentam conjuntamente maiores suscetibilidades a eventos de descargas atmosféricas e queimadas, com destaque para os estados de Tocantins, Mato Grosso e trecho Sul do Pará. Considerando somente as descargas atmosféricas, observa-se que a porção oeste da região Sul do Brasil, porção Sul de Mato Grosso do Sul e áreas na divisa dos estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais e São Paulo também apresentaram grande incidência de descargas durante o período considerado - 1998 a 2003 (Figura 28). Analisando somente as queimadas, verifica-se que, além das regiões entre o Centro-Oeste e o Norte, há grande incidência de focos de calor em estados do Nordeste, áreas do interior da Bahia e de São Paulo. Destaca-se que os mapas apresentados encontram-se em escala nacional e que estudos mais detalhados podem ser utilizados para avaliação da susceptibilidade à queimadas e descargas atmosféricas.

4.5 Conclusões da ETAPA 1

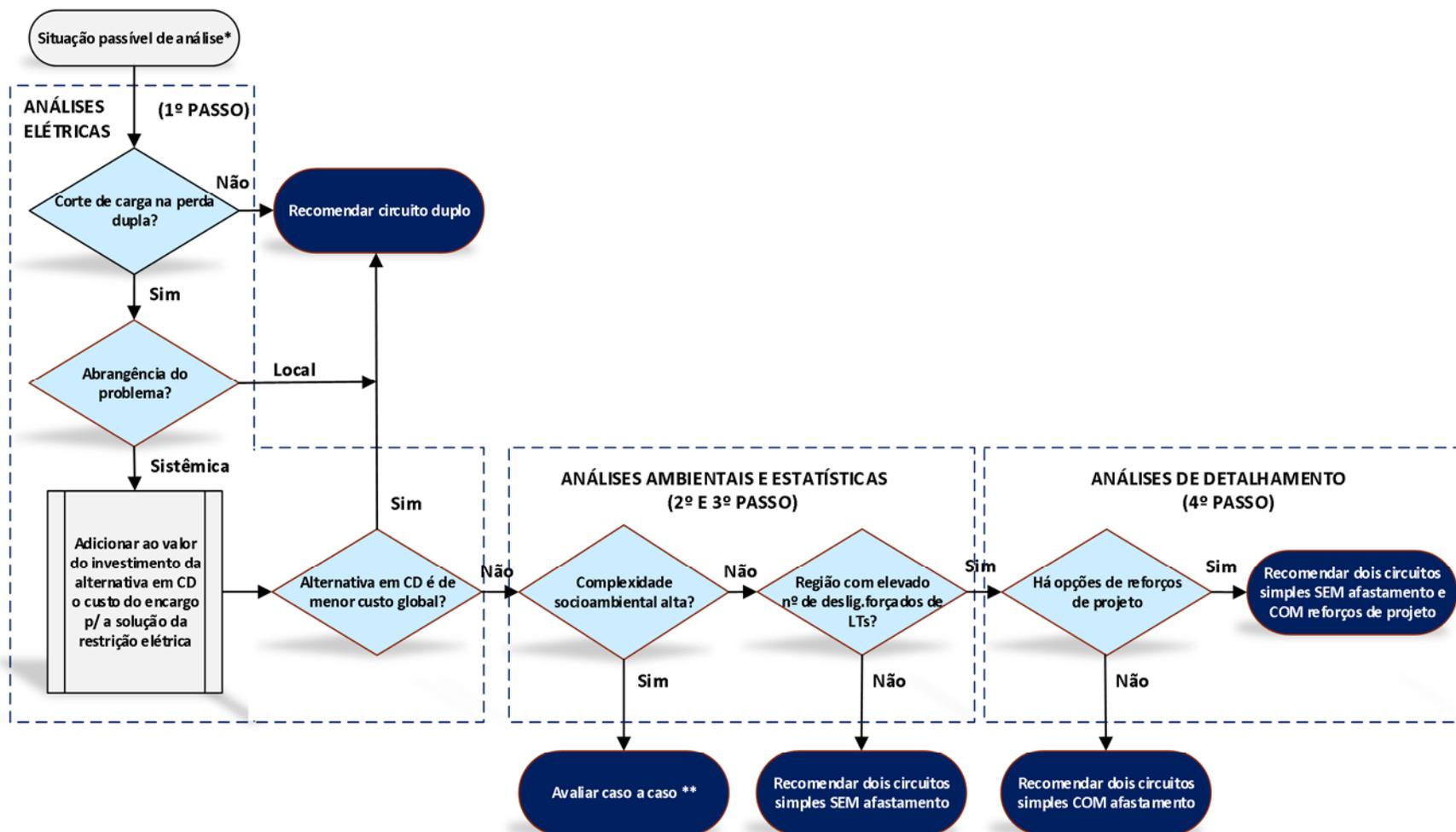
Após o levantamento e análise de todas as informações anteriormente descritas, as principais conclusões foram:

- A configuração de dois circuitos simples, mesmo que sem afastamento, possui, de fato, melhor desempenho quanto à minimização de riscos de desligamentos se comparado à configuração de um circuito duplo;
- Perdas duplas são bem menos frequentes (6%) do que as perdas simples (94%) em trechos com dois ou mais circuitos simples;
- Trechos com circuitos duplos estão mais sujeitos às perdas duplas (75%), enquanto trechos formados por dois ou mais circuitos simples estão mais sujeitos às perdas simples (70% dos casos);
- As principais causas para perdas simples e múltiplas em LT de 230 kV são as descargas atmosféricas;
- Nos trechos de linhas de transmissão em 500 kV, as descargas atmosféricas foram predominantes nas perdas duplas de trechos de circuitos duplos e queimadas nas perdas duplas em trechos compostos de dois ou mais circuitos simples;

-
- Tanto para situações de descargas atmosféricas quanto para situações de queimadas, o afastamento entre os circuitos simples paralelos se mostra como efetivo para minimizar o risco de desligamentos simultâneos;
 - Para que seja minimizado o número de desligamentos simultâneos de dois circuitos simples, por conta de descarga atmosférica e de queimadas, o afastamento mínimo entre eles deve ser superior à maior distância de separação entre os circuitos no ponto de defeito, apurada em levantamento estatístico realizado na Etapa 1. Neste sentido, recomenda-se que o afastamento mínimo entre os circuitos seja de 200 m, no caso de descargas atmosféricas, e de 500 m, no caso de queimadas.
 - Estabelecida uma sazonalidade para o sistema da região Nordeste em relação aos desligamentos de dois circuitos simples e de um circuito duplo que ocorre em maior intensidade entre os meses Agosto a Setembro.

5 ETAPA 2: METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO E RECOMENDAÇÃO

A figura a seguir demonstra as etapas a serem percorridas para a tomada de decisão em relação à configuração adequada final para a linha de transmissão objeto de recomendação.



*Esta situação parte de um caso em que serão recomendados dois circuitos idênticos e paralelos

**Nestas avaliações eventualmente poderão ser recomendados circuitos duplos com reforços e especificações adicionais de projetos

Figura 31 – Fluxograma decisório

5.1 1º Passo: Análises Elétricas

O 1º passo consiste na realização de análises elétricas para a verificação do impacto elétrico da perda dupla da LT que está sendo estudada, observando se tal contingência tem como consequência algum corte de carga¹. Uma vez identificado o corte de carga na perda dupla, prossegue-se com as demais análises para a identificação da abrangência do problema. Na Figura 31, encontra-se destacada no fluxograma uma das etapas desse processo, denominada Análises Elétricas.

- As análises devem ser realizadas considerando os cenários e condições de operação mais críticas e factíveis verificadas ou esperadas para o atendimento à carga da região de estudo;
- Os critérios a serem adotados para a simulação da perda dupla devem ser os estabelecidos nos Procedimentos de Rede – Submódulo 23.3 Diretrizes e Critérios para estudos elétricos;
- No primeiro nível das análises elétricas, deve-se considerar a ocorrência ou não de corte de carga. Caso esse não ocorra, será recomendada a adoção de circuito duplo e, em caso contrário, deve-se avaliar o impacto do corte de carga;
- Dando sequência às avaliações elétricas, deve-se caracterizar o impacto da perda dupla no SIN como de abrangência sistêmica ou local. Dessa forma, em função dessa caracterização, poderão ser adotadas soluções de planejamento diferenciadas, conforme fluxograma da Figura 31. As definições para abrangência local ou sistêmica são apresentadas a seguir:
 - a. **Abrangência Local:** contingências duplas que impliquem apenas o risco de sobrecargas e sub ou sobretensões inadmissíveis com impactos localizados. Nessa situação, deverão ser definidas medidas operativas ou adoção de Sistemas Especiais de Proteção – SEP no âmbito dos estudos de planejamento da operação elétrica.
 - b. **Abrangência Sistêmica:** quando pelo menos um dos seguintes aspectos for identificado:
 - instabilidade de potência, frequência ou tensão envolvendo uma ou mais regiões geográficas (Norte, Nordeste, Sul, Sudeste e Centro-Oeste), estados ou capitais, com

¹ O corte de carga deve se configurar em situações nas quais, na ocorrência de perda dupla, verificam-se carregamentos inadmissíveis em elementos da rede (transformadores ou linhas), ou seja, carregamentos acima do limite de emergência nas análises em regime permanente.

consequente perda de sincronismo devido às oscilações inter-áreas e/ou colapso de tensão;

- sobrecargas inadmissíveis em equipamentos e/ou violações nos níveis de tensão que possam implicar desligamentos em cascata.
- Para as contingências duplas caracterizadas como de abrangência sistêmica deverão ser adicionados aos custos da alternativa em circuito duplo na análise econômica, os custos com geração térmica ou com restrições de intercâmbios necessários para evitar a ocorrência de blecautes (custo do encargo de sistema por restrição elétrica);
- Se a alternativa em circuito duplo for a de menor custo global após adicionado o custo do encargo ao valor do investimento, deve-se recomendar a adoção de circuito duplo e, em caso contrário, devem ser iniciadas as demais análises conforme os passos seguintes.

5.2 2º Passo: Análise de sensibilidade socioambiental

- Em continuidade ao 1º Passo: Análises Elétricas, se o problema decorrente da perda dupla for de abrangência sistêmica e a complexidade dos resultados das análises socioambientais for alta, conforme detalhado no item 5.2, deve-se verificar a natureza da questão socioambiental envolvida. Ou seja, é uma situação que precisará ser avaliada caso a caso.

A análise caso a caso se faz necessária, pois deverá ser ponderado o seguinte *trade-off*:

- i. De um lado, há um risco sistêmico comprovado no caso da ocorrência da perda dupla, o qual, em tese, poderia ser mitigado por meio da recomendação, por exemplo, de dois circuitos simples com ou sem afastamento; e
- ii. Por outro lado, caso opte pela configuração de dois circuitos simples em vez de um circuito duplo, por exemplo, estaria aumentando o impacto socioambiental em uma área de complexidade comprovadamente alta, o que poderá elevar o risco de insucesso na implementação das linhas de transmissão recomendadas.

Ao se ponderar os riscos assumidos advindos do *trade off* detalhado acima, deverá decidir pela recomendação de dois circuitos simples, com ou sem afastamento, ou um circuito duplo, a depender da propensão à assunção de um risco maior sistêmico ou socioambiental.

- Se o problema decorrente da perda dupla for de abrangência sistêmica e a complexidade dos resultados das análises socioambientais for baixa, deve-se verificar a estatística de desligamentos na região em análise, conforme detalhado no item 5.3.

Para a determinação da classificação de uma complexidade ambiental em alta ou baixa, alguns fatores devem ser considerados na escolha da configuração dos circuitos. A escolha por dois ou mais circuitos simples deve ser criteriosamente avaliada quando a LT planejada atravessar locais de elevada complexidade, tais como:

- Unidades de conservação de proteção integral;
- Terras indígenas;
- Territórios quilombolas;
- Áreas urbanas ou periurbanas;
- Regiões com alto grau de preservação florestal;
- Outras áreas que possam ser julgadas como de elevada sensibilidade, tais como áreas turísticas, regiões com elevada presença de cavernas e locais de irrigação mecanizada por pivôs centrais.

Nessa etapa são consultadas bases georreferenciadas existentes dos aspectos citados, além de imagens de satélite e bases de uso e cobertura do solo, para avaliar a interferência da futura LT com regiões de elevada sensibilidade.

Pontos de atenção:

Devido aos aspectos de sensibilidade socioambiental de algumas regiões, a implantação de dois circuitos simples pode representar fator de atraso significativo na entrada da linha em operação, por questões de licenciamento ambiental e/ou liberação fundiária. Há também a possibilidade do órgão ambiental ou outros intervenientes (Ministério Público, por exemplo) determinarem a adoção de circuito duplo como condicionante para a viabilidade ambiental do empreendimento. Além disso, sob a ótica dos critérios socioambientais (inclusive os aspectos fundiários) considerados no planejamento, a adoção de circuito duplo será, em todos os casos, um fator de minimização dos impactos de empreendimentos.

Caso a LT passe por regiões de elevada sensibilidade socioambiental, é indicado contato com órgão licenciador e, caso aplicável, outros órgãos intervenientes no processo de licenciamento ambiental, para fins de esclarecimento da solução proposta.

5.3 3º Passo: Análise de susceptibilidade a desligamento forçado por descargas atmosféricas e/ou queimadas

- Em continuidade ao 2º Passo: Análise de sensibilidade socioambiental, caso a estatística de desligamentos na região seja baixa, sugere-se a recomendação de dois circuitos simples sem afastamento. Caso a estatística seja alta, deve-se avaliar se existem opções de reforços no projeto para mitigar as ocorrências predominantes, conforme 4º Passo: Estudos de detalhamento de linhas de transmissão.

Na análise de susceptibilidade a desligamento forçado, 3º passo, é avaliado se a futura LT atravessa regiões com elevada susceptibilidade ocasionados por descargas atmosféricas e/ou queimadas. Nessa análise, são consideradas as seguintes informações:

- Histórico de perturbações ocasionadas por descargas atmosféricas e queimadas, com base nos dados do SIPER, do ONS.
- Mapas de densidade de descargas atmosféricas e de focos de queimadas, produzidos pelo ONS a partir de dados fornecidos pelo INPE.

Pontos de atenção:

Outras causas de desligamento forçado, tais como vento e vegetação, podem ser incluídas na análise mediante a existência de dados consistentes.

5.4 4º Passo: Estudos de Detalhamento de Linhas de Transmissão

- Em continuidade ao 3º Passo: Análise de susceptibilidade a desligamentos forçados, na hipótese de existirem opções de reforços no projeto, avalia-se qual é a melhor opção de reforço a ser adotada e recomenda-se o mesmo associado a uma configuração de dois circuitos simples sem afastamento.

A definição de soluções de referência é parte inerente ao processo de planejamento, e tem como objetivo apresentar soluções de transmissão tecnicamente viáveis para implantação. Dessa forma, os agentes participantes do certame para concessão dos empreendimentos contam com insumos relacionados a aspectos técnicos relevantes, reduzindo riscos na etapa pós leilão.

Portanto, é necessário na fase anterior ao leilão identificar eventuais problemas inerentes à solução de referência e possíveis precauções. Dessa forma, a depender da solução de referência, é primordial

a realização de estudos de detalhamento das linhas de transmissão indicadas, abordando aspectos elétricos e de projetos.

5.4.1 Aspectos Elétricos

Condicionantes diversos podem impactar diretamente na indicação do tipo de linha de transmissão a ser recomendada na fase de planejamento, inclusive, se a mesma será composta por circuitos simples ou duplo. Entretanto, alterações de concepções posteriores à fase de planejamento, de circuitos simples para circuito duplo, devem ser evitadas, pois podem restringir, ou mesmo levar a problemas de natureza elétrica de difícil solução na etapa pós leilão.

A despeito de potenciais benefícios de redução de impacto socioambiental, a adoção de circuito duplo em substituição a dois circuitos simples, impõe condicionamentos elétricos adicionais à instalação resultante, que precisam ser avaliados e devidamente solucionados. Em determinados casos, as alterações necessárias na solução inicialmente planejada incluem mudanças nas características elétricas das linhas de transmissão e dos equipamentos de suporte e controle de tensão.

Isso porque, como é de notório conhecimento, as linhas de transmissão em circuito duplo apresentam características elétricas distintas das de circuito simples, com requisitos específicos, dentre os quais podem ser destacados:

a) **Compensação Reativa**

Para todas as linhas com compensação reativa em derivação, mesmo as de circuito simples, é necessário investigar, com mais cuidado que as não compensadas, os condicionamentos impostos pelos requisitos de religamento monopolar.

Ao abrir apenas uma fase da linha, os acoplamentos eletromagnéticos entre as fases sãs, a fase sob defeito e o reator em derivação, podem provocar elevadas correntes de arco secundário durante o defeito e picos de tensão ressonantes na fase aberta, na faixa de frequência próxima à fundamental. Tais picos podem implicar níveis de tensão proibitivos, inviabilizando a implantação do requisito de religamento monopolar.

Linhas em circuito duplo compensadas devem ser avaliadas considerando também os acoplamentos entre os circuitos, além dos mencionados anteriormente. Tais configurações podem impor situações ainda mais restritivas que as observadas em circuitos simples,

limitando severamente o percentual de compensação das linhas. Em alguns casos, soluções em circuito duplo concomitantes ao requisito de religamento monopolar podem ser inviáveis, limitando o uso de importante recurso para a operação do sistema.

A depender do comprimento e nível de compactação das linhas pode também ser necessária a indicação de reatores instalados no neutro dos reatores em derivação (reatores de neutro), com a finalidade de limitar as correntes de arco secundário (correntes que circulam entre a fase aberta e a terra alimentadas pelo acoplamento com as fases sãs). Em certas situações, essa medida viabiliza o religamento monopolar. Entretanto, é importante destacar que a implantação de tais reatores de neutro pode provocar maior severidade nas sobretensões de manobra, principalmente nas manobras de rejeição de carga, limitando a solução ou exigindo outras medidas corretivas.

b) **Coordenação de Isolamento**

O traçado da linha de transmissão impõe condicionantes ao projeto de coordenação de isolamento, tendo em vista a melhoria do desempenho da linha devido a descargas atmosféricas. Em circuitos duplos, fenômenos como *backflashover* podem provocar desligamento quase imediato dos dois circuitos, e caso o requisito de confiabilidade seja restritivo é necessária especial atenção na definição de alguns componentes da linha de transmissão, como distâncias de isolamento, concepção e comprimento das cadeias de isoladores, além do sistema de aterramento das torres.

Outro fator que pode impactar no desempenho das linhas de transmissão são as características elétricas do solo. Regiões com elevada resistividade elétrica podem dificultar a obtenção de valores de resistência de aterramento em níveis adequados. Circuitos duplos implantados em tais regiões são impactados de maneira mais significativa que os de circuito simples, com repercussão direta no custo do sistema de aterramento e no isolamento da linha.

Em casos extremos, pode ainda ser necessária a implantação de para-raios de ZnO junto às cadeias de isoladores em alguns pontos críticos da LT, como forma de mitigar os desligamentos por *backflashover*. Tais soluções impõem sobre custos à implantação das linhas, e caso não previsto na etapa do Projeto Básico podem provocar significativa redução do desempenho das mesmas, tanto por atraso na fase de implantação do empreendimento, como na disponibilidade após a entrada em operação.

c) **Faixa de Passagem**

A faixa de passagem é fortemente dependente dos aspectos eletromecânicos e elétricos das linhas de transmissão, portanto a adequada avaliação desse requisito é necessária, dado que podem surgir condições restritivas à utilização tanto de circuitos simples como de circuito duplo.

O fato de se compactar dois circuitos simples em uma solução em circuito duplo, mantidos os mesmos requisitos de desempenho dos dois circuitos, não é garantia de redução substancial da largura da faixa de passagem, ou mesmo adequação à faixa disponível.

Em função da nova distribuição espacial dos condutores quando se altera a solução de circuito simples para duplo, os diferentes requisitos elétricos devem ser reavaliados, dentre os quais os limites máximos de campos elétrico e magnético, radio interferência e ruído audível.

d) **Condições ambientais diversas**

Condições ambientais diversas, tais como altitude, poluição, salinidade, estiagens prolongadas, dentre outras, afetam diretamente a concepção de componentes da linha de transmissão, que precisam ser revistas quando se altera a concepção de circuito simples para circuito duplo, em decorrência da nova disposição dos condutores no espaço que influencia diretamente os condicionantes elétricos da linha de transmissão.

5.4.2 Aspectos de Projeto

As soluções usualmente utilizadas na concepção elétrica de linhas de transmissão no Brasil permitem a implantação de dois circuitos em uma mesma estrutura, com algumas restrições, ou mesmo redução de desempenho como já indicado anteriormente. Nesses casos, quando justificável, algumas medidas podem ser utilizadas para reduzir a diferença de desempenho a níveis aceitáveis, a começar, em muitos casos, com a adoção de estruturas autoportantes.

Entretanto, a depender da tecnologia de transmissão utilizada, não existe metodologia consagrada para levantamento da equivalência técnica entre dois circuitos simples e um circuito duplo, como evidenciado em experiências recentes da expansão do sistema em 500 kV do SIN.

Em decorrência das características atuais do SIN (grande extensão geográfica com fontes distantes dos centros de carga e rede razoavelmente malhada), em situações específicas, os estudos para expansão da rede em 500 kV (técnico e econômico) têm recomendado a adoção de linhas de transmissão com Potência Natural elevada (LPNE), que tem como característica uma reatância série expressivamente menor que as de linhas as recomendadas em soluções típicas. Soluções em LPNE permitem maiores fluxos de potência nessas linhas e, quando comparadas a soluções tradicionais, reduzem a quantidade de linhas a serem implantadas em uma determinada expansão do sistema, além de minimizar a necessidade de utilização de capacitores série.

Soluções com tecnologia LPNE têm sido utilizadas em diversas expansões recentes do SIN, como o tronco em 500 kV Rio das Éguas – Luziânia – Barreiras e, mais recentemente, na expansão Xingu – Serra Pelada – Miracema.

Essas linhas têm em destaque a utilização de 6 subcondutores por fase e feixes expandidos com dimensões muito superiores às das linhas convencionais (com faixas de passagem de largura da ordem de 60 metros). Por essas razões, não existe no país soluções de linhas de transmissão com essas características em circuito duplo. Entretanto, uma expansão com dois circuitos simples do tipo LPNE possibilita uma capacidade de transmissão que em solução convencional exigiria pelo menos 3 circuitos.

De fato, uma solução em circuito duplo convencional não é eletricamente equivalente a uma solução com dois circuitos simples do tipo LPNE. Desta forma, para que uma solução apenas em circuito duplo tenha, minimamente, um desempenho equivalente à uma solução com dois circuitos simples do tipo LPNE, seriam necessários pelo menos dois circuitos duplos convencionais ou um circuito duplo e um simples.

Nos casos em que a tecnologia permita a utilização de um circuito duplo em substituição a dois circuitos simples, com justificada necessidade de se adotar critérios mais conservativos na concepção

desses circuito duplos², poderá ser necessário considerar dentre outras, os seguintes tipos de medidas:

- a) Utilização de critérios de dimensionamento mais conservativos, implicando a adoção de requisitos técnicos mais restritivos que os indicados no Submódulo 2.4 dos Procedimentos de Rede como, por exemplo, a adoção de períodos de retorno dos ventos mais elevados ou menor probabilidade de desligamentos da LT por descargas atmosféricas.
- b) Rompimento de mais de um condutor de uma fase em um dos circuitos.
- c) Utilização de fatores de dimensionamento mecânico das estruturas da série mais robustos e aplicação de estruturas autoportantes ao longo de todo o traçado da LT.
- d) Fundações com fator de majoração de cargas mais elevados que os usuais.

Cabe ressaltar que as definições de quais critérios conservativos deverão ser adotados em condições especiais, bem como as respectivas especificações necessárias, também serão objeto de análise no contexto do planejamento da expansão.

Embora normalmente os custos de implantação de um circuito duplo sejam inferiores ao de dois circuitos simples, é importante destacar que critérios mais conservativos utilizados na concepção do circuito duplo podem acarretar em custos adicionais. Em determinadas situações essa relação favorável de custos pode ser invertida.

² * A adoção de critérios mais conservativos não deve ser utilizada de maneira ampla, e por isso se restringe aos projetos de linhas com circuitos duplos em que se verifiquem as premissas tratadas neste documento.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O propósito da elaboração deste documento visou o estabelecimento de uma metodologia que buscasse explicitar todas as considerações e/ou ponderações que devem fundamentar a recomendação de dois circuitos simples paralelos em vez de um circuito duplo.

A contextualização do problema ocorre quando se está propondo a ampliação da rede básica (nova linha de transmissão) ou quando a obra envolver a proposição do seccionamento de uma linha de transmissão, caracterizando um novo ponto de suprimento. Em ambas situações deve-se adotar a indicação de dois circuitos simples ou de um circuito duplo.

No caminho para a tomada de decisão, a informação mais relevante é a avaliação do grau de impacto que uma possível perda dupla possa vir a causar ao sistema. Essa avaliação deve ser realizada por meio da simulação de perda dupla, a partir de um ponto de operação mais crítico possível, com o objetivo de se identificar o pior impacto possível para o desempenho do SIN pós contingência. Uma vez identificada a abrangência desse impacto, se local ou sistêmico, com ou sem corte de carga, prossegue-se, se necessário, com as demais análises socioambientais, estatísticas e de detalhamento, conforme figura do fluxograma decisório (Figura 31).

Na hipótese de se identificar que o impacto da contingência dupla é de abrangência sistêmica, devem ser iniciados os passos 2, 3 e 4 explicitados no Capítulo 5 que, respectivamente, correspondem à análise de sensibilidade socioambiental, à análise de susceptibilidade à desligamento forçado por descargas atmosféricas e/ou queimadas e ao estudo de detalhamento de linhas de transmissão.

Considerando que a análise de sensibilidade socioambiental pode identificar elevada complexidade na região de estudo, recomenda-se uma avaliação caso a caso, onde serão ponderados diversos aspectos, tais como: montantes de corte de carga envolvidos, factibilidade de adoção de medidas mitigadoras para redução dos impactos ambientais, prazos de implantação, investimentos associados, impactos da perda dupla para o SIN, dentre outros.

Como último passo do fluxograma de tomada de decisão, cita-se o estudo de detalhamento de linhas de transmissão, que objetiva identificar parâmetros e/ou critérios de projeto que possam influenciar no aumento da segurança elétrica de forma a minimizar a exposição da linha de transmissão de circuito duplo à perda simultânea dos dois circuitos. Esses parâmetros e critérios podem estar correlacionados a aspectos, tais como:

-
- Resiliência mecânica das estruturas da transmissão;
 - Coordenação de isolamento;
 - Tipo de estrutura (interferência das estruturas quanto a aspectos socioambientais); e
 - Condições ambientais diversas (altitude, poluição química e salinidade).

Uma vez percorridos todos os passos do fluxograma, se identificada a necessidade de circuitos simples com afastamento, deverá ser recomendada, com base nas conclusões das análises estatísticas, a distância mínima de 200 m de afastamento entre os circuitos no caso de descargas atmosféricas e de 500 m de afastamento no caso de queimadas.

Por fim, recomenda-se que a metodologia do presente documento seja adotada nos estudos de planejamento, ainda na fase de elaboração da Análise Técnico-Econômica de Alternativas: Relatório R1, sempre que se identificar a necessidade de implantação de dois novos circuitos paralelos e/ou a implantação de nova instalação por meio seccionamento de linha de transmissão existente.

7 REFERÊNCIAS

- [1] Ofício nº 333/2018/SPE-MME, de 18 de julho de 2018 – Assunto: Questionamentos sobre a adoção de dois circuitos simples ao invés de um circuito duplo realizadas por órgãos de licenciamento ambiental e o critério de afastamento mínimo entre circuitos.
- [2] Ofício nº 0825/EPE/2018, de 08 de agosto de 2018 – Assunto: Seccionamento de linhas de transmissão.
- [3] Ofício nº 270/2017/SPE-MME de 13 de Outubro – Assunto: Seccionamento de linhas de transmissão;
- [4] Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, *Metodologia de Classificação Estatística de Desligamentos Forçados e do Desempenho de Proteção, Religamento Automático e SEP, 2013.*
- [5] “Map Maker App”: <https://mapmakerapp.com>.
- [6] EPE. Empresa de Pesquisa Energética, 2005. Diretrizes para Elaboração dos Relatórios Técnicos Referentes às Novas Instalações da Rede Básica (EPE-DEE-RE-001/2005-R1).
- [7] CCPE. Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos, 2002. Critérios e Procedimentos para o Planejamento da Expansão dos Sistemas de Transmissão – Volume 2.
- [8] ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2018. Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos – Procedimentos de Rede – Submódulo 23.3 – Revisão 2018.08.
- [9] ANEEL, 2016. Procedimento de distribuição (módulo 2) – Revisão 7.

8 EQUIPE TÉCNICA

Coordenação Executiva:

- EPE: Elisângela Medeiros de Almeida
- EPE: José Marcos Bressane
- ONS: Mauro Muniz
- ONS: Sumara Duarte Ticom

Coordenação Técnica:

- EPE: Maxwell Cury Júnior

Equipe Técnica:

EPE

- Alfredo Lima Silva
- André Cassino Ferreira
- André Viola Barreto
- Daniel José Tavares de Souza
- Dourival de Souza Carvalho Júnior
- Kátia Gisele Soares Matosinho
- Maria de Fátima Carvalho Gama

ONS

- Adriano de Andrade Barbosa
- Carlos Belmiro Campinho
- David do Nascimento Gonçalves
- Elder Geraldo Sales de Sant´Ana
- Fernando Machado Silva
- João Henrique Magalhães Almeida
- Leandro Ribeiro Montezuma
- Lucas Medeiros Marinho
- Luiz Filipe Alvarenga e Pedro Guimarães Trindade