

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 1006

**MONITORAMENTO DE AFUNDAMENTOS MOMENTÂNEOS DE TENSÃO E
CLASSIFICAÇÃO POR TIPO, DURAÇÃO E MAGNITUDE**

Patrícia de Souza Carletto

DATA DA DEFESA: 26/09/2017

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**MONITORAMENTO DE AFUNDAMENTOS MOMENTÂNEOS DE
TENSÃO E CLASSIFICAÇÃO POR TIPO, DURAÇÃO E
MAGNITUDE**

Patrícia de Souza Carletto

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Braz de Jesus Cardoso Filho

Coorientador: Prof. Igor Amariz Pires

Belo Horizonte - MG

Setembro de 2017

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

MONITORAMENTO DE AFUNDAMENTOS MOMENTÂNEOS DE
TENSÃO E CLASSIFICAÇÃO POR TIPO, DURAÇÃO E
MAGNITUDE

Patrícia de Souza Carletto

C279m Carletto, Patrícia de Souza.
Monitoramento de afundamentos momentâneos de tensão e
classificação por tipo, duração e magnitude [manuscrito] / Patrícia de
Souza Carletto. - 2017.
xxii, 78 f., enc.: il.

Orientador: Braz de Jesus Cardoso Filho.
Coorientador: Igor Amariz Pires.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 77-78.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Energia elétrica - Qualidade -
Teses. 3. Afundamento de tensão - Teses. I. Cardoso Filho, Braz de
Jesus. II. Pires, Igor Amariz. III. Universidade Federal de Minas Gerais.
Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.3(043)

Belo Horizonte - MG

Setembro de 2017

PATRICIA DE SOUZA CARLETTO

**MONITORAMENTO DE AFUNDAMENTOS
MOMENTÂNEOS DE TENSÃO E CLASSIFICAÇÃO POR
TIPO, DURAÇÃO E MAGNITUDE**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Braz de Jesus Cardoso Filho, UFMG

PhD. pela University of Wisconsin – Madison, EUA

Prof. Dr. Igor Amariz Pires, UFMG

Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, Brasil

Prof. Dr. Danilo Iglesias Brandão, UFMG

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP - Campinas, Brasil

Prof. Dr. Thales Alexandre Carvalho Maia, UFMG

Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte, Brasil



Belo Horizonte,
Setembro de 2017.

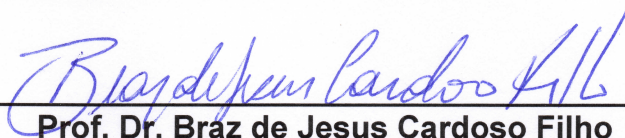
"Monitoramento de Afundamentos Momentâneos de Tensão e Classificação por Tipo, Duração e Magnitude"

Patrícia de Souza Carletto

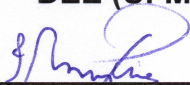
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 26 de setembro de 2017.

Por:



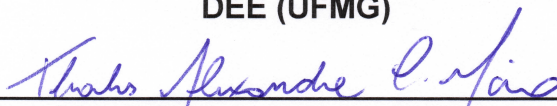
Prof. Dr. Braz de Jesus Cardoso Filho
DEE (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. Igor Amariz Pires
DELT (UFMG) - Coorientador



Prof. Dr. Danilo Iglesias Brandão
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Thales Alexandre Carvalho Maia
DEE (UFMG)

*Dedico esta dissertação:
às minhas filhas, ao meu esposo,
aos meus pais, irmãos e amigos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro à Deus por tudo que tenho tido a oportunidade de viver e de aprender.

Agradeço pela saúde, paz, amor e alegria.

Aos meus familiares pelo amor, carinho e apoio, que nos ajudou a vencer mais esta etapa em nossas vidas.

Ao meu orientador, professor Braz por ter me acolhido na UFMG, pela sabedoria e paciência.

Ao meu coorientador, professor Igor, pelas contribuições valiosas, pelas sugestões e pela paciência.

Ao colega Eduardo Araújo por ter me mostrado o caminho a seguir. Ao Filipe Dias por ter me dado a oportunidade de dar continuidade ao seu mestrado. Aos colegas da UFMG, Felipe Mota, Tamires, Fabiano, Waner, Adriano, Daniel e Luiz Gustavo, pelo companheirismo e apoio.

Aos colegas do Laboratório Tesla Engenharia de Potência, Rafael, Gideon, Alysson, Fernando, Reginaldo, Rodrigo, Nicole, André Cardoso, André Saraiva, Nicolas, Hélio, Tiago, Sandro, Pedro, Flávio, Matheus, Vitor, Bruno e Gabriel pela convivência, apoio e amizade. Em especial à Arlete, Tamires e Camila pela amizade, carinho, cuidado e apoio.

Aos professores Porfírio, Sidelmo, Flávio, Danilo e José Osvaldo, pela sabedoria e conhecimento. Ao professor Rodney e ao Jerônimo pelas orientações e trabalho realizado ao longo desse mestrado.

À Capes pelo apoio financeiro que proporcionou à realização deste trabalho.

Muito obrigado a todos!

“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim. ”

(Chico Xavier)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
ESCOLA DE ENGENHARIA

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Patrícia de Souza Carletto

O Afundamento Momentâneo de Tensão, apesar de ser um fenômeno de curta duração, é um dos problemas mais comuns de degradação da Qualidade de Energia Elétrica no setor industrial, podendo causar interrupção do fluxo produtivo, refugos e atrasos. São caracterizados como uma redução nos valores de tensão (rms) para valores entre 0,1 a 0,9 pu (tensão residual), com duração entre 1 ciclo a 3 minutos. Como o afundamento ocorre em um ambiente industrial, muitos tipos de cargas são sensíveis aos afundamentos. O tipo de afundamento: monofásico, bifásico ou trifásico, tanto quanto a sua magnitude e tempo de duração, determinam as cargas suscetíveis aos afundamentos. Sendo assim, há necessidade de conhecer o perfil de ocorrência dos afundamentos para determinar a melhor solução de mitigação destes eventos. Esse trabalho apresenta o resultado de uma análise de 16 meses de monitoramento no Laboratório Tesla da UFMG, com o objetivo de fazer a caracterização desses afundamentos no período de setembro de 2015 a dezembro de 2016.

Palavras-chaves: Afundamento Momentâneo de Tensão, Mitigação e Qualidade de Energia.



Federal University of Minas Gerais
Graduate Program in Electrical Engineering
Engineering School

ABSTRACT

Master's Degree
Patrícia de Souza Carletto

The momentary voltage sags, despite being a short-lived phenomenon, is one of the most usual problems of the degradation of Electrical Energy Quality in the industrial sector. It can cause interruption of the productive flow, generating losses of the items in the manufacturing process, as it rejects and delays it. Sags are characterized with a reduction in voltage values (rms) for values between 0.1 to 0.9 pu (residual voltage), lasting between 1 cycle and 3 minutes. Considering that the sags occur in an industrial environment, many types of loads are sensitive to them. The single-phase type, two-phase or three-phase sags, as well as their magnitude and duration determine the loads susceptibility. Besides that, it is also necessary to know the occurrence profile of the events to define the most appropriate mitigation solution for these sags. This work presents the results of 16 months monitoring analysis at the Tesla Laboratory of the UFMG, in order to know the characterizing of the sags, in the period from September/2015 to December/2016.

Keywords: Sag, Mitigation e Power Quality.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	VI
RESUMO.....	IX
ABSTRACT	X
LISTA DE FIGURAS.....	XV
LISTA DE TABELAS.....	XX
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XXII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	2
1.2 OBJETIVOS	3
1.3 CONTRIBUIÇÕES	3
1.4 ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO.....	3
2. O AFUNDAMENTO MOMENTÂNEO DE TENSÃO.....	5
2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS	7
2.2 EXEMPLO DE UMA CARACTERIZAÇÃO DE UM AFUNDAMENTO TRIFÁSICO	9
2.3 COMPENSAÇÃO DOS DISTÚRBIOS	11
2.4 ESTUDOS REALIZADOS POR OUTROS AUTORES	13
2.4.1 ESTUDO EM UM TERRITÓRIO CANADENSE EM 22 CONCESSIONÁRIAS DE ENERGIA ELÉTRICA	13
2.4.2 ESTUDOS REALIZADOS EM UMA INDÚSTRIA QUÍMICA	14
2.4.3 ESTUDO EM UM CIRCUITO INDUSTRIAL.....	15

2.4.4	ESTUDO REALIZADO EM UMA FÁBRICA COM ALTO ÍNDICE DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL	18
2.4.5	COMPORTAMENTO DOS AFUNDAMENTOS E MELHORIA DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO	20
2.4.6	ÍNDICE DE ENERGIA DOS AFUNDAMENTOS	24
2.5	CONCLUSÃO	26
3.	O PROCESSO DE MEDIÇÃO	27
3.1	O SISTEMA DE MEDIÇÃO.....	27
3.2	PERÍODO DE MONITORAMENTO	28
3.3	DADOS COLETADOS NO MONITORAMENTO	29
4.	RESULTADO DA MONITORAÇÃO.....	31
4.1	DADOS MONITORADOS NO PERÍODO DE JANEIRO A DEZEMBRO DE 2016	31
4.1.1	NÚMERO DE EVENTOS REGISTRADOS E ÍNDICE DE PRECIPITAÇÃO POR MÊS.....	31
4.1.2	EVENTOS REGISTRADOS POR HORA DO DIA	32
4.1.3	DURAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS	33
4.1.4	MAGNITUDE DOS AFUNDAMENTOS.....	34
4.1.5	EVENTOS POR TIPO DE AFUNDAMENTOS.....	35
4.1.6	DISTRIBUIÇÃO DOS EVENTOS POR FASE.....	37
4.1.7	CURVAS DOS AFUNDAMENTOS	38
4.1.8	DESBALANCEAMENTO DE TENSÃO EM AFUNDAMENTOS	40
4.2	DADOS MONITORADOS NO PERÍODO DE SETEMBRO A DEZEMBRO DE 2015	46
4.2.1	NÚMERO DE EVENTOS REGISTRADOS E ÍNDICE DE PRECIPITAÇÃO POR MÊS.....	47
4.2.2	EVENTOS REGISTRADOS POR HORA DO DIA	48
4.2.3	DURAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS	48
4.2.4	MAGNITUDE DOS AFUNDAMENTOS.....	49
4.2.5	EVENTOS POR TIPO DE AFUNDAMENTOS.....	50
4.2.6	DISTRIBUIÇÃO DOS EVENTOS POR FASE.....	51

4.2.7	DESBALANCEAMENTO DE TENSÃO NOS AFUNDAMENTOS NO PERÍODO DE SETEMBRO A DEZEMBRO DE 2015	53
4.3	COMPARAÇÃO DOS MESES DE SETEMBRO A DEZEMBRO DE 2015 E 2016	56
4.3.1	NÚMERO DE EVENTOS REGISTRADOS E ÍNDICE DE PRECIPITAÇÃO	56
4.3.2	EVENTOS REGISTRADOS POR HORA DO DIA	58
4.3.3	DURAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS	58
4.3.4	MAGNITUDE DOS AFUNDAMENTOS	59
4.3.5	EVENTOS POR TIPO DE AFUNDAMENTO	59
4.3.6	DISTRIBUIÇÃO DOS EVENTOS POR FASE	61
4.3.7	DESBALANCEAMENTO DE TENSÃO EM AFUNDAMENTOS	62
4.4	COMPARAÇÃO ENTRE O ANO DE 2013 E 2016	63
4.4.1	NÚMERO DE EVENTOS REGISTRADOS E ÍNDICE DE PRECIPITAÇÃO	63
4.4.2	DURAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS	65
4.4.3	MAGNITUDE DOS AFUNDAMENTOS	65
4.4.4	EVENTOS POR TIPO DE AFUNDAMENTOS	66
4.4.5	DISTRIBUIÇÃO DOS EVENTOS POR FASE	67
4.5	ANÁLISE DOS DADOS REFERENTES A 52 MESES DE MONITORAMENTO DOS AFUNDAMENTOS	67
4.5.1	MÉDIA MENSAL DOS AFUNDAMENTOS DOS 52 MESES DE MONITORAMENTO	68
4.5.2	MÉDIA MENSAL DO ÍNDICE DE PRECIPITAÇÃO DOS 52 MESES DE MONITORAMENTO	69
4.5.3	CORRELAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS MOMENTÂNEOS DE TENSÃO X PRECIPITAÇÃO	69
4.6	CONCLUSÃO	71
5.	CONCLUSÃO FINAL	72
5.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS	72
5.2	PROPOSTA DE CONTINUIDADE	75
5.2.1	REPRESENTAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS	75
5.2.2	CARACTERIZAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS EM MÉDIA TENSÃO	75
5.2.3	CLASSIFICAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS	76

5.2.4	SUSCETIBILIDADE AOS AFUNDAMENTOS	76
5.2.5	DESBALANCEAMENTO DE TENSÃO EM AFUNDAMENTOS	76
REFERÊNCIAS.....		77

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Afundamento Trifásico/ Dados do MATLAB®	9
Figura 2.2 - Afundamento trifásico	10
Figura 2.3 - Afundamento trifásico - agregação por parâmetros críticos.....	10
Figura 2.4 – Afundamento trifásico - agregação pela fase crítica	11
Figura 2.5 – Compensador Série de Tensão	12
Figura 2.6 - Variações de tensão (rms) – curva ITIC	20
Figura 2.7 - Caracterização de um afundamento de tensão.....	21
Figura 2.8 – Distribuição acumulativa do número de afundamentos inaceitáveis por ano	23
Figura 3.1 – Sistema de medição <i>Sag Captor</i>	27
Figura 4.1 - Número de afundamentos registrados em 2016.....	32
Figura 4.2 - Precipitação no ano de 2016	32
Figura 4.3 – Número de eventos por hora do dia	33
Figura 4.4 - Número de afundamentos por duração (ms).....	34
Figura 4.5 - Número de afundamentos por tensão residual	35
Figura 4.6 – Eventos por tipo de afundamento.....	35

Figura 4.7 – Eventos bifásicos por fase	36
Figura 4.8 - Eventos monofásicos	36
Figura 4.9 – Eventos por fase	38
Figura 4.10 - Ondas senoidais - afundamento monofásico – fase A.....	38
Figura 4.11 - Forma de onda do afundamento - fase A – 71,48% - 116,0 ms.....	39
Figura 4.12 - Ondas senoidais - afundamento bifásico – fases BC	39
Figura 4.13 - Forma de onda do afundamento - fases BC – 82,85% - 65,0 ms.....	39
Figura 4.14 - Ondas senoidais - afundamento trifásico – fases ABC.....	40
Figura 4.15 - Forma de onda do afundamento -fases ABC – 71,42% - 1,04 s.....	40
Figura 4.16 – Percentual de desbalanceamento bifásico	42
Figura 4.17 – Percentual de desbalanceamento trifásico.....	44
Figura 4.18- Afundamento bifásico balanceado – fases BC	45
Figura 4.19 - Afundamento bifásico desbalanceado de 19,3% - Fases AB.....	45
Figura 4.20 - Afundamento trifásico balanceado	46
Figura 4.21 - Afundamento trifásico desbalanceado de 73,7%	46
Figura 4.22 - Número de afundamentos registrados de setembro a dezembro em 2015.....	47

Figura 4.23 – Precipitação de setembro a dezembro de 2015	47
Figura 4.24 – Número de eventos por hora do dia de setembro a dezembro de 2015.....	48
Figura 4.25 – Número de afundamentos por duração de setembro a dezembro de 2015.....	49
Figura 4.26 – Número de afundamentos por tensão residual de setembro a dezembro de 2015	49
Figura 4.27 – Eventos por tipo de afundamento de setembro a dezembro de 2015	50
Figura 4.28 - Eventos bifásicos por fase no período de setembro a dezembro de 2015.....	50
Figura 4.29 – Eventos monofásicos no período de setembro a dezembro de 2015.....	51
Figura 4.30 – Eventos por fase de setembro a dezembro de 2015	52
Figura 4.31 – Percentual de desbalanceamento trifásico de setembro a dezembro de 2015.	54
Figura 4.32 – Percentual de desbalanceamento trifásico.....	56
Figura 4.33 – Número de afundamentos de setembro a dezembro de 2015 X 2016.....	56
Figura 4.34 – Número de afundamentos de setembro a dezembro de 2015 X 2016.....	57
Figura 4.35 - Precipitação de setembro a dezembro de 2015 X 2016	57
Figura 4.36 – Número de eventos por hora do dia de 2015 X 2016.....	58
Figura 4.37 – Número de afundamentos por duração de 2015 X 2016.....	58

Figura 4.38 – Número de afundamentos por tensão residual de 2015 X 2016.....	59
Figura 4.39 - Eventos por tipo de afundamento 2015 X 2016	60
Figura 4.40 - Eventos bifásicos por fase em 2015 X 2016.....	60
Figura 4.41 - Eventos monofásicos 2015 X 2016	60
Figura 4.42 – Eventos por fase 2015 X 2016	61
Figura 4.43 – Eventos no ano de 2016 X 2013	63
Figura 4.44 – Número de eventos registrados por mês em 2016 X 2013.....	64
Figura 4.45 – Precipitação no ano de 2016 X 2013.....	64
Figura 4.46 – Duração dos afundamentos de 2016 X 2013.....	65
Figura 4.47 – Número de afundamentos por tensão residual nos anos de 2016 X 2013.....	65
Figura 4.48 – Eventos por tipo de afundamento no ano de 2016 X 2013	66
Figura 4.49 – Eventos bifásicos por fase nos anos de 2016 X 2013	66
Figura 4.50 – Eventos monofásicos nos anos de 2016 X 2013	67
Figura 4.51 – Distribuição dos eventos por fase 2016 X 2013.....	67
Figura 4.52 – Média e desvio padrão dos afundamentos de 52 meses de monitoramento.....	68

Figura 4.53 - Média e desvio padrão do índice de precipitação de 52 meses de monitoramento	69
Figura 4.54 - Correlação dos Afundamentos X Precipitação de 52 meses de monitoramento	70
Figura 5.1– Afundamento monofásico tipo B	74
Figura 5.2 – Afundamento bifásico tipo C	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Variação Momentânea de Tensão	7
Tabela 2.2 - Variação Temporária de Tensão.....	7
Tabela 2.3 - Distâncias críticas para faltas trifásicas	15
Tabela 2.4 – Número de afundamentos na subestação 1 em 2014.....	17
Tabela 2.5 – Distribuição dos afundamentos de tensão em 2014.....	18
Tabela 2.6 – Densidade de afundamentos dos eventos aleatórios.....	22
Tabela 2.7 – Densidade dos afundamentos dos eventos medidos	24
Tabela 4.1 - Afundamentos por fase.....	37
Tabela 4.2 – Afundamentos bifásicos.....	41
Tabela 4.3 – Desbalanceamento bifásico	42
Tabela 4.4 - Desbalanceamento bifásico por faixa de variação	42
Tabela 4.5 - Afundamentos trifásicos.....	43
Tabela 4.6 – Desbalanceamento trifásico	43
Tabela 4.7 – Desbalanceamento trifásico por faixa de variação	44
Tabela 4.8 – Afundamentos por fase no período de setembro a dezembro de 2015.....	52

Tabela 4.9 – Afundamentos bifásicos no período de setembro a dezembro de 2015.....	53
Tabela 4.10 – Desbalanceamento bifásico no período de setembro a dezembro de 2015	54
Tabela 4.11 – Desbalanceamento bifásico por faixa de variação de setembro a dezembro 2015	54
Tabela 4.12 – Afundamentos trifásicos no período de setembro a dezembro de 2015	55
Tabela 4.13 – Desbalanceamento trifásico no período de setembro a dezembro de 2015	55
Tabela 4.14 - Desbalanceamento trifásico por faixa de variação	56
Tabela 4.15 – Afundamentos por fase no período de setembro a dezembro de 2015	61
Tabela 4.16 – Afundamentos por fase no período de setembro a dezembro de 2016.....	61
Tabela 4.17 – Desbalanceamento bifásico no período de setembro a dezembro de 2016	62
Tabela 4.18- Desbalanceamento trifásico no período de setembro a dezembro de 2016.....	63
Tabela 4.19 – Média e desvio padrão dos afundamentos de 52 meses de monitoramento	68
Tabela 4.20 - Média e desvio padrão do índice de precipitação de 52 meses de monitoramento	69

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMT:	Afundamento Momentâneo de Tensão
CEA	Canadian Electrical Association
CST:	Compensador Série de Tensão
D:	Desbalanceamento de tensão em afundamentos
IEC:	International Electrotechnical Commission
IEEE:	Institute of Electric and Electronics Engineers
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PPGEE:	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
PRODIST:	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional
VTCD:	Variação de Tensão de Curta Duração

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma visão geral da dissertação, motivação, objetivos, contribuições e estruturação do texto.

O afundamento momentâneo de tensão (AMT) é um dos problemas de qualidade de energia que mais afeta o setor industrial (BOLLEN, 1999). Está relacionado a curtos-circuitos, faltas no sistema elétrico, manobras de grandes cargas no sistema elétrico e ao fator climatológico, que podem ocasionar descargas elétricas, curtos-circuitos, variações e faltas de tensão. O contato de árvores e animais às redes de distribuição também podem causar problemas nas redes elétricas.

Os parâmetros e critérios estabelecidos por normas definem os valores de referência e procedimentos relativos à qualidade do serviço prestado pela concessionária de energia elétrica. Monitorar e controlar as causas destes fenômenos reduzem as paradas e danos aos processos industriais, mas nem todas as ocorrências dependem de controle e fazem parte de fenômenos estocásticos, que estão associados a fatores que nem sempre podem ser controlados ou excluídos do sistema elétrico.

Tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desbalanceamento de tensão, flutuação de tensão, variações de tensão de curta duração e variação de frequência são parâmetros definidos para serem medidos e controlados de acordo com o PRODIST (ANEEL, 2016).

As variações momentâneas e temporárias de tensão em curtos intervalos de tempo, tanto quanto outros parâmetros podem gerar danos aos equipamentos e causar prejuízos. O afundamento de tensão, conhecido na literatura internacional como *voltage sag* ou *voltage dip* é objeto de estudo nessa dissertação, denominado como afundamento momentâneo de tensão.

Apesar de serem fenômenos menos severos do que as interrupções, são mais frequentes e são as principais causas de mau funcionamento e prejuízos em sistemas industriais. Os prejuízos relacionados às interrupções, afundamentos, elevações momentâneas de tensão (*swell*), oscilações de baixa frequência (*flicker*), surtos de tensão, harmônios e outros são relevantes. Estima-se que US\$150 bilhões por ano, nos EUA são atribuídos aos prejuízos referentes aos danos causados pelos afundamentos de tensão (LOPES, 2006).

Muitas cargas são sensíveis aos afundamentos tanto em ambiente industrial, comercial ou residencial. O tipo de afundamento monofásico, bifásico ou trifásico, tanto quanto a sua magnitude, tempo de duração e frequência de ocorrência determinam a suscetibilidade das cargas aos afundamentos. Sendo assim, há necessidade de conhecer o perfil de ocorrência dos afundamentos, para determinar a melhor solução para mitigação destes eventos.

1.1 Motivação

A motivação para a realização desse trabalho está relacionada à necessidade de caracterização dos afundamentos e conhecimento da sua frequência de ocorrência, com o objetivo de buscar soluções que possam fazer a sua mitigação e redução dos prejuízos causados pelos eventos. Por se tratar de um fenômeno de curta duração que pode causar

danos e prejuízos a diversos tipos de consumidores é necessário ter conhecimento do maior número de dados possíveis dos eventos, como duração, magnitude, tipo, fase de maior ocorrência e etc., para reduzir os danos causados pelos afundamentos.

1.2 Objetivos

Foi feito um monitoramento no Laboratório Tesla Engenharia de Potência, localizado na Escola de Engenharia da UFMG, durante 16 meses, com o objetivo de conhecer as características dos afundamentos. Os resultados são apresentados neste trabalho.

1.3 Contribuições

Com os resultados do monitoramento foi possível fazer uma análise referente à ocorrência dos eventos e correlacionar o índice de precipitação da região, verificar a frequência em relação à hora do dia, duração e magnitude dos eventos, tipo de afundamento, identificar a fase de maior ocorrência nos eventos e o desbalanceamento de tensão no momento em que o afundamento ocorreu. Foi feito também uma comparação com dados coletados anteriormente e um aumento do banco de dados em relação aos registros dos afundamentos no Laboratório Tesla.

1.4 Estruturação do Texto

Esta dissertação possui 5 capítulos, organizados da seguinte forma:

O capítulo 2 caracteriza os afundamentos momentâneos e temporários de tensão com definição da duração, magnitude e frequência de ocorrência. Descreve a metodologia para

medição e compensação dos distúrbios. Mostra alguns estudos e análises realizadas por outros autores.

O capítulo 3 descreve o sistema de medição, o período de monitoramento, a forma de coleta dos dados e as análises realizadas após o monitoramento.

O capítulo 4 apresenta os resultados dos eventos nos 16 meses monitorados, compara os resultados com os dados coletados anteriormente e analisa os 52 meses de monitoramento dos alicerces no Laboratório Tesla da UFMG.

No capítulo 5 é realizada a conclusão do trabalho, analisando os resultados encontrados, além de algumas propostas de continuidade.

2. O AFUNDAMENTO MOMENTÂNEO DE TENSÃO

Este capítulo caracteriza os afundamentos de tensão com definição da duração, magnitude e frequência de ocorrência. Descreve a metodologia para medição e compensação dos distúrbios. Mostra alguns estudos e análises realizadas por outros autores.

O afundamento de tensão é caracterizado como uma redução no valor da tensão eficaz com faixas específicas de variação de tensão residual ou magnitude, com tempo de duração definido. A sua caracterização varia de acordo com a norma ou com a recomendação técnica.

De acordo com a IEEE 1159 (IEEE, 2009), o afundamento momentâneo de tensão é caracterizado como uma redução nos valores de tensão eficaz para valores entre 0,1 a 0,9 pu (tensão residual), com duração de 0,5 a 30 ciclos.

Para a IEC 61000-4-11 (IEC, 2004) o afundamento é definido de forma distinta para 50 e 60 Hz, separados por classe 1, 2, 3 ou 4 referente à proteção eletromagnética do produto, com número de ciclos e magnitudes variados, que não serão detalhados neste trabalho.

Para o PRODIST (ANEEL, 2016), o afundamento de tensão é uma VTCD (variação de tensão de curta duração) com desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo. São divididos em variação momentânea de tensão e variação temporária de tensão. A característica principal que define e delimita uma variação momentânea de tensão de uma variação temporária de tensão está relacionada principalmente ao tempo do evento.

As variações momentâneas de tensão ocorrem com duração inferior ou igual a 3 segundos, enquanto que as variações temporárias de tensão ocorrem com duração superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos.

O valor eficaz da tensão em relação a tensão de referência é um fator de caracterização. Magnitude menor que 0,1 pu é definida como interrupção e superior a 1,1 pu é definida como elevação.

Os valores intermediários superiores ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu são definidos como afundamentos. Os afundamentos podem ser momentâneos ou temporários. Os momentâneos são superiores ou iguais a um ciclo e inferior ou igual a 3 segundos. Os temporários são superiores a 3 segundos e inferiores a 3 minutos.

As VTCD estão classificadas e definidas conforme Tabela 2.1 e Tabela 2.2.

O monitoramento dos dados dessa dissertação trata dos afundamentos momentâneos de tensão, classificados como variação momentânea de tensão, em destaque na Tabela 2.1. O Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2016) foi utilizado como referência para tratativa dos dados monitorados.

A caracterização dos afundamentos momentâneos de tensão (AMT), de acordo com a Tabela 2.1 deve ser feita através da duração da variação e da amplitude (ou magnitude) da tensão. A duração da variação do AMT deve ser superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos, equação (1). A magnitude da tensão (valor eficaz) em relação a tensão de referência, deve ser superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu, equação (2).

$$1 \text{ ciclo} \leq \text{AMT}_{(\text{tempo})} \leq 3 \text{ segundos} \quad (1)$$

$$0,1 \text{ pu} \leq \text{AMT}_{(\text{magnitudo})} < 0,9 \text{ pu} \quad (2)$$

Tabela 2.1 - Variação Momentânea de Tensão

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Magnitude da Tensão
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	tempo \leq 3 segundos	magnitude $<$ 0,1 pu
	Afundamento Momentâneo de Tensão	1 ciclo \leq tempo \leq 3 segundos	0,1 pu \leq magnitude $<$ 0,9 pu
	Elevação Momentânea de Tensão	1 ciclo \leq tempo \leq 3 segundos	magnitude $>$ 1,1 pu

Fonte: Adaptado de PRODIST – módulo 8 – Qualidade de Energia

Tabela 2.2 - Variação Temporária de Tensão

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Magnitude da Tensão
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	3 segundos $<$ tempo $<$ 3 minutos	magnitude $<$ 0,1 pu
	Afundamento Temporário de Tensão	3 segundos $<$ tempo $<$ 3 minutos	0,1 pu \leq magnitude $<$ 0,9 pu
	Elevação Temporária de Tensão	3 segundos $<$ tempo $<$ 3 minutos	magnitude $>$ 1,1 pu

Fonte: Adaptado de PRODIST – módulo 8 – Qualidade de Energia

2.1 Caracterização dos Afundamentos

De acordo com o PRODIST (ANEEL, 2016), além da duração e da magnitude dos eventos, a severidade da variação de tensão de curta duração (VTCD), medida entre fase e neutro de

determinado barramento do sistema de distribuição é também caracterizada pela frequência de ocorrência. Faz-se necessário identificar a quantidade de vezes que os parâmetros duração e magnitude ocorrem em determinado período de tempo, ao longo do barramento.

O indicador definido para desempenho de um determinado barramento do sistema de distribuição em relação as VTCD correspondem ao número de eventos agrupados por faixas de magnitudes e de duração, discretizados conforme critério definido a partir do levantamento dos dados monitorados.

Em um determinado ponto de medição, uma VTCD é caracterizada a partir da combinação dos parâmetros da magnitude e duração de cada evento fase-neutro. Eventos fase-neutro simultâneos são agregados, compondo um mesmo evento no ponto de monitoração (agregação de fases). Ou seja, eventos que ocorrem simultaneamente em fases distintas são definidos como eventos bifásicos ou trifásicos.

A duração dos eventos bifásicos ou trifásicos é definida pelo critério de agregação das fases. O intervalo de tempo decorrido entre o instante em que o primeiro dos eventos fase-neutro transpõe determinado limite e o instante em que o último dos eventos fase-neutro retorna para determinado limite é um dos critérios, de acordo com o PRODIST (ANEEL, 2016) .

A agregação de fase pode ser feita por parâmetros críticos ou por agregação pela fase crítica:

a) **Agregação por parâmetros críticos:** a duração do evento é definida como a máxima duração entre os 3 eventos fase-neutro, ou seja, intervalo de tempo decorrido entre o instante em que o primeiro evento fase-neutro atinge 0,9 pu e o instante em que o último evento fase-

neutro retorna ao valor acima de 0,9 pu. O valor da magnitude é a que mais se distanciou da tensão de referência.

b) **Agregação pela fase crítica:** a duração do evento é definida como a duração do evento fase-neutro mais crítica ou de menor magnitude em relação a tensão de referência.

Eventos consecutivos em um período de 3 minutos, no mesmo ponto, são agregados compondo um único evento (agregação temporal). Como os eventos tratados aqui são os afundamentos de tensão com duração de 1 ciclo a 3 segundos, esta agregação temporal está associada aos afundamentos temporários de tensão, se ocorrer entre 0,1 pu e 0,9, e não aos afundamentos momentâneos de tensão.

No caso de afundamentos de tensão que ocorreram no intervalo de 3 minutos, o evento selecionado é o de menor magnitude da tensão.

2.2 Exemplo de uma Caracterização de um Afundamento Trifásico

A Figura 2.1 representa os dados informados pelo MATLAB® referente a um afundamento trifásico que ocorreu no Laboratório da UFMG no dia 26/12/2015 às 15:03 horas. A Figura 2.2 representa a curva do afundamento.

FASE A -> TENSÃO RESIDUAL: 34.51% e DURAÇÃO: 80.50ms
FASE B -> TENSÃO RESIDUAL: 38.56% e DURAÇÃO: 147.00ms
FASE C -> TENSÃO RESIDUAL: 44.86% e DURAÇÃO: 131.00ms

Figura 2.1 – Afundamento Trifásico/ Dados do MATLAB®

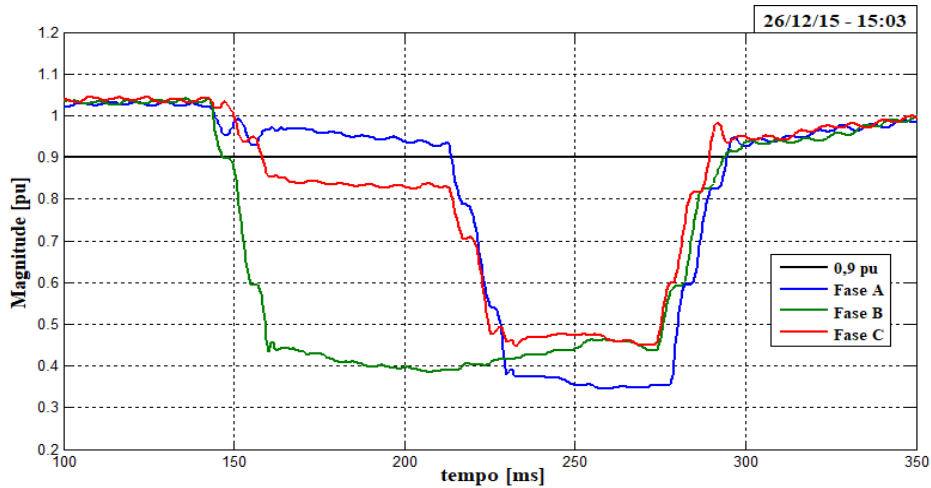


Figura 2.2 - Afundamento trifásico

A caracterização do afundamento por agregação por parâmetros críticos ou por agregação pela fase crítica será realizada de acordo com os dados de magnitude e duração desse afundamento.

a) **Agregação por parâmetros críticos:** a duração é definida como máxima duração entre as 3 fases (fase B – verde) e a magnitude que mais distanciou da tensão de referência. Esse evento seria caracterizado com duração de 147,0 ms e magnitude de 0,35 pu, conforme Figura 2.3.

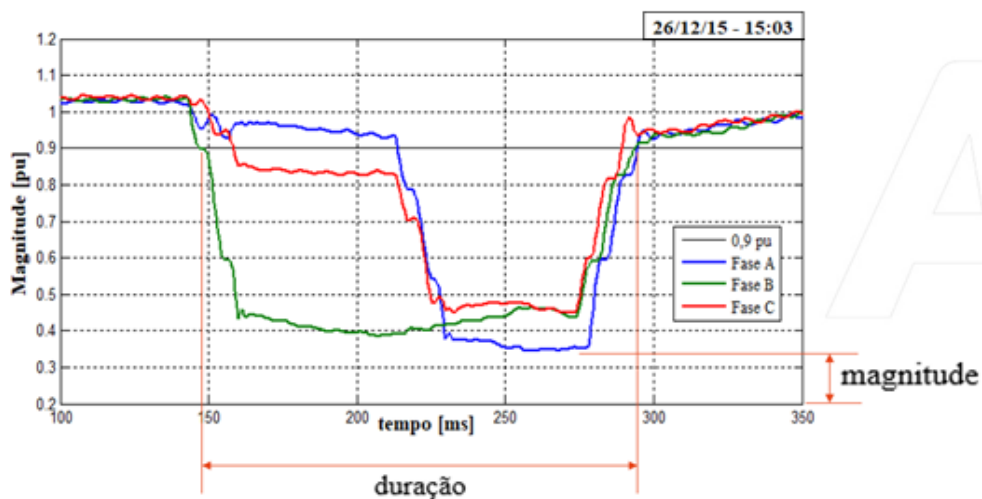


Figura 2.3 - Afundamento trifásico - agregação por parâmetros críticos

b) **Agregação pela fase crítica:** a duração é definida pelo evento com duração da fase de magnitude mais crítica (fase A – azul). Esse evento seria caracterizado com duração de 80,5 ms e magnitude de 0,35 pu. A fase com magnitude mais crítica foi a fase A, conforme Figura 2.4.

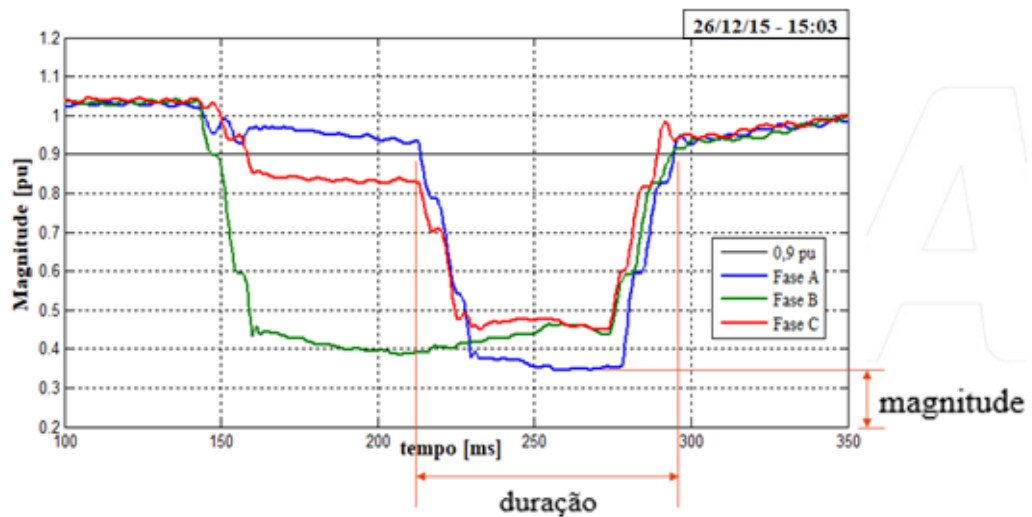


Figura 2.4 – Afundamento trifásico - agregação pela fase crítica

O critério definido para caracterização dos afundamentos bifásicos e trifásicos monitorados nessa dissertação foi a agregação pela fase crítica. A duração do evento é definida como a duração do evento fase-neutro da menor magnitude da tensão.

2.3 Compensação dos Distúrbios

A compensação dos distúrbios deve ser feita após conhecimento e análise dos dados de monitoramento. O monitoramento deve contemplar períodos anuais com ocorrências horo-sazonais de consumo de energia elétrica como o horário de verão, demandas específicas em relação aos períodos de férias, feriados, datas festivas e ocorrência específicas do local a ser

monitorado. De posse destes dados é possível buscar formas alternativas de realizar a mitigação dos afundamentos de tensão.

A forma mais simples de fazer a mitigação com o custo praticamente irrisório é a mudança das cargas para a fase menos afetada (PIRES et al., 2016). Outra forma de mitigação dos afundamentos é a instalação de um Compensador Série de Tensão (CST) para compensação dos distúrbios, que pode ser feita de acordo com a necessidade de mitigação dos afundamentos na fase mais afetada ou menos afetada.

O CST mostrado na Figura 2.5 (PIRES et al., 2012) é um dispositivo baseado em eletrônica de potência, instalado entre a rede e a carga a ser protegida. Na presença de um afundamento momentâneo de tensão, ele sintetiza e injeta a tensão faltante, para que a carga possa ter em seus terminais uma tensão com valores nominais a todo instante. O CST pode ser monofásico ou trifásico.

Em circuitos trifásicos deve ser avaliado e definido de acordo com o tipo de carga que será mitigado o afundamento. O CST monofásico pode ser instalado tanto na fase mais afetada quanto na menos afetada, dependendo do tipo de carga que está instalado nessa fase e do percentual de afundamentos que se deseja atenuar.

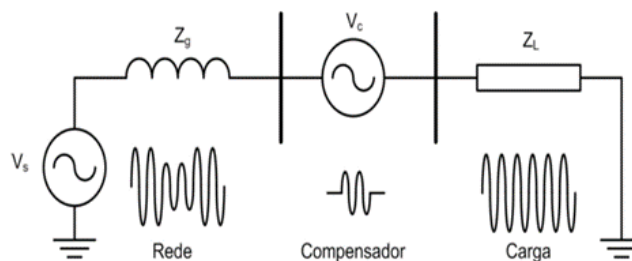


Figura 2.5 – Compensador Série de Tensão

Fonte: (PIRES et al., 2012)

Em circuitos trifásicos, quando se instala um compensador na fase mais afetada, os afundamentos passam a ser somente bifásicos e monofásicos. Se a instalação ocorrer na fase A, por exemplo, os afundamentos monofásicos nessa fase deixarão de ocorrer e os bifásicos ocorrerão somente na fase B e C.

Os afundamentos bifásicos com incidência na fase da sua instalação serão reduzidos e passariam a ser somente monofásicos, o que teria pouca influência em algumas cargas trifásicas. Exemplo são alguns conversores de frequência que possuem excelente *ride-through* perante afundamentos monofásicos (PIRES, 2011).

2.4 Estudos Realizados por outros Autores

Estudos e períodos de monitoramentos dos afundamentos são realizados em diversos tipos de indústrias e regiões em várias partes do mundo. Alguns estudos e formas de análises dos afundamentos serão mostrados, com o objetivo de conhecer e definir a melhor forma de sua mitigação.

2.4.1 Estudo em um Território Canadense em 22 Concessionárias de Energia Elétrica

Em 1991, a CEA (*Canadian Electrical Association*) fez um estudo da frequência dos afundamentos de tensão no território canadense em 22 concessionárias e foi monitorado um total de 550 consumidores industriais, comerciais e residenciais alimentados por 120 V e 347 V por 25 dias. Houveram localidades com ocorrência de 1 evento por mês, outras com 2 ou 3 eventos por mês, e outras ainda com números bem altos, entre 20 e 40 eventos. Há uma discrepância entre o número de ocorrência nas diversas localidades.

Estes resultados apresentam a necessidade de verificar a ocorrência dos eventos por pelo menos 12 meses, contemplando todas as estações do ano. É necessário também, fazer a verificação dos eventos no local em que se quer fazer a mitigação dos afundamentos, inclusive com levantamento da suscetibilidade dos equipamentos aos afundamentos momentâneos de tensão (KOVAL; HUGHES, 1997).

2.4.2 Estudos Realizados em uma Indústria Química

Em uma indústria química em Nova Déli na Índia, foram realizados alguns estudos e observou-se que se a produção for interrompida por uma média de 4 horas por semana, o custo de parada de produção seria de US\$ 14,5 milhões por ano.

O estudo para verificação dos afundamentos foi feito pelo Métodos das Distâncias Críticas (BOLLEN, 1999), onde a carga total requerida pela indústria era de 34 MW (GOSWAMI et al., 2012).

A Tabela 2.3 representa as distâncias críticas no Ponto de Acoplamento Comum (PAC). De acordo com a tabela, um afundamento com magnitude de 90% em um nível de tensão de 440 V tem distância de 3,4 km, ou seja, a distância crítica (BOLLEN, 1999) diminui com o aumento da tensão no PAC (GOSWAMI et al., 2012).

A influência de um afundamento fase-fase na carga, depende da sua conexão. Uma carga conectada em uma ligação delta terá uma queda de tensão diferente de uma carga conectada em uma ligação estrela.

Este estudo mostra que os afundamentos de tensão com maior magnitude ocorrem devido às faltas nos barramento com menor distância da indústria, e os afundamentos com menor magnitude devido às faltas que ocorre em barramentos mais distantes (GOSWAMI et al., 2012).

Tabela 2.3 - Distâncias críticas para faltas trifásicas

Magnitude do AMT no PAC	Distâncias Críticas para Diferentes Níveis de Tensão (km)			
	440 V	6,6 kV	132 kV	400 kV
90%	3,4	11,4	56,6	260,6
80%	1,9	8,3	38,9	198,5
70%	1,1	4,6	26,4	132,6
60%	0,9	2,4	13,8	48,5
50%	0,6	1,8	11,6	16,5
40%	0,4	1,1	9,8	11,4
30%	0,3	0,6	4,6	2,4

Fonte: Adaptado de (GOSWAMI et al., 2012).

2.4.3 Estudo em um Circuito Industrial

Foi feita uma pesquisa na cidade de Manizales na Colômbia (ARIAS-GUZMAN et al., 2017) em 25 usuários industriais. Em 60%, ou seja, 15 empresas reclamaram de variação de tensão e em 80%, 20 empresas relataram o uso de equipamentos sensíveis aos distúrbios. Portanto, houve a necessidade de verificar a energia na subestação que alimenta o sistema de distribuição industrial e no PAC de cada usuário, registrando o nível de tensão e a duração de cada afundamento.

As indústrias avaliadas são de diversos ramos de produção: fabricação de ferramentas, processamento de café, indústria de madeira, produção química, centro de processamentos

de dados e outras. Após análise, chegou-se à conclusão que a interrupção dos processos de produção, representaram 90% dos problemas relatados pela indústria.

Foi utilizado o IEEE 1564 (IEEE, 2014) como métodos para cálculo da gravidade do afundamento de tensão, com as seguintes definições:

- Obter registros das formas de onda por um período de medição de no mínimo de um mês;
- Realizar cálculos da tensão residual e duração dos afundamentos de tensão e
- Calcular o índice de severidade dos afundamentos nas subestações e somar as contribuições individuais em cada afundamento.

A IEEE 1564 (IEEE, 2014) propõe o seguinte cálculo para o índice de severidade, equação (3):

$$S_e = \frac{1-V}{1-V_{\text{curva}(d)}} \quad (3)$$

Onde:

V = tensão residual em pu

d = duração do afundamento

$V_{\text{curva}(d)}$ = valor da magnitude da curva de referência para a mesma duração

O padrão IEEE 1564 (IEEE, 2014) recomenda o uso da curva F47 (SEMI F47-0706, 2006) como referência.

Após o monitoramento feito de janeiro de 2008 a dezembro de 2014 foi registrado 2700 eventos de variação de tensão eficaz. Desses, 2676 são referentes a afundamentos de tensão,

ou seja, 99,11% dos eventos foram afundamentos. Os demais, menos de 1% são relativos a elevações (*swell*) e interrupções de tensão. Com esses dados foi possível calcular o fator de gravidade de cada PAC de cada usuário.

A Tabela 2.4 representa o número de afundamento na subestação 1, monitorada em 2014 na Colômbia. O maior número de afundamentos ocorreu com magnitude de 80% a 90% em intervalos entre 100 a 250 ms.

Tabela 2.4 – Número de afundamentos na subestação 1 em 2014

Magnitude (pu)	Duração (s)						
	< 0,1	0,1 - 0,25	0,25 - 0,5	1 - 3	3 - 20	20- 60	60 - 300
0,8 - 0,9	66	115	56	24	8	0	0
0,7 - 0,8	56	18	9	3	0	0	0
0,6 - 0,7	23	9	7	1	0	0	0
0,5 - 0,6	4	3	1	1	0	0	0
0,4 - 0,5	8	1	1	0	0	0	0
0,3 - 0,4	4	0	0	0	0	0	0
0,2 - 0,3	0	0	1	0	0	0	0
0,1 - 0,2	0	0	1	0	0	0	0
≤ 0,1	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Adaptado de (ARIAS-GUZMAN et al., 2017)

A Tabela 2.5 representa a distribuição dos afundamentos no ano de 2014. Os afundamentos com magnitude de 80% a 90% com duração < 100 ms teve uma frequência de ocorrência de 15,71% com grau de severidade de 0,4 W_{ss} (*pior cenário*) com valor representativo de severidade ($W_{ss} \cdot Fo$) de 0,0162, conforme definido pela IEEE 1564 (IEEE, 2014), em que o cálculo do índice de severidade está descrito de forma detalhada.

Neste estudo foi possível observar que o registro dos afundamentos atende a F47 (SEMI F47-0706, 2006) e que os problemas dos afundamentos não estão relacionados à qualidade da energia fornecida. Há problemas relacionados com a prática de engenharia deficientes,

falha no sistema de proteção e baixa imunidade dos equipamentos aos afundamentos de tensão. Os afundamentos que ocorreram de acordo com a Tabela 2.4 não são suficientes para gerar as paradas de produção relatadas pelas indústrias avaliadas (ARIAS-GUZMAN et al., 2017).

Tabela 2.5 – Distribuição dos afundamentos de tensão em 2014

Magnitude (pu)	Duração (ms)	Frequência de Ocorrência F_o (%)	Pior Cenário de Gravidade W_{SS}	Valor Representativo da Gravidade ($W_{SS} \cdot F_o$)
0,8 - 0,9	< 100	15,71	0,400	0,062
	100 - 250	27,38	0,666	0,182
	250 - 500	13,33	0,666	0,088
0,7 - 0,8	< 100	13,33	0,600	0,079
	100- 250	4,28	1,00	0,042
	250 - 500	2,14	1,00	0,021

Fonte: Adaptado de (ARIAS-GUZMAN et al., 2017)

Este estudo demonstrou que há necessidade de fazer uma avaliação com o objetivo de determinar a relação das ocorrências dos afundamentos de tensão com a interrupção dos processos industriais.

2.4.4 Estudo Realizado em uma Fábrica com Alto Índice de Automação Industrial

Foi feito um estudo em uma empresa com alto índice de automação industrial em que foi verificado que uns dos principais problemas era o afundamento de tensão. O afundamento de tensão (MORENO-MUÑOZ; ROSA, 2008) é um evento estocástico que envolve uma variedade de fatores aleatórios como tipo de curto-circuito no sistema de energia, localização das falhas, desempenho do sistema de proteção e descargas atmosféricas.

A instalação da fábrica é em um alimentador de 25 kV e possui seu próprio transformador (Δ -Y) de 630 kVA que reduz de 230 kV/400 V. O ramo de atividade é fabricação de refrigeradores e sistemas de refrigeração para indústria hoteleira e de massas. O monitoramento foi feito de maio de 2014 a abril de 2015.

A Figura 2.6 (MORENO-MUÑOZ; ROSA, 2008) representa todos os eventos que ocorreram durante o período de monitoramento dos dados da indústria (12 meses). Há eventos de afundamentos e de elevação de tensão. A tolerância da curva está em $\pm 10\%$ da tensão nominal em que o equipamento funciona corretamente. Se a tensão diminui para 70% do nominal é permitido uma duração do evento de 0,5 segundo. Esta curva de sensibilidade se aplica a equipamentos de TI, desconhecida para outros tipos de equipamentos.

De acordo com o estudo feito nesta indústria e tomando a curva ITIC somente como referência, chegou-se à conclusão (MORENO-MUÑOZ; ROSA, 2008) de que ocorrerá um número médio de 45 afundamentos e 5 interrupções momentâneas a cada mês nesta fábrica.

Não há uma proposta única para mitigar todos os afundamentos. A mitigação é necessária de acordo com cada conjunto de equipamentos para encontrar a solução adequada, inclusive com avaliação de custo e benefício. Uma sugestão foi adequar os fabricantes dos equipamentos utilizados nos processos de fabricação, revisando as fontes de alimentação para suportar os eventos de variação de tensão, ou seja, as considerações de qualidade de energia precisam ser incorporadas nas máquinas e equipamentos da fábrica, explorando a disponibilidade e adequação dos dispositivos de mitigação existentes, para tornar o processo industrial em condições mais robustas quanto à ocorrência do evento (MORENO-MUÑOZ; ROSA, 2008).

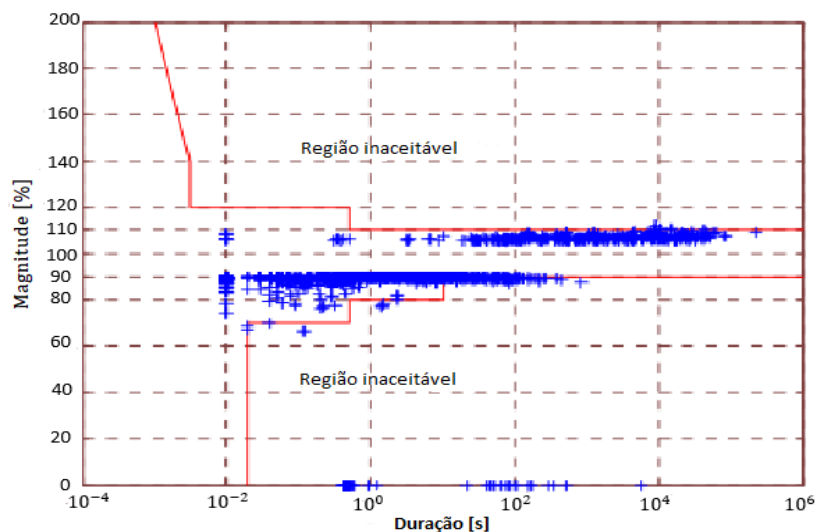


Figura 2.6 - Variações de tensão (rms) – curva ITIC
 Fonte: adaptado de (MORENO-MUÑOZ; ROSA, 2008)

2.4.5 Comportamento dos Afundamentos e Melhoria de um Sistema de Transmissão

O número de cargas industriais controladas por computador tem aumentado nos últimos anos, e isso faz com que as cargas industriais sejam sensíveis aos afundamentos de tensão.

Uma carga sensível, normalmente é protegida contra afundamentos de tensão e é desconectada quando a magnitude e a duração excedem os limites especificados. Perdas financeiras devidos a interrupções de produção causadas por afundamentos de tensão são significativas (NAIDU et al., 2012).

O monitoramento dos afundamentos de tensão no sistema de distribuição é a melhor forma de determinar as ocorrências dos afundamentos, no entanto é necessário um longo período para ter resultados precisos de magnitude, duração e frequência de ocorrência dos eventos.

O estudo (NAIDU et al., 2012) propõe uma abordagem alternativa através de simulação por computador, utilizando o método de posições de falhas e método de distâncias críticas (BOLLEN, 1999).

Foi utilizado a abordagem de Monte-Carlo (BUICE et al., 2006) para gerar os dados aleatórios, combinada ao método de posições de falhas. As incertezas são: tipos de falta, localização da falta e impedância da falta. Um estudo comparativo foi realizado para o método das distâncias críticas, porém, somente para falhas trifásicas equilibradas. O sistema utilizado para verificação do desempenho foi no nordeste do Brasil.

De acordo com o estudo (NAIDU et al., 2012) e (MARTINEZ; MARTIN-ARNEDO, 2006) a melhor forma de caracterizar um afundamento é mostrada na equação (4) e na Figura 2.7.

$$N = f(V_r, d) \quad (4)$$

Onde:

N = número de afundamentos por ano

V_r = tensão residual

d = duração do afundamento

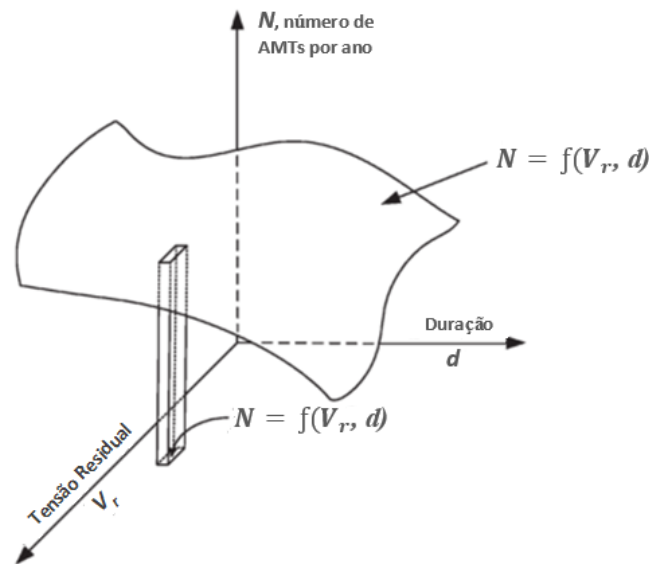


Figura 2.7 - Caracterização de um afundamento de tensão
 Fonte: Adaptado de (NAIDU et al., 2012)

Para simular os 10.000 eventos aleatórios foi definido o sistema de distribuição e demais variáveis que não serão citadas aqui, para detalhamento ver o estudo (NAIDU et al., 2012) . É de conhecimento anterior que existem 497 afundamentos por ano na região monitorada, retirando as simulações que geraram interrupção em cargas sensíveis aos eventos (198 eventos), a simulação foi equivalente a 19,72 anos de monitoramento de afundamentos com 9802 eventos. Para efeito de comparação foi instalado um medidor de qualidade durante 180 dias.

A Tabela 2.6 representa o número de afundamentos inaceitáveis por ano dos eventos gerados aleatoriamente e a área em destaque representa a tolerância ITIC. O número de afundamentos inaceitáveis por ano é de 66,32. Esse número é alto e considerado crítico.

Tabela 2.6 – Densidade de afundamentos dos eventos aleatórios

Magnitude (%)	Duração em Segundos						
	0 - 0,02	0,02 - 0,2	0,2 - 0,5	0,5 - 0,8	0,8 - 1,2	1,2 - 1,5	1,5 - 10
95 - 100	0,00	76,97	6,59	9,03	0,35	0,00	1,01
90 - 95	0,00	57,60	16,33	36,71	1,32	0,00	3,14
85 - 90	0,00	34,02	10,24	55,98	0,05	0,00	2,54
80 - 85	0,00	23,83	21,95	24,49	0,15	0,20	2,03
75 - 80	0,00	15,57	15,62	7,35	0,15	0,20	0,51
70 - 75	0,00	8,47	6,49	2,69	0,15	0,20	0,71
65 - 70	0,00	5,37	5,88	2,13	0,15	0,30	0,10
60 - 65	0,00	1,67	4,41	1,37	0,05	0,05	0,00
55 - 60	0,00	1,57	1,12	0,30	0,15	0,20	0,41
50 - 55	0,00	1,22	0,56	0,10	0,10	0,51	0,00
45 - 50	0,00	1,17	0,46	0,61	0,10	0,56	0,96
40 - 45	0,00	0,25	0,61	0,10	0,05	0,35	0,10
35 - 40	0,00	0,10	0,20	0,10	0,05	0,41	0,15
30 - 35	0,00	0,41	0,00	0,51	0,35	0,25	0,10
25 - 30	0,00	0,41	0,10	0,35	0,25	0,41	0,25
20 - 25	0,00	0,81	1,17	0,25	0,15	0,25	0,25
15 - 20	0,00	1,27	0,00	0,66	0,41	0,10	0,51
10 - 15	0,00	1,12	0,30	1,17	0,20	0,25	0,20
5 - 10	0,00	0,71	0,96	1,37	0,25	0,10	0,51
0 - 5	0,00	1,52	0,86	0,81	0,30	0,20	0,20

Fonte: Adaptado de (NAIDU et al., 2012)

A Figura 2.8 representa a distribuição acumulada com intervalo de confiança de 95% para o valor médio de $66,30 \pm 0,7$.

A Tabela 2.7 representa o número de afundamentos inaceitáveis por ano dos eventos medidos por 180 dias, e a área destacada representa a tolerância ITIC. O número de afundamentos inaceitáveis por ano é de 66.

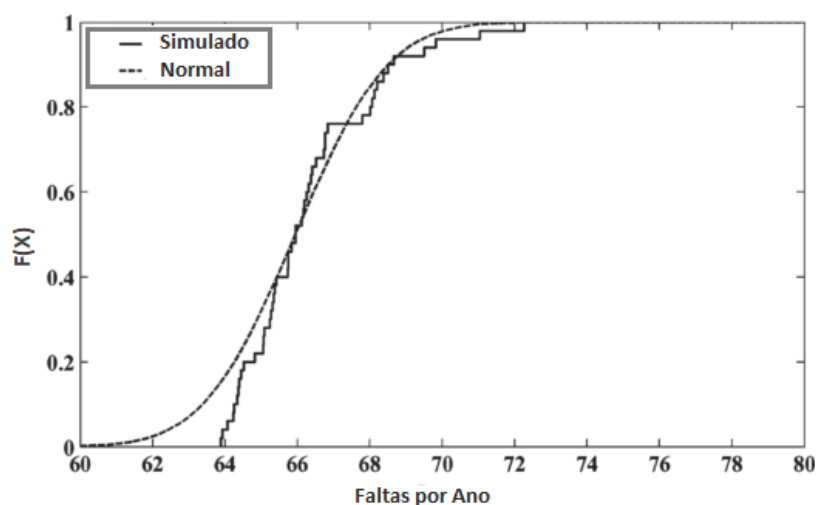


Figura 2.8 – Distribuição acumulada do número de afundamentos inaceitáveis por ano
Fonte: Adaptado de (NAIDU et al., 2012)

Analisando a Tabela 2.6 (eventos aleatórios) e a Tabela 2.7 (eventos medidos) é possível observar que os valores são muito similares e que o método de Monte-Carlo para geração dos dados dos eventos, a situação de contorno e demais análises são suficientes para efetuar a avaliação dos afundamentos neste sistema de distribuição.

Outros fatores importantes foram observados neste trabalho que vale ressaltar. O desempenho do sistema de distribuição poderá ser melhorado pelo ajuste adequado dos relés de proteção, limpeza dos isoladores de proteção, manutenção dos cabos dos alimentadores de distribuição e instalação de para-raios nas redes de distribuição de energia (NAIDU et al., 2012).

Tabela 2.7 – Densidade dos afundamentos dos eventos medidos

Magnitude (%)	Duração em Segundos						
	0 - 0,02	0,02 - 0,2	0,2 - 0,5	0,5 - 0,8	0,8 - 1,2	1,2 - 1,5	1,5 - 10
95 - 100	0	44	28	16	0	0	0
90 - 95	0	36	16	8	12	8	0
85 - 90	0	24	20	12	16	0	4
80 - 85	0	20	12	4	4	0	8
75 - 80	0	16	24	4	2	2	0
70 - 75	0	24	16	2	0	2	0
65 - 70	0	8	6	0	0	0	0
60 - 65	0	6	4	2	2	0	0
55 - 60	0	4	2	0	0	0	2
50 - 55	0	4	2	2	0	0	0
45 - 50	0	0	0	0	2	0	0
40 - 45	0	0	0	0	0	0	0
35 - 40	0	0	0	0	0	0	0
30 - 35	0	0	2	0	0	0	0
25 - 30	0	0	0	2	0	0	0
20 - 25	0	0	0	0	0	0	0
15 - 20	0	0	0	0	0	0	0
10 - 15	0	0	0	0	0	0	0
5 - 10	0	0	0	0	0	0	0
0 - 5	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Adaptada de (NAIDU et al., 2012)

2.4.6 Índice de Energia dos Afundamentos

A IEEE 1564 (IEEE, 2014) define a equação para cálculo de energia dos afundamentos (E_{VS}), conforme equação (5):

$$E_{VS} = \int_0^T \left[1 - \left\{ \frac{V(t)}{V_{nom}} \right\}^2 \right] dt \quad (5)$$

Onde:

$V(t)$ = tensão rms residual do afundamento

V_{nom} = tensão nominal

A tensão nominal deve ser expressa na mesma unidade da tensão do afundamento e a energia do afundamento deve ser expressa em ciclos, milissegundos ou segundos.

O cálculo da energia do afundamento utilizando tensão e duração deve ser realizado de acordo com a equação (6):

$$E_{VS} = \left[1 - \left(\frac{V}{V_{nom}} \right)^2 \right] \cdot T \quad (6)$$

Onde:

T = duração em ms ou ciclos

V = tensão residual do evento

Como exemplo ((IEEE, 2014), um afundamento de 0,75 pu e 4 ciclos de duração pode ser calculado de acordo com a equação (7) em 60 Hz:

$$E_{VS} = [1 - 0,75^2] \cdot 0,0667 \text{ s} = 0,0292 \text{ s ou } 29,2 \text{ ms ou } 1,75 \text{ ciclos} \quad (7)$$

A energia de um afundamento de tensão pode ser interpretada como energia (ou falta dela) no evento de queda de tensão.

De acordo com a IEEE 1564 (IEEE, 2014), considere uma carga de impedância constante com consumo de energia ativa (P_o) na tensão nominal (V_{nom}). Quando a tensão cai durante um afundamento de tensão, o consumo de energia ativa na carga cai de acordo com a equação (8):

$$P = \left(\frac{V}{V_{nom}} \right)^2 \cdot P_o \quad (8)$$

A IEEE 1564 (IEEE, 2014) tem informações complementares para cálculo da energia em uma afundamento de tensão.

2.5 Conclusão

Neste capítulo foi descrito a metodologia de medição dos afundamentos, a forma de sua caracterização por magnitude, duração e frequência de ocorrência. Foi possível observar através dos exemplos de estudos de casos feitos por outros autores, que há necessidade de realizar o monitoramento dos afundamentos e buscar soluções adequadas a cada tipo de carga e de localização.

3. O PROCESSO DE MEDIÇÃO

Este capítulo descreve o sistema de medição, o período de monitoramento, a forma de coleta dos dados e as análises realizadas após o monitoramento.

3.1 O Sistema de Medição

O sistema de medição projetado para detecção e armazenamento dos dados dos afundamentos foi desenvolvido no Laboratório Tesla Engenharia de Potência (SILVA, 1999), laboratório pertencente à Escola de Engenharia da UFMG. O sistema de medição é denominado *Sag Captor*. A Figura 3.1 ilustra o sistema de medição.



Figura 3.1 – Sistema de medição *Sag Captor*

O sistema é composto por um microcomputador, um condicionador de sinais alimentado por um Nobreak com autonomia de 30 minutos e uma placa de aquisição de dados que trabalha diretamente no barramento do micro, facilitando a gravação dos dados na forma de arquivo no HD do micro (OLIVEIRA, 2015).

O sistema condicionador de sinais permite a aquisição de 12 sinais de tensão de até 440 V utilizando uma frequência de amostragem de 2 kHz. A placa de aquisição utilizada é o modelo *DAQCard 6062E* de fabricação da NI (*NATIONAL INSTRUMENTS*, 1997).

O software de aquisição de dados e análise da qualidade de energia dispõe de recursos que permitem a visualização dos sinais adquiridos. Além disso, apesar da tensão da rede estar sendo monitorada, o recurso de disparo ou “trigger” é programado de forma a armazenar apenas os eventos de AMT.

Os dados dos afundamentos monitorados são disponibilizados pelo software através de um arquivo de dados em formato de texto. Os arquivos de pontos dos eventos registrados foram processados no MATLAB® (OLIVEIRA, 2015), considerando:

- Para o cálculo do valor eficaz uma janela de um ciclo;
- A caracterização dos AMT foi feita através de duração e magnitude dos afundamentos e
- Para os eventos bifásicos e trifásicos o critério para definição da magnitude e duração do afundamento foi feito pelo método de agregação pela fase crítica, onde a duração do evento é definida como a duração do evento da fase de menor magnitude.

3.2 Período de Monitoramento

O período de monitoramento dos dados foi de setembro de 2015 a dezembro de 2016, gerando 16 meses de dados dos afundamentos a serem adicionados aos 36 meses de dados coletados anteriormente (OLIVEIRA, 2015) no Laboratório Tesla da UFMG.

Os dados medidos em 16 meses totalizam 138 eventos com média de 8,6 eventos por mês.

3.3 Dados Coletados no Monitoramento

Os dados foram coletados em sistema trifásico fase-fase de 220 V. Os dados foram coletados diariamente e armazenados em um banco de dados com informação de data, hora da ocorrência, duração e magnitude por fase (A, B e C). Foram gerados os seguintes gráficos referentes aos afundamentos:

- a) Número de eventos por mês;
- b) Comparação dos números de eventos com o índice de precipitação do local em que os afundamentos foram coletados;
- c) Ocorrência dos eventos por hora do dia;
- d) Tipo de evento (monofásico, bifásico ou trifásico);
- e) Duração dos eventos;
- f) Magnitude dos eventos;
- g) Desbalanceamento de tensão em afundamentos bifásicos e trifásicos;
- h) Média e desvio padrão mensal dos afundamentos;
- i) Média e desvio padrão do índice de precipitação e
- j) Equação de regressão da curva de correlação dos afundamentos em função do índice de precipitação.

Os resultados dos dados monitorados são apresentados no capítulo 4 da seguinte forma:

- a) Período de setembro a dezembro de 2015.
- b) Período de janeiro a dezembro de 2016.

- c) Comparação do período de setembro a dezembro de 2016 com o mesmo período de 2015.
- d) Comparação do período de janeiro a dezembro de 2016 com os dados monitorados anteriormente, de janeiro a dezembro de 2013.

Obs.: Os dados do ano de 2013 são de janeiro a dezembro, por ser um ano completo e recente de dados anteriores (OLIVEIRA, 2015), foi utilizado para comparação com o ano de 2016.

- e) Análise dos dados referentes a 52 meses de monitoramentos dos afundamentos de abril de 2011 a março de 2014 de 36 meses (OLIVEIRA, 2015) e de setembro de 2015 a dezembro de 2016 de 16 meses.

4. RESULTADO DA MONITORAÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos eventos nos 16 meses de monitoramento, comparação dos resultados com dados coletados anteriormente e análise de 52 meses de monitoramento dos afundamentos no Laboratório Tesla da UFMG.

Os resultados dos eventos monitorados são do período de setembro de 2015 a dezembro de 2016. Serão tratados em 2 etapas:

- a) Setembro a dezembro de 2015 e
- b) Janeiro a dezembro de 2016.

Os dados referentes ao ano de 2016 serão tratados primeiramente, pois a tratativa dos dados feita em um ano completo facilita a visualização por contemplar as 4 estações do ano, visto que, os afundamentos possuem uma correlação com as questões climáticas, principalmente em relação à precipitação (OLIVEIRA, 2015).

4.1 Dados Monitorados no Período de Janeiro a Dezembro de 2016

4.1.1 Número de Eventos Registrados e Índice de Precipitação por Mês

No ano de 2016 houve ocorrência de 102 afundamentos de tensão distribuídos por mês, conforme Figura 4.1. A média foi de 8,5 afundamentos/mês.

O índice de precipitação foi coletado na Estação Automática Pampulha - A521, conforme relatório recebido do 5º DISME (FERNANDES, 2016). Esta estação está localizada dentro do Campus da UFMG a 2,2 km de distância do Laboratório Tesla de Engenharia.

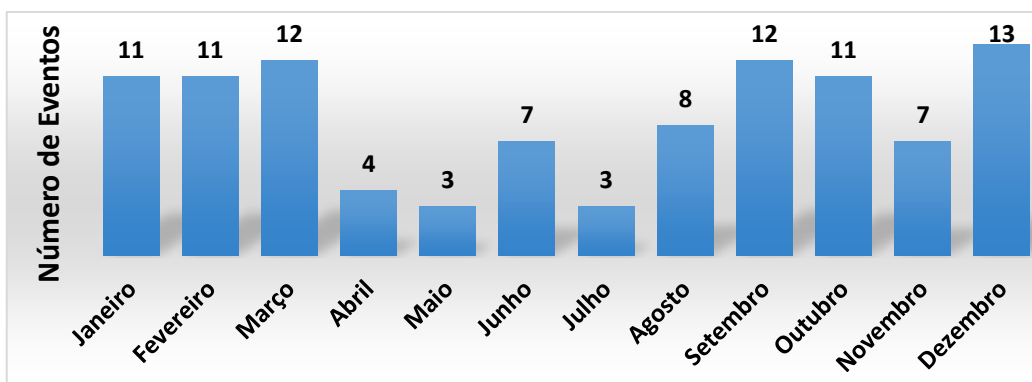


Figura 4.1 - Número de afundamentos registrados em 2016

A Figura 4.2 representa o índice de precipitação no ano de 2016 em milímetros. Existe uma tendência de ocorrer maior número de afundamentos nos meses mais chuvosos. Os meses de janeiro e dezembro tiveram precipitações de 375 e 326 mm/mês e afundamentos de 11 e 13 eventos/mês. Por outro lado, os meses de maio, julho e agosto tiveram precipitação nula e baixo número de afundamentos, sendo 3 no mês de maio, 3 no mês de julho e 8 no mês de agosto.

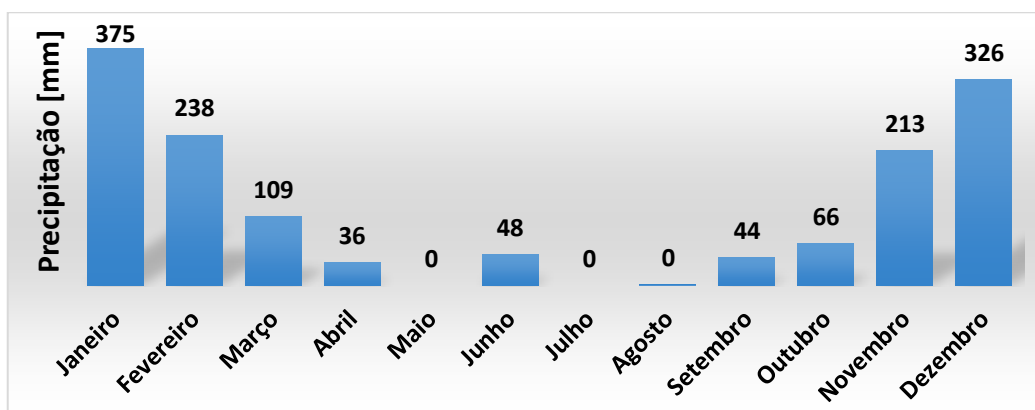


Figura 4.2 - Precipitação no ano de 2016

4.1.2 Eventos Registrados por Hora do Dia

Os eventos em função do horário de ocorrência são mostrados na Figura 4.3. O maior número de afundamentos ocorre no período da tarde, com maior incidência no horário de 17:00 às

18:00 horas com 12 eventos. A concentração neste horário está ligada principalmente às chuvas de verão, que normalmente ocorrem no final do dia na região monitorada.

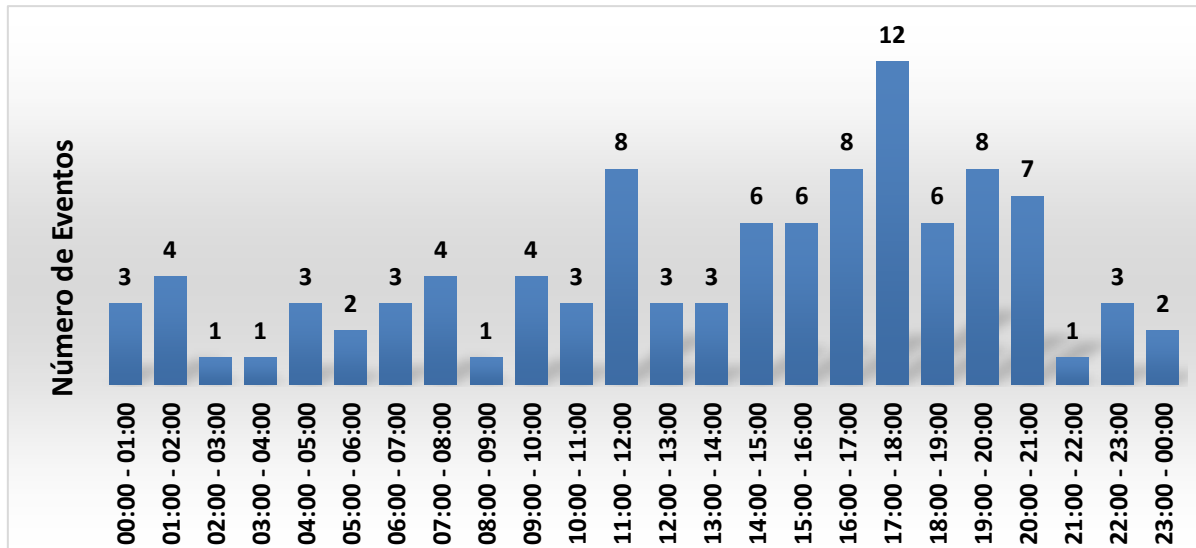


Figura 4.3 – Número de eventos por hora do dia

4.1.3 Duração dos Afundamentos

Uma forma de caracterização dos afundamentos é feita através da duração. De acordo com o PRODIST (ANEEL, 2016), são considerados afundamentos momentâneos de tensão, os eventos com duração superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos. Equação (9). Estes afundamentos são mostrados na Figura 4.4.

$$1 \text{ ciclo} \leq \text{AMT}_{(\text{tempo})} \leq 3 \text{ segundos} \quad (9)$$

O percentual de eventos entre 1 ciclo e 100 ms é de 62%, com ocorrência de 63 eventos. Eventos entre 100 ms e 200 ms representam 21% com 21 eventos. O maior número de eventos ocorreu nos afundamentos com menor tempo de duração, 1 ciclo a 200 ms que representam 82%, com 84 eventos.

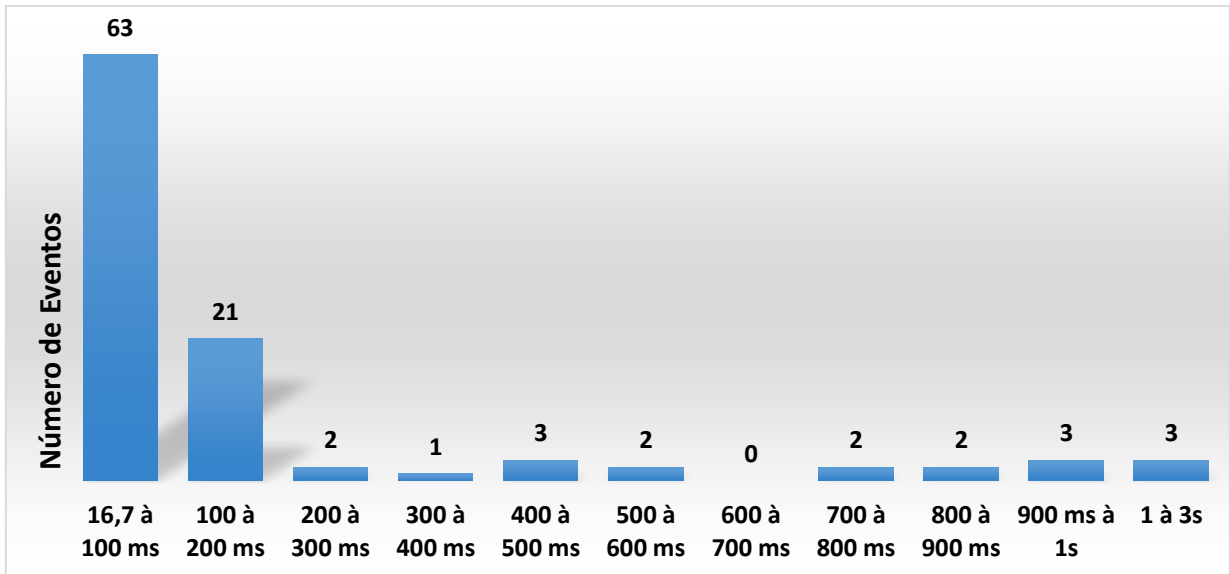


Figura 4.4 - Número de afundamentos por duração (ms)

4.1.4 Magnitude dos Afundamentos

Outra forma de caracterização dos afundamentos é a magnitude ou amplitude dos afundamentos, ou seja, o valor da tensão residual em um afundamento.

Conforme definido no PRODIST (ANEEL, 2016) são considerados afundamentos de tensão, eventos com tensão residual superior ou igual a 10% da tensão de referência até valores menores que 90%, equação (10):

$$0,1 \text{ pu} \leq \text{AMT}_{(\text{magnitude})} < 0,9 \text{ pu} \quad (10)$$

A Figura 4.5 representa a tensão residual dos afundamentos monitorados. O maior número de afundamentos ocorreu com tensão residual acima de 60%. Foram 81 eventos, ou seja 79% de 102 eventos. A faixa de tensão residual com maior frequência de ocorrência foi entre 70% e 80%, com 34 afundamentos.

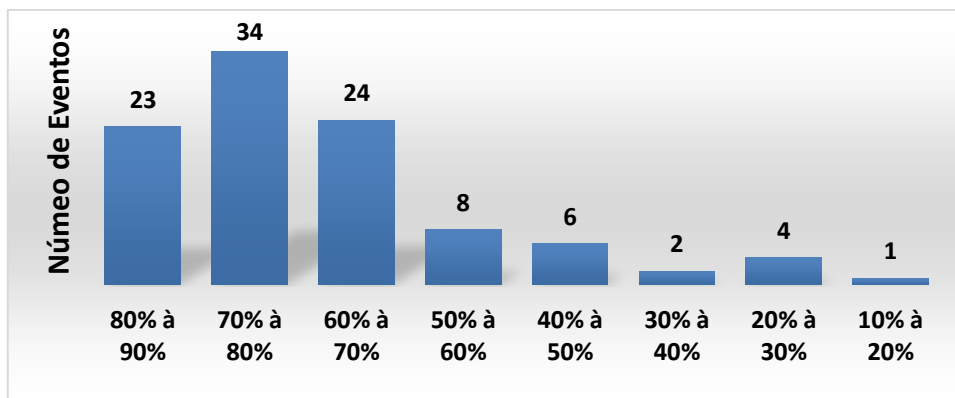


Figura 4.5 - Número de afundamentos por tensão residual

4.1.5 Eventos por Tipo de Afundamentos

Os eventos por tipo de afundamento: trifásicos, bifásicos ou monofásicos são representados na Figura 4.6. Ocorreram 30 afundamentos trifásicos, 39 afundamentos bifásicos e 33 afundamentos monofásicos. Os afundamentos trifásicos representam 30% dos eventos, os bifásicos 38% e os afundamentos monofásicos representam 32%.

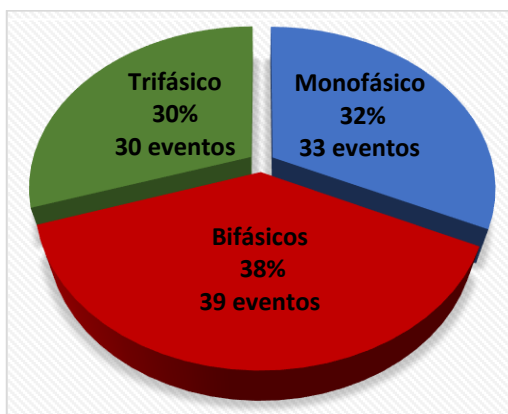


Figura 4.6 – Eventos por tipo de afundamento

Os afundamentos bifásicos são os mais representativos com 39 eventos e 38% em um total de 102 eventos. A Figura 4.7 representa os eventos bifásicos distribuídos por fase. Nas fases AB ocorreram 11 eventos, representando 28% dos afundamentos. Nas fases BC ocorreram

6 eventos, representando 15% dos eventos. Nas fases CA ocorreram 22 eventos, representando 57%.

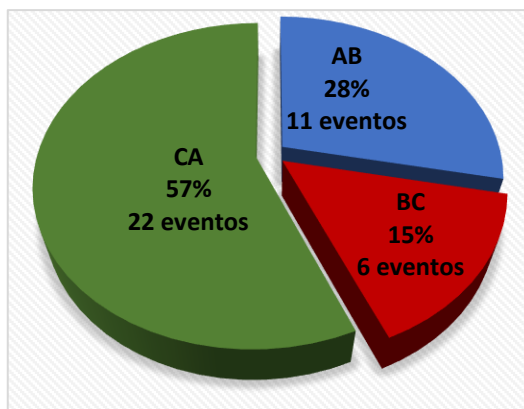


Figura 4.7 – Eventos bifásicos por fase

Os afundamentos monofásicos representam 33 eventos, distribuídos por fase, conforme Figura 4.8. A fase A teve um total de 16 eventos, representando 49%. Na fase B ocorreram 7 eventos, representado 21%. A fase C com 10 eventos, representando 30%.

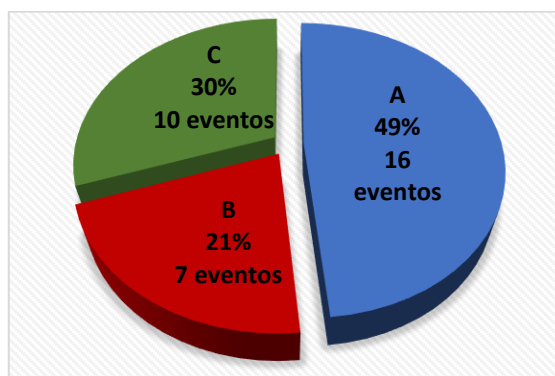


Figura 4.8 - Eventos monofásicos

A fase mais afetada nos distúrbios monofásicos foi a fase A seguida da fase C. Esta concentração de afundamentos em uma fase pode ser explicada pela distribuição desigual de cargas ou mesmo, pela proximidade de uma fase a galhos de árvores, por ter-se na região um sistema de distribuição convencional aéreo (CEMIG, 2014).

4.1.6 Distribuição dos Eventos por Fase

A fase A foi a fase mais afetada, tanto nos eventos bifásicos quanto nos eventos monofásicos, conforme Figura 4.7 e Figura 4.8.

Nos eventos bifásicos ocorreram 33 eventos na fase A, 17 eventos na fase B e 28 eventos na fase C. Nos eventos monofásicos ocorreram 16 eventos na fase A, 7 eventos na fase B e 10 eventos na fase C. Os eventos foram totalizados por fase da seguinte forma:

- Fase A = **30 (trifásicos ABC) + 11 (bifásicos AB) + 22 (bifásicos CA) + 16 (monofásicos A)**
Fase A = 79 eventos
- Fase B = **30 (trifásicos ABC) + 11 (bifásicos AB) + 6 (bifásicos BC) + 7 (monofásicos B)**
Fase B = 54 eventos
- Fase C = **30 (trifásicos ABC) + 6 (bifásicos BC) + 22 (bifásicos CA) + 10 (monofásicos C)**
Fase C = 68 eventos

A Tabela 4.1 representa a ocorrência dos afundamentos por fase, considerando que ocorreram 102 afundamentos no ano 2016. A fase A foi a mais afetada com 79 eventos (77%), seguida pela fase C com 68 eventos (67%). A fase B teve a menor ocorrência de eventos (53%), com 54 eventos. A Figura 4.9 representa os eventos por fase.

Tabela 4.1 - Afundamentos por fase

Fase	Trifásico	Bifásico	Monofásico	Total	%
A	30	33	16	79	77%
B	30	17	7	54	53%
C	30	28	10	68	67%

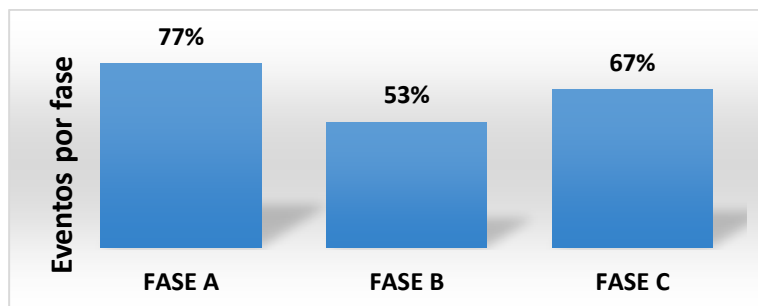


Figura 4.9 – Eventos por fase

4.1.7 Curvas dos Afundamentos

Os eventos registrados são disponibilizados pelo software do *Sag Captor* e através do MATLAB® foi possível processar os dados e gerar as curvas dos afundamentos monitorados.

Foram selecionadas algumas curvas típicas para ilustrar os afundamentos. É importante informar que todos os afundamentos mostrados são reais, e que cada figura tem a data e hora em que o afundamento ocorreu.

A Figura 4.10 representa um afundamento monofásico que ocorreu na fase A. A tensão residual desse afundamento é de 71,48% e sua duração é de 116,0 ms. As fases B e C permanecem nesse evento com tensão acima de 90%. A Figura 4.11 representa a forma de onda do afundamento.

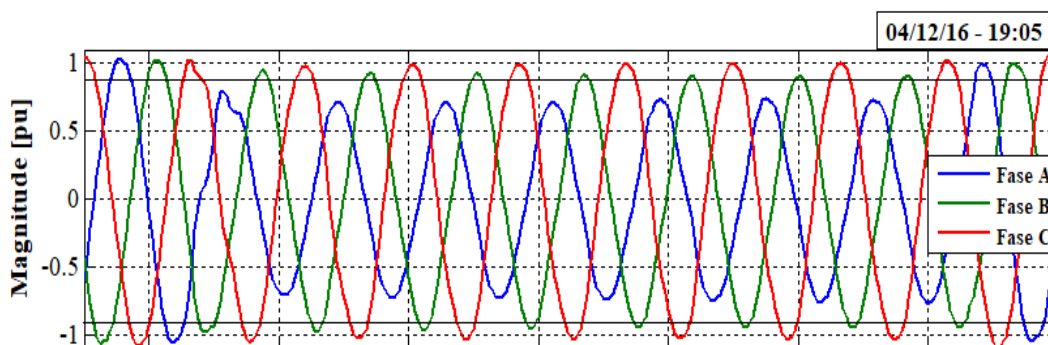


Figura 4.10 - Ondas senoidais - afundamento monofásico – fase A

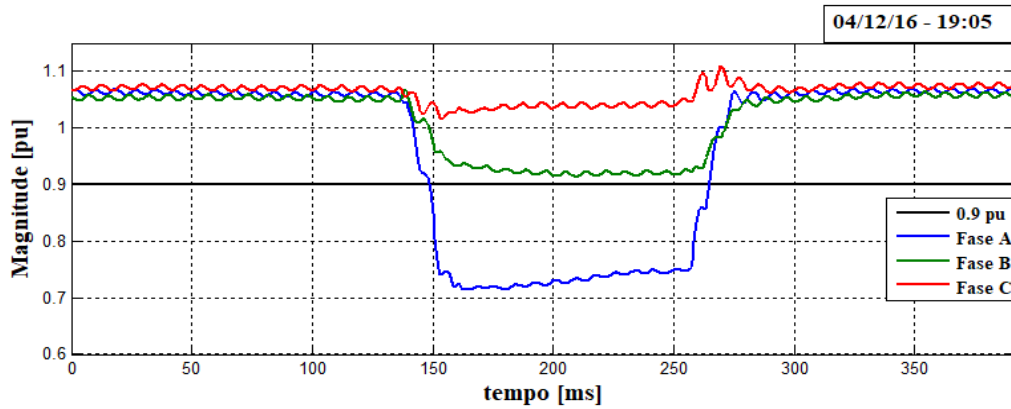


Figura 4.11 - Forma de onda do afundamento - fase A – 71,48% - 116,0 ms

A Figura 4.12 representa um afundamento bifásico que ocorreu nas fases B e C. A tensão residual na fase mais afetada (fase C) é de 82,85% durante 65,0 ms. A Figura 4.13 representa a forma de onda do afundamento.

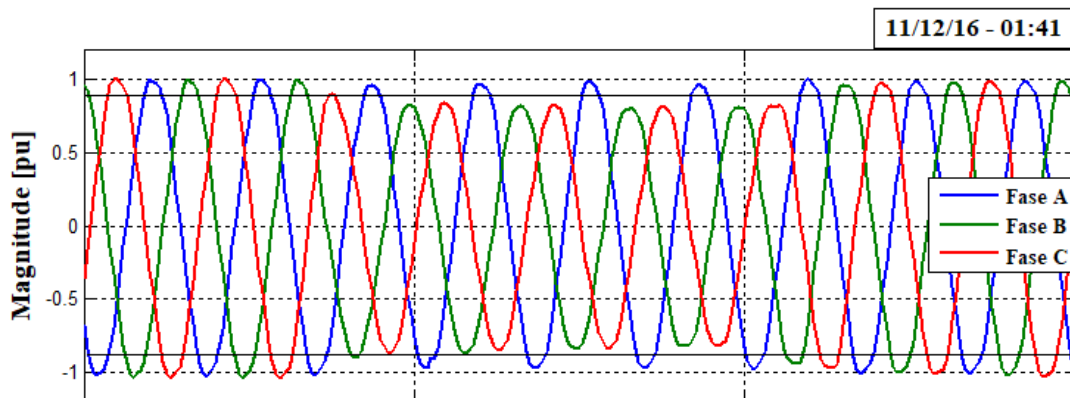


Figura 4.12 - Ondas senoidais - afundamento bifásico – fases BC

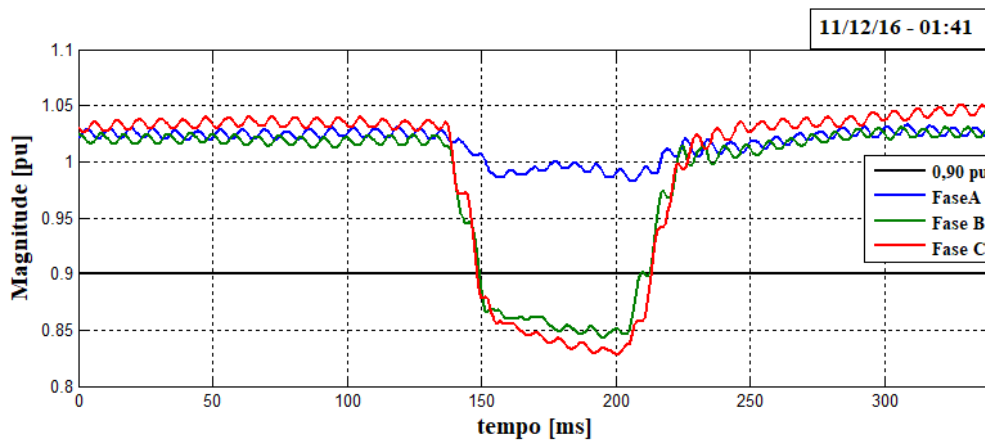


Figura 4.13 - Forma de onda do afundamento - fases BC – 82,85% - 65,0 ms

A Figura 4.14 representa um afundamento trifásico com tensão residual na fase mais afetada (fase A) de 71,42%. A tensão residual das fases B e C é de 71,70% e 73,86%, respectivamente. A duração desse afundamento é de 1,04 s. A Figura 4.15 representa a forma de onda do afundamento.

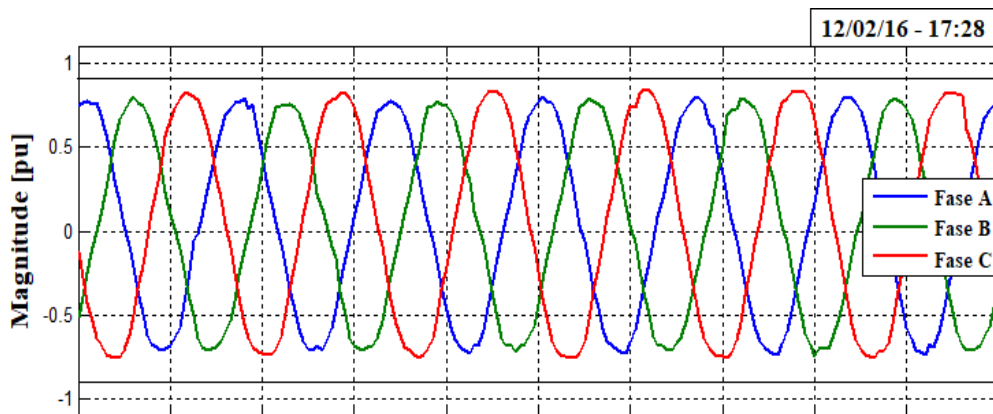


Figura 4.14 - Ondas senoidais - afundamento trifásico – fases ABC

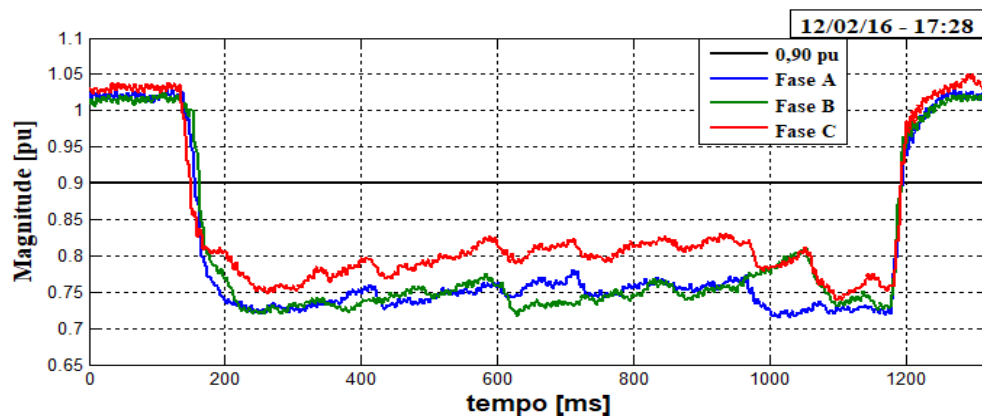


Figura 4.15 - Forma de onda do afundamento -fases ABC – 71,42% - 1,04 s

4.1.8 Desbalanceamento de Tensão em Afundamentos

O PRODIST (ANEEL, 2016) define os aspectos que interferem na qualidade da energia fornecida pelas concessionárias de energia elétrica. Para o termo desbalanceamento de tensão nos afundamentos (D) não há definição na literatura técnica. Os critérios definidos

para tratativa dos desbalanceamentos dos afundamentos bifásicos e trifásicos são definidos a seguir:

4.1.8.1 Desbalanceamento de Tensão em Afundamentos Bifásicos

Um afundamento bifásico é considerado balanceado se a relação entre a tensão residual das fases afetadas pelo afundamento for menor ou igual a 2%. Será desbalanceado se a relação entre a tensão residual das fases afetadas for maior do que 2%.

Os afundamentos bifásicos contribuíram com 39 eventos, representando 38% dos 102 afundamentos monitorados, conforme apresentado na Figura 4.6.

As fases AB tiveram 11 afundamentos, as fases BC tiveram 6 afundamentos e as fases CA tiveram 22, conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Afundamentos bifásicos

Fases afetadas	Nº de afundamentos	Percentual
AB	11	28%
BC	6	15%
CA	22	57%

Os desbalanceamentos bifásicos estão representados por fase na Tabela 4.3. Os afundamentos que ocorreram nas fases CA representam o maior número de eventos desbalanceados, com 20 afundamentos. Avaliando o total de afundamentos bifásicos, o número de eventos desbalanceados é de 87% dos eventos.

A Tabela 4.3 representa o desbalanceamento dos afundamentos bifásicos por fase afetada. O total de afundamentos bifásicos com desbalanceamento maior do que 2% é de 34

afundamentos, 87%. Apenas 5 afundamentos foram balanceados, ou seja, 13% dos afundamentos bifásicos são balanceados.

Tabela 4.3 – Desbalanceamento bifásico

Fases afetadas	Balanceado	Desbalanceado
	$\leq 2\%$	$> 2\%$
AB	2	9
BC	1	5
CA	2	20
Total	5	34
Percentual	13%	87%

Os desbalanceamentos entre as fases variam de 2% a 30%. A Figura 4.16 e a Tabela 4.4 representam o percentual distribuído dos 34 afundamentos bifásicos desbalanceados em função das faixas de variação de 2% a 10%, 13 eventos. De 10% a 20%, 11 eventos. De 20% a 30%, 10 eventos.

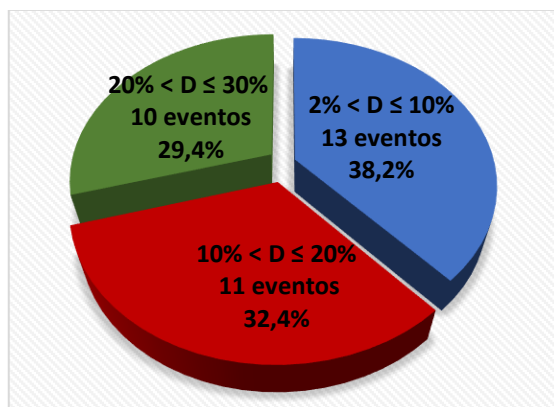


Figura 4.16 – Percentual de desbalanceamento bifásico

Tabela 4.4 - Desbalanceamento bifásico por faixa de variação

Desbalanceamento bifásico		
$2\% < D \leq 10\%$	13	38,2%
$10\% < D \leq 20\%$	11	32,4%
$20\% < D \leq 30\%$	10	29,4%

4.1.8.2 Desbalanceamento de Tensão em Afundamentos Trifásicos

Um afundamento trifásico é considerado balanceado, se a relação da tensão residual da fase mais afetada no afundamento em relação a tensão residual da fase menos afetada, for menor ou igual a 2%. Será considerado desbalanceado se a relação entre a tensão residual da fase mais afetada no afundamento, em relação a tensão residual da fase menos afetada for maior do que 2%.

A Tabela 4.5 representa os afundamentos trifásicos com 30 eventos, 29% dos 102 afundamentos monitorados, conforme apresentado na Figura 4.6.

Fases afetadas	Nº de afundamentos
ABC	30

A Tabela 4.6 representa o número de afundamentos trifásicos balanceados e desbalanceados, sendo 2 e 28 respectivamente. Os afundamentos trifásicos com desbalanceamento maior do que 2% representam 93% dos afundamentos.

Fases afetadas	Balanceado	Desbalanceado
	$\leq 2\%$	$> 2\%$
ABC	2	28
Percentual	7%	93%

Dos 30 afundamentos trifásicos, 28 são desbalanceados, porém, o desbalanceamento trifásico tem uma faixa de variação maior do que o desbalanceamento dos eventos bifásicos.

A Figura 4.17 e a Tabela 4.7 representam o percentual de desbalanceamento trifásico. A

maior parte do desbalanceamento trifásico ocorreu entre 2% e 10% da tensão residual, 14 eventos. De 10% a 30%, 3 eventos. De 30% a 50%, 7 eventos. De 50% a 70%, 4 eventos.

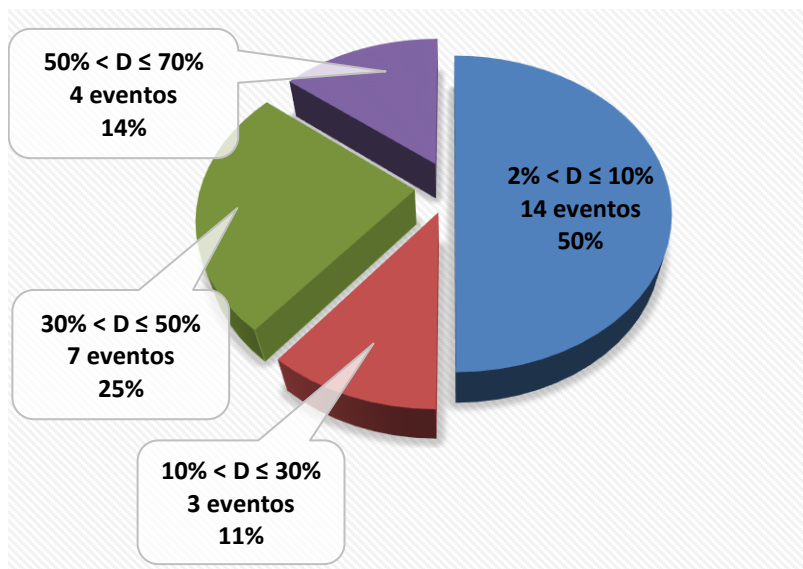


Figura 4.17 – Percentual de desbalanceamento trifásico

Tabela 4.7 – Desbalanceamento trifásico por faixa de variação

Desbalanceamento trifásico		
2% < D ≤ 10%	14	50%
10% < D ≤ 30%	3	11%
30% < D ≤ 50%	7	25%
50% < D ≤ 70%	4	14%

4.1.8.3 Curvas dos Afundamentos Balanceados e Desbalanceados

Foram geradas algumas curvas típicas dos afundamentos balanceados e desbalanceados monitorados, que são mostradas a seguir:

A Figura 4.18 representa um afundamento bifásico balanceado, ou seja, a relação da tensão residual entre as fases afetadas é menor do que 2%. Não houve afundamento na fase A, pois a tensão residual foi de 96,65. A Fase B teve tensão residual de 80,36 e a fase C de 79,76. Esse afundamento é balanceado pois a relação entre as fases afetadas é de 0,60%.

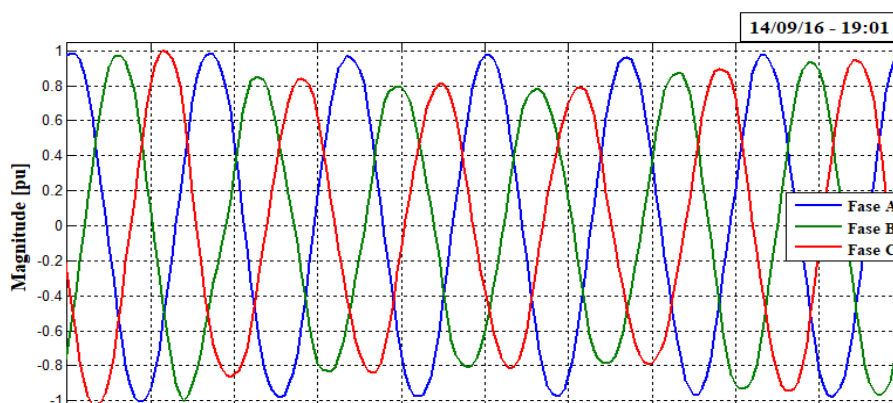


Figura 4.18- Afundamento bifásico balanceado de 0,60% – fases BC

A Figura 4.19 representa um afundamento bifásico desbalanceado. A fase A tem tensão residual de 62,75% e a fase B com 82,08%. A tensão residual na fase C foi de 91,63%, ou seja, não ocorreu afundamento na fase C. O desbalanceamento desse afundamento foi de 19,3%.

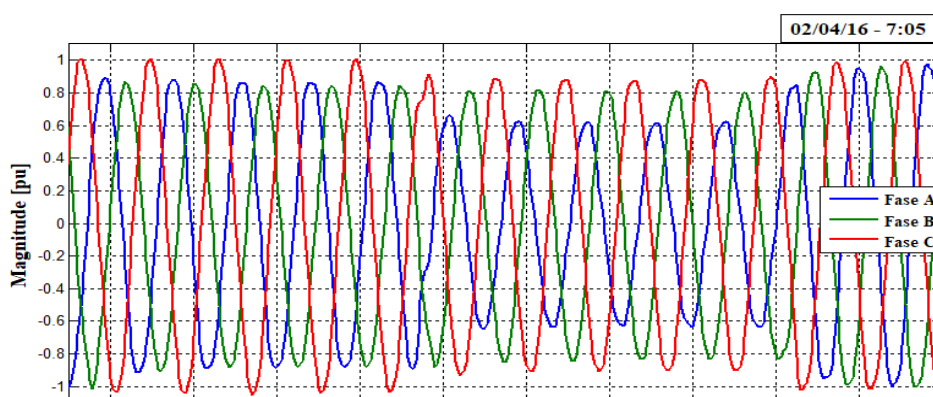


Figura 4.19 - Afundamento bifásico desbalanceado de 19,3% - Fases AB

A Figura 4.20 representa um afundamento trifásico balanceado. A tensão residual entre a fase mais afetada e a menos afetada é menor do que 2%. A fase A tem tensão residual de 85,18% e foi a fase a mais afetada. A fase B que é a fase menos afetada tem tensão residual de 86,74%. A fase C tem tensão residual de 85,35%. Esse afundamento é balanceado pois a relação entre as fases afetadas é de 1,6%.

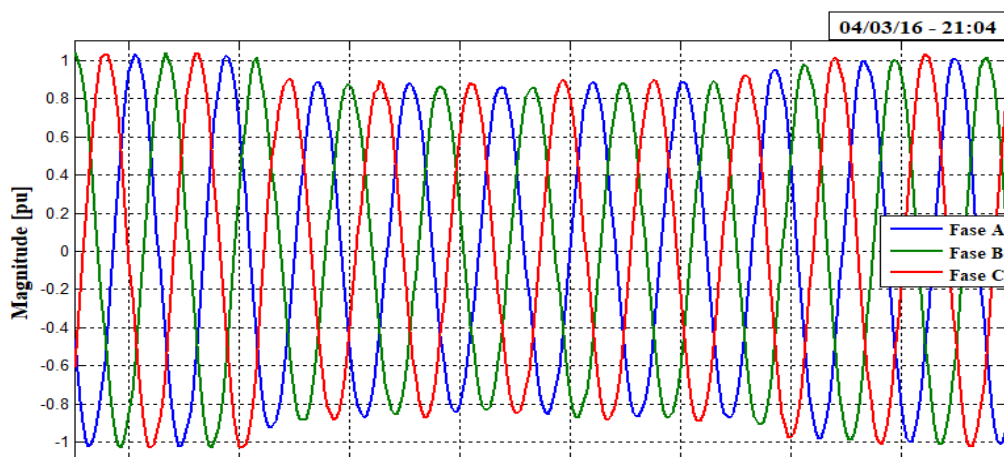


Figura 4.20 - Afundamento trifásico balanceado de 1,6%

A Figura 4.21 representa um afundamento trifásico desbalanceado. A fase A, que é a fase mais afetada tem uma tensão residual de 12,07%. A fase B de 78,61%. A fase C, que é a menos afetada de 85,75%. O desbalanceamento desse afundamento é de 73,7%.

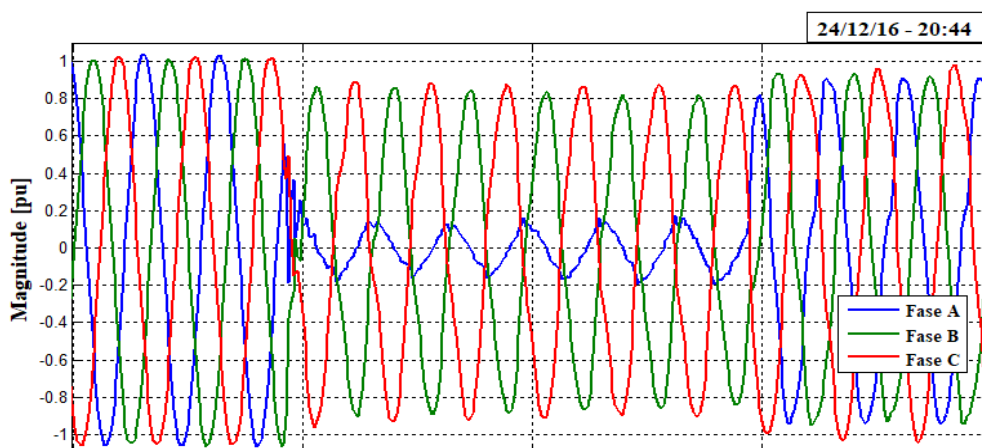


Figura 4.21 - Afundamento trifásico desbalanceado de 73,7%

4.2 Dados Monitorados no Período de Setembro a Dezembro de 2015

Os critérios utilizados para medição e definição dos afundamentos no período de setembro a dezembro de 2015 são os mesmos definidos e utilizados no período de janeiro a dezembro de 2016.

4.2.1 Número de Eventos Registrados e Índice de Precipitação por Mês

No período de setembro a dezembro de 2015 houve ocorrência de 36 afundamentos de tensão distribuídos por mês, conforme Figura 4.22. A média foi de 9,0 afundamentos/mês.

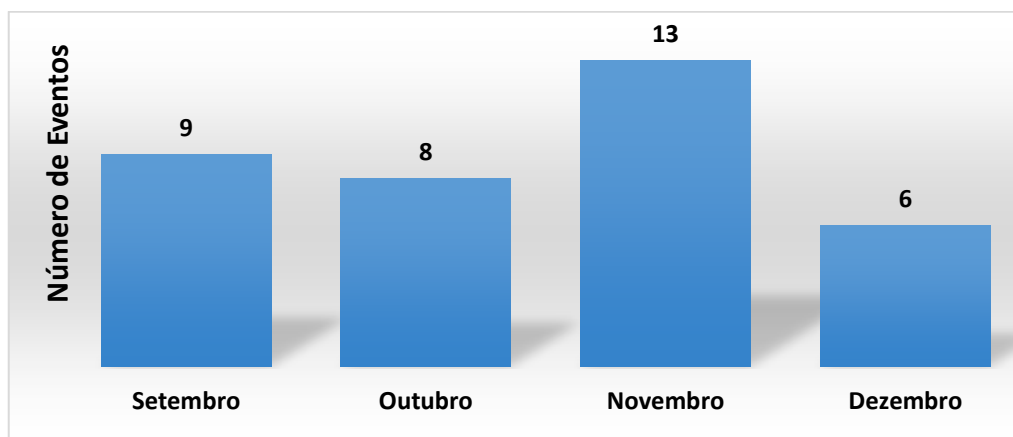


Figura 4.22 - Número de afundamentos registrados de setembro a dezembro em 2015

A Figura 4.23 representa o índice de precipitação de setembro a dezembro de 2015 em milímetros. Neste período o mês mais chuvoso foi novembro com 207 mm, seguido de dezembro com 160 mm.

O mês de novembro teve o maior índice de precipitação no período monitorado e o maior número de afundamentos/mês, sendo 13 afundamentos e 207 mm de índice de precipitação.

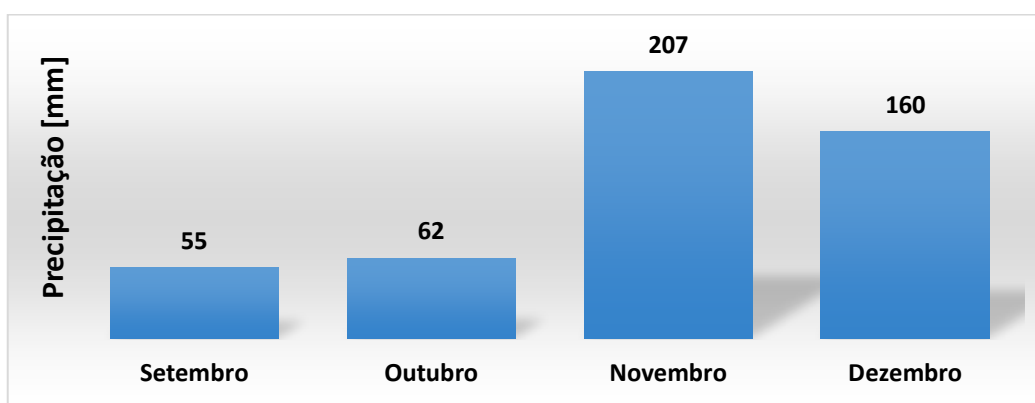


Figura 4.23 – Precipitação de setembro a dezembro de 2015

4.2.2 Eventos Registrados por Hora do Dia

Os eventos em função do horário de ocorrência são mostrados na Figura 4.24. O maior número de afundamentos ocorre no período de 15:00 às 16:00 horas com 5 eventos.

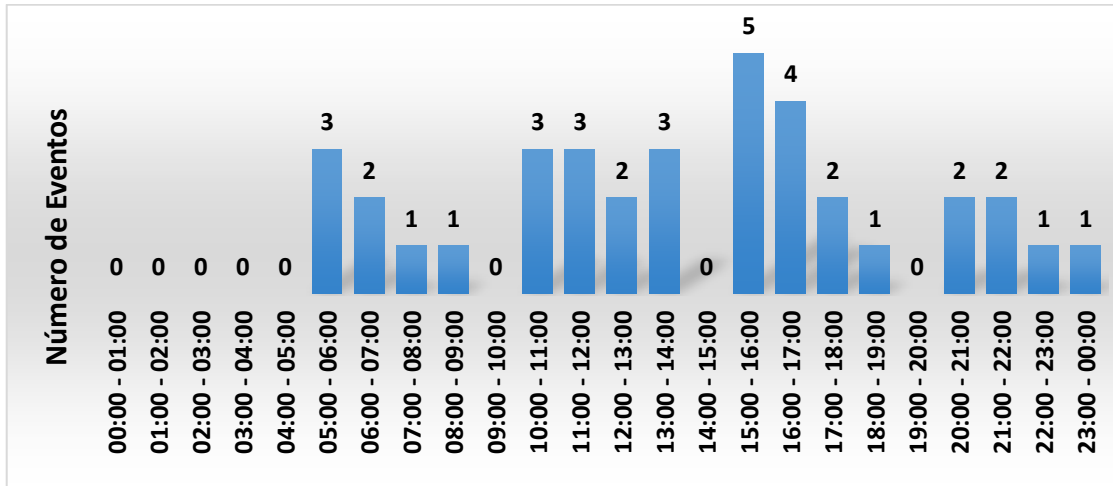


Figura 4.24 – Número de eventos por hora do dia de setembro a dezembro de 2015

4.2.3 Duração dos Afundamentos

A duração dos afundamentos é caracterizada de acordo com o PRODIST (ANEEL, 2016). Os eventos com duração superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos, equação (11), são mostrados na Figura 4.25.

$$1 \text{ ciclo} \leq \text{AMT}_{(\text{tempo})} \leq 3 \text{ segundos} \quad (11)$$

O percentual de eventos entre 1 ciclo e 100 ms é de 65%, com ocorrência de 23 eventos. Eventos entre 100 ms e 200 ms representam 14% com 5 eventos. O maior número de eventos ocorreu nos afundamentos com menor duração, 1 ciclo a 200 ms que representam 78% com 28 eventos.

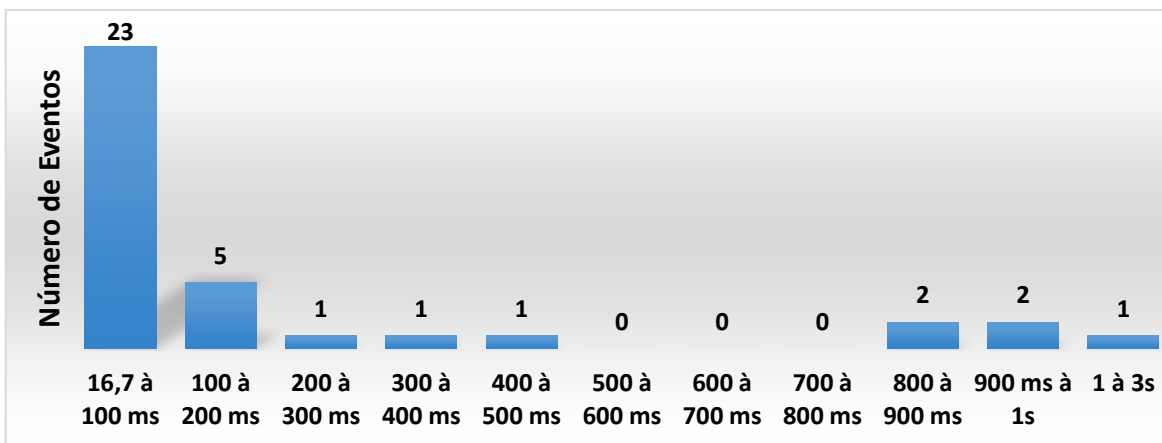


Figura 4.25 – Número de afundamentos por duração de setembro a dezembro de 2015

4.2.4 Magnitude dos Afundamentos

A magnitude é outra forma de caracterização dos afundamentos de acordo com o PRODIST (ANEEL, 2016), equação (12):

$$0,1 \text{ pu} \leq \text{AMT}_{(\text{magnitude})} < 0,9 \text{ pu} \quad (12)$$

A Figura 4.26 representa a tensão residual dos afundamentos monitorados nesse período. O maior número de afundamentos ocorreu com tensão residual acima de 50%. Foram 32 afundamentos, representando 89% dos afundamentos. A maior faixa de ocorrência foi acima de 70% com 56% dos afundamentos e 20 eventos.

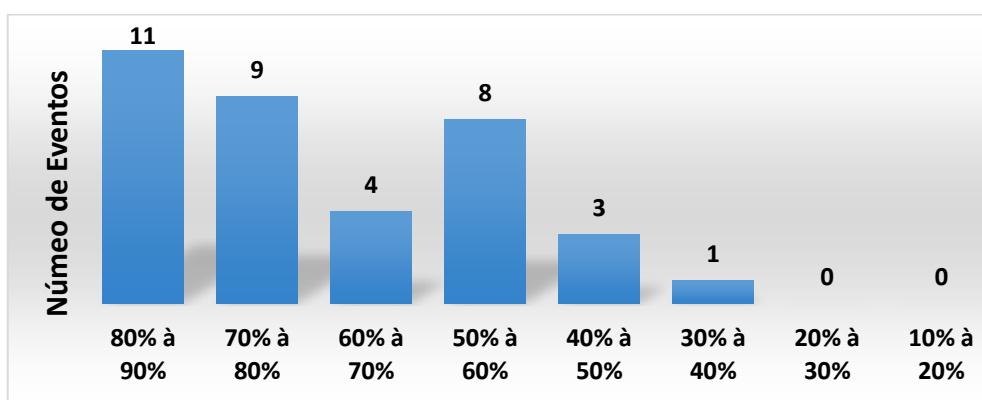


Figura 4.26 – Número de afundamentos por tensão residual de setembro a dezembro de 2015

4.2.5 Eventos por Tipo de Afundamentos

Os eventos por tipo de afundamentos: trifásicos, bifásicos ou monofásicos são representados na Figura 4.27. Ocorreram 13 afundamentos trifásicos, 12 bifásicos e 11 monofásicos. Os afundamentos trifásicos representam 36% dos eventos, os bifásicos 33% e os afundamentos monofásicos representam 31%.

Os afundamentos trifásicos são os mais representativos, embora os números de eventos estejam bastante equilibrados neste período de monitoramento.

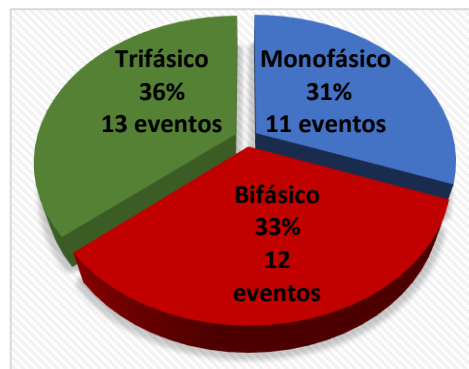


Figura 4.27 – Eventos por tipo de afundamento de setembro a dezembro de 2015

A Figura 4.28 representa os eventos bifásicos distribuídos por fase. Nas fases AB ocorreram 6 eventos, representando 50% dos afundamentos. Nas fases BC ocorreram 2 eventos, representando 17% dos eventos. Nas fases CA ocorreram 4 eventos, representando 33%.

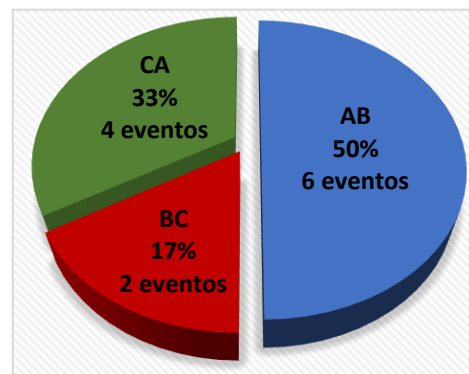


Figura 4.28 - Eventos bifásicos por fase no período de setembro a dezembro de 2015

A Figura 4.29 representa os eventos monofásicos, com 31% dos afundamentos, 11 eventos em um total de 36 afundamentos de setembro a dezembro de 2015. Na fase A ocorreram 4 eventos, representando 36,4%. Na fase B ocorreram 2 eventos, representando 18,2%. Na fase C, 5 eventos, representando 45,5%.

A fase mais afetada neste período foi a fase C seguida pela fase A.

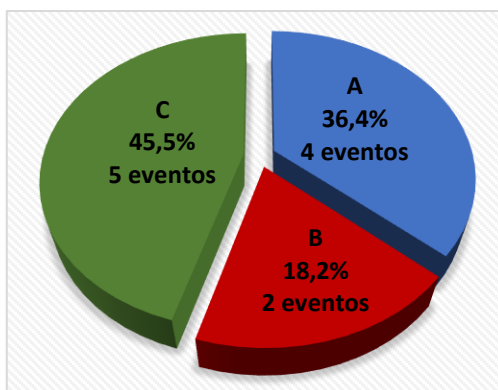


Figura 4.29 – Eventos monofásicos no período de setembro a dezembro de 2015

4.2.6 Distribuição dos Eventos por Fase

A fase A foi a fase mais afetada nos eventos bifásicos conforme Figura 4.28 e a fase C nos eventos monofásicos, conforme Figura 4.29.

Nos eventos bifásicos ocorreram 10 eventos na fase A, 8 eventos na fase B e 6 eventos na fase C. Nos eventos monofásicos ocorreram 4 eventos na fase A, 2 eventos na fase B e 5 eventos na fase C.

Os eventos foram totalizados por fase da seguinte forma:

- Fase A = 13 (trifásicos ABC) + 6 (bifásicos AB) + 4 (bifásicos CA) + 4 (monofásicos A)
Fase A = 27 eventos

- Fase B = 13 (trifásicos ABC) + 6 (bifásicos AB) + 2 (bifásicos BC) + 2 (monofásicos B)
Fase B = 23 eventos
- Fase C = 13 (trifásicos ABC) + 2 (bifásicos BC) + 4 (bifásicos CA) + 5 (monofásicos C)
Fase C = 24 eventos

A Tabela 4.8 e a Figura 4.30 representam a ocorrência dos afundamentos por fase, considerando que ocorreram 36 afundamentos de setembro a dezembro de 2016. A fase A foi a mais afetada com 27 eventos (75%), seguida pela fase C com 24 eventos (67%). A fase B foi a menos afetada (64%) com 23 eventos.

Tabela 4.8 – Afundamentos por fase no período de setembro a dezembro de 2015

Fase	Trifásico	Bifásico	Monofásico	Total	%
A	13	10	4	27	75%
B	13	8	2	23	64%
C	13	6	5	24	67%

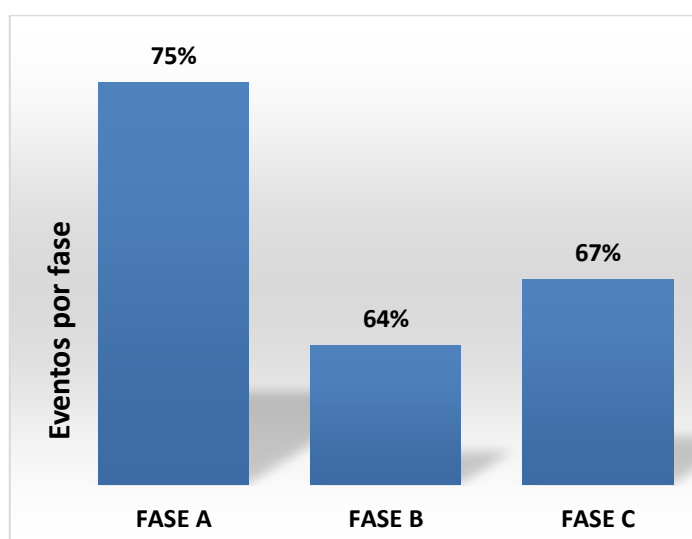


Figura 4.30 – Eventos por fase de setembro a dezembro de 2015

4.2.7 Desbalanceamento de tensão nos afundamentos no período de setembro a dezembro de 2015

4.2.7.1 Desbalanceamento de Tensão em Afundamentos Bifásicos

Um afundamento bifásico é considerado balanceado se a relação entre a tensão residual das fases afetadas pelo afundamento for menor ou igual a 2%. Será desbalanceado se a relação entre a tensão residual das fases afetadas for maior do que 2%.

Os afundamentos bifásicos contribuíram com 12 eventos, representando 33% dos 36 afundamentos monitorados, conforme Figura 4.27.

As fases AB tiveram 6 afundamentos, as fases BC tiveram 2 afundamentos e as fases AC tiveram 4, conforme Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Afundamentos bifásicos no período de setembro a dezembro de 2015

Fases afetadas	Nº de afundamentos	Percentual
AB	6	50%
BC	2	17%
CA	4	33%

Os desbalanceamentos bifásicos estão representados por fase na Tabela 4.10. O número de afundamentos desbalanceados é de 83%, com 10 eventos. Apenas 2 afundamentos foram balanceados, representando 17% dos afundamentos bifásicos.

Tabela 4.10 – Desbalanceamento bifásico no período de setembro a dezembro de 2015

Fases afetadas	Balanceado ≤ 2%	Desbalanceado > 2%
AB	1	5
BC	0	2
CA	1	3
Total	2	10
Percentual	17%	83%

Os desbalanceamentos entre as fases variam de 2% a 40%. A Figura 4.31 e a Tabela 4.11 representam o percentual distribuído dos 10 afundamentos bifásicos desbalanceados em função das faixas de variação de 2% a 10%, 5 eventos. De 10% a 20%, 2 eventos. De 20% a 30%, 2 eventos. De 30% a 40%, 1 evento.

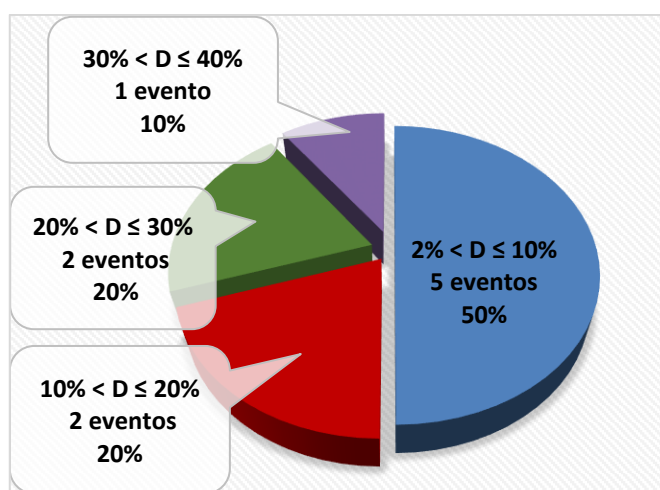


Figura 4.31 – Percentual de desbalanceamento trifásico de setembro a dezembro de 2015.

Tabela 4.11 – Desbalanceamento bifásico por faixa de variação de setembro a dezembro 2015

Desbalanceamento bifásico		
2% < D ≤ 10%	5	50%
10% < D ≤ 20%	2	20%
20% < D ≤ 30%	2	20%
30% < D ≤ 40%	1	10%

4.2.7.2 Desbalanceamento de Tensão em Afundamentos Trifásicos

Um afundamento trifásico é considerado balanceado, se a relação da tensão residual da fase mais afetada no afundamento, em relação a tensão residual da fase menos afetada, for menor ou igual a 2%. Será considerado desbalanceado se a relação entre a tensão residual da fase mais afetada no afundamento, em relação a tensão residual da fase menos afetada for maior do que 2%.

Os afundamentos trifásicos, Tabela 4.12, representam 13 eventos, com 36% dos 36 afundamentos monitorados, conforme apresentado na Figura 4.27.

Tabela 4.12 – Afundamentos trifásicos no período de setembro a dezembro de 2015

Fases afetadas	Nº de afundamentos	Percentual
ABC	13	100%

A Tabela 4.13 representa o número de afundamentos trifásicos balanceados e desbalanceados, sendo 1 e 12 respectivamente. A maior parte dos afundamentos trifásicos com desbalanceamentos maior do que 2% representam 92% dos afundamentos.

Tabela 4.13 – Desbalanceamento trifásico no período de setembro a dezembro de 2015

Fases afetadas	Balanceado ≤ 2%	Desbalanceado > 2%
ABC	1	12
Percentual	8%	92%

A Figura 4.32 e a Tabela 4.14 representam os afundamentos trifásicos desbalanceados. Dos 13 afundamentos trifásicos, 12 são desbalanceados. Ocorreram 7 eventos com desbalanceamentos de tensão em afundamentos entre 2% a 10%, representando 58,3% dos afundamentos trifásicos desbalanceados. De 10% a 20% ocorreu 1 evento, 8,3%. De 20% a 30% ocorreram 3 eventos, 25%. De 30% a 40% ocorreu 1 evento, 8,3%.

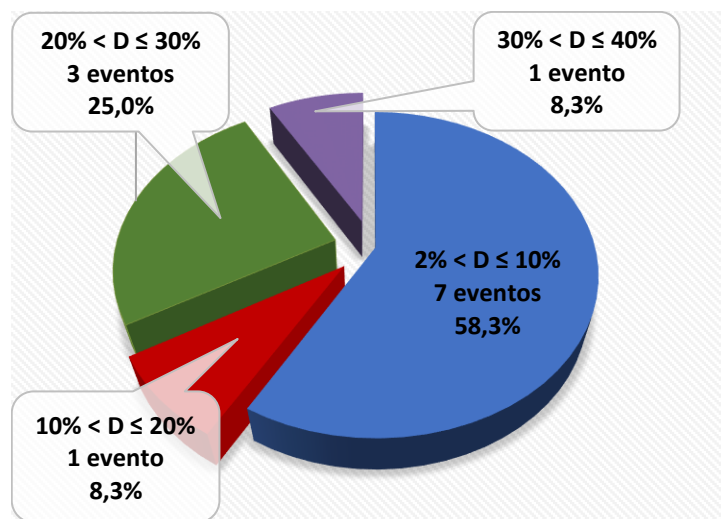


Figura 4.32 – Percentual de desbalanceamento trifásico

Tabela 4.14 - Desbalanceamento trifásico por faixa de variação

Desbalanceamento trifásico		
2% < D ≤ 10%	7	58,3%
10% < D ≤ 20%	1	8,3%
20% < D ≤ 30%	3	25,0%
30% < D ≤ 40%	1	8,3%

4.3 Comparação dos Meses de Setembro a Dezembro de 2015 e 2016

4.3.1 Número de Eventos Registrados e Índice de Precipitação

No período de setembro a dezembro de 2015 houve 36 afundamentos e no mesmo período de 2016 houve 43 afundamentos, conforme Figura 4.33.

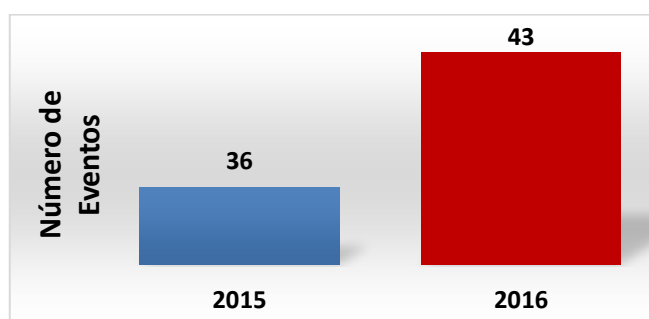


Figura 4.33 – Número de afundamentos de setembro a dezembro de 2015 X 2016

A Figura 4.34 representa o número de afundamentos nos meses de setembro a dezembro em 2015 e em 2016. A maior discrepância ocorreu no mês de dezembro, com 6 afundamentos em 2015 e 13 afundamentos em 2016. Neste período, o índice de ocorrência dos afundamentos foi 19% maior em 2016 do que no mesmo período em 2015.

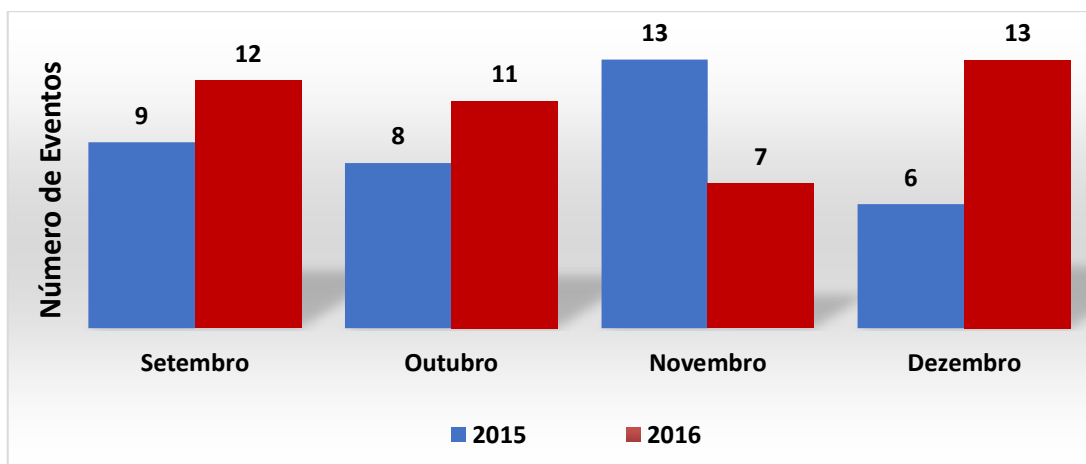


Figura 4.34 – Número de afundamentos de setembro a dezembro de 2015 X 2016

A Figura 4.35 representa o índice de precipitação no período de setembro a dezembro de 2015 e 2016. No mês de dezembro de 2016 o índice de precipitação foi de 326 mm e em 2015 foi de 160 mm, o que indica um pouco mais que o dobro de 2015 na região monitorada.

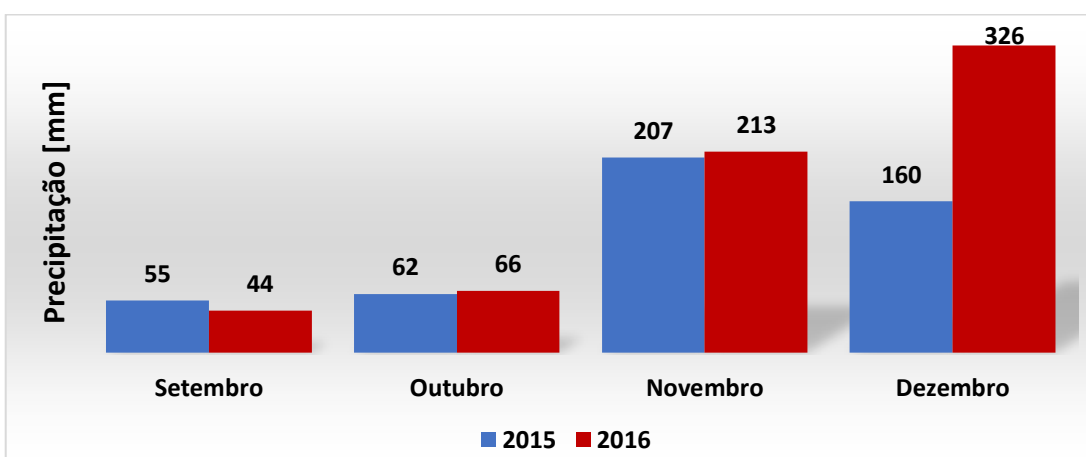


Figura 4.35 - Precipitação de setembro a dezembro de 2015 X 2016

4.3.2 Eventos Registrados por Hora do Dia

A Figura 4.36 representa o número de eventos por hora do dia no período de setembro a dezembro de 2015 e 2016. Há uma tendência em ocorrer afundamentos em horário comercial de 8:00 às 18:00 horas, mas o maior número de eventos ocorreu em 2016 no horário 19:00 às 20:00 horas, com 8 afundamentos.

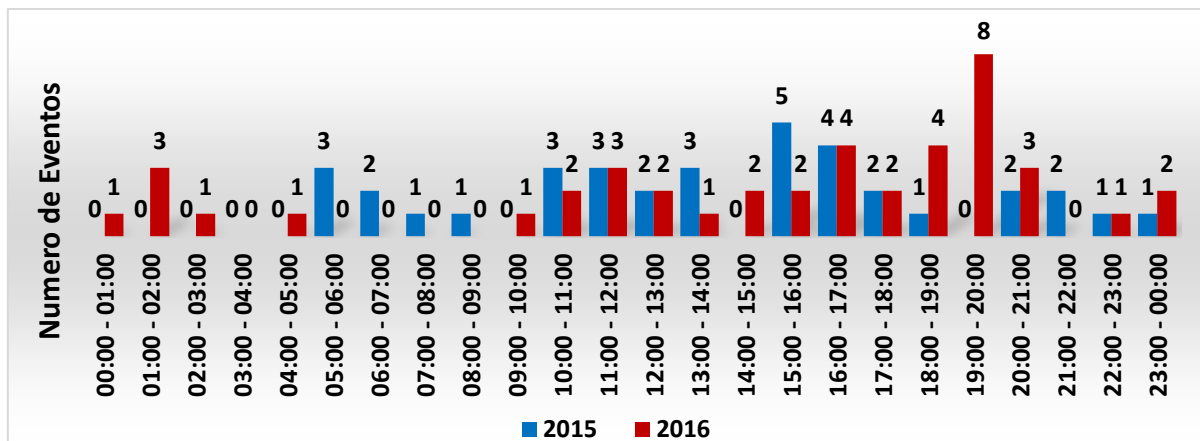


Figura 4.36 – Número de eventos por hora do dia de 2015 X 2016

4.3.3 Duração dos Afundamentos

A maior concentração dos afundamentos ocorreu entre 1 ciclo e 200 ms, conforme Figura 4.37. Em 2015 foram 78% dos afundamentos com 28 eventos e em 2016 foram 94% com 34 eventos.

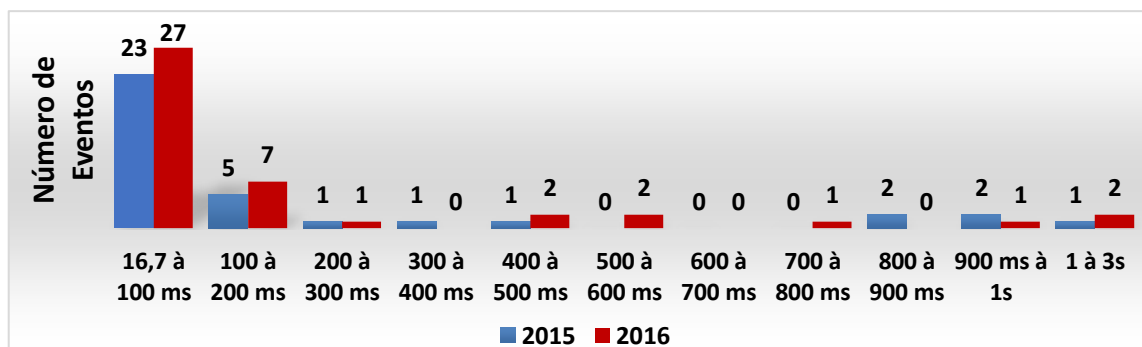


Figura 4.37 – Número de afundamentos por duração de 2015 X 2016

4.3.4 Magnitude dos Afundamentos

A magnitude ou tensão residual dos afundamentos é mostrada na Figura 4.38. A maior parte dos afundamentos ocorreu acima de 50% da tensão residual. Em 2015 foram 89% com 32 afundamentos e em 2016 foram 95% com 41 afundamentos.

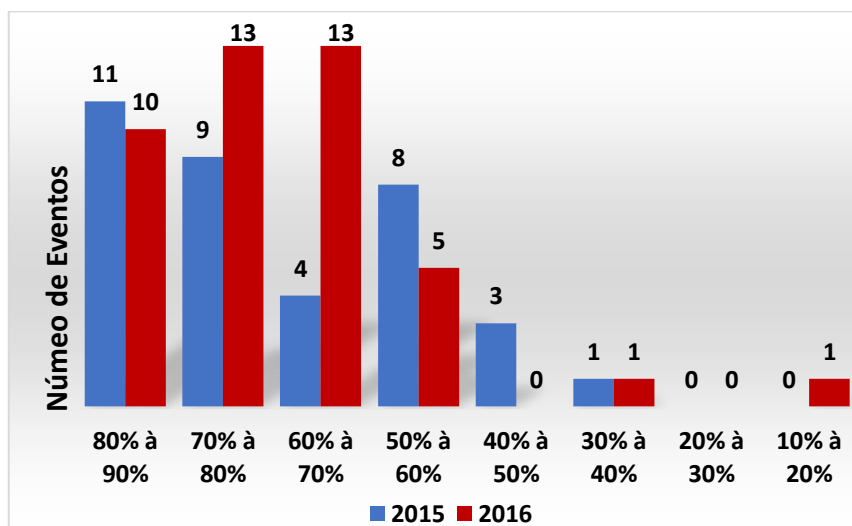


Figura 4.38 – Número de afundamentos por tensão residual de 2015 X 2016

4.3.5 Eventos por Tipo de Afundamento

Os eventos por tipo de afundamentos no período de setembro a dezembro de 2015 e 2016 são representados na Figura 4.39. Apesar dos números de afundamentos serem diferentes em 2015 (36 eventos) e 2016 (43 eventos) a distribuição em percentual é semelhante.

A Figura 4.40 representa os eventos bifásicos distribuídos por fase no período de setembro a dezembro de 2015 X 2016. O número de eventos é semelhante em 2015 (12 eventos) e 2016 (14 eventos), porém a distribuição entre as fases afetadas não é homogênea. Em 2015 as fases mais afetadas são AB com 6 eventos e em 2016 as fases mais afetadas são CA com 8 eventos.

A Figura 4.41 representa o número de afundamentos monofásicos de setembro a dezembro de 2015 X 2016. A fase mais afetada em 2015 foi a fase C, e a fase mais afetada em 2016 foi a fase B. Não há relação entre a fase mais afetada em 2015 X 2016.

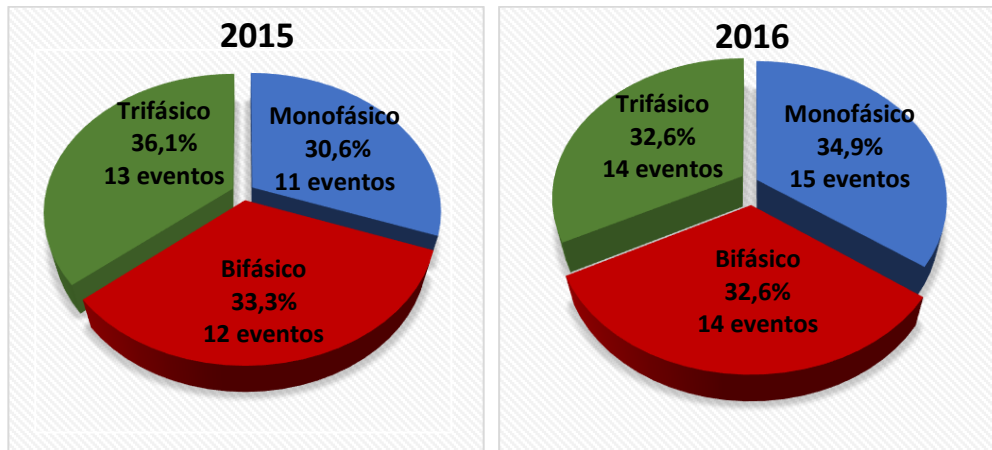


Figura 4.39 - Eventos por tipo de afundamento 2015 X 2016

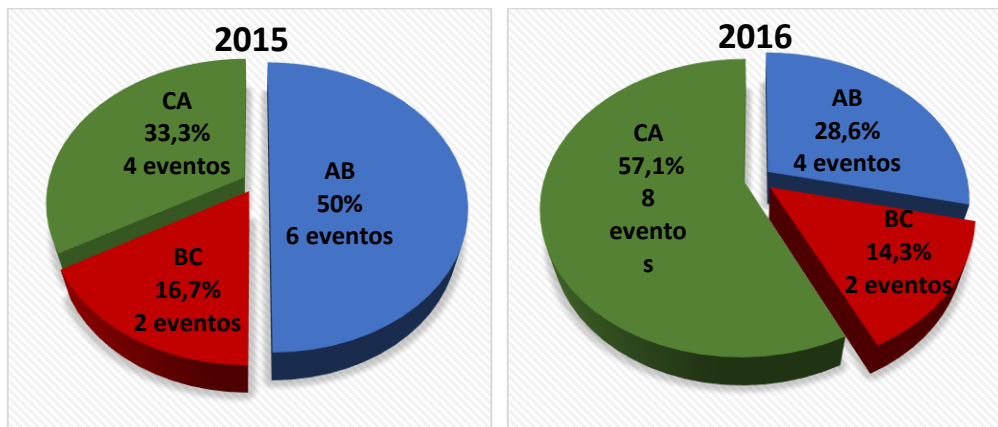


Figura 4.40 - Eventos bifásicos por fase em 2015 X 2016

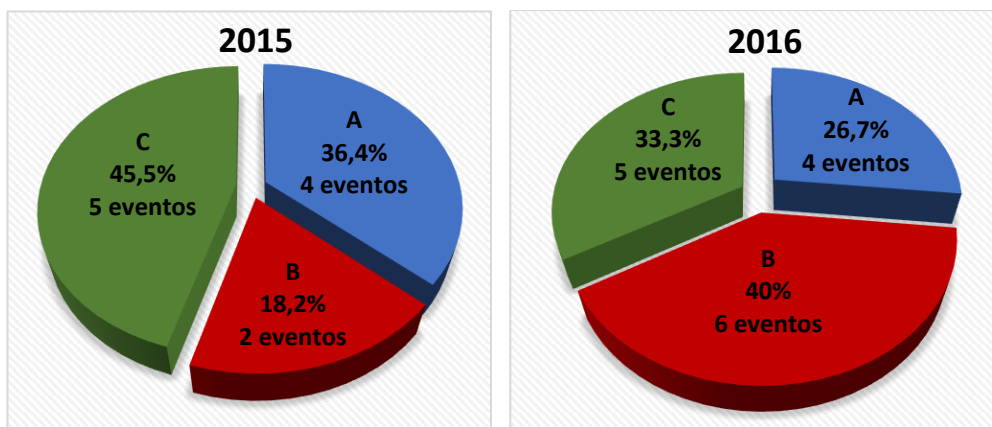


Figura 4.41 - Eventos monofásicos 2015 X 2016

4.3.6 Distribuição dos Eventos por Fase

A fase mais afetada no período de setembro a dezembro de 2015 e 2016 foi a fase A, com 75% e 70%, respectivamente. A Tabela 4.8, reproduzida neste item para facilitar a comparação, e a Tabela 4.16 representam a incidência dos eventos distribuídos por fase de ocorrência. A Figura 4.42 representa o comparativo de 2015 e 2016.

Tabela 4.15 – Afundamentos por fase no período de setembro a dezembro de 2015

Fase	Trifásico	Bifásico	Monofásico	Total	%
A	13	10	4	27	75%
B	13	8	2	23	64%
C	13	6	5	24	67%

Tabela 4.16 – Afundamentos por fase no período de setembro a dezembro de 2016

Fase	Trifásico	Bifásico	Monofásico	Total	%
A	14	12	4	30	70%
B	14	6	6	26	60%
C	14	10	5	29	67%

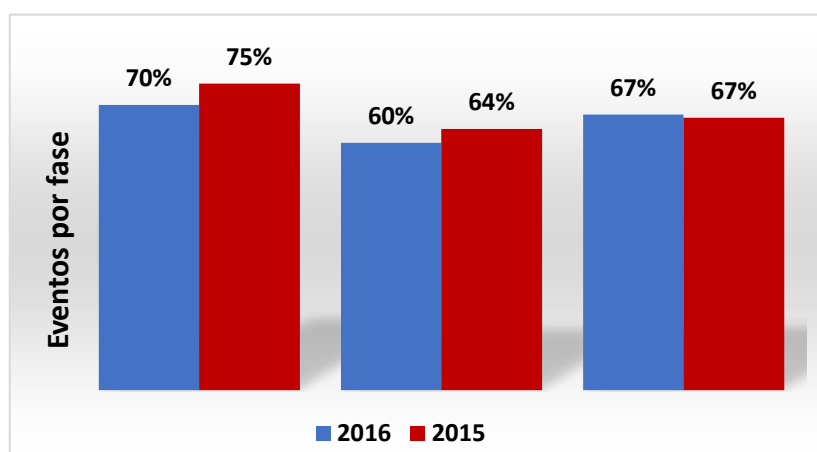


Figura 4.42 – Eventos por fase 2015 X 2016

4.3.7 Desbalanceamento de Tensão em Afundamentos

4.3.7.1 Desbalanceamento dos Afundamentos Bifásicos de Setembro a Dezembro de 2015 e 2016

No período de setembro a dezembro de 2015 houve 12 afundamentos e no mesmo período em 2016 houve 14 afundamentos. Os desbalanceamentos ocorreram em torno de 80% dos eventos tanto em 2015 quanto em 2016 conforme Tabela 4.10, reproduzida neste item para facilitar a visualização e Tabela 4.17.

Tabela 4.10 - Desbalanceamento no período de setembro a dezembro de 2015

Fases afetadas	Balanceado ≤ 2%	Desbalanceado > 2%
AB	1	5
BC	0	2
CA	1	3
Total	2	10
Percentual	17%	83%

Tabela 4.17 – Desbalanceamento bifásico no período de setembro a dezembro de 2016

Fases afetadas	Balanceado ≤ 2%	Desbalanceado > 2%
AB	2	2
BC	0	2
CA	1	7
Total	3	11
Percentual	21%	79%

4.3.7.2 Desbalanceamento de Tensão em Afundamentos Trifásicos

A Tabela 4.13, reproduzida neste item para facilitar a visualização, representa 13 eventos trifásicos no período de setembro a dezembro de 2015, com 92% dos afundamentos

desbalanceados. Em 2016, mesmo período, 14 eventos, sendo 100% dos afundamentos desbalanceados, conforme Tabela 4.18.

Tabela 4.13 – Desbalanceamento trifásico no período de setembro a dezembro de 2015

Fases afetadas	Balanceado	Desbalanceado
	$\leq 2\%$	$> 2\%$
ABC	1	12
Percentual	8%	92%

Tabela 4.18- Desbalanceamento trifásico no período de setembro a dezembro de 2016

Fases afetadas	Balanceado	Desbalanceado
	$\leq 2\%$	$> 2\%$
ABC	0	14
Percentual	0%	100%

4.4 Comparação entre o Ano de 2013 e 2016

Os itens a seguir são referentes a comparação dos dados monitorados no ano de 2016 e em 2013 (OLIVEIRA, 2015). Os dados referentes a esses anos contemplam as 4 estações do ano e são os mais recentes e acessíveis de janeiro a dezembro.

4.4.1 Número de Eventos Registrados e Índice de Precipitação

A Figura 4.43 representa o número de afundamentos que ocorreu no ano de 2016 e 2013.

Em 2016 foram 102 eventos e em 2013 foram 100 eventos.

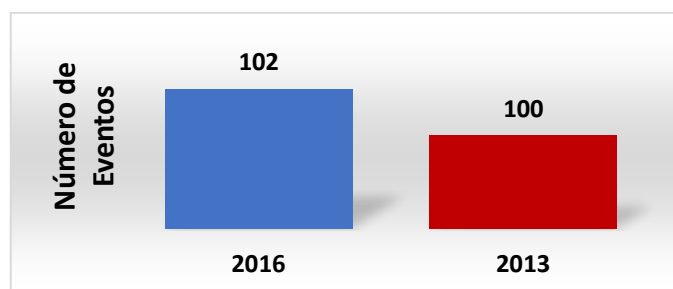


Figura 4.43 – Eventos no ano de 2016 X 2013

A Figura 4.44 representa o número de afundamentos que ocorreu por mês nos anos de 2016 e 2013. A média no ano de 2016 foi de 8,5 afundamentos por mês e em 2013 foi de 8,3 afundamentos por mês.

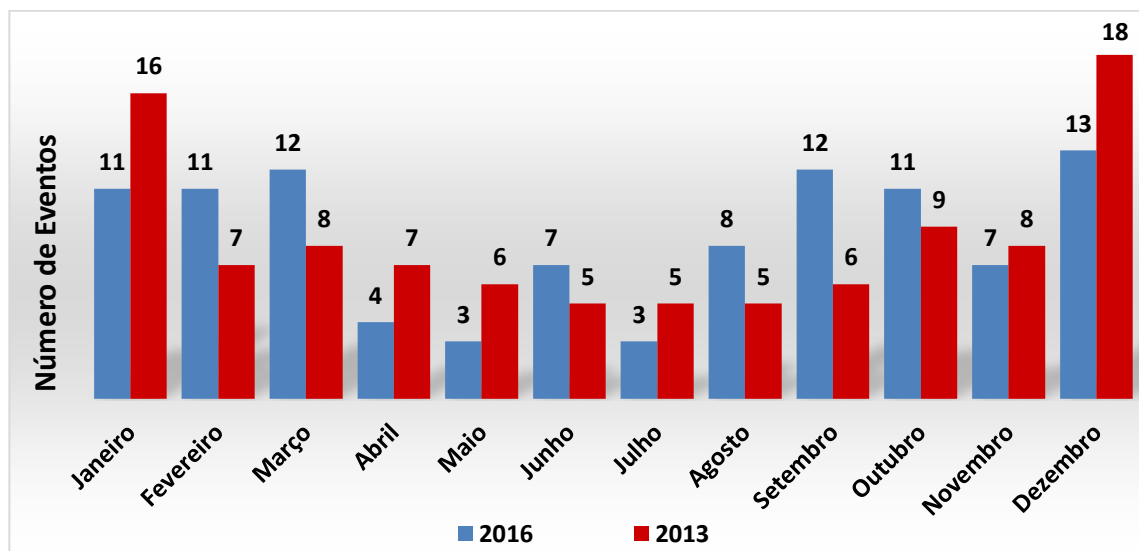


Figura 4.44 – Número de eventos registrados por mês em 2016 X 2013

A Figura 4.45 representa o índice de precipitação no ano de 2016 e 2013. No ano de 2013 ocorreram mais chuvas do que em 2016. Os meses mais chuvosos foram janeiro e dezembro, com precipitação de 375 e 326 mm em 2016. Em 2013, 430 e 495 mm, respectivamente.

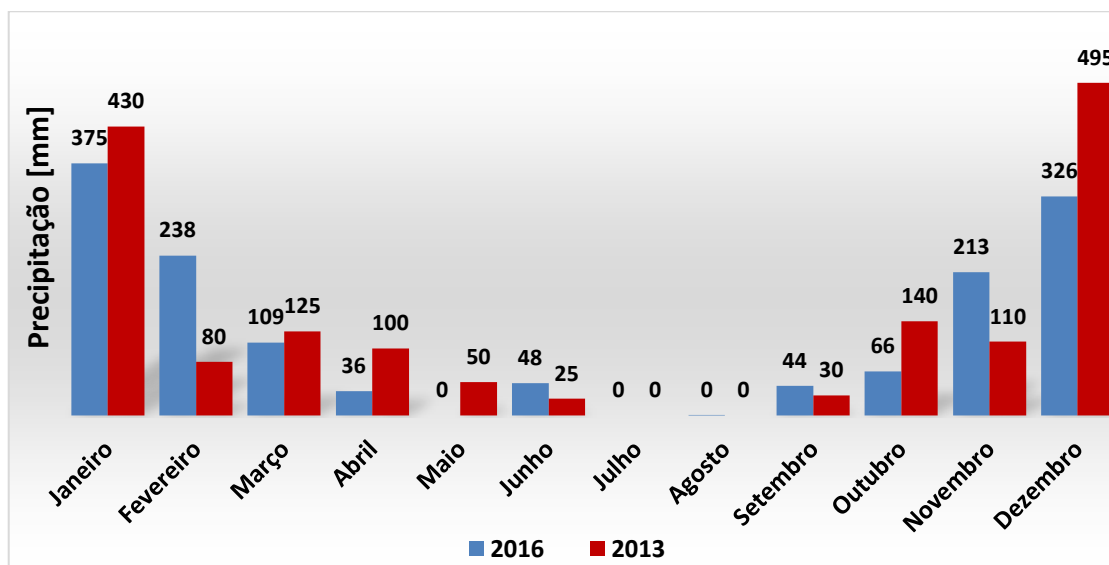


Figura 4.45 – Precipitação no ano de 2016 X 2013

4.4.2 Duração dos Afundamentos

A duração dos afundamentos é mostrada na Figura 4.46. A maior ocorrência de eventos é de 1 ciclo a 200 ms, tanto em 2016 com 82% dos eventos, quanto em 2013 com 66%.

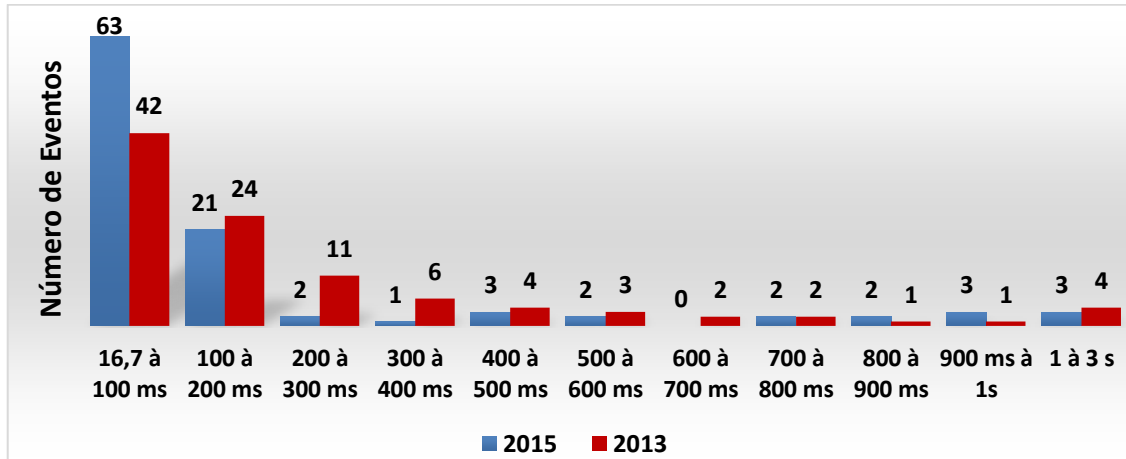


Figura 4.46 – Duração dos afundamentos de 2016 X 2013

4.4.3 Magnitude dos Afundamentos

A Figura 4.47 representa a tensão residual dos afundamentos nos anos de 2016 e 2013. A maior incidência dos afundamentos ocorreu acima de 60% da tensão residual em 2016 e 2013, com 79% e 83% dos afundamentos, respectivamente.

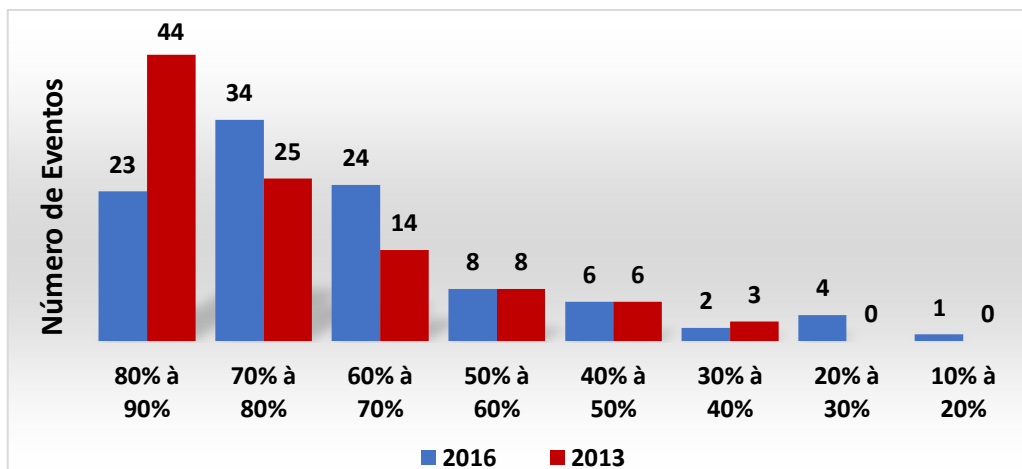


Figura 4.47 – Número de afundamentos por tensão residual nos anos de 2016 X 2013

4.4.4 Eventos por Tipo de Afundamentos

A Figura 4.48 representa o tipo de afundamento: monofásico, bifásico ou trifásico. No ano de 2016 houve uma distribuição homogênea nos afundamentos. No ano de 2013 o afundamento monofásico foi predominante, com 51% dos eventos.

A Figura 4.49 representa o número de eventos bifásicos por fases afetadas. Nos anos de 2016 e de 2013 houve predominância dos afundamentos nas fases CA.

A Figura 4.50 representa os afundamentos monofásicos por fase. No ano de 2016 e de 2013 houve predominância dos eventos na fase A, com 49% e 53%, respectivamente.

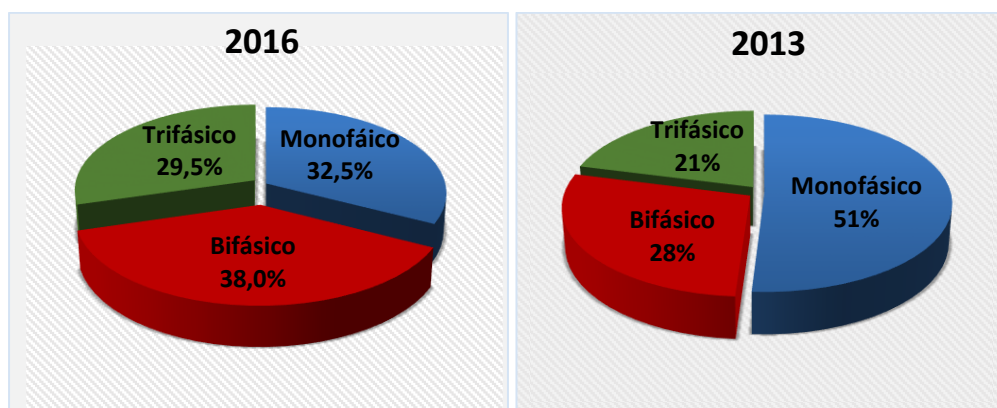


Figura 4.48 – Eventos por tipo de afundamento no ano de 2016 X 2013

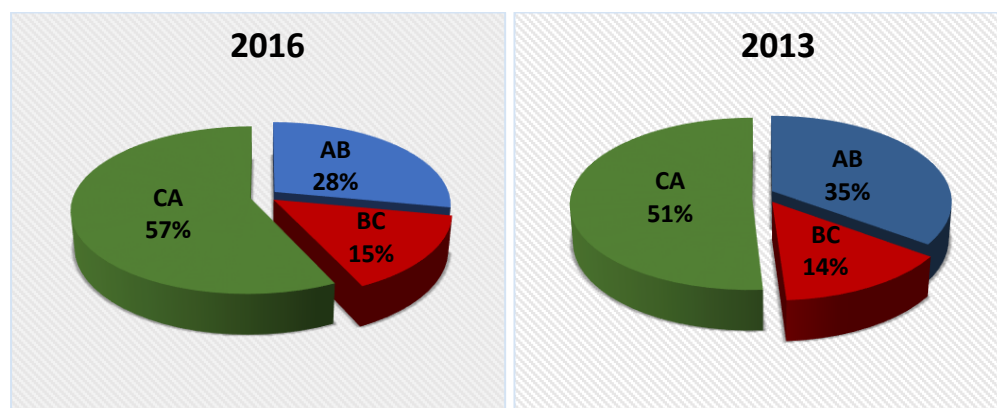


Figura 4.49 – Eventos bifásicos por fase nos anos de 2016 X 2013

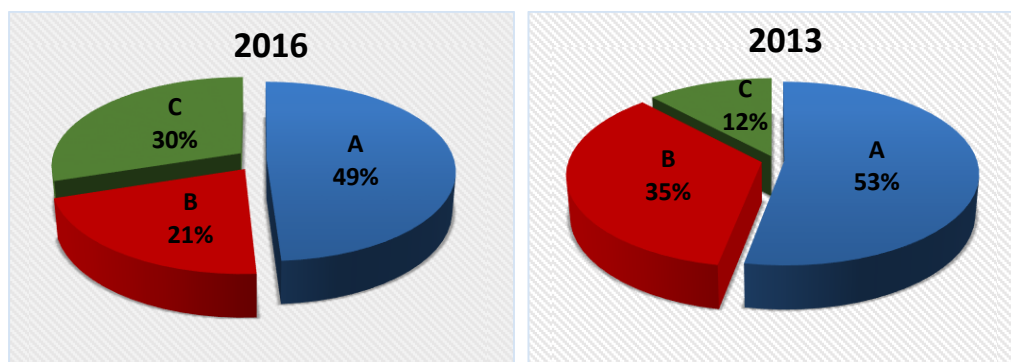


Figura 4.50 – Eventos monofásicos nos anos de 2016 X 2013

4.4.5 Distribuição dos Eventos por Fase

A Figura 4.51 representa os afundamentos por fase nos anos de 2016 e 2013. A fase mais afetada em 2016 e 2013 foi a fase A com 77% e 72% dos eventos, respectivamente.

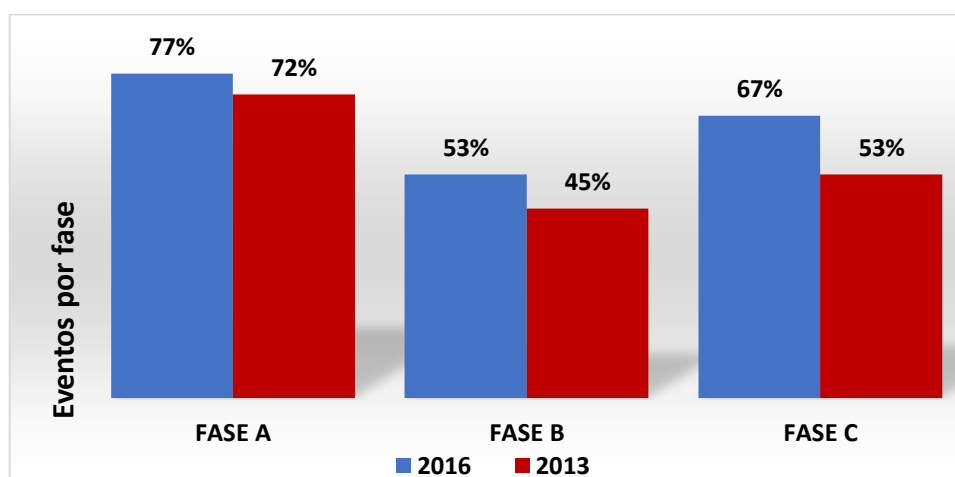


Figura 4.51 – Distribuição dos eventos por fase 2016 X 2013

4.5 Análise dos dados referentes a 52 meses de monitoramento dos afundamentos

Para complementar as análises feitas referente ao monitoramento dos afundamentos, foi feita a média mensal dos afundamentos monitorados nessa dissertação, que são de 16 meses (setembro de 2015 a dezembro de 2016) e os dados coletados anteriormente de 36 meses

(abril de 2011 a março de 2014) em (OLIVEIRA, 2015), totalizando 52 meses de monitoramento.

É importante informar que houve um espaçamento entre os dados coletados (abril de 2014 a agosto de 2015) devido aos problemas que ocorreram no sistema de medição *Sag Captor* como troca de baterias do microcomputador, substituição do nobreak e defeitos na PCI do *Sag Captor*. Estes defeitos ocasionaram falta de continuidade na coleta de dados.

4.5.1 Média Mensal dos afundamentos dos 52 meses de monitoramento

A Figura 4.52 e a Tabela 4.19 representam a média mensal e o desvio padrão dos afundamentos de 52 meses de monitoramento. No mês de dezembro a média mensal foi de 14,20 afundamentos por mês e o desvio padrão de 6,53.

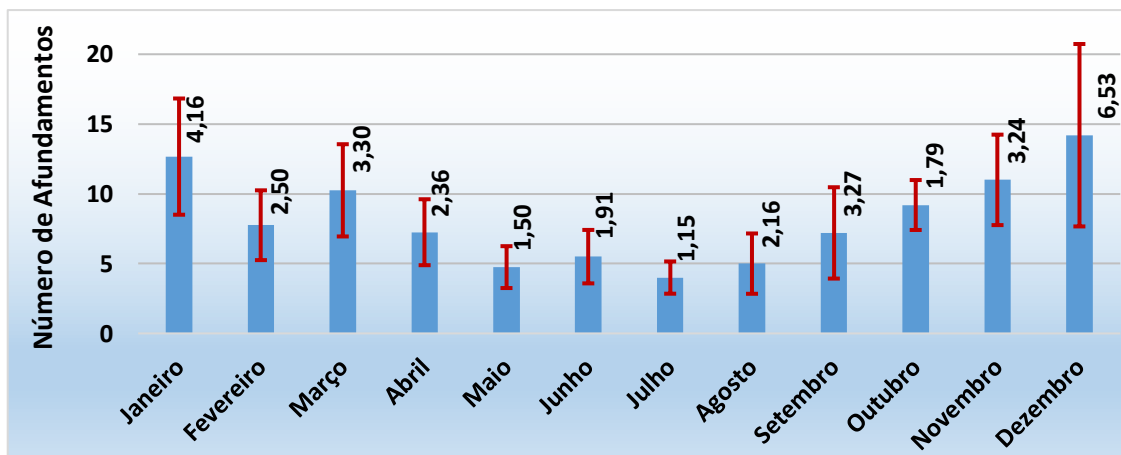


Figura 4.52 – Média e desvio padrão dos afundamentos de 52 meses de monitoramento

Tabela 4.19 – Média e desvio padrão dos afundamentos de 52 meses de monitoramento

Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Média	12,67	7,75	10,25	7,25	4,75	5,50	4,00	5,00	7,20	9,20	11,00	14,20
Desvio Padrão	4,16	2,50	3,30	2,36	1,50	1,91	1,15	2,16	3,27	1,79	3,24	6,53

4.5.2 Média Mensal do índice de precipitação dos 52 meses de monitoramento

A Figura 4.53 e a Tabela 4.20 representam o índice de precipitação mensal de 52 meses de monitoramento. Há uma semelhança entre os gráficos referentes aos números de afundamentos e o índice de precipitação. O mês de dezembro teve um índice médio de precipitação de 380 mm e o desvio padrão de 230 mm.

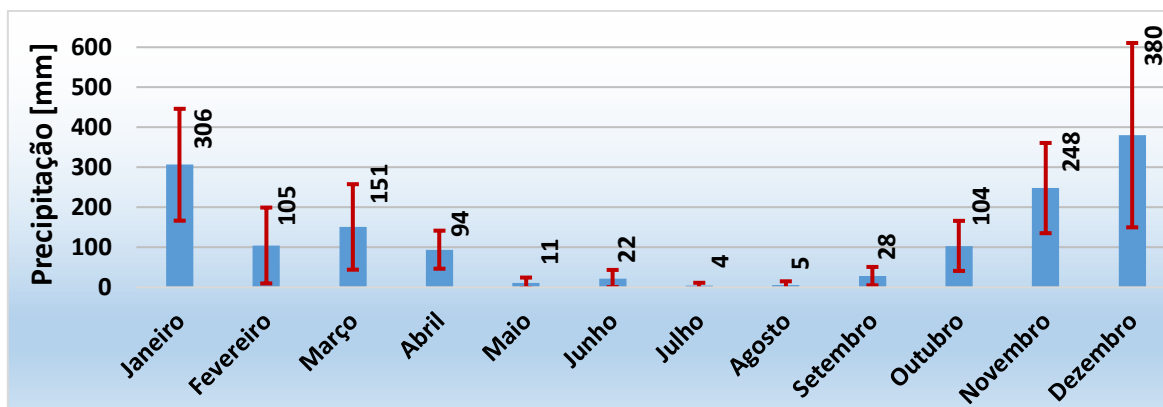


Figura 4.53 - Média e desvio padrão do índice de precipitação de 52 meses de monitoramento

Tabela 4.20 - Média e desvio padrão do índice de precipitação de 52 meses de monitoramento

Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Média	306	105	151	94	11	22	4	5	28	104	248	380
Desvio Padrão	140	95	107	48	13	21	8	10	23	63	113	230

4.5.3 Correlação dos Afundamentos Momentâneos de Tensão X Precipitação

É possível observar a relação entre os números de afundamentos por mês e os índices de precipitação pluviométrico, através da Figura 4.1 e Figura 4.2, Figura 4.23 e Figura 4.24.

A Figura 4.54 representa a curva de correlação dos dados monitorados totalizando um monitoramento de 52 meses de afundamentos.

A equação (13) de regressão representa a correlação do índice de precipitação (variável X) e número de afundamentos (variável Y):

$$Y = 0,0248x + 5,2236 \quad (13)$$

O coeficiente de determinação (R^2) é a proporção do número de afundamentos (variável Y) dependente do índice de precipitação (variável X). O coeficiente de determinação é o quadrado do coeficiente de relação. Para o coeficiente de determinação $R^2 = 0,8159$ obtém-se o coeficiente de relação de 0,9033. Valores de R próximos a 1 indicam forte correlação entre as variáveis.

Analisando o coeficiente de correlação de 0,9033, a influência do índice de precipitação em relação aos afundamentos monitorados é mostrada neste gráfico. Em todo o período de monitoração de 52 meses 81,59% dos afundamentos de tensão são explicados pelo índice de precipitação. Os demais eventos, 18,41% tem como causa, outros fatores que não estão relacionados ao índice de precipitação.

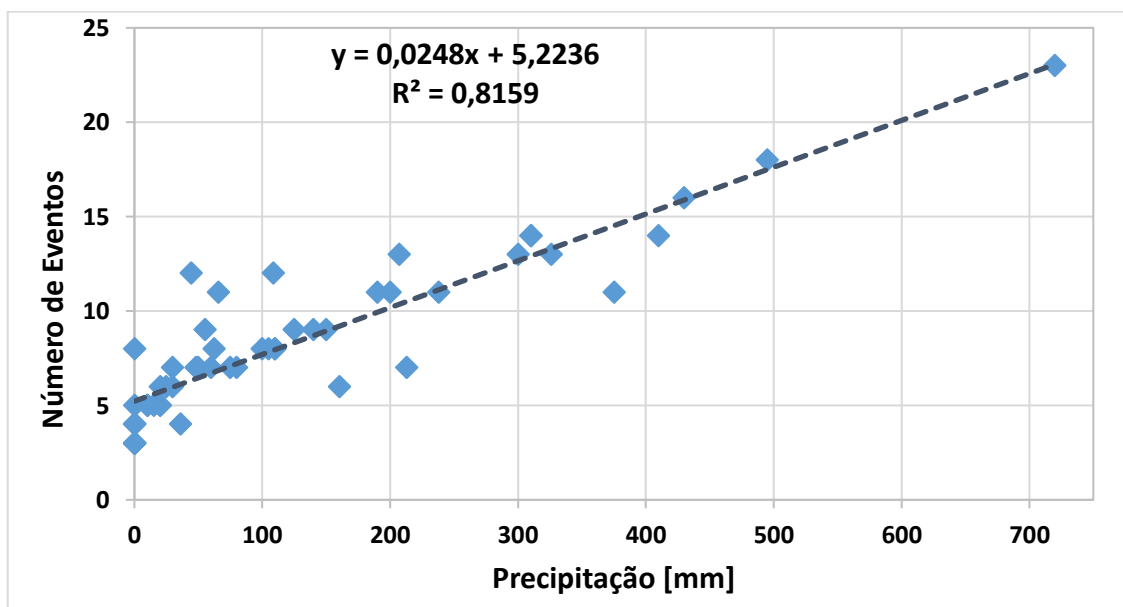


Figura 4.54 - Correlação dos Afundamentos X Precipitação de 52 meses de monitoramento

4.6 Conclusão

Neste capítulo foi possível visualizar através de gráficos, os dados monitorados dos eventos registrados, caracterizados por duração, magnitude, frequência mensal, hora do dia, precipitação, por tipo e por fase. A fase mais afetada nos afundamentos monofásicos, bifásicos e trifásicos foi identificada.

Algumas curvas características dos afundamentos foram mostradas, identificando a fase de ocorrência dos afundamentos, sua magnitude e duração.

O desbalanceamento dos afundamentos bifásicos e trifásicos, bem como o nível de desbalanceamento foi identificado e representado graficamente.

Foi feito um levantamento comparando dados do ano de 2016 com 2013, de 2015 com 2016 e ocorrência dos eventos por fase.

Por fim, foi feita uma análise dos dados de 52 meses de afundamentos registrados. Fazendo a sua distribuição mensal e cálculo da média e o desvio padrão dos afundamentos e dos índices de precipitação.

A equação de regressão foi calculada para os 52 meses e o gráfico de correlação dos afundamentos e precipitação foi gerado.

5. CONCLUSÃO FINAL

Neste capítulo serão apresentadas a conclusão do trabalho, análise dos resultados encontrados e proposta de continuidade.

5.1 Análise dos Resultados

Este trabalho apresentou afundamentos momentâneos de tensão ocorridos de setembro a dezembro de 2015 e de janeiro a dezembro de 2016 no Laboratório Tesla Engenharia de Potência, localizado na Universidade Federal de Minas Gerais.

Analisando os dados coletados, o tipo de afundamento mais recorrente foi o bifásico em 2015 e 2016 (Figura 4.27) e (Figura 4.6). A fase mais afetada em 2015 e 2016 foi a fase A (Figura 4.30) e (Figura 4.9), independente do tipo de AMT.

Diante dos dados coletados, algumas propostas de mitigação são apresentadas. A mais simples e de menor custo seria remanejar as cargas monofásicas mais sensíveis para a fase menos afetada, fase B (Figura 4.30) e (Figura 4.9).

Para mitigar uma quantidade maior de afundamentos o ideal é instalar um CST na fase mais afetada (fase A), reduzindo assim 49% dos eventos em circuitos monofásicos (Figura 4.8) e 77% dos eventos que ocorreram na fase A (Figura 4.9), nos eventos monofásicos, bifásicos e trifásicos, de acordo com 2016.

Quanto ao tempo de duração dos eventos, a maior parte está concentrada entre 1 ciclo e 200 ms (Figura 4.4) e (Figura 4.25) em 2015 e 2016, com 78% e 82%, respectivamente.

Quanto à magnitude, o maior número de eventos ocorreu entre 50% a 90% da tensão de referência (Figura 4.26) em 2015 com 89% dos eventos. Em 2016 (Figura 4.5) o maior número de eventos ocorreu entre 60% a 90%, com 79% dos afundamentos.

Quanto ao desbalanceamento dos afundamentos, a maior parte dos afundamentos são desbalanceados, tanto os bifásicos com 83% (Tabela 4.10) e trifásicos com 92% (Tabela 4.13) no ano de 2015. Em 2016, os desbalanceamentos bifásicos representam 87% (Tabela 4.3) e os trifásicos 93% (Tabela 4.6).

A média mensal dos afundamentos foi calculada com base nos 52 meses de monitoramento. Em alguns meses o valor médio e o desvio padrão tiveram valores elevados, mostrando uma variação muito grande entre os anos monitorados. O mesmo ocorre com a precipitação.

O mês de dezembro, por exemplo, teve o valor médio do índice de precipitação de 380 mm e desvio padrão de 230. Choveu muito no mês de dezembro de 2016, com o índice de precipitação de 326 mm (Figura 4.2) e em dezembro de 2015 houve pouca chuva, pois, o índice foi de 160 mm (Figura 4.23).

A equação (13) de regressão mostrada no gráfico de correlação do número de afundamentos X índice de precipitação (Figura 4.54), demonstra que para 81,59% dos afundamentos são explicados pelo índice de precipitação, enquanto que os demais, 18,41% tem outros fatores como causa, que não foram estudados nesse trabalho.

Outra análise interessante está relacionada à causa do afundamento. O maior número de afundamentos que ocorreram durante a monitoração dos dados foram os afundamentos bifásicos. Como os dados foram monitorados na baixa tensão e o transformador abaixador

(Δ -Yn), na ocorrência de distúrbios monofásicos (Figura 5.1), por exemplo do tipo B (BOLLEN, 1999), fazem com que na baixa tensão o fenômeno seja equivalente a um afundamento do tipo C (Figura 5.2), ou seja, bifásico.

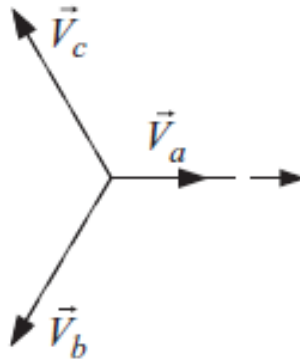


Figura 5.1– Afundamento monofásico tipo B

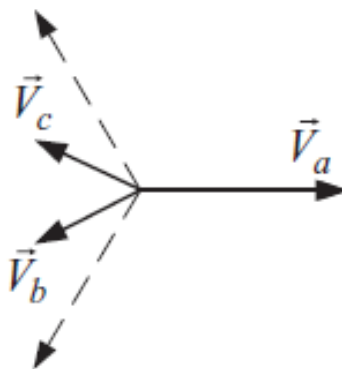


Figura 5.2 – Afundamento bifásico tipo C

Assim, a ocorrência de faltas fase-terra em sistemas de alta e média tensão, fazem com que na baixa tensão, tenha um fenômeno não propriamente de afundamento monofásico.

Os dados referentes ao monitoramento dos afundamentos, ou seja, o resultado da classificação por tipo, duração, magnitude e demais dados resultantes deste trabalho,

auxiliam no projeto e desenvolvimento de Compensadores Série de Tensão, principalmente nos cálculos do barramento c.c..

Os números encontrados na caracterização dos afundamentos auxiliam na definição da solução mais adequada para a mitigação dos afundamentos, ressaltando que o período de monitoramento dos afundamentos é fator importante para se ter confiabilidade nos dados monitorados, e que cada conjunto de cargas tem um comportamento diferente frente aos afundamentos.

5.2 Proposta de continuidade

Durante o monitoramento e análise dos afundamentos foi observada algumas questões que não foram tratadas nessa dissertação e serão inseridas aqui como proposta de continuidade.

5.2.1 Representação dos afundamentos

Com os resultados dos afundamentos com maior número de ocorrência classificados por tipo, duração e magnitude, fazer um estudo, tomando como referência a energia perdida durante a ocorrência do evento. De posse desse estudo, buscar formas de representar o afundamento X energia perdida no momento da sua ocorrência IEEE 1564 (IEEE, 2014).

5.2.2 Caracterização dos afundamentos em média tensão

Com os resultados dos afundamentos com maior número de ocorrência, verificar a origem do afundamento, que pode estar em média tensão, e fazer a classificação dos afundamentos em média e baixa (BOLLEN, 1999).

5.2.3 Classificação dos afundamentos

Com os resultados dos afundamentos com maior número de ocorrência, fazer a caracterização por agregação por união de fases por parâmetros críticos e agregação por fase crítica, conforme item 2.1- Caracterização dos Afundamentos.

5.2.4 Suscetibilidade aos afundamentos

Com base no banco de dados dos afundamentos mais severos e mais frequentes, fazer uma análise em equipamentos para verificar a sua suscetibilidade aos afundamentos mais recorrentes.

5.2.5 Desbalanceamento de tensão em afundamentos

Fazer uma análise dos afundamentos desbalanceados em cargas específicas, por exemplo, retificador trifásico.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica, PRODIST- Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. In: **Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica, Revisão 7**. Brasília: Janeiro, 2016.
- ARIAS-GUZMAN, S. et al. Analysis of Voltage Sag Severity Case Study in an Industrial Circuit. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 53, n. 1, p. 15–21, jan. 2017.
- BOLLEN, M. H. **Understanding Power Quality Problems**. New York, USA: IEEE, 1999.
- BUICE, E. S. et al. Evaluation of a novel UHMWPE bearing for applications in precision slideways. **Precision Engineering**, v. 30, n. 2, p. 185–191, abr. 2006.
- CEMIG. ND-3.1 Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas. p. 124, 2014.
- FERNANDES, A. S. **Instituto Nacional de Meteorologia - INMET /5º DISME**. Belo Horizonte: [s.n.]. Disponível em: <www.inmet.gov.br/portal>.
- GOSWAMI, A. K. et al. Voltage Sag Assessment in a Large Chemical Industry. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 48, n. 5, p. 1739–1746, set. 2012.
- IEC. INTERNATIONAL STANDARD IEC 61000-4-11 TEST Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests. **Control**, 2004.
- IEEE. Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality - IEEE Std 1159. **The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc**, n. June, p. 1–81, 2009.
- IEEE. Guide for Voltage Sag Indices IEEE 1564. **The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc**, n. March, p. 1–59, 2014.
- KOVAL, D. O.; HUGHES, M. B. Canadian national power quality survey: frequency of industrial and commercial voltage sags. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 33, n. June, p. 622–627, 1997.
- LOPES, B. M. **Compensadores Série de Baixa Tensão: Topologias, Técnicas de Projetos e Viabilidade Econômica**. Belo Horizonte: Dissertação de Mestrado, UFMG, 2006.
- MARTINEZ, J. A.; MARTIN-ARNEDO, J. Voltage Sag Studies in Distribution Networks - Part II: Voltage Sag Assessment. **IEEE Transactions Power Del**, v. 21, n. July, p. 1679–1688, 2006.
- MORENO-MUÑOZ, A.; ROSA, LA J. J. G. DE. Voltage Sag in Highly Automated Factories. **IEEE Transactions on Industry Applications**, p. 1–6, 2008.

NAIDU, S. R. et al. Voltage Sag Performance of a Distribution System and Its Improvement. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 48, n. 1, p. 218–224, jan. 2012.

NATIONAL INSTRUMENTS, “NI-DAQ - USER MANUAL”. **National Instruments**, 1997.

OLIVEIRA, F. DIAS DE. **Monitoramento e Análise de Afundamentos Momentâneos de Tensão**. Belo Horizonte: Dissertação de Mestrado, UFMG, 2015.

PIRES, I. A. **Compensadores Série de Tensão em Onda Quadrada: Aplicação na Mitigação de Afundamentos de Tensão**. Belo Horizonte: Tese de Doutorado, UFMG, 2011.

PIRES, I. A. et al. Compensador série de tensão em onda quadrada para mitigação de afundamentos de tensão. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, v. 23, n. 2, p. 164–178, abr. 2012.

PIRES, I. A. et al. On the Application of Single-Phase Voltage Sag Compensators in Three-Phase Systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 53, n. 1, p. 630–637, jan. 2016.

SEMI F47-0706. “Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity”. **Semiconductor Equipment and Materials International (SEMI)**, 2006.

SILVA, S. M. **Estudo e Projeto de um Restaurador Dinâmico de Tensão**. Belo Horizonte: Dissertação de Mestrado, UFMG, 1999.