

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CARLOS CARDOSO DA COSTA SILVA JÚNIOR

**ALOCAÇÃO DE QUALÍMETROS PARA
ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE
VTCD**

Porto Alegre
2021

CARLOS CARDOSO DA COSTA SILVA JÚNIOR

**ALOCÇÃO DE QUALÍMETROS PARA
ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE
VTCD**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas de Energia

ORIENTADOR: Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne

Porto Alegre
2021

CARLOS CARDOSO DA COSTA SILVA JÚNIOR

**ALOCAÇÃO DE QUALÍMETROS PARA
ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE
VTCD**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____
Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne , UFRGS
Doutor pela Chalmers University of Technology – Göteborg,
Suécia

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho, UNIFEI
Doutor pela Universidade Federal de Itajubá – Itajubá, Brasil

Prof. Dr. Renato Gonçalves Ferraz, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Daniel da Silva Gazzana, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Coordenador do PPGEE: _____
Prof. Dr. Sérgio Haffner

Porto Alegre, julho de 2021.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe e minha esposa, onde encontro o apoio para seguir sempre em frente.

Dedico também a dois homens, meu pai Carlos (in memoriam) e meu filho Vicente. O primeiro por, antes de partir, possibilitar meu ingresso no Programa de Pós-Graduação e o segundo por encontrar em sua chegada a motivação para conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PP-GEE, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Ao meu orientador Professor Roberto Leborgne, pelos ensinamentos, orientações e compreensão.

Agradeço a minha esposa Clarissa, por toda motivação, suporte e paciência durante o período do curso, principalmente nos primeiros dias de vida do nosso filho.

A todos Orixás, onde busco alento frente às dificuldades e deposito minha fé.

Por fim, aos meus pais Carlos (in memoriam) e Veraci, por todo esforço, dedicação, sacrifício e apoio em toda minha formação.

RESUMO

Esta pesquisa apresenta uma proposta de metodologia para alocação de monitores, também chamados neste trabalho de Qualímetros, e de estimação de afundamentos de tensão em sistemas de distribuição. A localização dos monitores objetiva realizar o registro de ocorrências de afundamentos a partir de um número limitado de monitores e realizar a estimação da magnitude das tensões, durante os eventos, nos locais não monitorados. Os resultados dos valores estimados de magnitude de tensão são utilizados para calcular o indicador Fator de Impacto, estabelecido pela ANEEL para quantificar os distúrbios de afundamento de tensão nos sistemas de distribuição de energia. A metodologia baseia-se na simulação de faltas, onde a localização de monitores visa garantir a observabilidade de afundamentos causados por curtos-circuitos brandos para permitir o registro de afundamentos de tensão gerados por faltas com condições iguais ou mais severas de curto-circuito. Para a estimação dos afundamentos em todos os nós do sistema é utilizado um banco de dados de afundamentos de tensão onde é encontrado o cenário que melhor aproxima os estados dos nós monitorados para atribuir valores de estados para aos outros nós. A metodologia proposta foi aplicada aos sistemas testes IEEE 34 e 123 nós, os resultados para estes estudos de caso mostram que o metodologia proposta é capaz de registrar e estimar os eventos de afundamentos de tensão e calcular o Fator de Impacto dos nós não monitorados com um baixo grau de erro.

Palavras-chave: Afundamentos de Tensão, Localização ótima de monitores, Estimação de Afundamentos de Tensão.

ABSTRACT

This research presents a methodology for monitors allocation and voltage sags estimation in distribution systems. The location of the monitors aims to record all occurrences of sags from an limited number of monitors and to estimate the magnitude of the voltages, during the events, in the unmonitored locations. The results of the estimated voltage magnitude values are used to quantify voltage sags disturbances in power distribution systems in unmonitored locations. The methodology is based in fault's simulations, considering the case of less severe short circuit to allow the recording of all sags generated by faults with equal or more severe short circuit conditions. To estimate the sags on unmonitored nodes in the system, a database of voltage sags is used to found in the scenario that best approximates the states of the monitored nodes to assign states values to another nodes. The proposed methodology was applied to IEEE test feeders 34 and 123 node test systems, the results for these cases of study show that the proposed methodology is capable of recording and estimated all voltage sags events on unmonitored nodes with small errors.

Keywords: Voltage sags, Optimal monitor location, Voltage sags estimation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Sistema exemplo 4 nós.	20
Figura 2 -	Sistema exemplo 7 nós.	23
Figura 3 -	Sistema teste IEEE 34 nós.	45
Figura 4 -	Sistema teste IEEE 123 nós.	46
Figura 5 -	Curva de carregamento do sistema ao longo do dia em relação a carga nominal do sistema.	48
Figura 6 -	Matriz de Cobertura Sistema IEEE 34 nós.	49
Figura 7 -	Perfil de tensão falta monofásica no nó 812.	53
Figura 8 -	Erro de Estimção do Cálculo de arranjos de 2 monitores.	57
Figura 9 -	Erro de Estimção do Cálculo de Impacto para arranjos de 3 monitores.	58
Figura 10 -	Matriz de Cobertura Sistema IEEE 123 nós com carregamento igual a 0,78.	60
Figura 11 -	Matriz de Cobertura Sistema IEEE 123 nós com carregamento igual a 1.	61
Figura 12 -	Diferenças entre as Matriz de Cobertura com carregamentos diferentes.	61
Figura 13 -	Erro de Estimção do Cálculo de Impacto no Sistema IEEE 123 nós.	64
Figura 14 -	Erro de Estimção do Fator de Impacto relacionado a faltas externas ao alimentador.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Estratificação das VTCD com base nos níveis de sensibilidade das diversas cargas.	26
Tabela 2 -	Fatores de ponderação e Fator de Impacto Base de acordo com tensão nominal.	27
Tabela 3 -	Eventos registrados por arranjos de 1 monitor.	50
Tabela 4 -	Eventos registrados por arranjos de 2 e 3 monitores.	51
Tabela 5 -	Erro de estimação de arranjos de um monitor.	54
Tabela 6 -	Erro de estimação de arranjos de dois e três monitores.	54
Tabela 7 -	Resultado do Fator de Impacto Estimado pelo Arranjo 812 e 854. . .	56
Tabela 8 -	Eventos registrados por arranjos no sistema IEEE 123 nós.	62
Tabela 9 -	Erro de estimação de arranjos de monitores no sistema IEEE 123 nós.	63
Tabela 10 -	Erro de estimação de arranjo de 7 monitores no sistema IEEE 123 nós.	64
Tabela 11 -	Erro de cálculo do FI no sistema IEEE 123 nós.	65
Tabela 12 -	Percentual de eventos de afundamentos de tensão, causados faltas externas, registrados.	67
Tabela 13 -	Erro de estimação frente a afundamentos causados por faltas externas.	68

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EPRI	Electric Power Research Institute
FI	Fator de Impacto
IEEE	Institute of Electrical and Eletronics Engineers
IEC	International Electrotechnical Commission
MQEE	Monitor de Qualidade de Energia
MTRDF	Matriz de Tensão Remanescente Durante Falta
ONS	Operador Nacional do Sistema
PPGEE	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
SARFI	System Average RMS Variation Frequency Index
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativas	14
1.2	Objetivos	15
1.3	Contribuições	15
1.4	Estrutura do Trabalho	16
2	CONCEITOS BÁSICOS	18
2.1	Afundamentos de Tensão	18
2.2	Cálculo de Magnitude de Afundamentos de Tensão	21
2.3	Área de Vulnerabilidade e Área Afetada	24
2.4	Medição de Afundamentos e Fator de Impacto	25
2.5	Estimação de Afundamentos de Tensão	28
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
3.1	Localização de Monitores de Afundamentos de Tensão	30
3.2	Estimação de Afundamentos de Tensão	33
4	METODOLOGIA	35
4.1	Modelagem Computacional	37
4.2	Simulações de Falta	38
4.3	Localização Ótima de Monitores	38
4.3.1	Função Objetivo e Restrições	39
4.3.2	Limiar de Tensão Adotado	40
4.4	Construção e Armazenamento das MTRDF	41
4.5	Estimação de Afundamentos de Tensão	42
4.6	Cálculo do Fator de Impacto	43
5	APLICAÇÕES E RESULTADOS	44
5.1	Definições Iniciais de Modelagem	44
5.2	Casos de Estudo	45
5.2.1	Sistema IEEE 34 nós	45
5.2.2	Sistema IEEE 123 nós	46
5.2.3	Simulações de Faltas	47
5.3	Resultados	48
5.3.1	Sistema IEEE 34 nós	49
5.3.2	Sistema IEEE 123 nós	58
5.3.3	Afundamentos Externos ao Alimentador	66

6 CONCLUSÕES	69
6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	71
REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

A qualidade de energia elétrica vem sendo um dos grandes focos das pesquisas na área de engenharia elétrica nos últimos anos. Isso se justifica pela inserção de cargas cada vez mais sensíveis a distúrbios no fornecimento de energia elétrica. Uma definição generalista, muito citada na literatura, é apresentada por DUGAN; MCGRANAGHAN; BEATY (1996) que estabelecem a falta de qualidade de energia elétrica como a manifestação de qualquer distúrbio na tensão, na corrente ou na frequência que resulte em falha ou mau funcionamento de equipamento do consumidor.

Nas últimas duas décadas no Brasil o cenário regulatório vem se desenvolvendo cada vez mais no sentido de considerar os distúrbios de qualidade, estabelecendo definições, indicadores, limites e métodos de medição para as perturbações. O Operador Nacional do Sistema (ONS) estabelece os requisitos de qualidade de energia na Rede Básica no submódulo 2.9 dos seus Procedimentos de Rede (ONS, 2020). Em 2008 a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) através da sua Resolução Normativa nº 345/2008 aprovou a primeira versão do PRODIST, que tem como objetivo normatizar e padronizar as atividades no âmbito dos sistemas de distribuição, trazendo em seu Modulo 8 os procedimentos relativos à qualidade de energia elétrica.

Entre os distúrbios de qualidade de energia, as variações de tensão de curta duração (VTCD), em particular os afundamentos de tensão, possuem grande relevância, associada às potenciais consequências destes distúrbios. Um afundamento de tensão é capaz de causar o desligamento, parcial ou total, de uma planta industrial, dependendo da sensibilidade das cargas, resultado em prejuízos financeiros, que podem atingir valores elevados dependendo do processo (MCGRANAGHAN; ROETTGER, 2002).

Os afundamentos de tensão são distúrbios com características altamente aleatórias, o que torna seu monitoramento complexo. Uma das barreiras enfrentadas no monitoramento dos eventos de afundamentos de tensão, em especial em sistemas de distribuição, é o custo financeiro da instalação de monitores em todos os pontos de conexão com os clientes. E justamente pela maioria das cargas, sensíveis a este distúrbio, estarem conectadas a rede de distribuição que o registro dos eventos se torna mais relevante nesta parte do sistema elétrico. Com a motivação de possibilitar os registros dos afundamentos de tensão

com um custo reduzido do sistema de monitoração foram propostas na literatura metodologias de localização de monitores, chamados também neste trabalho de Qualímetros, que minimizam a quantidade de equipamentos necessários.

Os primeiros estudos com objetivo de localização ótima de monitores de qualidade de energia para registros de afundamentos de tensão, como OLGUIN; BOLLEN (2003), tinham o foco nos sistemas de transmissão, e posteriormente surgiram estudos de aplicação do método voltados para os sistemas de distribuição (KAZEMI et al., 2013), como apresentado em IBRAHIM et al. (2012).

Quando tratado especificamente de VTCD as metodologias baseadas em simulações de falta se destacam e são aplicadas na grande maioria dos estudos recentes, mostrando eficácia tanto em sistemas de transmissão quanto em sistemas distribuição para registro dos distúrbios causados por curtos-circuitos ao longo das redes analisadas.

Inicialmente os trabalhos sobre o tema, como OLGUIN; BOLLEN (2003), utilizavam métodos de cálculo para determinar os valores de tensão durante uma falta, como os métodos das posições de falta e o método das distancias críticas, com a prevalência do primeiro. Em seguida foram desenvolvidos estudos que comparavam os resultados dos valores calculados com simulações de falta em *softwares* de modelagem de sistemas elétrico. Atualmente, com o avanço dos *softwares* de modelagem, com tempos de simulações muito baixos, os valores de tensão durante falta são determinados por simulações, que permitem uma modelagem muito mais completa e precisa.

A consequência gerada pela localização de um número reduzido de monitores em um sistema elétrico é a existência de pontos não monitorados. As metodologias de localização de monitores, de maneira geral, limitam-se a registrar todos os eventos de afundamentos, dentro de parâmetros estabelecidos, muitas vezes não definindo os pontos do sistema afetados. Em outras palavras um conjunto de monitores é alocado para registrar a ocorrência de afundamentos de tensão em um sistema, mas não é capaz de informar os locais onde ocorreram e nem suas respectivas severidades.

De forma efetiva, principalmente tratando de normas regulatórias, o interesse do cliente e para quantificação de índices de qualidade da energia fornecida pela concessionária o maior interesse é conhecer a incidência de VTCD nos pontos de conexão das unidades consumidoras. Neste sentido o simples registro do distúrbio no sistema elétrico, sem definir os pontos afetados e a severidade para cada um deles, tem pouco valor prático na percepção do cliente e da concessionária.

O PRODIST (ANEEL, 2020) define como indicador que quantifica os distúrbios de variações de tensão de curta duração o Fator de Impacto (FI), que é quantificado por ponto de conexão nos sistemas de distribuição. Embora ainda não sejam definidas penalizações para este indicador, o seu conhecimento no ponto de conexão é importante tanto para o consumidor, que pode tomar medidas para mitigar os efeitos dos distúrbios, quanto para a concessionária em seu planejamento de expansão e melhorias da rede.

São encontradas na literatura, ainda em pouca quantidade, propostas de metodologias para estimação de afundamentos de tensão em redes de distribuição com o objetivo de estimar a intensidade de afundamentos de tensão em pontos não monitorados do sistema a partir de pontos monitorados. Algumas destas metodologias, como KEMPNER (2012), exploram fortemente a característica de sistemas radiais, o que de certa forma limita sua aplicação, especialmente com o constante crescimento do uso de gerações distribuídas e redes inteligentes.

Nesta dissertação é apresentada uma proposta para localização de monitores, em redes de distribuição, para registrar todos os afundamentos de tensão e, ainda, estimar as tensões em todos os pontos não monitorados. Com as tensões estimadas é calculado o Fator de Impacto nos pontos de conexão de sistemas de distribuição. A metodologia proposta utiliza como informação adicional, para resolver o problema de estimação, um banco de dados obtido a partir de simulações de falta nos sistemas elétricos analisados.

1.1 Justificativas

Como citado, a variação de tensão de curta duração é um distúrbio relevante na área de Qualidade de Energia e seu monitoramento é importante. A instalação de um número elevado de Qualímetros pode ser considerada financeira, e até tecnicamente, inviável, o que justifica a necessidade de estudos de técnicas que permitam observar ocorrências de VTCD a partir de um número limitado de equipamentos de monitoramento.

Por outro lado, nas últimas duas décadas o ambiente regulatório vem sofrendo modificações no sentido de estabelecer os parâmetros de Qualidade de Energia que devem ser obedecidos no fornecimento de energia elétrica. No âmbito de sistemas de distribuição o Fator de Impacto é um indicador relativamente novo e que deve ser mensurado em pontos de interesse de sistemas de distribuição.

Neste cenário são encontradas duas justificativas desta dissertação. Uma sendo o emprego de um indicador, estabelecido pela agência reguladora brasileira, ainda pouco utilizado em pesquisas. E a outra justificativa é a proposta de uma metodologia para estimação de magnitudes de afundamentos de tensão em pontos não monitorados dos sistemas de distribuição, permitindo a quantificação da incidência de VCTD através da alocação de um número limitado de Qualímetros.

A evolução das ferramentas disponíveis para solução dos problemas, tanto em nível de *hardware* quanto em de *softwares*, mantém a necessidade de atualizações em métodos já bastante estudados, permitindo o seu contínuo aperfeiçoamento. Neste sentido esta pesquisa também se justifica pela utilização do OpenDSS, sendo este um programa de código aberto, que se popularizou na área após a consolidação do método de localização de monitores de afundamentos de tensão

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é o apresentar uma metodologia que permita a quantificação de afundamentos de tensão em pontos não monitorados de um sistema de distribuição através de um número limitados de equipamentos de monitoramento. Passam por este objetivo principal a aplicação de um método de alocação de monitores e posteriormente de método de estimação de afundamentos de tensão.

Portanto, um objetivo secundário desta pesquisa é o estudo de métodos de alocação de monitores de VTCD, desenvolvidos para registro do distúrbio, para identificar e propor alterações necessárias que permitam, além de registrar, a estimação da severidade de VTCD em pontos onde não existam Qualímetros instalados.

Ainda sobre a localização de monitores, outro objetivo considerado é a análise da influência de variações nas tensões pré-falta na resolução deste problema. Na literatura este parâmetro para o cálculo de afundamentos de tensão é considerado fixo, e muitas vezes até simplificado, devido a isto pretende-se realizar uma análise de sensibilidade deste parâmetro para verificar sua influência sobre a capacidade de observação de um conjunto de monitores instalados.

O tema estimação de afundamentos de tensão, com a finalidade de estimar a magnitude afundamentos de tensão em pontos não monitorados, ainda é pouco encontrado na literatura, considerando isto outro objetivo desta dissertação é propor uma abordagem para a solução deste problema. A partir da estimação deste parâmetro de severidade de VTCD são calculados os valor do Fator de Impacto em diversos nós de um sistema de distribuição.

1.3 Contribuições

É realizada uma análise de métodos de localização de monitores com a finalidade de, não somente registrar eventos globais, mas também, estimar a magnitude dos afundamentos em todos os nós não monitorados. Isto permite que sejam estimados também os valores do Fator de Impacto mais próximos à cada unidade consumidora, o que contribui para o interesse de concessionárias e consumidores no desenvolvimento de pesquisas no tema.

No mesmo sentido, a metodologia apresentada, para possibilitar a estimação do indicador, possui baixo custo de implantação, considerando o pequeno número de Qualímetros necessários para sua aplicação. Isto torna viável a possibilidade de análises que visem o aperfeiçoamento do indicador, por parte dos órgãos de regulação, abrindo caminho inclusive para transformação dos limites definidos de recomendados para obrigatórios.

A proposta para localização de monitores, diferente de muitos trabalhos existentes, permite registrar afundamentos de tensão gerados por faltas com uma grande diversidade de variação de parâmetros de modelagem, como tipos e impedâncias de falta e tensões

pré-falta e pode ser aplicado em sistemas desequilibrados.

Outra contribuição relevante desta pesquisa é a realização de uma análise de sensibilidade da alteração da matriz de cobertura de um sistema em relação a variações de fluxo de carga, o que alterações na capacidade de um conjunto de monitores de observar eventos de VTCD em rede elétrica.

Ainda, neste trabalho é estudada a limitação do método de localização de monitores baseado em simulações de curto-circuito de registrar e afundamentos de tensão, em sistemas de distribuição, causados por faltas externas a rede analisada. A partir deste estudo é proposta uma complementação a técnica para permitir o registro e a estimação das magnitudes dos afundamentos também deste eventos, que são responsáveis por um grande número de VTCD em alimentadores de distribuição de energia.

1.4 Estrutura do Trabalho

Neste primeiro capítulo é realizado uma introdução sobre o tema, enfatizando a relevância do estudo dos afundamentos de tensão, com destaque para o seu monitoramento em sistema de distribuição. São apresentados também os objetivos, contribuições e estrutura desta dissertação.

O capítulo 2 é dedicado a apresentação de conceitos básicos e definições necessários para o entendimento dos demais capítulos, principalmente os destinados a revisão bibliográfica e a metodologia. São abordados os conceitos de definições de afundamentos de tensão, cálculo de afundamentos, definição de área vulnerável que possibilitam o entendimento dos métodos de alocação de monitores para registro de afundamentos de tensão. É apresentada também a forma de medição de afundamentos de tensão e cálculo do Fator de Impacto estabelecidas no PRODIST. Por último é abordado os conceitos de estimação de estados necessário para a compreensão da metodologia proposta.

No capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica direcionada a proposta desta dissertação, sobre o monitoramento de afundamentos de tensão e a estimação de afundamentos de tensão. Por ser um assunto em voga a bastante tempo, os conceitos apresentados no segundo capítulo são suficientes para compreensão da proposta apresentada, não sendo necessária uma revisão bibliografia generalista sobre o assunto. Desta forma, a revisão bibliográfica apenas dos recortes relacionados aos objetivos da metodologia proposta, tem a finalidade de apresentar o estado da arte dentro destes tópicos.

O capítulo 4 trata das propostas de metodologia para localização de monitores e para estimação de afundamentos de tensão para o cálculo do indicador Fator de Impacto, detalhando a modelagem, etapas e técnicas utilizadas. São descritos os parâmetros de simulações de faltas, a construção e armazenamento do banco de dados utilizado para estimação das magnitudes de tensão durante afundamentos de tensão e o método de localização ótima de monitores.

No capítulo 5 são apresentados aplicações e resultados da metodologia apresentada no capítulo 4 utilizando os sistemas de distribuição teste IEEE de 34 e de 123 nós. Os dois sistemas apresentam características distintas, onde o sistema de 34 nós é um sistema com linhas mais longas e opera em um nível de tensão superior ao sistema de 123 nós, por outro lado este segundo apresenta uma maior complexidade relacionado ao seu maior número de nós. Os resultados obtidos nos dois sistemas são complementares na validação e na análise de sensibilidade da metodologia proposta.

Por fim o sexto capítulo contém as principais conclusões realizadas a partir do desenvolvimento desta dissertação e as propostas para continuação dos trabalhos de pesquisas relacionadas ao tema.

2 CONCEITOS BÁSICOS

Neste capítulo serão abordados conceitos teóricos e definições necessárias para o entendimento da revisão bibliográfica e da metodologia proposta neste trabalho. Inicialmente é apresentada a definição de afundamento de tensão, normas relevantes que o caracterizam e suas principais causas. Em seguida é apresentado a forma de cálculo da magnitude dos afundamentos de tensão, o método das posições de falta e o conceito de área de vulnerabilidade, que compõem a abordagem escolhida, neste trabalho, para alocação de qualímetros em sistemas elétricos de distribuição. Na sequência são apresentados conceitos de estimação de estados necessários para compreensão do método proposto para estimação do distúrbio em locais não monitorados. Por último são abordadas as definições para medição de afundamentos de tensão e cálculo do indicador Fator de Impacto.

2.1 Afundamentos de Tensão

Um afundamento de tensão pode ser definido como um distúrbio de qualidade de energia caracterizado por uma redução momentânea do valor eficaz de tensão, dentro de intervalo definido, em um ponto de um sistema elétrico. Existe uma grande variedade de normas que definem e que classificam os afundamentos de tensão, as mais citadas entre elas são as estabelecidas pelo IEEE e pelo IEC, onde embora haja diferenças em suas classificações é pacificado que os dois parâmetros principais desse fenômeno são a intensidade e a duração.

A norma IEEE 1159 (IEEE, 2019), intitulada “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”, caracteriza o afundamento de tensão como um decréscimo no valor RMS da tensão para valores entre 0,1 e 0,9 pu com duração a partir de 0,5 ciclo até 1 minuto. A norma também define sua terminologia, onde a intensidade do afundamento se refere ao valor remanescente da tensão durante o fenômeno. Por exemplo, em um afundamento de tensão de 0,8 pu sendo o nível nominal de tensão da rede de 380 V significa que a tensão remanescente durante o evento é de 304 V (ou 0,8 pu).

A nível nacional o afundamento de tensão é classificado pelo ONS nos Procedimentos de Rede, junto com a interrupção e a elevação de tensão, compondo os distúrbios de Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD). As VTCD são eventos caracterizadas por

desvios significativos no valor eficaz da tensão por um curto intervalo de tempo. Esta norma utiliza os mesmos valores de intensidade que a IEEE 1159, no entanto há uma pequena diferença na duração, que compreende o intervalo de 1 ciclo até 1 minuto. Os Procedimentos de Rede estabelecem indicadores de qualidade de energia elétrica para o Sistema Interligado Nacional e define que para as VTCD a amplitude do fenômeno é definida pelo menor valor eficaz da tensão no ponto considerado, enquanto perdurar o evento e que a duração é o intervalo de tempo decorrido entre o instante em que o valor eficaz da tensão no ponto considerado ultrapassa determinado limite e o instante em que essa variável volta a cruzar esse limite (ONS, 2020).

Ainda sobre a regulação no Brasil, no âmbito dos sistemas de distribuição, os indicadores de qualidade de energia são estabelecidos pela ANEEL nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (ANEEL, 2020). A definição dos afundamentos de tensão é a mesma apresentada pelo ONS, se diferenciado apenas no intervalo de duração considerado, que é de 1 ciclo até 3 minutos.

Afundamentos de tensão, até mesmo com uma pequena duração, podem ter o mesmo impacto que uma interrupção com duração de vários minutos, este impacto irá depender da sensibilidade das cargas ligadas ao sistema elétrico. MCGRANAGHAN; ROETTGER (2002) apresentam uma metodologia para estimar os custos gerados por eventos de afundamento de tensão em processos produtivos e apontam que as instalações de manufatura podem ter prejuízos que variam de milhares até milhões de dólares associados a uma única interrupção no processo.

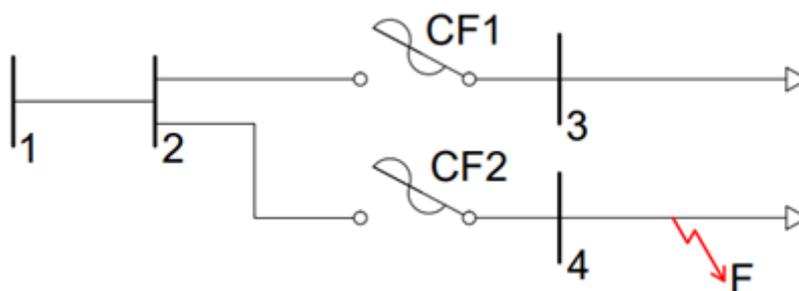
Desta forma, possuindo o mesmo potencial de prejuízos que interrupções de fornecimento, os afundamentos de tensão são eventos de igual ou maior importância, pois possuem frequência de ocorrência muito superior e afetam mais consumidores.

Os afundamentos de tensão têm como principais origens a energização de transformadores, ligação de grandes cargas e faltas em um sistema elétrico. As faltas são responsáveis pela maior parte dos afundamentos de tensão, principalmente devido a existência de milhares de quilômetros de linhas aéreas, tanto de transmissão quanto de distribuição, em um sistema elétrico que estão sujeitas a todos os tipos de intempéries. Ainda que existam ocorrências de curtos-circuitos em subestações as suas taxas de falhas são muito inferiores comparadas às de linhas de energia.

Os curtos-circuitos em redes aéreas podem ser provocados por diversas ocorrências, como vendavais, contatos com árvores ou animais, contaminação de isoladores e falhas humanas, mas a principal causa são as descargas atmosféricas. Em sistemas distribuição esta exposição pode ser considerada maior, considerada a ausência de elementos de proteção, como cabos de guarda, além da sua proximidade em relação solo e presença dentro do perímetro urbano, que favorecem o contato com outros elementos. Devido a grande maioria de suas causas possuírem natureza aleatória e imprevisível, os afundamentos de tensão estão entre os eventos mais difíceis de serem evitados, e também monitorados.

A duração de um afundamento de tensão causado por uma falta na rede elétrica está diretamente relacionada com a atuação do sistema de proteção da rede. Durante um curto-circuito a unidade consumidora conectada à montante do dispositivo de proteção, que deve atuar para eliminar a falta, irá sofrer um afundamento de tensão a partir do instante em que inicia a falta até a atuação da proteção. Como ilustração, supondo no sistema da Figura 1, um curto-circuito F em um ramo deste sistema que resulte na atuação da chave fusível CF2 causará a interrupção de fornecimento para todos os consumidores ligados a jusante deste elemento, mas os demais consumidores ligados a este sistema irão sofrer um afundamento de tensão até a atuação da proteção.

Figura 1 – Sistema exemplo 4 nós.



Fonte: O autor, 2021.

A intensidade do afundamento de tensão relacionado a uma falta depende, além da topologia e impedâncias do sistema, do tipo, da localização e da impedância da falta e das tensões pré-falta no sistema.

As faltas trifásicas e trifásicas à terra são os casos mais severos e causam afundamentos simétricos, no entanto são mais raras. Já os demais tipos de falta, principalmente a monofásica, são mais comuns, causam afundamentos desequilibrados e menos severos.

A localização da falta influencia diretamente na área afetada por ela. Faltas nos sistemas de transmissão e subtransmissão têm o potencial de gerar afundamentos em um maior número de consumidores, se comparadas com faltas ocorridas em sistemas de distribuição que, geralmente, afetam apenas circuitos adjacentes ao local da falta. É necessário destacar também que a grande maioria dos consumidores finais estão ligados ao sistema de distribuição e qualquer falta neste sistema irá afetar algum consumidor, ainda com uma severidade potencialmente maior. Por outro lado, faltas em uma linha do sistema de transmissão, por ser um sistema malhado, afetarão os consumidores com intensidades e durações menores, dependendo de fatores como tipo e impedância de falta e o sistema de proteção.

A impedância de falta é uma importante variável a ser considerada, pois raramente o seu valor é nulo. Desprezar a impedância de curto-circuito, em cálculos de afundamento, leva a obtenção de valores mais severos do defeito. É comum considerar para cálculos de área afetada e área vulnerável, em um sistema de energia, os pontos de falta sendo apenas

os nós do sistema, não sendo calculadas faltas ao longo das linhas.

As faltas ao longo das linhas podem ser enxergadas, do nó, como um valor de resistência de falta correspondente a impedância da linha do nó até o ponto da falha. Desta forma, além da própria impedância de falta que é constituída pela associação de vários elementos, a consideração de uma impedância de falta é necessária para o modelo de cálculo para incluir faltas ocorridas em todo o sistema estudado, não limitado apenas a faltas nos nós ou poucos pontos ao longo das linhas.

A tensão pré-falta é um fator que recorrentemente é encontrado nos modelos para cálculo de afundamentos de tensão, com seu valor sendo igual a 1 pu o que permite simplificar o método de cálculo utilizado e eliminar a necessidade do cálculo de fluxo de potência do sistema. No entanto sabe-se que a premissa de tensão 1 pu em todos os nós, está longe da realidade, ainda mais tratando de sistema de distribuição. A tensão em regime permanente é uma função direta da curva de carga do sistema e de atuação de equipamentos de regulação de tensão, sendo que são consideradas tensões adequadas de atendimento, para todo SIN, as compreendidas entre os valores de 0,95 e 1,05 pu (ONS, 2020).

2.2 Cálculo de Magnitude de Afundamentos de Tensão

Como exposto na subseção anterior, as faltas em sistemas elétricos de potência são as principais causas de afundamentos de tensão e possuem natureza aleatória, enquanto outras causas como a energização de transformadores e ligação de grandes cargas podem ser até mesmo mitigadas com ações como planejamento de operação e métodos de partida. A simulação de faltas fornece a tensão em toda a rede elétrica durante uma falta e é o método mais utilização para estudos de afundamentos de tensão.

É importante ressaltar que a probabilidade de ocorrência de curtos-circuitos em linhas de transmissão, de subtransmissão e de distribuições é muito superior do que em qualquer outro componente de um sistema elétrico. Como já citado, é resultado de muitos quilômetros de redes elétricas expostos a todos tipos de intempéries. Diante disso é comum, e aceitável, que os únicos locais de faltas considerados para a determinação do desempenho de um sistema, frente a afundamentos de tensão, são as linhas de transmissão, de subtransmissão e de distribuição.

Na literatura há dois métodos frequentemente citados para cálculos de afundamentos de tensão, o método da distância crítica e o método das posições de falta. O primeiro possui implementação relativamente simples, comparada com outros métodos e se fundamenta na determinação das posições de falta que irá gerar um afundamento com uma intensidade pré-estabelecida no ponto de interesse. Desta forma, faltas, com os mesmos parâmetros, ocorridas entre o ponto de interesse e os pontos com distâncias críticas irão resultar em afundamentos mais severos do que a intensidade pré-estabelecida para deter-

minar esta distância crítica. Esta metodologia se apresenta como eficaz, principalmente, para sistemas radiais e, como alguns ajustes, para sistemas pouco malhados, mas há limitações quando aplicado a sistemas de malhados de grande porte.

O método das posições de falta se baseia na simulação de faltas em diversos pontos de um sistema e calcular o valor das tensões remanescentes nestes pontos. Esta técnica é adequada para sistemas de grande porte, tanto radiais, quanto malhados e fornece uma visão geral do comportamento do sistema para um cenário de faltas estabelecido.

Ambos os métodos são amplamente conhecidos nessa área de estudo, portanto a seguir será apresentada a formulação para do método das posições falta, o utilizado neste trabalho.

Também conhecido como método do curto-circuito deslizante, o método das posições de falta , permite identificar a magnitude de afundamentos de tensão em pontos de interesse gerados por faltas em diversos pontos, que geralmente são os próprios pontos de interesse. A seguir, para facilitar a compreensão, será descrita a formulação para cálculo das tensões remanescentes durante uma falta trifásica. Na formulação apresenta os pontos de interesse e pontos de falta serão os nós do sistema estudado.

A tensão remanescente em um nó i do sistema durante uma falta trifásica no nó k pode ser calculada a partir da equação 1.

$$V_{i,k} = V_i^P - \frac{V_k^P}{Z_{k,k} + Z_f} \times Z_{i,k} \quad (1)$$

Onde:

$V_{i,k}$ – tensão remanescente no nó i devido a curto-circuito no nó k ;

V_i^P – tensão pré-falta no nó i ;

V_k^P – tensão pré-falta no nó k ;

$Z_{k,k}$ – impedância própria do nó k ;

Z_f – impedância de falta;

$Z_{i,k}$ – impedância de transferência entre os nós i e k .

Verifica-se a partir da equação 1 que as tensões remanescentes durante uma falta sofrem a influência das tensões pré-falta no sistema, da impedância de falta, da posição relativa do nó de interesse e do nó onde ocorre a falta, além das características próprias da rede.

Como já mencionado em 2.1, a tensão pré-falta nos nós do sistema está relacionada com o seu nível de carregamento. A obtenção destas tensões pré-falta implica na necessidade de um estudo de fluxo de potência para cada regime de carregamento considerado. Outro fator importante para o estudo do fluxo de potência, que tem influência nas simulações de curto-circuito, é a modelagem da carga.

As impedâncias de falta, que têm grande impacto nos cálculos de curto-circuito é uma das variáveis mais aleatórias e difíceis de definir, sendo alvo de uma própria área

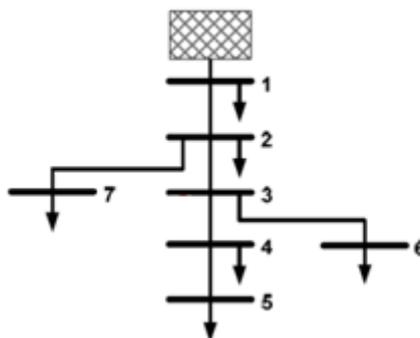
de pesquisa para sua determinação. Quanto maior a impedância da falta menor será a sua severidade e menor sua área de propagação, onde cada valor tensão residual a ser estudado tem um valor máximo de impedância de falta que será capaz de gerá-lo.

A partir do método das posições de falta é construída a Matriz de Tensões Remanescentes Durante Falhas (MTRDF), que irá fornecer a visão geral do desempenho do sistema, frente as magnitudes dos afundamentos de tensão, durante faltas nos nós do sistema. Para cada tipo e impedância de falta e cada nível de carregamento considerados será construída uma MTRDF, ou seja, uma MTRDF terá os valores das tensões durante faltas de um tipo no sistema com a mesma impedância de falta para o um nível de carregamento do sistema. Cada elemento da matriz é um vetor de 3 tensões de fase no nó i devido a um curto-circuito no nó k .

Na construção da MTRDF cada coluna k da matriz corresponde a tensão remanescente nos nós, i , do sistema devido a uma falta no nó k . Já cada linha i da MTRDF corresponde a tensão remanescente no nó i devido a faltas em cada uma dos nós, k , do sistema. Cada elemento da matriz é calculado conforme (1) no caso de faltas trifásicas e de maneira semelhante para os demais tipos de falta, que não serão apresentados neste documento por serem encontrados facilmente na literatura do tema.

Para ilustrar a construção da MTRDF é apresentado na Figura 2 o diagrama unifilar de um sistema exemplo, equilibrado, apresentado em IBRAHIM; MOHAMED; SHAREEF (2011), e a MTRDF do sistema para faltas trifásica com impedância de falta nula. Nesta forma simplificada as tensões apresentadas na MTRDF, representam as magnitudes das tensões de fase nos nós.

Figura 2 – Sistema exemplo 7 nós.



Fonte: (IBRAHIM; MOHAMED; SHAREEF, 2011).

$$MTRDF = \begin{bmatrix} 0 & 0,82 & 0,94 & 0,98 & 0,98 & 0,98 & 0,95 \\ 0 & 0 & 0,47 & 0,65 & 0,91 & 0,66 & 0,048 \\ 0 & 0 & 0 & 0,35 & 0,67 & 0,34 & 0,43 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,32 & 0,28 & 0,37 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,23 & 0,32 \\ 0 & 0 & 0 & 0,29 & 0,61 & 0 & 0,28 \\ 0 & 0 & 0,41 & 0,58 & 0,85 & 0,59 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Observa-se por se tratar de faltas solidas em um sistema radial que as tensões nos nós a jusante ao local de falta são nulas, bem como as tensões nos próprios locais de falta, desta forma todos os elementos da diagonal principal da MTRDF para este caso são iguais a zero.

2.3 Área de Vulnerabilidade e Área Afetada

Dois conceitos importantes para analisar o desempenho de um sistema, frente a afundamentos de tensão, e, também, para localização de um sistema de monitoramento de afundamentos, são os conceitos de área de vulnerabilidade e de área afetada.

A área de vulnerabilidade é definida como a região de um sistema elétrico onde que se ocorrida uma falta, com um valor máximo de impedância, irá causar um afundamento de tensão, com tensão residual inferior ao limiar estabelecido, em um ponto genérico k do sistema. Uma vez conhecida a área de vulnerabilidade é possível definir a região onde um monitor, localizado no ponto k, irá enxergar afundamentos de tensão com parâmetros iguais ou mais severos que os definidos.

Já a área afetada é definida como a região onde um afundamento de tensão terá magnitude inferior a um limite estabelecido, devido a uma falta em um ponto genérico i do sistema analisado.

Estas duas áreas podem ser facilmente identificadas a partir da MTRDF, onde uma linha i permite identificar a área vulnerável, o nó i, através da identificação dos locais de faltas, k, que resultam em afundamentos observados do nó i. Já a área afetada é identificada a partir de uma coluna k onde se pode observar quais nós, i, sofrem afundamentos de tensão devido a uma falta no nó k.

Na localização de monitores o conceito mais importante é o de área de vulnerabilidade. Para melhor ilustrá-lo será retomado, como exemplo, o sistema apresentado em 2.2, e identificada a área de vulnerabilidade do nó 7 para magnitudes de tensão remanescentes durante faltas trifásicas francas menores que 0,5 pu destacado em vermelho em (3).

$$MTRDF = \begin{bmatrix} 0 & 0,82 & 0,94 & 0,98 & 0,98 & 0,98 & 0,95 \\ 0 & 0 & 0,47 & 0,65 & 0,91 & 0,66 & 0,048 \\ 0 & 0 & 0 & 0,35 & 0,67 & 0,34 & 0,43 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,32 & 0,28 & 0,37 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,23 & 0,32 \\ 0 & 0 & 0 & 0,29 & 0,61 & 0 & 0,28 \\ 0 & 0 & 0,41 & 0,58 & 0,85 & 0,59 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

As faltas trifásicas francas nos nós 1, 2, 3 e 7 resultaram em tensões remanescentes durante a falta inferiores a 0,5 pu no nó 7, portanto estes quatro nós compõem a área de vulnerabilidade do nó 7 para este tipo de faltas.

A partir da MTRDF pode ser definida uma Matriz de Cobertura para um limiar de tensão remanescente que permite a melhor identificação das áreas vulneráveis e afetada. Esta Matriz de Cobertura é uma matriz binária, construída, de forma genérica, conforme (4) e é utilizada nas técnicas de localização de monitores de afundamentos de tensão.

$$MC = \begin{cases} 1, & \text{se } V_{i,k} \leq \alpha \\ 0, & \text{se } V_{i,k}^{DF} > \alpha \end{cases} \quad (4)$$

Onde:

MC - Matriz de Cobertura

$V_{i,k}$ - Tensão Remanescente no nó i devido a uma falta no nó k ;

α - Limiar de Tensão.

Nesta forma a Matriz de Cobertura para o exemplo anterior, considerando um limiar igual a 0,5 pu, conforme (4), é apresentado em (5).

$$MC = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.4 Medição de Afundamentos e Fator de Impacto

No âmbito dos sistemas de distribuição brasileiros o PRODIST, em seu Módulo 8, junto com as definições de VTCD, estabelece os métodos de medição e define o indicador Fator de Impacto para caracterização da severidade das VTCD. O Fator de Impacto é calculado a partir dos eventos de VTCD ocorridos durante um período de 30 dias.

Os eventos de VTCD são estratificados em 9 regiões de sensibilidade, conforme a

magnitude da tensão residual e a duração do evento, visando correlacionar a importância de cada evento com os níveis de sensibilidade das diferentes cargas conectadas aos sistemas de distribuição, em média e alta tensão. A Tabela 1 apresenta as regiões de estratificação.

O Fator de Impacto, para caracterização da severidade da incidência de eventos de VTCD é calculado conforme (6).

$$FI = \frac{\sum_{i=A}^I (f_{ei} \times f_{pi})}{FI_{BASE}} \quad (6)$$

Onde:

f_{ei} – frequência de ocorrência de eventos de VTCD, apurados num período de trinta dias, para cada região de sensibilidade i ;

f_{pi} – fator de ponderação para cada região de sensibilidade i ;

FI_{BASE} – Fator de Impacto base, obtido do somatório dos produtos dos fatores de ponderação pelas frequências máximas de ocorrência em um período de trinta dias, para cada região de VTCD.

Tabela 1 – Estratificação das VTCD com base nos níveis de sensibilidade das diversas cargas.

Amplitude (pu)	Duração						
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 seg]	(1 seg - 3 seg]	(3 seg - 1 min]	(1 min - 3 min]
> 1,15	REGIÃO H			REGIÃO I			
(1,10 - 1,15]	REGIÃO A			REGIÃO G			
(0,85 - 0,90]	REGIÃO A			REGIÃO G			
(0,80 - 0,85]	REGIÃO A			REGIÃO G			
(0,70 - 0,80]	REGIÃO B	REGIÃO D		REGIÃO F			
(0,60 - 0,70]	REGIÃO B	REGIÃO D		REGIÃO F			
(0,50 - 0,60]	REGIÃO C	REGIÃO D		REGIÃO F			
(0,40 - 0,50]	REGIÃO C	REGIÃO D		REGIÃO F			
(0,30 - 0,40]	REGIÃO E			REGIÃO F			
(0,20 - 0,30]	REGIÃO E			REGIÃO F			
(0,10 - 0,20]	REGIÃO E			REGIÃO F			
< 0,10	REGIÃO E			REGIÃO F			

Fonte (ANEEL, 2020)

O fator de ponderação (fp) para cada região de sensibilidade e o Fator de Impacto base são obtidos a partir da Tabela 2.

Tabela 2 – Fatores de ponderação e Fator de Impacto Base de acordo com tensão nominal.

Região de Sensibilidade	Fator de Ponderação (f_p)	Fator de Impacto Base (FI_{BASE})	
		$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
A	0,00	2,13	1,42
B	0,04		
C	0,07		
D	0,15		
E	0,25		
F	0,36		
G	0,07		
H	0,02		
I	0,04		

Fonte (ANEEL, 2020)

Percebe-se através de (6), que o fator de impacto é relativo ao Fator de Impacto Base, sendo o valor de referência para o indicador de 1,0 pu nos sistemas de distribuição em média e em alta tensão. O PRODIST não estabelece valores de referência para sistema de distribuição em baixa tensão.

Ainda percebe-se através dos fatores de ponderação, presentes na Tabela 2, que eventos pertencentes a região de sensibilidade A não possuem nenhum efeito sobre o valor do Fator de Impacto, pois seu fator é nulo. Desta forma afundamentos de tensão com magnitude, de tensão residual, superiores a 0,85 pu para qualquer duração ou com magnitude entre 0,80 e 0,85 pu com duração inferior a 600 ms não influenciam no valor do Fator de Impacto.

Na medição de VTCD em um ponto de monitoração são consideradas a agregação dos parâmetros amplitude e duração de cada evento. Desta forma, para um mesmo ponto de monitoração, eventos trifásicos são agregados compondo um mesmo evento, o que é denominado como agregação de fases e eventos consecutivos, dentro de um período de até 3 min, são agregados compondo um evento único, o que é denominado como agregação temporal.

O menor valor residual de tensão durante o evento de afundamento de tensão, considerado a partir das agregações de fase e temporal, será o seu valor de intensidade. A agregação de fases é feita pelo critério de união das fases, em que a duração do evento é definida como o intervalo decorrido entre o instante em que o primeiro dos eventos em uma das fases transpõe determinado limite e o instante em que o último dos eventos retorna para este limite.

O PRODIST ainda estabelece duas formas alternativas para agregação de fases. A primeira é a agregação por parâmetros críticos, onde a duração do evento é definida como

a máxima duração entre os três eventos, um por fase, e o valor de magnitude que mais se distanciou da tensão de referência. A segunda alternativa é a agregação pela fase crítica, onde a duração do evento é definida como a duração do evento de amplitude crítica, portanto a de menor amplitude de tensão residual.

A partir destas definições pode se observar que será considerado apenas um único evento de VTCD gerado por uma falta em um alimentador que resulte na atuação de um religador. Caso o ponto de monitoração esteja à jusante do religador o afundamento gerado até a atuação da proteção não será considerado e sim o evento mais severo no intervalo, que é a interrupção de curta duração se for uma falta temporária ou se for uma falta permanente que seja eliminada após a atuação do religador por outro elemento de proteção à jusante do ponto de monitoração. Se a interrupção gerada for de curta duração está será estratificada nas regiões E ou F e contribuirá para o cálculo do valor do Fator de Impacto. Em se tratando de uma falta permanente eliminada por um elemento de proteção à montante do ponto de monitoração o evento não será considerado como VTCD e sim como interrupção de fornecimento.

Considerando a mesma situação de falta, mas se o ponto de monitoramento estiver à montante do religador e este perceber mais de um afundamento de tensão devido a atuação da proteção, dentro do período de 3 min, pela agregação temporal será considerada apenas um único evento de afundamento.

2.5 Estimação de Afundamentos de Tensão

Como descrito na subseção anterior, o Fator de Impacto é um indicador calculado a partir dos eventos de afundamentos de tensão em um ponto da rede elétrica, desta forma o indicador de qualidade terá valores diferentes para os clientes conectados aos diversos pontos de conexão da rede de distribuição. Sendo assim, para o cálculo do Fator de Impacto é necessário conhecer as magnitudes e durações de todos os eventos de afundamentos de tensão em cada ponto para o qual se calcule o indicador.

Os métodos de localização ótima de monitores se justificam pela inviabilidade técnica e econômica de monitorar todos os pontos de conexão de uma rede elétrica, por isso se busca encontrar um conjunto de monitores que permitam registrar todos os eventos a partir de instalação de um número limitado de monitores. Com isto para obter os valores de magnitude de tensão durante afundamentos de tensão em pontos não monitorados, ou seja, sem medição do valor durante o evento, é necessário estimar os valores de magnitudes de tensão a partir dos valores medidos nos nós monitorados.

O problema de estimação das magnitudes de tensões durante afundamentos de tensão é denominado na literatura como estimação de afundamentos de tensão. Este problema é caracterizado por ser um sistema subdeterminado, ou seja, o conjunto de variáveis conhecidas não permite a construção de um sistema de equações, linearmente independentes,

que possibilitem o cálculo das magnitudes de tensão não medidas.

Sistemas subdeterminados podem não ter solução ou apresentam mais de uma solução de estimação para os valores de estados desconhecidos, sendo esta segunda possibilidade a presente neste problema, pois se trata de um circuito elétrico que possui solução. Neste caso é necessária alguma informação adicional para determinar a solução correta para o problema.

As informações adicionais para a determinação da solução para a estimação de afundamentos de tensão podem ser obtidas de diversas formas, como através de informações da topologia da rede, dados estocásticos e simulações de faltas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A qualidade de energia, principalmente nas últimas duas décadas, se tornou uma das grandes áreas de pesquisa em sistema de potência. As VTCD são distúrbios que dispõem apresentações por sua relevância e número de trabalhos publicados. Considerando isto a revisão bibliográfica a seguir será direcionada aos dois recortes que compreendem a metodologia proposta, que são a localização de monitores de afundamentos de tensão e a estimação de afundamentos de tensão.

O monitoramento de distúrbios de qualidade de energia elétrica é um assunto bastante explorado, incluindo a localização de monitoramento de afundamentos de tensão. Já a estimação de afundamentos de tensão é um tema onde são encontradas pesquisas em quantidade muito inferior ao primeiro assunto.

3.1 Localização de Monitores de Afundamentos de Tensão

OLGUIN; BOLLEN (2003) apresentam uma metodologia para localização ótima de monitores de afundamentos de tensão, em sistemas de transmissão, através de simulações de faltas, com objetivo principal de encontrar o número mínimo, e as posições, de monitores que garanta a observação de eventos, com limiares definidos, em todos os nós de um sistema. É utilizado o método de posições de falta para determinação da matriz de tensão durante a falta, como apresentado na seção anterior, de maneira simplificada, utilizando a premissa de desconsiderar a carga pré-falta no sistema, considerando as tensões pré-falta iguais a 1 pu.

Na formulação do método de otimização, foi utilizado o conceito de área vulnerável para definir uma matriz de cobertura binária, onde os elementos correspondentes da matriz de tensão durante a falta com valores menores que o limiar estabelecido possuem o valor 1 e os demais 0. Neste estudo foram consideradas, para a determinação da matriz de cobertura, apenas faltas trifásicas solidas.

O método de otimização se resume em encontrar o número mínimo de monitores que obedece a restrição de cada nó do sistema estar localizada dentro da área vulnerável de pelo menos um nó monitorado. A formulação aplicada é caracterizada como um problema de otimização linear inteira, o que permitiu a aplicação de um algoritmo *Branch and*

Bound, para sua solução. O caso de estudo desta pesquisa foi um sistema de transmissão de 87 nós e foram considerados quatro limiares de tensão, variando de 0,75 a 0,90 pu. Esta variação permite observar o aumento do número de monitores necessários quando o limiar dos afundamentos observados é reduzido. Entre as sugestões propostas para seguimento da pesquisa estão a consideração de faltas assimétricas e faltas não sólidas.

O trabalho apresentado anteriormente tem continuidade em OLGUIN; VUINOVICH; BOLLEN (2006), onde de forma adicional a metodologia, para minimizar o número de monitores, é incluído um método de otimização, baseada em algoritmo genético, para explorar o espaço de solução de localização de conjuntos de monitores, com o número mínimo encontrado através do método de *Branch and Bound*. O caso de estudo também é mantido e para comprovar a robustez do método são comparados os índices SARFI-90 médio do sistema considerando o monitoramento de todo o sistema, de 87 nós, e o monitoramento do conjunto ótimo de monitores encontrado pelo método, com apenas 8 monitores.

ALMEIDA (2007) propõe um método baseado em OLGUIN; BOLLEN (2003), e define a matriz observabilidade, para um limiar definido, baseado na matriz de tensões remanescentes durante faltas. Neste estudo são considerados todos os tipos de faltas e a metodologia é aplicada em sistemas de transmissão de 7, 60 e 154 nós.

IBRAHIM et al. (2012) apresenta o conceito de matriz de observabilidade topológica, que considera a topologia da rede e permite definir o limite da área de detecção de um monitor ao longo das linhas, não limitado apenas aos nós. A metodologia é aplicada a dois casos de estudo, sendo um o sistema de transmissão teste IEEE de 30 nós e o outro um o sistema de distribuição teste IEEE de 34 nós.

A dissertação de KEMPNER (2012) segue a mesma linha de OLGUIN; BOLLEN (2003), no entanto aplica a metodologia em um sistema de distribuição, utilizando o método das posições de falta para determinar a matriz de tensão durante falta e um algoritmo do tipo *Branch and Bound*, para determinar o conjunto com o número mínimo de monitores e maior capacidade de observação do sistema. Neste estudo também são consideradas apenas faltas trifásicas sólidas e a simplificação das tensões pré-falta iguais a 1 pu. O caso de estudo utilizado é o sistema de distribuição teste IEEE com 37 nós e considera diversos limiares de magnitude de tensão.

Já na tese de KEMPNER (2016), são considerados todos os tipos de faltas, ainda apenas faltas sólidas, para diversos limiares de magnitude de tensões residuais. O trabalho propõe um método de redução do esforço computacional resultante da consideração de diversas matrizes de tensão durante a falta, uma para cada tipo de falta, através da intersecção das matrizes de observabilidade, ou cobertura. A metodologia proposta é aplicada aos sistemas de distribuição teste IEEE de 13, 34, 37 e 123 nós.

HAGHBIN; FARJAH; MAZAHERIFAR (2013) também utilizam a abordagem apresentada em OLGUIN; VUINOVICH; BOLLEN (2006), e propõem uma metodologia para

selecionar o arranjo ótimo de monitores através de índices atribuídos os locais dos monitores utilizando lógica fuzzy. O caso de estudo realizado é uma rede de transmissão de pequeno porte, com 26 nós.

GOMES (2016) propõe uma metodologia simplificada para localização de monitores em sistema de distribuição considerando o caso mais brando de faltas, que se espera seja o mais crítico de ser monitorado, que é o caso de uma falta monofásica com resistência de falta diferente de zero. Diferente dos trabalhos já citados, neste foi utilizado para a otimização e localização de monitores apenas um algoritmo genético. O método foi aplicado nos sistemas de distribuição de testes IEEE 13, 34 e 123 nós e em um sistema real. Foi utilizado um método estocástico, baseado no Método de Monte Carlo, para simulação de faltas na rede para verificar a eficiência da metodologia. Como esperado, a consideração do caso mais brando de falta permitiu ao conjunto de monitores registrar todos os afundamentos simulados. Ainda no caso de estudo do sistema real foi reduzida a resistência de falta para verificar a sensibilidade do método e verificado que a adoção de resistências de falta para o cálculo da área vulnerável reduz a eficiência do método de localização, já que serão possíveis eventos que não sejam registrados por nenhum monitor.

JUNQUEIRA (2017) utiliza o conceito de matriz de observabilidade topológica, apresentado por Ibrahim (2012), e resolvem o problema de localização ótima de monitores através de um método de otimização de enxame de partículas binárias. A metodologia proposta é aplicada a um sistema de distribuição, desequilibrado, teste IEEE de 13 nós e a um sistema de 90 nós, equilibrado, baseado em um sistema real.

Os trabalhos desenvolvidos após OLGUIN; BOLLEN (2003) tiveram entre seus avanços a aplicação do método, também, a redes de distribuição, consideração de diferentes tipos e impedâncias de faltas e utilização de *softwares* de análise de sistemas para determinar as magnitudes de tensão, em substituição ao cálculo de curto-circuito. O foco principal de diversas pesquisas encontradas é o de propor metodologias para otimizar a localização de monitores, muitas vezes visando a redução de esforço computacional. Através da revisão da literatura pode-se considerar saturado este assunto do ponto de vista de aplicação de métodos de solução do problema de otimização ou métodos de redução do espaço de busca.

Como já mencionado na introdução dessa dissertação, a ótica adotada é de que, a localização de monitores em uma rede é um problema de planejamento de operação que não possui necessidade de ser solucionado em tempo real. Por esta percepção as técnicas adotadas para reduzir o esforço computacional não tem relevância prática se a resposta ótima encontrada for a mesma.

Por outro lado, ainda são pouco exploradas, em pesquisas, análises de sensibilidade amplas de variáveis de entrada que possuem grande influência nos resultados, destacando a variações de tensões pré-falta e variações de impedância de falta. Esta proposta realiza um amplo estudo em relação a variações destes parâmetros de entrada, partindo da hipó-

tese apresentada por GOMES (2016), de utilização de um caso menos severo e avançando em análises de sensibilidade que corroboram para identificação de alterações necessárias, para ampliar a aplicação do método, e validação da hipótese.

3.2 Estimação de Afundamentos de Tensão

WANG; XU; PAN (2005) apresentam um conceito de estimativa de estados de curva-tura com o objetivo de calcular índices de desempenho de qualidade de energia em um alimentador a partir da monitoração de um número limitado de pontos. A metodologia proposta utiliza como informações adicionais, as medições, a topologia radial da rede e cálculos de faltas no sistema, sendo necessário conhecer o caminho de falta para a estimativa. A estimativa é realizada para uma situação de falta e segmenta a curva do perfil de tensão de um alimentador a fim de determinar os valores de magnitude de tensão em pontos não monitorado através de regressão linear.

ESPINOSA-JUAREZ; HERNÁNDEZ (2007) apresentam uma metodologia aplicável a qualquer topologia de sistema para estimativa da frequência de ocorrência de afundamentos de tensão em pontos não monitorados. A proposta utiliza uma matriz que indica quais nós não monitorados deverão sofrer um afundamento devido a um afundamento percebido por um nó monitorado, se limitando a estimar apenas a frequência de ocorrência de afundamentos, com um limite de severidade estabelecido, sem estimar as magnitudes de tensão, em cada nó não monitorado, para os eventos ocorridos.

TAO et al. (2015) realizam a estimativa de localização de falta por afundamentos de tensão a partir de um conjunto de monitores capaz de garantir a observabilidade do sistema, frente a afundamentos. O objetivo do método não é o cálculo de um indicador em cada nó do sistema, mas estimar o local, tipo e resistência de falta no sistema a partir de afundamentos registrados por um sistema de monitoramento. Os autores definem o conceito de domínio de influência da falta, que corresponde ao conceito de área vulnerável e utilizam o método dos mínimos quadrados e um algoritmo de otimização de enxame de partículas para encontrar a solução do problema em sistemas malhados.

A dissertação de TELLES (2017) propõe uma metodologia para estimar indicadores de afundamentos de tensão em sistemas de distribuição a partir de medições realizadas em apenas um terminal da rede. A proposta utiliza um método de localização de faltas, baseada na análise de impedância aparente vista de um terminal local para determinar o perfil de tensão da rede durante uma falta. Para validação o método foi aplicado aos sistemas de distribuição teste IEEE de 13 e de 34 nós.

BLANCO-SOLANO et al. (2019) apresenta uma metodologia, para estimativa da magnitude de afundamentos de tensão em nós não monitorados, baseada em uma técnica de sensoriamento compreensivo. As simulações de faltas realizadas no estudo utilizaram a ferramenta computacional OpenDSS para obtenção das tensões remanescentes durante

as faltas nos sistemas analisados. Nos resultados são apresentados os erros no cálculo de um indicador de qualidade de energia, para afundamentos de tensão, devido as estimações de magnitudes de tensão em nós não monitorados.

A estimação de afundamentos de tensão é um assunto mais incipiente do que a localização de monitores, com poucos trabalhos publicados e com objetivos e abordagens diversas. Entre os objetivos distintos estão a estimação da frequência de ocorrência de afundamentos de tensão e a estimação da localização de falta, onde embora se incluam estes trabalhos no tema estimação de afundamentos de tensão, seus objetivos são diferentes do objetivo desta pesquisa, que é estimar as magnitudes de tensão em todos os nós do sistema.

Os trabalhos de TELLES (2017) e BLANCO-SOLANO et al. (2019) possuem os objetivos mais semelhantes ao da metodologia proposta. Em relação a pesquisa de TELLES (2017) este trabalho propõe a localização de monitores em pontos diferentes, além do nó da subestação, objetivando um baixo grau de erro de estimação e é aplicado em um sistema com número maior de nós.

Quanto ao trabalho de BLANCO-SOLANO et al. (2019), nesta proposta também é utilizado o OpenDSS para obtenção das magnitudes de tensão e o objetivo é de estimar as magnitudes de tensão em todos os nós não monitorados. No entanto a metodologia, utilizada pelos autores, de sensoriamento compreensivo é diferente da proposta neste documento. Outra diferença é o indicador escolhido para quantificar os distúrbios, que nesta dissertação é o Fator de Impacto, determinado pela agência reguladora brasileira.

4 METODOLOGIA

A localização de monitores de afundamentos de tensão em sistema de distribuição pode ser realizada através de diferentes métodos, que pode variar conforme critérios e objetivos do modelo de otimização. Em geral a localização de monitores de afundamentos de tensão está associada a inviabilidade de monitoramento de todos os pontos de um sistema de distribuição, sendo necessário determinar um número limitado de pontos de monitoração que permitam observar os eventos ocorridos no sistema com o menor erro possível.

Para alcançar o objetivo de calcular o Fator de Impacto em todas os nós do sistema é necessário, além do registro de todos os eventos de afundamentos de tensão relevantes, saber todos os nós afetados, monitorados e não monitorados, e a magnitude de tensão em cada um deles. Desta forma para o cálculo do indicador nos nós não monitorados é necessário estimar os afundamentos de tensão a partir dos dados dos nós monitorados. A metodologia proposta utiliza dados de simulações de afundamentos de tensão para realizar a estimação dos distúrbios em todos os pontos, de interesse, do sistema estudado.

O primeiro passo é realizar a modelagem computacional do sistema, e em seguida as simulações de faltas para determinação das matrizes de tensões remanescentes durante a falta. As simulações de falta são utilizadas na construção das matrizes de cobertura do sistema, para a localização de monitores, e também são utilizadas para construir um banco de dados, para a estimação de afundamentos.

Após construída as matrizes de cobertura é aplicado o método de otimização para determinar o número mínimo de monitores necessários para observar o sistema, considerando os parâmetros estabelecidos. Com a determinação do número mínimo de monitores necessários a metodologia de otimização passa ao objetivo de determinar o conjunto de monitores, com o número mínimo, que maximize a observabilidade do sistema.

Para cada evento de afundamento de tensão registrado pelo arranjo de monitores definido é estimada a severidade dos distúrbios em todos os nós do sistema através das informações de estados de tensão dos monitores. O algoritmo de estimação irá buscar dentro do banco de dados gerado pelas simulações de falta o cenário que represente com o menor erro os valores dos nós monitorados.

Após as estimações das magnitudes de tensão para todos os eventos os dados são estratificados e é calculado o Fator de Impacto de cada nó do sistema, utilizando os valores medidos para os nós monitorados e o valor estimado para os nós não monitorados.

A metodologia proposta nesta dissertação pode ser dividida em seis passos enumerados a seguir:

- Passo 1 – Modelagem Computacional: O primeiro passo é a modelagem do sistema estudado através de um *softwares* de simulações e análise de rede elétrica;
- Passo 2 – Determinação da MTRDF e da Matriz de Cobertura: a partir da definição dos parâmetros do caso menos severo de faltas, que resulte em afundamentos de tensão que deverão ser registrados, é construída a matriz de cobertura a partir MTRDF determinada através das simulações de faltas;
- Passo 3 – Alocação Ótima de Monitores: Após a determinação da Matriz de Cobertura é resolvido o problema de otimização que minimize o número de monitores necessários para atender a restrição de garantir a observabilidade dos nós desejados;
- Passo 4 – Construção do Banco de Dados: São definidos intervalos e níveis de variações de impedâncias de falta e carregamento do sistema e geradas as MTRDF para todos os tipos de faltas. Todas as MTRDF são armazenadas formando o banco de dados de simulações de falta;
- Passo 5 – Estimação de Magnitude de Afundamentos de Tensão: Os dados de afundamentos de tensão registrados pelo conjunto de monitores alocados são utilizados para estimar a magnitude dos afundamentos de tensão nos nós não monitorados através de busca de situação de falta no banco de dados;
- Passo 6 – Cálculo do Fator de Impacto: Após estimadas as magnitudes de afundamentos de tensão para os eventos registrados é realizado o cálculo do Fator de Impacto para cada nó.

Esta proposta se destina a estimação de afundamentos em sistemas de distribuição, mais especificamente em alimentadores a partir de uma subestação e são considerados os nós ligados em nível de tensão primária. É importante ressaltar que curtos-circuitos próximos ao terminal da subestação necessitam possuir uma impedância de falta muito inferior, comparado com curtos-circuitos no meio de um alimentador, para gerarem um afundamento de tensão. Com isso, para permitir a utilização de intervalos maiores de impedância de falta na aplicação desta metodologia pode ser necessário desconsiderar pontos próximos do terminal da subestação.

A desconsideração desses pontos, na prática, não causa prejuízos para o cálculo final do indicador de qualidade, visto que faltas no alimentador, muito próximas a subestação devem ser eliminadas por um elemento de proteção a montante do local de falta, e que resultaram em uma interrupção de fornecimento em todo o alimentador. Além disto é considerada a premissa que o nó da subestação possui um MQEE que é capaz de registrar eventos próximos a este nó.

A metodologia aplicada realiza a estimação das magnitudes de afundamentos de tensão gerados por faltas na rede, que é um dos parâmetros de caracterização de severidade que depende das condições de falta. A duração dos afundamentos, como já mencionado, é diretamente dependente da atuação dos dispositivos de proteção, e sua modelagem não está inclusa no escopo deste trabalho. Em uma situação real de monitoração a duração dos afundamentos de tensão será registrada pelos MQEE localizados na rede.

Cabe ressaltar que além das faltas ao longo do alimentador, faltas a montante ao nó da subestação também são responsáveis por afundamentos de tensão. Embora o método de localização de monitores utilizado não considere estas falhas externas a rede, no capítulo 5 são identificadas alterações necessárias para inclui-las no escopo e, também, são apresentados resultados da aplicação da metodologia para este caso.

4.1 Modelagem Computacional

Para as simulações de faltas foi utilizado o *softwares* OpenDSS, do EPRI, que é uma ferramenta que vem sendo bastante difundida nos últimos anos para a análise de sistema de distribuição. O OpenDSS é uma ferramenta robusta para a análise e simulações de redes de distribuição e ainda atinge uma alta velocidade de cálculo (BLANCO-SOLANO et al., 2019).

A utilização de um *softwares* de simulação para os cálculos das magnitudes de tensão é um avanço em relação aos primeiros estudos sobre localização de monitores de afundamentos de tensão que utilizavam cálculos de curto-circuito para a definição das matrizes de tensões remanescentes, pois facilidade de implementação. A exatidão dos resultados é limitada pelo modelo matemático utilizado para os cálculos, sendo que quanto mais completo o modelo maior é sua complexidade de ser desenvolvido. Atualmente os *softwares* de análise de redes utilizam modelos completos e tornam viáveis a realização de estudos com número elevado de simulações.

O OpenDSS possui uma função que cria uma falta em um sistema que permite definir o tipo e a impedância de falta, além de outras variáveis. Em casos de modelos de sistemas que possuem reguladores de tensão, com ajuste automático, é necessário realizar o cálculo do fluxo de potência antes da falta para ajuste dos taps dos reguladores e posteriormente fixá-los para então criar o ponto de falha no sistema.

Os dados de saída das simulações de faltas utilizados na metodologia proposta são as magnitudes das tensões de todas as fases de cada nó e a potência de curto-circuito no nó de referência. Estes dados podem ser importados por diversos *softwares* de cálculo, como o Matlab, que foi o escolhido para o desenvolvimento deste estudo.

4.2 Simulações de Falta

Como descrito nos capítulos iniciais a simulação de faltas é a ferramenta utilizada para determinar a magnitude dos afundamentos de tensão. Estas simulações de faltas têm duas finalidades neste trabalho, a de determinar a matriz de cobertura que é utilizada na solução do problema de localização ótima de monitores e a de gerar um banco de dados que é utilizado na estimação de afundamentos de tensão nos nós não monitorados.

Para determinar a matriz de cobertura a situação de falta utilizada leva em consideração o tipo de falta menos severo, a resistência de falta mais alta, que cause afundamentos de tensão na rede, e o carregamento mais leve do sistema, desta forma as faltas simuladas terão a menor área de propagação possível. Se por um lado, estas considerações resultam em um número mínimo maior de quilômetros necessários, para observar todo o sistema, por outro garante a capacidade do conjunto de monitores de registrar todos os eventos de afundamentos de tensão mais severos do que os considerados neste cenário.

Uma metodologia similar foi empregada por GOMES (2016) que considerou um cenário de faltas monofásicas com resistências de falta de 50Ω para determinar as áreas vulneráveis por faltas. O autor fez a comparação deste método com outro utilizando o Método de Monte Carlo, também utilizado em outros trabalhos, para simular faltas com diversos cenários e concluiu que o método proposto, que o autor chamou método determinístico, apresentou resultados correspondentes com uma complexidade e esforço computacional inferior, para solução do problema de localização ótima de monitores. Através dos resultados e conclusões foi possível validar a hipótese de que a adoção do caso mais brando de situação de falta na localização de monitores garante que o conjunto de monitores é capaz de observar os afundamentos gerados por faltas mais severas.

Diferente de GOMES (2016), que realizou simulações para determinar qual fase apresentava os afundamentos menos severos e constrói a matriz de cobertura a partir da MTRDF desta fase, neste trabalho foram determinadas as MTRDF das três fases, para todo sistema, e na construção da matriz de cobertura utiliza-se o maior valor de tensão residual durante falta em cada nó.

4.3 Localização Ótima de Monitores

De forma genérica, o principal objetivo da localização ótima de monitores de afundamentos de tensão é o de encontrar um arranjo com o menor número de monitores que permita a observação de todos os eventos relevantes. Na definição de quais eventos devem ser registrados pelo arranjo de monitores é necessário determinar a severidade dos eventos, a partir de um limiar de tensão adotado.

Um conceito muito importante para localização de monitores é o conceito de observabilidade, onde se define que um nó é observado se todo evento de afundamento com magnitude de tensão igual ou inferior ao limiar adotado é registrado por algum monitor

alocado no sistema. Isto equivale a dizer, agregando o conceito de área de vulnerabilidade, que um nó é observado se ele pertencer a área vulnerável de pelo menos um nó com monitor alocado.

As soluções do problema de localização ótima de monitores são as combinações de locais de monitoramento que permitem a observação de todos os pontos do sistema. Na formulação matemática desse problema é definido um vetor X , binário, de localização de MQEE da seguinte forma:

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (7)$$

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{se o nó } i \text{ possui MQEE} \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (8)$$

Onde:

X - Vetor de locais de monitoramento;

n - número de nós.

Através das equações (4) e (7) um vetor observabilidade, chamado de Y , pode ser obtido, sendo:

$$Y = X \cdot MC \quad (9)$$

onde:

$$Y = [y_1, y_2, \dots, y_n] \quad (10)$$

O valor de y_i indica por quantos MQEE o nó i é observado. Um nó i é considerado observado por um arranjo de monitores X se $y_i \geq 1$.

4.3.1 Função Objetivo e Restrições

Como já descrito a abordagem utilizada, nesta proposta, leva em consideração a restrição de que todos os nós do sistema deverão ser observados por pelo menos um monitor. A solução desse problema de otimização poderá não ter uma solução única, ou seja, poderá haver mais de um arranjo com o mesmo número, mínimo encontrado, de monitores que garantam a observabilidade de todos os nós. Neste caso será escolhido o arranjo que maximize a observabilidade do sistema considerando a soma do número de nós observados por cada monitor. A seguir a equação (11) apresenta a formulação básica do problema de otimização, a partir da sua função objetivo.

$$F_{Obj} = \min \sum_{i=1}^n x_i \quad Rest = y_i \geq 1 \quad i = 1, 2 \dots n \quad (11)$$

Onde:

x_i – i-ésimo elemento do vetor de localização de MQEE;

y_i – i-ésimo elemento do vetor observabilidade;

n – número de nós.

A restrição do problema de otimização da equação (11) implica que a solução deve compreender apenas arranjos que atendam ao critério de que cada nó deve estar sendo observado por pelo menos um monitor.

Para resolução desse problema é possível a aplicação de diversas técnicas de otimização, inclusive baseadas em programação linear inteira. O método utilizado nesta proposta para determinar o número mínimo de monitores é o de busca em todo espaço de solução, entre as combinações de arranjos de MQEE, ordenados a partir dos arranjos com menor número de pontos monitorados. Desta forma, através da busca ordenada em ordem crescente de número de MQEE, quando a primeira solução que atende a restrição de observabilidade é encontrada o número mínimo de monitores é determinado.

A opção pela busca exaustiva é adotada sem prejuízo para a solução ou eficiência da metodologia, observando que o problema de alocação ótima de monitores é solucionado apenas uma vez para um conjunto de parâmetros de uma rede. Ainda é considerado que a solução do problema pode ser resumida a uma sucessão de simples somas de vetores binários, que possuem complexidade e custos computacionais extremamente baixos e tempos de solução desprezíveis. Portanto a adoção de um método complexo de otimização, que levam aos mesmos resultados, não se justifica, pois não contribui com nenhuma melhoria efetiva no alcance dos objetivos deste trabalho.

4.3.2 Limiar de Tensão Adotado

O limiar de tensão adotado possui grande influência na solução do problema de localização de monitores. A utilização de limiares maiores resulta na necessidade de um número maior de medidores para observar todos os eventos com tensões residuais abaixo deste valor. Já o caso contrário, de utilizado de um valor menor de limiar de referência pode resultar em incapacidade do conjunto de qualímetros de registrar eventos relevantes para o estudo.

Neste trabalho o limiar de tensão foi definido com base no cálculo do Fator de Impacto, descrito nas seções iniciais. Desta forma, os eventos de afundamentos de tensão com relevância para este estudo são os que possuem influência sobre o cálculo do indicador. Com isso afundamentos de tensão localizados na região, de estratificação, A não possuem relevância, já que seu fator de ponderação para o cálculo do Fator de Impacto é zero.

Outra região de estratificação que não será totalmente considerada nesse estudo é a região G, que compreende eventos com tensão remanescentes ente 0,70 e 0,85 pu e durações entre 0,6 segundos e 3 minutos. Isto porque a duração de afundamentos de tensão, em sistema de distribuição, gerados por curtos-circuitos em ramos adjacentes ao

local do afundamento está associada à atuação do sistema de proteção que, em regra geral, possui tempos de atuação inferiores a 0,6 segundos.

Mesmo considerando a partida de grandes motores, que é outra grande causa de afundamentos de tensão, que pode gerar distúrbios com durações maiores, além de possuir diversas medidas mitigadoras, em sua curva típica o pico de sobrecorrente é alcançado por volta de 0,1 segundos, enquanto no tempo de 0,6 segundos o seu valor de sobrecorrente é cerca de 80% do valor máximo. Com isso um evento gerado por uma partida de motor, que registre um valor de tensão remanescente de 0,85 pu em 0,6 segundos, que seria o menos severo para estar presente na região G, apresenta um valor de tensão remanescente por volta de 0,68 pu em 0,1 segundos, o que enquadraria este evento em uma região com severidade maior. Portanto, conclui-se que eventos pertencentes a região G são pouco prováveis. Ainda pode-se observar que esta região de estratificação possui um baixo fator de ponderação para o cálculo do Fator de Impacto.

Baseado nas considerações anteriores, o limiar de tensão utilizado, nesta proposta, é o de 0,80 pu pois é o maior valor de tensão residual devido a um afundamento que possui relevância no valor do Fator de Impacto calculado, tanto em relação ao fator de ponderação quanto em probabilidade de ocorrência.

É necessário ressaltar, uma possibilidade remota, que afundamentos de tensão causados por partidas de grandes motores podem possuir tensões remanescentes acima de 0,80 pu após 0,6 segundos e inferiores a 0,70 pu antes disso, pertencendo, devido a agregação de fases e agregação temporal, a região de estratificação F. No entanto a metodologia utilizada não irá considerar o transiente e sim a magnitude e duração do evento estabelecidas pelos critérios de agregação, portanto o modelo matemático não inclui esta possibilidade. Na prática em um cenário real, o sistema de monitoramento, dependendo de sua localização, poderia registrar um evento com estas características, específicas, dentro de outra região de estratificação, com fator de ponderação menor. Ainda assim, considerando o objetivo de minimizar o número de monitores em um arranjo de monitores a alteração do limiar de 0,80 para 0,85, que garante o enquadramento correto de um eventual afundamento com esta especificidade, aumentaria o número de medidores necessários e seu efeito prático no Fator de Impacto seria de baixa significância.

4.4 Construção e Armazenamento das MTRDF

Como já descrito nas seções iniciais através das simulações de falta é construída, para um cenário de tipo e impedância de falta e carregamento do sistema, a Matriz de Tensões Remanescentes Durante Falhas (MTRDF), conforme apresentada por OLGUIN; BOLLEN (2003). Cada coluna desta matriz representa o local da falta e mostra sua propagação ao longo do sistema, já as linhas da matriz estão associadas a tensão remanescente no nó, correspondente a linha da matriz, devido a curtos-circuitos em diferentes pontos

do sistema.

Para gerar um banco de dados que possibilite a estimação dos afundamentos de tensão são simuladas faltas em diferentes cenários. Cada cenário é formado por um nível de carregamento, um valor de impedância e um tipo de falta, sendo que é gerada uma MTDRF para cada fase da rede. Todas as matrizes de tensões remanescentes durante faltas obtidas a partir de todos os níveis de carregamentos e impedâncias de falta são armazenadas, formando assim o banco de dados que será utilizado na estimação de afundamentos.

As impedâncias de falta utilizadas na formação do banco estão compreendidas em um intervalo que varia de 0.001Ω até o maior valor de impedância de falta resulte em afundamentos com tensão menor ao limiar adotado em todos os nós a serem observados.

Os níveis de carregamento adotados neste estudo são multiplicadores dos valores nominais das cargas conectadas a rede e estão em um intervalo que busca compreender as variações diárias típica de carregamento do sistema estudado.

4.5 Estimação de Afundamentos de Tensão

O objetivo da metodologia proposta, além de encontrar um arranjo de monitores que registre todos os afundamentos de tensão, é de calcular o Fator de Impacto dos pontos de interesse do sistema, o que exige o conhecimento das tensões remanescentes durante os afundamentos em todos estes pontos. Portanto o problema gerado pela utilização de um número limitado de monitores é a necessidade de estimação dos afundamentos de tensão nos pontos não monitorados do sistema.

A partir do registro de um afundamento de tensão por um dos monitores localizados na rede as informações de magnitude de tensão de todos os MQEE, durante o evento, são utilizadas para estimar as magnitudes de tensão nos nós não monitorados. O algoritmo implementado realiza uma busca no banco de dados formado por situações de falta para encontrar a situação que melhor se aproxime dos estados de tensão dos nós monitorados.

O método adotado para encontrar está melhor aproximação foi o de mínimos quadrados dos resíduos. São calculados para cada situação de falta o erro, ou diferença residual, entre as magnitudes de tensões medidas pelos monitores e as magnitudes de tensões, nestes nós monitorados, para a situação de falta, após isto os quadrados dos valores dessas diferenças são somados. Ao final deste processo são calculados todos os valores de soma de quadrados de resíduos para todas as situações de falta é identificada qual destas situações apresenta o menor valor calculado.

Após determinada a situação de falta presente no banco que mais se aproxima dos dados registrados pelos MQEE os valores de magnitudes de tensões desta situação são atribuídos aos valores de magnitudes de tensão dos nós não monitorados do sistema.

4.6 Cálculo do Fator de Impacto

Um das principais contribuições deste trabalho é o cálculo do Fator de Impacto, onde embora existam estudos com o objetivo, similar, de calcular o índice $SARFI_{x\%}$ para de um sistema, que é o indicador de qualidade de energia internacional mais utilizado para quantificação dos afundamentos de tensão, o indicador determinado pela ANEEL tem uma forma distinta de cálculo.

A forma de cálculo do Fator de Impacto é a apresentada no item 2.4 desta dissertação e é calculado o fator de impacto para cada nó do sistema, desta forma cada nó terá seu Fator de Impacto determinado utilizando os valores de magnitudes de tensões remanescentes registrados pelo arranjo de monitores e os valores estimados para os nós não monitorados.

5 APLICAÇÕES E RESULTADOS

Para validação da proposta apresentada na seção anterior a metodologia será aplicada aos sistemas testes de distribuição IEEE 34 nós e IEEE 123 nós. Como parâmetro principal para analisar a robustez da metodologia são cálculos os fatores de impacto para os nós dos sistemas estudados a partir dos valores de magnitudes de afundamentos de tensão estimados e comparados com os valores calculados a partir dos dados de magnitude de afundamentos obtidos diretamente nas simulações.

A sensibilidade da metodologia é testada através de uma série de simulações aleatórias de faltas, variando os parâmetros de tipo de falta, impedância de falta, carregamento do sistema e local de falta.

Para avaliar a aplicação do método de localização de MQEE e de cálculo do Fator de Impacto, para casos de afundamentos de tensão gerados por faltas externas ao alimentador, no final deste capítulo são apresentadas adaptações necessárias à metodologia e resultados de sua aplicação.

5.1 Definições Iniciais de Modelagem

Inicialmente é necessário identificar as características do sistema analisado para definição dos parâmetros utilizados nas simulações. Como exposto na seção anterior o escopo da metodologia é aplicação a rede primária de um alimentador de primário de distribuição a partir do terminal de uma subestação. Dois parâmetros, correlacionados, são definidos através de análise prévia da resposta do sistema a simulações de afundamentos de tensão, o primeiro é o intervalo de impedância de falta e o segundo é a região do sistema que será analisada pela metodologia.

A análise prévia é realizada através da geração da matriz de cobertura do sistema para casos brandos de falta, onde a impedância de falta é variada até o valor máximo que cause afundamentos de tensão, com magnitudes abaixo do limiar de 0,80 pu, em quase todos os nós do sistema, permitindo apenas a exceção de nós próximas a subestação. Através desta análise é arbitrado a partir de qual ponto o arranjo de monitores irá observar e quais pontos deverão ser observado pelo monitor da subestação. O objetivo desta etapa é de encontrar o maior limite para o intervalo de impedância.

5.2 Casos de Estudo

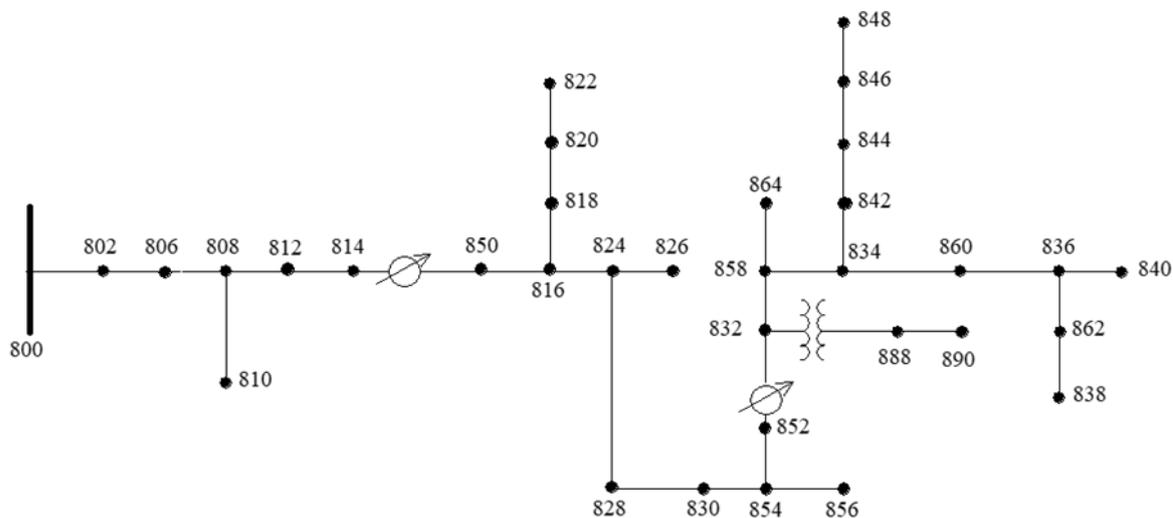
Para analisar as hipóteses a metodologia proposta é aplicada aos sistemas testes de distribuição do IEEE 34 e 123 nós. Cada caso de estudo possui sua relevância e seus resultados são complementares. O alimentador com 34 nós possui características semelhantes à sistema comumente encontrados, já o alimentador de 123 nós possui uma complexidade maior e permite explorar melhor principalmente o problema de alocação de MQEE e de efeitos das variações de carregamento nas matrizes de cobertura.

5.2.1 Sistema IEEE 34 nós

Este sistema tem como base um alimentador real, com tensão nominal de 24,9kV e caracterizado por ser um alimentador longo, levemente carregado, cargas desbalanceadas, dois reguladores de tensão, capacitores shunt e um transformador na linha ligada a dois nós com tensão nominal de 4,16kV.

As principais razões para escolha deste sistema para estudo de caso são suas características de nível de tensão primária e o comprimento das linhas que são compatíveis com alimentadores de distribuição típicos encontrados no Brasil.

Figura 3 – Sistema teste IEEE 34 nós.



Fonte: (IEEE, 2010).

Em análise prévia verificou-se que os dois nós a jusantes da subestação possuem uma alta potência de curto-circuito, e sua consideração reduziria significativamente o valor de impedâncias de falta que geram afundamento de tensão nesses nós. Observa-se que o trecho que envolve estes dois nós representa cerca de 3km de linhas do total de 93km do alimentador. Desta forma, para permitir a aplicação do método considerando impedâncias que compreendam a grande parte dos valores encontrados em casos práticos a localização dos monitores será realizada a partir do terceiro nó a jusante da subestação, sem gerar

grandes prejuízos aos resultados, visto que eventuais falhas nesse pequeno trecho descon- siderado podem ser observadas da subestação. Considerando isto o estudo é realizado a partir do nó 808 e a impedância de falta máxima adotada, nas simulações de falta, é de 30Ω .

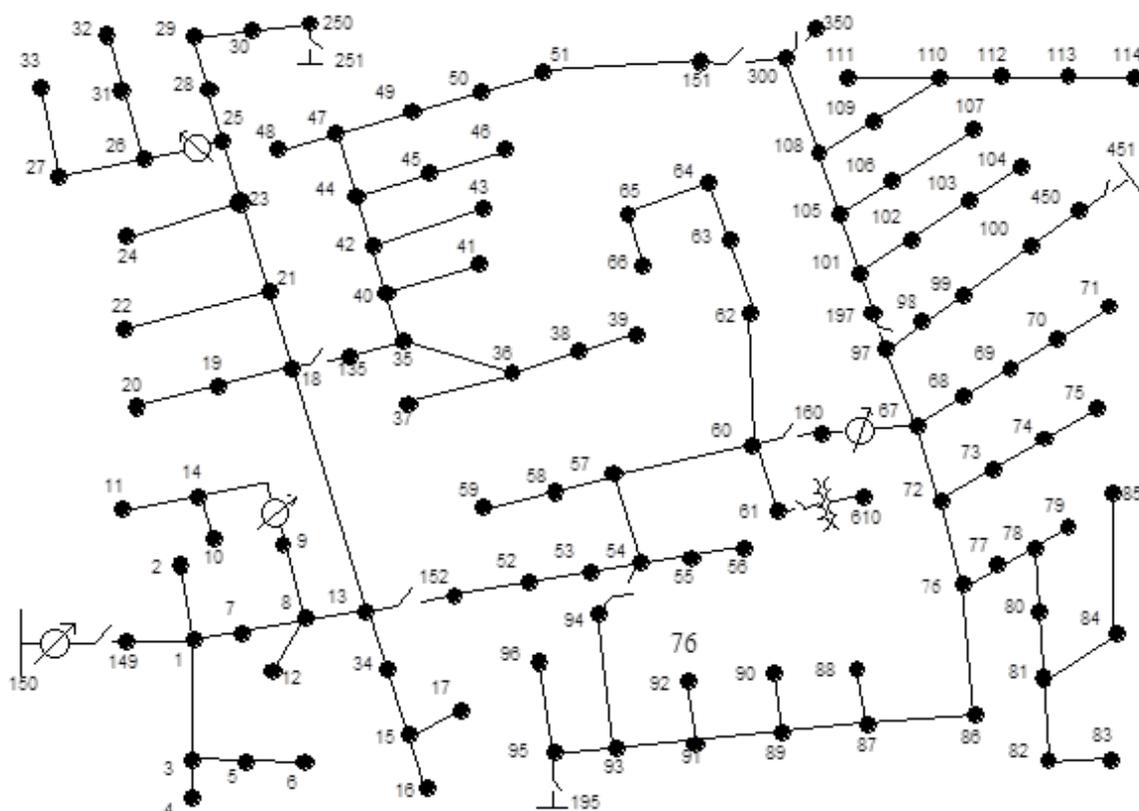
5.2.2 Sistema IEEE 123 nós

Este sistema teste opera em uma tensão nominal de 4,16kV, embora não seja um nível usual de tensão ele possui problemas de queda de tensão que são resolvidos com a apli- cação de reguladores de tensão e bancos de capacitores. Sendo caracterizado por possuir cargas desequilibradas e concentradas, quatro reguladores de tensão, capacitores shunt e múltiplas chaves.

As linhas deste alimentador são curtas, principalmente se comparadas com o sistema de 34 nós, possuindo um comprimento total de apenas 12 km. A razão principal para sua análise como caso de estudo é o elevado número de nós, se comparado com o primeiro caso, o torna a solução do problema de localização de monitores mais complexa.

As derivações do trecho entre os nós 149 e 13 são linhas monofásicas sem cargas significativas, com uma elevada potência de curto-circuito a montante do nó 13. Conside- rando isto o estudo é realizado a partir do nó 13 e a impedância de falta máxima adotada é de 1Ω .

Figura 4 – Sistema teste IEEE 123 nós.



Fonte: (IEEE, 2014).

5.2.3 Simulações de Falhas

Para cada conjunto de monitores alocados é realizada uma série de simulações de falta aleatórias onde são comparados os valores de magnitude de tensão estimados, através da metodologia, com os valores da simulação obtidas diretamente no OpenDSS, que por conveniência serão chamados, a partir deste ponto, de valores reais de magnitude de tensão.

É aplicado o Método de Monte Carlo para geração das situações de faltas simuladas a partir das distribuições de probabilidade das variáveis local de falta, impedância de falta, tipo de falta e carregamento do sistema.

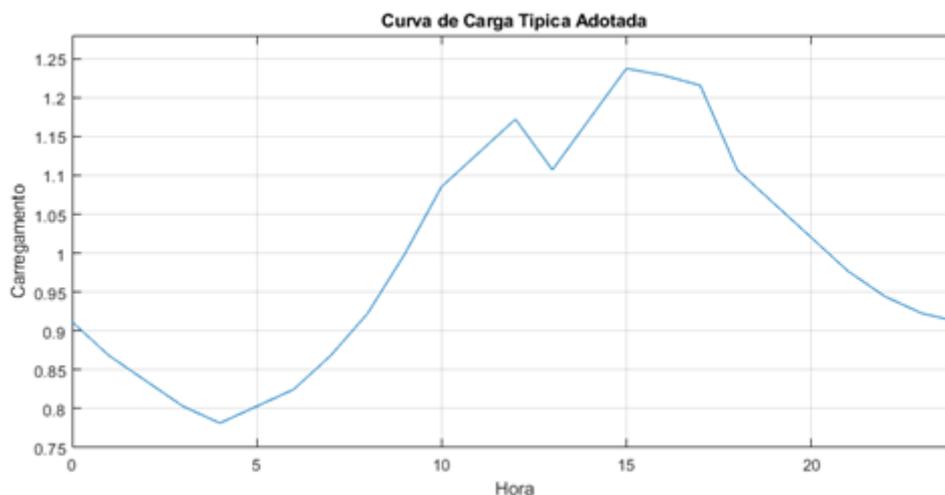
A distribuição de probabilidade do local da falta foi arbitrada considerando que a probabilidade da ocorrência de faltas é diretamente relacionada ao comprimento das linhas a distribuição. Por se tratar da rede primária de um alimentador, onde existem nós terminais, sem linhas à jusantes, 30% da probabilidade de falta foi distribuída uniformemente entre os nós, desta forma há uma probabilidade mínima para cada nó ser o local da falta simulada. Os 70% restantes da probabilidade do local da falta são distribuídos proporcionalmente ao comprimento de linhas ligadas, diretamente, à jusante de cada nó. Esta última definição foi feita considerando que o modelo utilizado apenas considera como locais de falta os nós do sistema, e não pontos intermediários, por outro lado uma falta no meio de uma linha pode ser enxergada, neste caso de sistema radial com fluxo de potência unidirecional, como uma falta no nó à montante desta linha com uma impedância igual a impedância da falta mais a impedância da linha entre o nó e o ponto de falta. Portanto a distribuição de probabilidade do local de falta utilizado parte de uma probabilidade mínima para cada nó e aumenta em razão do comprimento das linhas ligadas jusantes a cada um deles.

Neste modelo são consideradas as magnitudes em regime permanente dos afundamentos tensões, e não as magnitudes transitórias, em baixa frequência e em média tensão, desta forma as impedâncias de falta adotadas são resistências de falta, sem grandes prejuízos aos resultados. A distribuição de probabilidade adotadas para impedância de falta são distribuições uniformes, com variação contínua entre os intervalos considerados. Para o sistema de 34 nós o intervalo considerado é o de $0,001\Omega$ à 30Ω e para o sistema de 123 nós de $0,001\Omega$ e 1Ω . Os valores mínimos não são iguais a zero por limitações matemáticas, e até mesmo físicas, e os valores máximos foram definidos pelas avaliações prévias para determinação da maior resistência de falta capaz de gerar afundamentos com magnitudes de tensão inferiores ao limiar de 0,80 pu em toda região considerada dos sistemas.

Em relação ao carregamento, como os sistemas testes IEEE de 34 nós e de 123 nós não possuem uma curva própria, foi arbitrada uma curva de carregamento, para um dia típico, que será utilizada nas simulações dos estudos de caso. A curva criada, apresentada na Figura 5, é baseada em curvas típicas encontradas na literatura e por simplificação é utilizada apenas uma curva. Nestes casos de estudo, os valores de carregamento são multi-

plicadores dos valores nominais das cargas ligadas ao sistema, sendo que outra abordagem possível de ser adotada é a alteração individual de cada carga ligada a rede.

Figura 5 – Curva de carregamento do sistema ao longo do dia em relação a carga nominal do sistema.



Fonte: O autor, 2021.

A distribuição de probabilidade do nível de carregamento do sistema segue a curva de carregamento utilizada, variando, continuamente, de 0,78 a 1,24 vezes o carregamento nominal dos sistemas.

Em relação ao tipo de falta a distribuição de probabilidade adotada foi 75% para faltas monofásicas, 10% faltas bifásicas, 10% faltas bifásicas à terra, 4% faltas trifásicas e 1% faltas trifásicas à terra.

O número de faltas simuladas para cada conjunto de medidores alocado nos casos de estudo é de 10.000 faltas. É encontrado na literatura a recomendação da realização de um número de simulações superior ao número de faltas esperado em um horizonte de 20 anos. Considerando uma taxa de 1 falta por quilometro por ano, para o sistema de 34 nós, que é o maior estudado, que possui um total de 93 km de linhas o número mínimo de faltas simulados, para esta taxa de faltas, é de 1.860 faltas. Portanto o número de simulações adotados extrapola o número mínimo necessário, da maior rede em extensão estudada, para fornecer resultados significativos.

5.3 Resultados

Para verificar a validade da metodologia proposta são realizadas simulações considerando diferentes arranjos de monitores, que cumprem e não cumprem a restrição de observabilidade e com diferentes números de monitores por conjunto, não apenas o número mínimo de monitores necessários para registrar os eventos.

Os resultados a seguir estão divididos por caso de estudo e por etapas da metodologia

em: localização de monitores, estimação de afundamentos e cálculo de Fator de Impacto.

5.3.1 Sistema IEEE 34 nós

Com base nas características descritas e arbitradas anteriormente neste caso de estudo o banco de matrizes de tensão remanescentes durante faltas utilizado é construído a partir de 7 níveis de carregamento, variando entre 0,78 pu e 1,24 pu, de 153 níveis de resistência de falta, variando entre 0,001 Ω e 30 Ω e 11 tipos de faltas, diferenciando o envolvimento de cada fase, sendo composto então por cerca de 9,9 milhões de simulações de faltas.

5.3.1.1 Localização de Monitores

Conforme descrito o estudo de caso é aplicado ao sistema teste IEEE de 34 considerando os nós a partir do 808 com nível tensão primária, o que compreende 29 nós do sistema. A matriz de cobertura é gerada a partir do carregamento mais leve, de 0,78 vezes o nominal, faltas monofásicas, resistência de falta de 30 Ω e limiar de tensão de 0,80 pu, e é representada na Figura 6.

A partir da análise da matriz de cobertura pode-se verificar a existências de 20 soluções de localização de apenas um monitor capazes de registrar todos os eventos de afundamentos abaixo do limiar estabelecido. Dentre os nós trifásicos, apenas o 808 não permite a observação de todos os eventos.

Figura 6 – Matriz de Cobertura Sistema IEEE 34 nós.

Barra	808	810	812	814	850	816	818	824	820	822	826	828	830	854	832	858	834	860	842	836	840	862	844	846	848	856	852	864	838	
808	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
810	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
812	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
814	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
850	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
816	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
818	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
824	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
820	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
822	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
826	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
828	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
830	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
854	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
832	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
858	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
834	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
860	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
842	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
836	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
840	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
862	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
844	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
846	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
848	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
856	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
852	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
864	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
838	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1

Fonte: O autor, 2021.

Para verificar a validade do método de localização dos monitores são realizadas as simulações, conforme descrito em 5.2.3, de localização de um único MQEE em seis pontos diferentes, escolhidos após análise da matriz de cobertura para cobrir uma maior diversi-

dade de situações. Dos pontos escolhidos dois cumprem a restrição de observabilidade e outros quatro não cumprem, sendo que três destes pontos, são nós monofásicos.

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos, onde são apresentados, para cada medidor localizado, um valor denominado Y médio que é a soma do vetor Y, apresentando em (9), dividido pelo número de nós. O desempenho é avaliado através do valor percentual de eventos registrados, que verifica se os eventos de faltas simuladas na rede são registrados pelos arranjos de monitores.

Tabela 3 – Eventos registrados por arranjos de 1 monitor.

Arranjo	Observável	Y médio	Eventos Registrados (%)	Fases Conectadas
808	não	0,10	72,8%	A B C
812	sim	1,00	100,0%	A B C
854	sim	1,00	100,0%	A B C
818	não	0,14	44,0%	A
826	não	0,14	43,5%	B
838	não	0,14	43,6%	B

Fonte: O autor, 2021.

Os resultados obtidos confirmam a hipótese do método aplicado, mostrando que os arranjos de um monitor localizado que cumprem a restrição de observabilidade foram capazes de registrar todos os eventos simulados e, em contrapartida, que os arranjos que não cumprem a restrição não foram capazes de registrar todos os eventos.

A análise da matriz de cobertura permite identificar que o monitoramento de pontos a montante do nó 808 têm a capacidade de registrar os afundamentos de tensão, com tensão residual inferior a 0,80 pu, gerados por faltas com resistência de falta até 30Ω . Os resultados das simulações de monitoramento de nós monofásicos são compatíveis com a distribuição de probabilidade do tipo de faltas, onde a probabilidade de ocorrer uma falta monofásica em uma determinada fase é de 25%, para faltas bifásicas e bifásicas à terra envolvendo uma determinada fase a probabilidade é de 13,33% e para faltas trifásicas a probabilidade adotada é de 5%. A probabilidade de registro de eventos ligeiramente maior em um nó monofásico com a fase A conectada, também é esperada, pois o comprimento das linhas contendo a fase A é maior em relação as linhas contendo a fase B, que por sua vez possui comprimento superior de linhas em relação as que contêm a fase C.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados de simulações de arranjos dois e três monitores, sendo estas combinações dos locais presentes na Tabela 3. Destas combinações é apresentada apenas uma contendo um nó que é capaz de observar todo o sistema, pois é evidente que um arranjo de monitores que contenha um subconjunto de monitores capaz de observar todo do sistema também terá a mesma capacidade.

O esperado para um arranjo é que a área observável por ele seja igual a união das áreas observáveis por cada monitor, o que se verifica nos resultados obtidos. No arranjo de dois monitores contendo como um dos locais o nó 854, que é capaz de observar todos os eventos, foram registrados todos os eventos simulados, como previsto anteriormente.

Tabela 4 – Eventos registrados por arranjos de 2 e 3 monitores.

Arranjo	Observável	Y médio	Eventos Registrados (%)
2 monitores			
808 e 854	sim	1,10	100,0%
808 e 818	não	0,24	85,0%
808 e 826	não	0,24	84,1%
808 e 838	não	0,24	85,3%
818 e 826	não	0,28	77,9%
826 e 838	não	0,28	44,0%
3 monitores			
808, 818 e 826	não	0,38	93,5%
808, 826 e 838	não	0,38	84,5%
818, 826 e 838	não	0,41	76,6%

Fonte: O autor, 2021.

Nos três arranjos contendo como local o nó 808 e outro local sendo um nó monofásico, o percentual dos eventos registrados deve compreender a área observada pelo nó 808 e todos os eventos que afetam a fase na qual o nó onde está localizado o outro monitor está conectado. Desta forma a parcela de eventos registrados (ER) esperado, para o arranjo, é o resultado da soma da parcela de eventos observados pelo monitor no nó 808, conforme a Tabela 3, e o produto do complemento desta parcela e o percentual de eventos observados por um monitor em apenas uma das fases. Como ilustração em (12) é apresentado este cálculo, de valor esperado para eventos registrados, do arranjo de dois monitores nos nós 808 e 818 a partir dos resultados da Tabela 3.

$$ER_{808 e 818} = ER_{808} + (1 - ER_{808}) \times ER_{818} \quad (12)$$

$$ER_{808 e 818} = 0,728 + (1 - 0,728) \times 0,440 = 0,848 \quad (13)$$

Comparando o resultado de (13) com o apresentado na Tabela 4, verifica-se o comportamento esperado para os arranjos contendo o nó 808 e um nó monofásico. O arranjo de monitores nos nós 818 e 826, ambos monofásicos, um conectado a fase A e outro a fase B, possui ER compatível com a distribuição de eventos que afetam as fases A e B em todo o sistema. E como esperado, também, o arranjo formado por dois monitores nos

nós 826 e 838, ambos monofásicos conectados a fase B, apresentou ER similar aos ER individuais, isto está atribuído aos dois possuírem a mesma área observável.

Os resultados dos arranjos de três monitores podem ser interpretados da mesma forma descrita acima para os arranjos de dois monitores. Os dois primeiros são formados pelo nó 808 e uma dupla de monitores com o resultado de sua combinação mostrada entre os arranjos de dois monitores, onde aplicado o cálculo apresentado em (12), para estes casos, os resultados da parcela de eventos registrados obtidas através do cálculo é similar aos resultados das simulações. Para o último arranjo de três monitores, localizados nos nós 818, 826 e 838, pode-se comparar os resultados do arranjo de dois monitores localizados nos nós 818 e 826 e verificar que o acréscimo de um monitor no nó 838 não afeta os resultados, o que, como já descrito, é esperado por os nós 826 e 838 possuem a mesma área de observação.

5.3.1.2 *Estimação de Afundamentos*

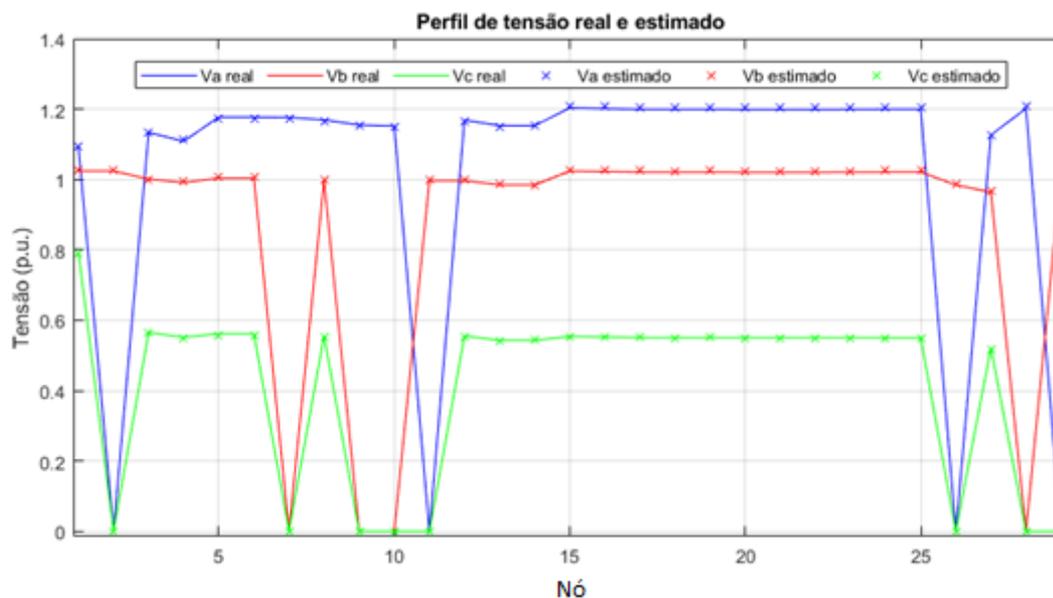
Inicialmente, para ilustrar o método de estimação de afundamentos, é apresentado na Figura 7 o perfil de tensão de uma simulação de falta monofásica na fase C no nó 812, com resistência de falta de $28,6 \Omega$ e carregamento do sistema igual a 0,87 vezes o carregamento nominal. A estimação foi realizada a partir do arranjo de dois monitores, nos nós 812 e 854, o algoritmo de estimação atribuiu, para os nós não monitorados, os valores de magnitude de tensão de uma falta monofásica na fase C no nó 812 com resistência de falta de $28,2 \Omega$ e carregamento igual a 0,85 vezes o carregamento nominal. Embora exista no banco de MTRDF a resistência de falta do evento simulado o valor encontrado na estimação foi um pouco diferente, devido ao carregamento ser discretizados em poucos níveis. Mesmo assim, neste exemplo, o maior erro de estimação de magnitude de tensão foi de apenas 0,0057 pu.

Os resultados do método de localização de monitores para este caso de estudo mostram que o número mínimo de monitores necessários para registrar todos os eventos de afundamentos de tensão, dentro dos parâmetros estabelecidos, é de apenas um monitor. Por serem soluções com apenas um monitor todas possuem o mesmo valor de observabilidade para cada nó, que é igual a um, não existindo uma resposta com maior observabilidade do sistema do que outra. A estimação de afundamentos parte do ponto em que há o registro de um afundamento de tensão em um dos nós monitorados e a partir disso são estimadas as magnitudes de tensão durante o evento para os nós não monitorados. Por isso na apresentação dos resultados, diferente dos resultados da localização de monitores, são considerados apenas arranjos de monitores capazes de observar todos os eventos de interesse.

Nos resultados a seguir cada nó que apresentar magnitude de tensão, em pelo menos uma das fases, abaixo do limiar determinado contabilizará um afundamento de tensão, ou seja, em uma simulação de falta o número de nós que apresentarem magnitude de

tensão, em pelo menos uma das fases, inferior a 0,80 pu será o número de afundamentos registrados durante o evento. Desta forma para uma única falta simulada no sistema podem ser registrados diversos nós com afundamentos.

Figura 7 – Perfil de tensão falta monofásica no nó 812.



Fonte: O autor, 2021.

Para analisar este experimento são considerados a existência de dois casos de erros, o primeiro caso é a ocorrência de um afundamento de tensão estimado, pelo algoritmo, em um nó onde na realidade não houve o distúrbio durante a falta simulada, que será denominado falso afundamento estimado (FAE). O segundo caso é o oposto, e ocorrendo quando um afundamento de tensão existente em um nó, durante a falta simulada, não é estimado pelo algoritmo implementado, e será denominado de afundamento não estimado (ANE). A robustez do método é avaliada através do erro total percentual, encontrado para cada arranjo, e será quantificado pela razão entre a soma dos casos de FAE e ANE pelo número total de afundamentos ocorridos durante as simulações de faltas. A Tabela 5 apresenta os resultados para seis arranjos de um monitor em diferentes locais do sistema.

Os resultados de estimação com apenas um monitor localizado no sistema mostram um valor considerável de erro, mesmo que a localização dos medidores garanta a observabilidade de todos os eventos dentro dos parâmetros estabelecidos. É observado que erro de estimação não teve variações significativas entre as posições de localização dos monitores. Para avaliar a sensibilidade da metodologia frente ao número de monitores é apresentado na Tabela 6 os resultados dos erros de estimação de arranjos de dois e três monitores.

É observado, através da Tabela 6, que os resultados de erro de estimação, na aplicação da metodologia proposta a partir da localização de dois monitores, ou mais, são significativamente baixos. Os resultados também mostram que o erro de estimação não é reduzido

com o aumento do índice de observabilidade individual de cada nó. Por outro lado, os arranjos que apresentaram melhores resultados são os que possuem monitores localizados no nó mais próximo a subestação, ao ponto que o erro de estimação aumenta conforme aumenta a distância entre a primeira nó monitorado e a subestação.

Tabela 5 – Erro de estimação de arranjos de um monitor.

Arranjo	Y médio	Afundamentos Simulados	FAE	ANE	Erro Total (%)
812	1,00	281.191	14.517	14.635	10,37%
816	1,00	280.993	14.566	14.994	10,52%
854	1,00	281.199	14.508	14.272	10,23%
840	1,00	281.230	14.331	14.466	10,24%
862	1,00	281.415	14.398	14.611	10,31%
834	1,00	280.582	14.768	14.266	10,35%

Fonte: O autor, 2021.

Tabela 6 – Erro de estimação de arranjos de dois e três monitores.

Arranjo	Y médio	Afundamentos Simulados	FAE	ANE	Erro Total (%)
2 monitores					
808 e 812	1,1	281.270	9	15	0,009%
808 e 854	1,1	281.210	13	17	0,011%
808 e 862	1,1	281.052	15	13	0,010%
812 e 854	2	280.915	33	32	0,023%
812 e 816	2	280.871	42	36	0,028%
812 e 862	2	280.975	41	35	0,027%
854 e 862	2	280.705	53	48	0,036%
3 monitores					
808, 854 e 862	2,1	280.976	8	13	0,007%
812, 854 e 862	3	281.268	34	29	0,022%
808, 812 e 854	2,1	280.954	13	12	0,009%

Fonte: O autor, 2021.

Embora a redução do erro na estimação com o aumento do número de monitores de um para dois, não é percebida uma redução significativa neste erro com o aumento de dois para três nós monitorados, o que leva a considerar que a metodologia proposta é viável a partir de um conjunto mínimo de informações para realizar a estimação de afundamentos de tensão. Neste sentido é constatado que as informações de magnitudes de tensão em apenas um nó não são suficientes para a aplicação da metodologia proposta, que passa a ser factível a partir da localização de dois monitores no sistema.

5.3.1.3 Cálculo do Fator de Impacto

Diferente de simplesmente registrar eventos de afundamentos de tensão e de estimar em quais nós não monitorados o distúrbio se propagou, para no Cálculo do Fator de Impacto é necessário saber precisamente a severidade dos afundamentos de tensão, em cada ponto no qual se deseja saber o valor do indicador. Como já mencionado, as simulações realizadas neste trabalho são direcionadas a estudar as magnitudes dos afundamentos de tensão, desta forma a duração dos eventos será um parâmetro arbitrado.

Levando em conta que as durações dos afundamentos de tensão estão diretamente relacionadas aos dispositivos de proteção, presentes no sistema, a duração dos eventos pode ser estimada através da modelagem destes dispositivos. É importante destacar que o tempo de atuação de um elemento de proteção é inversamente proporcional a potência de curto-circuito do defeito, sendo assim faltas com baixa impedância são eliminadas mais rapidamente. Neste caso de estudo foram analisadas as características e curvas de atuação de elos fusíveis com valores usuais, para sistemas que operam no mesmo nível de tensão, e verificou-se que faltas com impedância até 35Ω são geralmente eliminadas em tempos inferiores a 100 ms. Considerando isto, a estratificação dos eventos de afundamentos de tensão, observando a Tabela 1, é feita a partir dos valores de magnitude de tensão remanescente classificando-os nas Regiões B, C e E.

Como o indicador é quantificado de forma cumulativa aos eventos ocorridos durante um período de tempo é necessário, para simulação, estabelecer um número de eventos ocorridos para o cálculo do Fator de Impacto. É considerado nos resultados uma taxa de 100 faltas por ano, nos 90 quilômetros de linhas do alimentador, ou seja, uma taxa 1,11 taxas por quilometro ao ano. Os valores do indicador apresentados correspondem ao valor médio mensal obtido após a simulação de 10.000 faltas. Diferente dos resultados apresentados até este ponto, que tratam de forma global o sistema analisado, os resultados para o Fator de Impacto são apresentados por nó, individualmente. Este formato é devido ao objetivo principal da metodologia apresentada, de quantificar o indicador nos pontos não monitorados do alimentador.

Primeiro, para ilustrar o método, é apresentado, na Tabela 7, os resultados dos cálculos do Fator de Impacto calculados através dos dados de todos os nós nas simulações, chamado de valor real, e através das magnitudes de tensão estimadas a partir da localização de dois monitores, nos nós 812 e 854, chamado de valor estimado.

O arranjo com dois monitores foi escolhido como exemplo, frente aos resultados não satisfatórios da aplicação da metodologia com apenas um monitor. A escolha do arranjo com monitores nas nós 812 e 854 tem apoio na linha de maximização da observabilidade individual das nós do sistema. Cabe salientar que além do erro associado a estimar se houve ou não um afundamento de tensão, em um nó não monitorado, no cálculo do Fator de Impacto ainda há o erro associado a estratificação dos afundamentos em cada uma das regiões.

Os resultados da Tabela 7 apresentam valores satisfatórios na quantificação do Fator de Impacto através da estimação a partir dos dados de dois monitores, sendo a maior diferença entre os resultados estimado e real de 0,0015, sendo pouco significativa considerando que o valor de referência para o indicador, estabelecido pela ANEEL, é de 1. A seguir, na Figura 8, são apresentados os resultados dos erros de estimação dos cálculos do Fator de Impacto para diferentes localizações de arranjos de dois monitores.

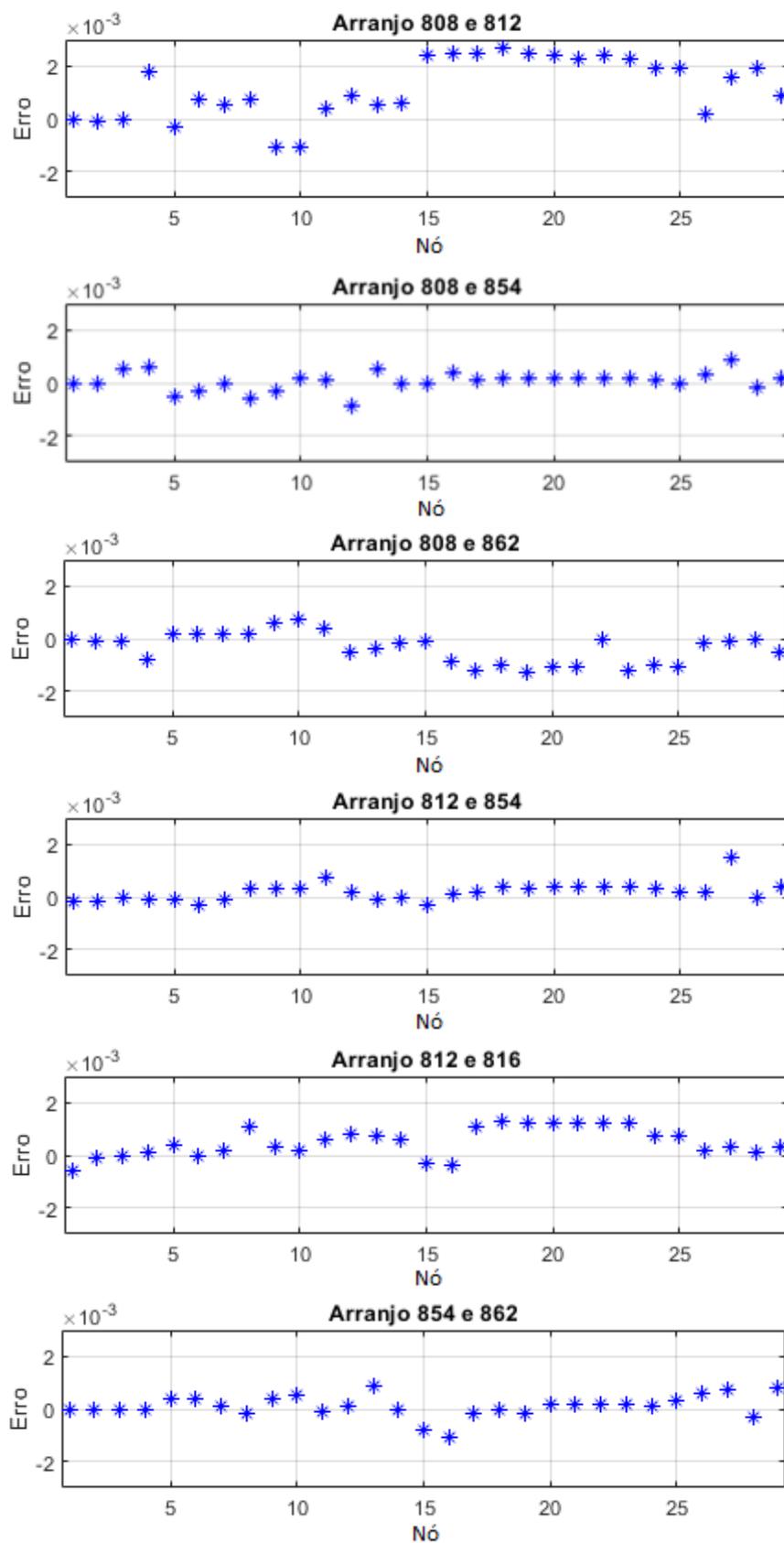
Analisando os gráficos da Figura 8 verifica-se com exceção do arranjo de dois monitores nos nós 808 e 812, o erro individual no cálculo do Fator de Impacto não ultrapassou 0,002 em nenhum resultado nos demais arranjos. O arranjo de monitores nos nós 808 e 854, um localizado no início e outro no centro do sistema tem o resultado com menor erro absoluto médio, com valor de 0,00027. Os arranjos com monitores em nós muito próximos ou terminais produziram resultados um pouco piores, mas ainda com erros muito baixos. Finalizando este estudo de caso é apresentado na Figura 9 os resultados do erro de estimação para três arranjos de três monitores.

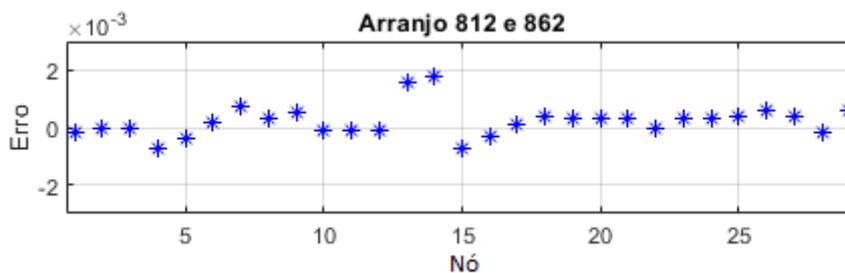
Tabela 7 – Resultado do Fator de Impacto Estimado pelo Arranjo 812 e 854.

Barra	FI Real	FI Est.	Diferença
808	0,1769	0,1767	-0,0002
810	0,0821	0,0819	-0,0002
812	0,3738	0,3738	0,0000
814	0,5506	0,5505	-0,0001
850	0,5235	0,5234	-0,0001
816	0,5253	0,5250	-0,0003
818	0,2342	0,2341	-0,0001
824	0,5573	0,5576	0,0003
820	0,2556	0,2559	0,0003
822	0,2563	0,2566	0,0003
826	0,2298	0,2305	0,0007
828	0,5588	0,5590	0,0002
830	0,6102	0,6101	-0,0001
854	0,6118	0,6118	0,0000
832	0,6250	0,6247	-0,0003
858	0,6264	0,6265	0,0001
834	0,6287	0,6289	0,0002
860	0,6289	0,6293	0,0004
842	0,6287	0,6290	0,0003
836	0,6290	0,6294	0,0004
840	0,6290	0,6294	0,0004
862	0,6290	0,6294	0,0004
844	0,6289	0,6293	0,0004
846	0,6293	0,6296	0,0003
848	0,6294	0,6296	0,0002
856	0,2487	0,2489	0,0002
852	0,6646	0,6661	0,0015
864	0,2757	0,2757	0,0000
838	0,2556	0,2560	0,0004

Fonte: O autor, 2021.

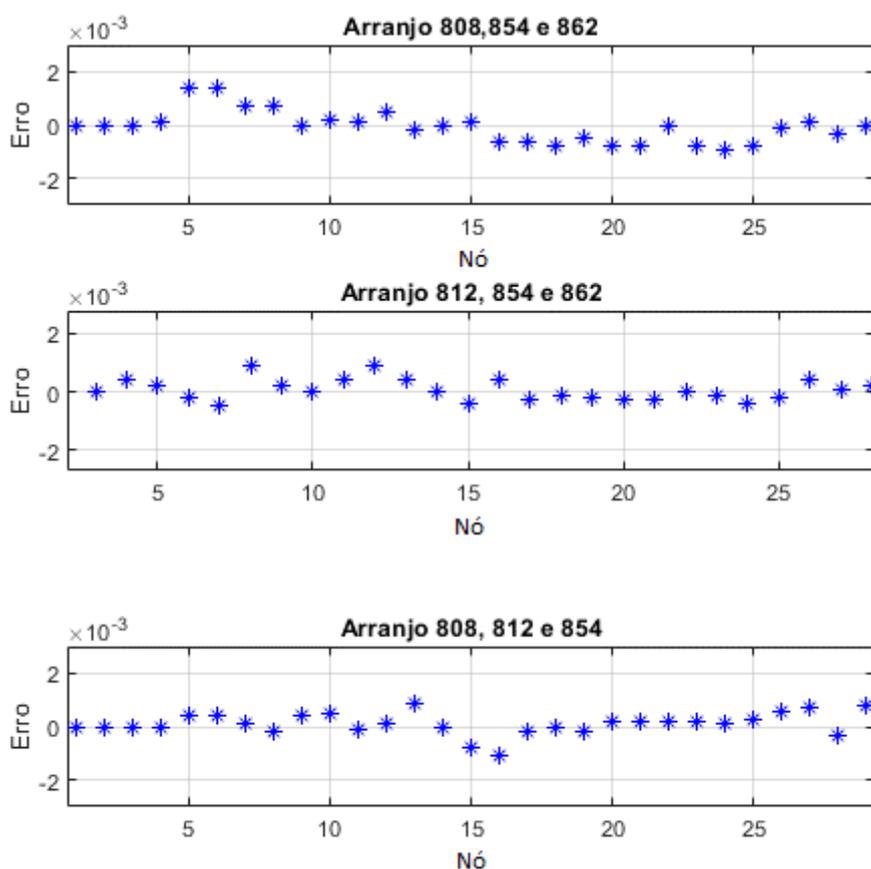
Figura 8 – Erro de Estimação do Cálculo de arranjos de 2 monitores.





Fonte: O autor, 2021.

Figura 9 – Erro de Estimação do Cálculo de Impacto para arranjos de 3 monitores.



Fonte: O autor, 2021.

Da mesma forma que nos resultados globais para estimação de afundamentos, o aumento de um monitor não resultou em uma melhora significativa nos resultados, sendo que o menor erro médio obtido nestes ensaios foi no arranjo formado pela monitoração dos nós 812, 854 e 862 com um erro médio absoluto de 0,00028, praticamente equivalente ao melhor resultado encontrado em arranjos com dois monitores.

5.3.2 Sistema IEEE 123 nós

A aplicação da metodologia proposta sobre o sistema IEEE de 123 nós serve para complementar os resultados do caso anterior, embora suas características sejam pouco

comuns, o seu número de nós maior permite estudar melhor o problema de localização de medidores.

Neste caso de estudo o banco de MTRDF (matrizes de tensão remanescentes durante faltas) construído a partir dos mesmos 7 níveis de carregamento do caso anterior, de 52 níveis de resistência de falta, variando entre $0,001 \Omega$ e 1Ω e 11 tipos de faltas, está composto então de 47,6 milhões de simulações de faltas.

5.3.2.1 *Localização de Monitores*

Conforme descrito o estudo de caso é aplicado ao sistema teste IEEE 123 nós considerando os nós a partir do nó 13 com nível tensão primária, o que compreende 109 nós do sistema. A matriz de cobertura é gerada considerando, faltas monofásicas, resistência de falta de 1Ω e limiar de tensão de 0,80 pu.

A primeira análise complementar da metodologia, neste estudo de caso, é realizada sobre o carregamento do sistema adotado para a construção da matriz de cobertura. A premissa de utilizar o caso mais brando para localizar os monitores, não é trivial do ponto de vista do carregamento do sistema. A hipótese de que um carregamento mais leve resulta em tensões pré-falta maiores não é válida, se considerada a presença de reguladores automáticos de tensão. Em carregamentos mais pesados se percebe uma tensão maior em nós a jusantes e próximos aos reguladores, pois a tendência desses equipamentos é de trabalharem com taps mais altos para garantir que a magnitude de tensão terminais estejam dentro dos limites em regime. As Figuras 10 e 11 mostram a representação gráfica da matriz de cobertura considerando os níveis de carregamento de 0,78 e 1,00, vezes o carregamento nominal, respectivamente, onde cada quadrado equivale a um elemento da matriz, sendo que os destacados em cinza escuro correspondem aos com valor iguais a um e em branco os elementos com valor igual a zero.

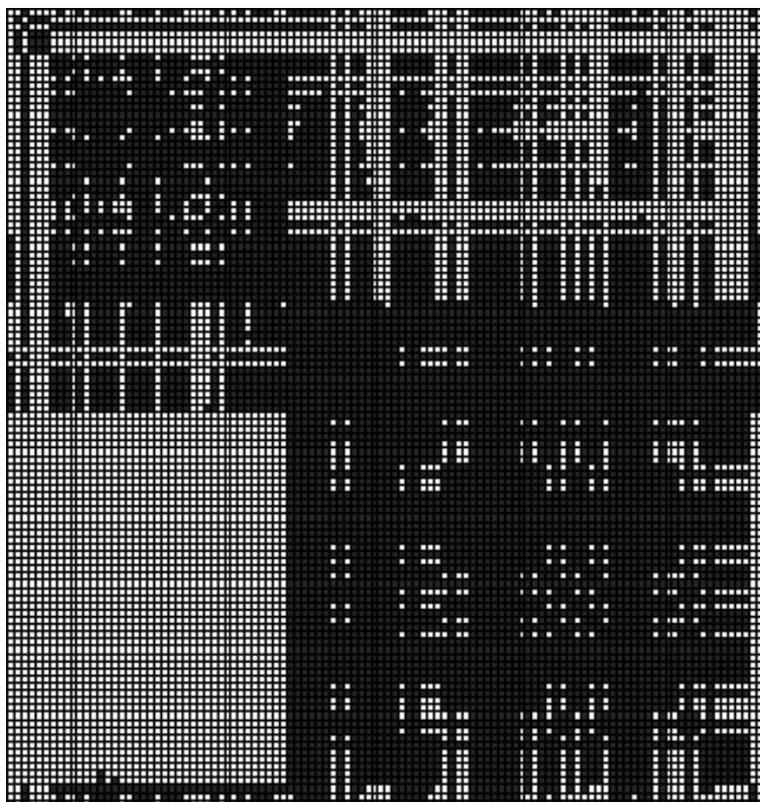
É possível observar diferenças entre as duas matrizes de cobertura, sendo que a matriz construída considerando o carregamento igual a 1 vez a carga nominal possui menos elementos com valor igual a 1 do que a matriz construída a partir de um carregamento de 0,78. A Figura 12 é o resultado das diferenças entre as matrizes de cobertura das Figuras 10 e 11, onde estão em azul os elementos com valor igual a um na matriz de 0,78 e zero na matriz de carregamento nominal. Em vermelho estão o inverso, os elementos com valor igual a um na matriz de cobertura com carregamento nominal e zero na matriz de carregamento mais leve.

Estas diferenças refletem diretamente no problema de localização ótima de monitores, onde um arranjo pode ter a capacidade de observar todo o sistema para um certo nível de carregamento e outro não. Especificamente no caso de estudo modelado, para carregamentos pesados o nó 34 não é observável de nenhum ponto do sistema, considerando a resistência de falta e limiar adotados, isso está associado ao fato do regulador de tensão localizado no início do alimentador operar com taps altos para este nível de carregamento.

Com isso não há solução do problema de localização de monitores, considerando os parâmetros adotados, que seja observável para carregamentos muito pesados.

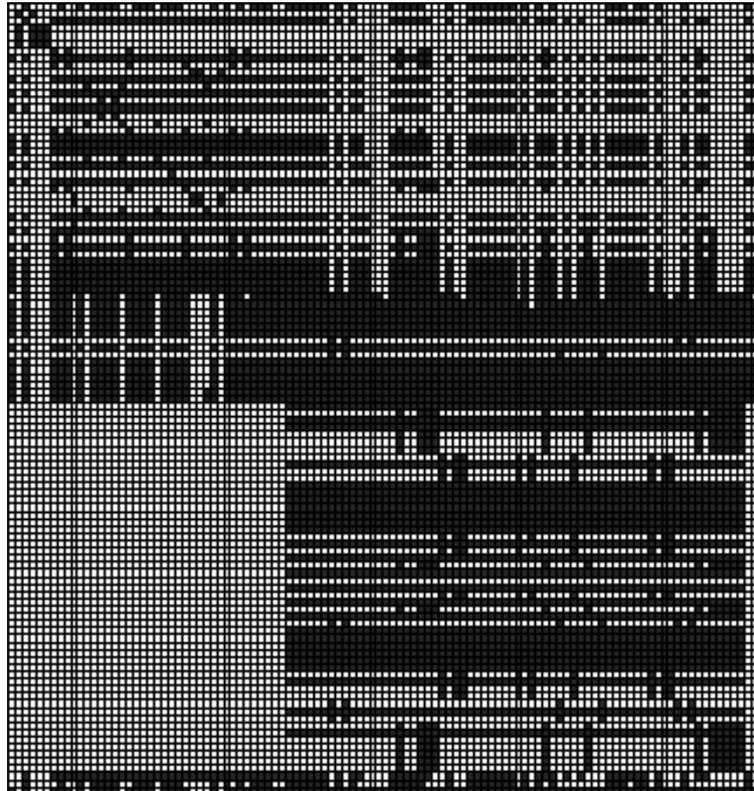
Para carregamentos leves e médios as soluções ótimas encontradas possuem número mínimo de três medidores. Resultados da capacidade de registro de eventos são apresentados na Tabela 8, onde cada arranjo simulado apresenta a localização dos monitores no sistema. Para cada arranjo é informada a sua capacidade de observabilidade de todo sistema e a média do índice individual de observabilidade para três níveis de carregamento diferentes.

Figura 10 – Matriz de Cobertura Sistema IEEE 123 nós com carregamento igual a 0,78.



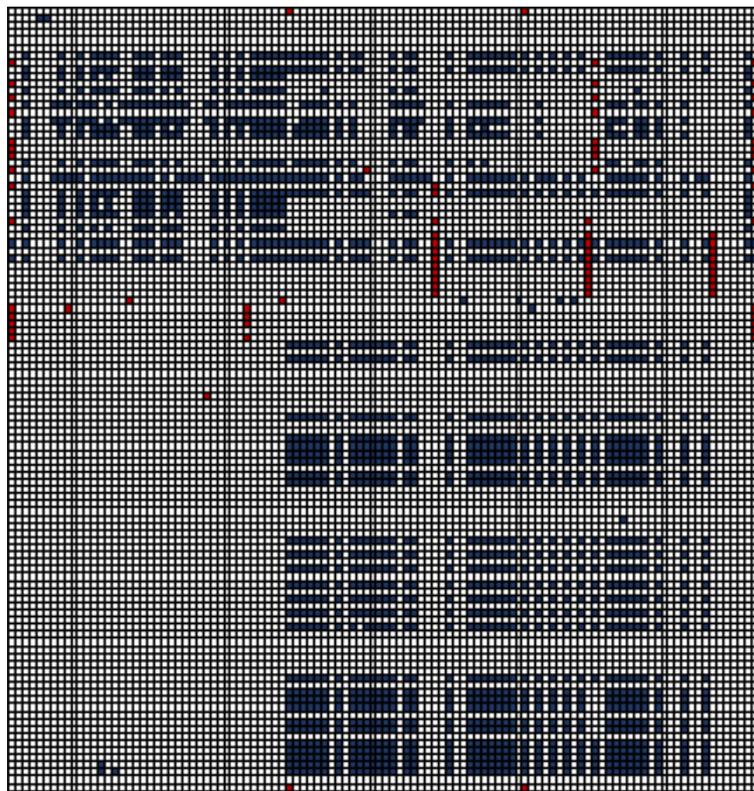
Fonte: O autor, 2021.

Figura 11 – Matriz de Cobertura Sistema IEEE 123 nós com carregamento igual a 1.



Fonte: O autor, 2021.

Figura 12 – Diferenças entre as Matriz de Cobertura com carregamentos diferentes.



Fonte: O autor, 2021.

Tabela 8 – Eventos registrados por arranjos no sistema IEEE 123 nós.

Arranjo	Carregamento						Eventos Regist. (%)
	0,78		1		1,24		
	Obs.	Y médio	Obs.	Y médio	Obs.	Y médio	
16, 50 e 65	sim	1,66	sim	1,70	não	1,69	99,99%
15, 23 e 60	sim	1,62	sim	1,65	não	1,64	99,97%
34, 23 e 60	sim	1,62	não	1,63	não	1,61	99,93%
15, 23 e 53	não	1,59	sim	1,64	não	1,60	99,67%
13, 23 e 53	não	2,01	não	2,08	não	2,02	99,62%
13, 35 e 97	não	1,77	não	1,83	não	1,85	99,76%
13, 29 e 107	não	1,58	não	1,26	não	1,60	97,38%

Fonte: O autor, 2021.

Os resultados obtidos mostram que embora não exista uma solução que registre todos os eventos para todos os carregamentos, as soluções que atendem a restrição para os carregamentos leve e médio chegam muito próxima de observar a totalidade dos eventos. A solução com capacidade de registrar todos os eventos de carregamento leve obteve melhor resposta que a solução com capacidade de registrar todos os eventos de carregamento médio, que por sua vez foi melhor que as soluções que não cumpre a restrição de observabilidade para qualquer nível de carregamento. Também é possível observar que entre as soluções com mesmas condições de observabilidade as com maior valor de observabilidade individual média apresentam os melhores resultados de percentual de eventos registrados.

5.3.2.2 Estimação de Afundamentos

Os resultados do método de localização de monitores para este caso de estudo mostram que o número mínimo de monitores necessários para registrar grande parte dos afundamentos de tensão, dentro dos parâmetros estabelecidos, é de três monitores.

O objetivo desta análise neste caso de estudo é de avaliar se a informação das magnitudes de tensão do número mínimo de monitores, encontrado como solução do problema de localização ótima de monitores, é capaz de estimar os afundamentos nos nós não monitorados. Este estudo visa complementar os resultados do caso anterior que mostram que a estimação de afundamentos, através da metodologia proposta, com o número mínimo de monitores instalados possui um erro elevado. Devido a isto esta análise visa desassociar o alto grau de erro, da metodologia, da utilização do número mínimo de monitores.

É necessário salientar que a discretização do intervalo de resistências de falta possui quase três vezes menos níveis do que a aplicada ao caso de estudo anterior. Ainda, se destaca, que o erro de estimação aumenta conforme menores as impedâncias das linhas

conectadas ao nó onde ocorreu a falta. Desta forma, considerando o número menor de níveis de resistência de falta, as impedâncias de linhas menores do sistema e a utilização de uma distribuição uniforme da probabilidade dos locais de falta se espera um erro maior nos resultados deste estudo de caso, comparado com o anterior.

São analisados os três melhores arranjos de três monitores encontrados na solução do problema de localização de monitores e, para analisar a sensibilidade do aumento do número de monitores nos resultados, são acrescentados um monitor a cada um destes arranjos, em regiões diferentes dos monitores que compõem estes arranjos. Da mesma forma que no caso anterior, a robustez do método é avaliada através do número de ocorrência dos erros de FAE e de ANE e do erro total percentual. A Tabela 9 apresenta os resultados para seis estudados.

Os resultados de estimação com três monitores, o mínimo para observar o sistema em quase a totalidade dos eventos, possuem erro muito inferior ao apresentado na utilização de apenas um monitor no sistema IEEE 34 nós. Em comparação com os resultados da localização de mais de um monitor no caso anterior, o erro é substancialmente maior, mas ainda em um patamar baixo, sendo ressaltado que a modelagem utilizada no sistema IEEE 34 nós possui mais níveis de resistências de falta e distribuição de probabilidade de local de falta mais precisa.

Tabela 9 – Erro de estimação de arranjos de monitores no sistema IEEE 123 nós.

Arranjo	Afundamentos Simulados	FAE	ANE	Erro Total (%)
16, 50 e 65	883.191	4.819	4.661	1,07%
15, 23 e 60	881.022	4.463	4.451	1,01%
34, 23 e 60	883.703	4.273	4.455	0,99%
16, 50, 65 e 108	883.015	4.220	4.387	0,97%
15, 23, 50 e 60	881.637	4.844	4.023	1,01%
34, 23, 50 e 60	884.598	3.803	4.571	0,95%

Fonte: O autor, 2021.

Verifica-se também uma ligeira melhora nos resultados de estimação com o acréscimo de um monitor em dois dos arranjos, de três monitores, e um resultado igual em outro. Assim como no caso de estudo anterior são verificados resultados melhores quando um dos monitores é localizado próximo a subestação. Para complementar esta análise de sensibilidade, em relação ao aumento do número de monitores, é apresentado na Tabela 10 o resultado de um arranjo de sete monitores, que corresponde a uma parcela 6,4% dos nós analisados no sistema.

O resultado para o arranjo de sete monitores apresentou melhora no resultado da estimação, mas ainda se manteve em um patamar próximo de erro em comparação com

arranjos com apenas três monitores localizados.

Tabela 10 – Erro de estimação de arranjo de 7 monitores no sistema IEEE 123 nós.

Arranjo	Afundamentos Simulados	FAE	ANE	Erro Total (%)
13, 16, 23, 50, 60, 76 e 108	881.403	3.287	3.162	0,73%

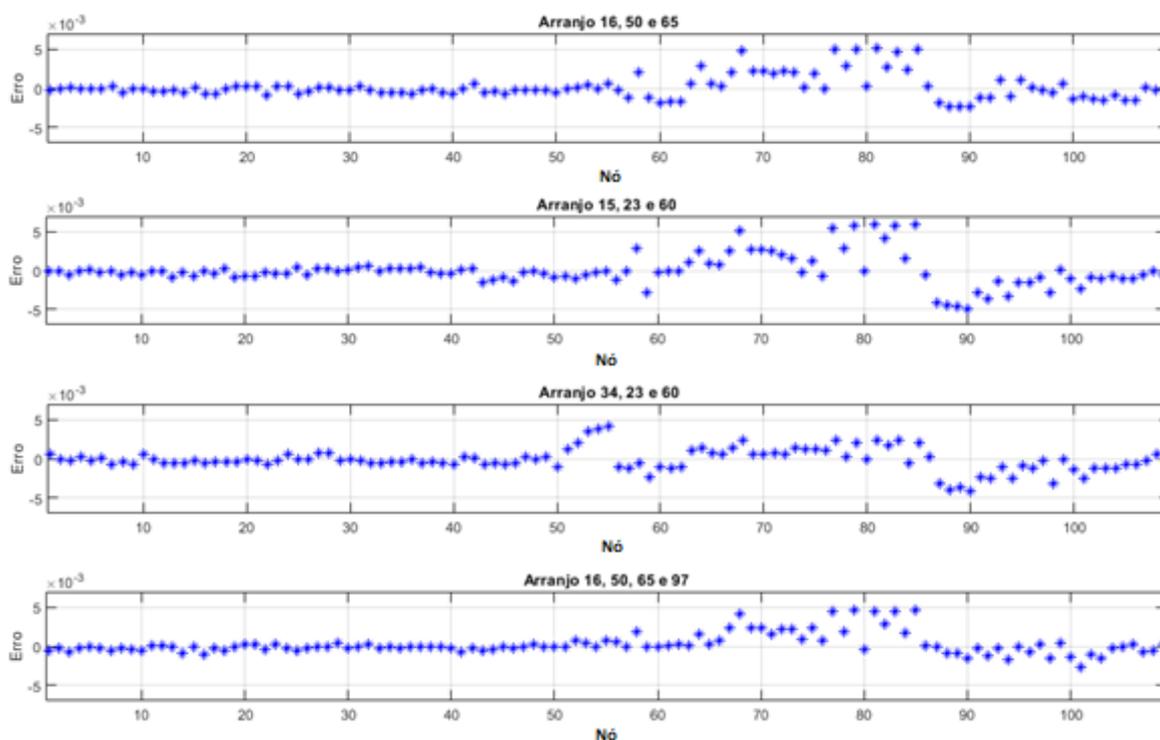
Fonte: O autor, 2021.

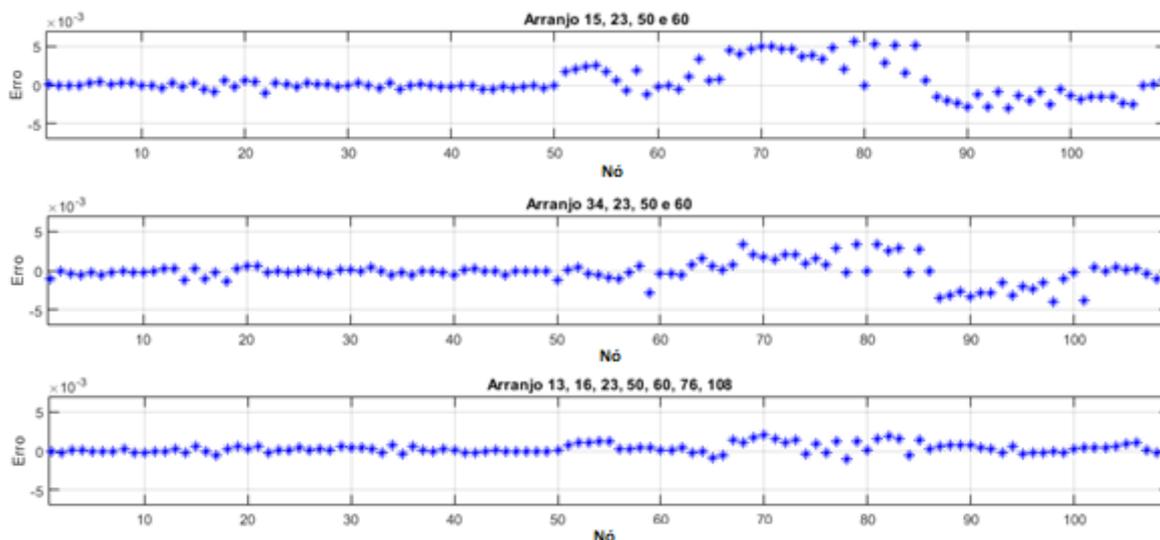
5.3.2.3 Cálculo do Fator de Impacto

Neste estudo são mantidas as premissas do caso anterior e mostrados os resultados do erro individual do valor, médio mensal, do Fator de Impacto, considerando uma taxa de 100 faltas por ano, o que para 11 quilômetros de linhas estudadas resulta em uma taxa de 9,09 faltas por quilometro ao ano. Esta taxa de falhas é uma extrapolação que aumenta o erro obtido, tornando os resultados mais rigorosos, visto que a nível de tensão nominal do alimentador é mais baixo do que sistemas usuais.

São apresentados, na Figura 13, os resultados do erro no Cálculo do Fator de Impacto por nó para cada arranjo apresentado na sessão anterior.

Figura 13 – Erro de Estimação do Cálculo de Impacto no Sistema IEEE 123 nós.





Fonte: O autor, 2021.

Percebesse que o comportamento dos erros no cálculo do Fator de Impacto por nó possui comportamento semelhante entre os arranjos de três e quatro monitores. O arranjo de sete monitores apresentou os menores erros no cálculo do indicador. A Tabela 11 apresenta os valores de erro absoluto médio e erro absoluto máximo para cada conjunto de monitores simulados.

Tabela 11 – Erro de cálculo do FI no sistema IEEE 123 nós.

Arranjo	Erro Absoluto	
	Médio	Máximo
16, 50 e 65	0,0010	0,0051
15, 23 e 60	0,0013	0,0060
34, 23 e 60	0,0010	0,0041
16, 50, 65 e 108	0,0008	0,0047
15, 23, 50 e 60	0,0014	0,0056
34, 23, 50 e 60	0,0010	0,0034
13, 16, 23, 50, 60, 76 e 108	0,0005	0,0021

Fonte: O autor, 2021.

Os resultados mostram que mesmo com as diferenças de modelagem, que aumentam o erro da metodologia, os valores de Fator de Impacto calculados para cada nó não monitorado possuem diferenças pouco significativas entre os valores obtidos a partir das magnitudes de tensão simuladas e a partir das magnitudes estimadas. Nestas simulações a maior diferença encontrada foi de 0,0060, destacando que o valor de referência do indicador é de 1, portanto o erro possui baixa significância no levantamento do indicador.

Ainda se verifica uma redução nos erros médios e máximos na aplicação do arranjo de sete monitores, no entanto ele não muda a ordem do erro comparado com os arranjos com menos monitores.

5.3.3 Afundamentos Externos ao Alimentador

Nesta subseção são apresentados resultados do cálculo do Fator de Impacto relacionado a afundamentos de tensão gerados externamente ao alimentador estudado. Esta análise é realizada para o caso de estudo do sistema IEEE 34 nós onde foram simuladas faltas, à montante do alimentador, que reduz a magnitude de tensão, em pelo menos uma das fases, do nó da subestação a uma faixa de 0,10 pu a 0,92 pu. O limite superior foi estabelecido por ser o valor máximo de tensão que causa um afundamento com magnitude de tensão 0,80 pu em pelo menos um nó do alimentador.

O problema de localizar quilômetros para estimar afundamentos de tensão gerados por faltas ao longo do alimentador é o foco principal desta pesquisa, e é mais complexo do que o problema de registrar os distúrbios causados por faltas externas. Curto-circuitos a montante do alimentador causam um decréscimo na magnitude de tensão na subestação que é propagado para todos os nós. A estimação para este tipo de afundamentos não demanda estudos de curto-circuito e pode ser feita em cima do perfil de tensão do alimentador. Desta forma os arranjos de monitores utilizados nesta análise são arranjos que apresentaram as melhores respostas ao longo do alimentador.

O objetivo, desta subseção, é observar se a metodologia proposta, além da capacidade de calcular o Fator de Impacto relacionado a faltas que ocorrem ao longo do alimentador, é capaz de calcular o Fator de Impacto relacionado a faltas externas ao alimentador e identificar alterações necessárias para incluir estes afundamentos. Para isso a metodologia foi adaptada, criando um novo banco de situações de falta, onde são considerados os mesmos níveis de carregamento e tipos de falta. A principal diferença está nos locais de falta considerados, que neste caso é apenas o nó da subestação e nas resistências de falta que foram determinadas para resultar em afundamentos com as magnitudes da faixa determinada, discretizada em 34 níveis diferentes.

As simulações apresentadas possuem os mesmos parâmetros do que as anteriores, sendo realizadas 10.000 simulações de faltas para cada arranjo de monitores, com as mesmas distribuições de probabilidade para tipo de falta e carregamento e distribuição uniforme de probabilidade para a resistência de falta. Para proporcionar uma comparação com os resultados anteriores, os valores calculados do Fator de Impacto continuando sendo referentes ao valor médio mensal do indicador para uma taxa de 100 faltas por ano.

Os resultados da Tabela 12 mostram o percentual de registro de afundamentos de tensão, que gerados por falhas externas, para cinco arranjos diferentes de monitores. Observa-se que os arranjos determinados pela metodologia de localização de monitores para garantir a observabilidade integral do sistema, frente a afundamentos de tensão

gerados por faltas no alimentador, não é capaz de monitorar a ocorrência de todos os afundamentos resultados de faltas externas.

Tabela 12 – Percentual de eventos de afundamentos de tensão, causados faltas externas, registrados.

Arranjo	Eventos Registrados (%)
808 e 812	64,6%
808 e 854	68,7%
808 e 862	58,2%
808, 812 e 854	69,3%
808, 854 e 862	68,2%

Fonte: O autor, 2021.

Este resultado é esperado, considerando que a técnica para localizar monitores se baseia em um estudo de curto-circuito para determinar a área vulnerável. A não ocorrência de uma falta no alimentador acaba por estar totalmente fora do escopo da localização de monitores.

É possível registrar e identificar este tipo de afundamento através do monitoramento da subestação, observando as magnitudes de tensão em seu nó. Ainda é possível registrar a ocorrência de uma falta ao longo do alimentador monitorando a corrente no nó da subestação e verificando o surgimento de uma corrente de curto-circuito. Considerando isso para englobar na metodologia proposta, de estimação de afundamentos de tensão e cálculo do Fator de Impacto, afundamentos causados por faltas externas é necessário incluir no conjunto de medidas os valores de magnitudes de tensão e de corrente no nó da subestação.

Em relação ao erro de estimação, utilizando a abordagem proposta, para afundamentos com causas externas tem um patamar superior em relação ao erro de estimação para afundamentos de tensão causados por faltas no alimentador, como é verificado na Tabela 13. Ainda assim, o maior percentual de erro total para os arranjos estudados foi de 1,24%.

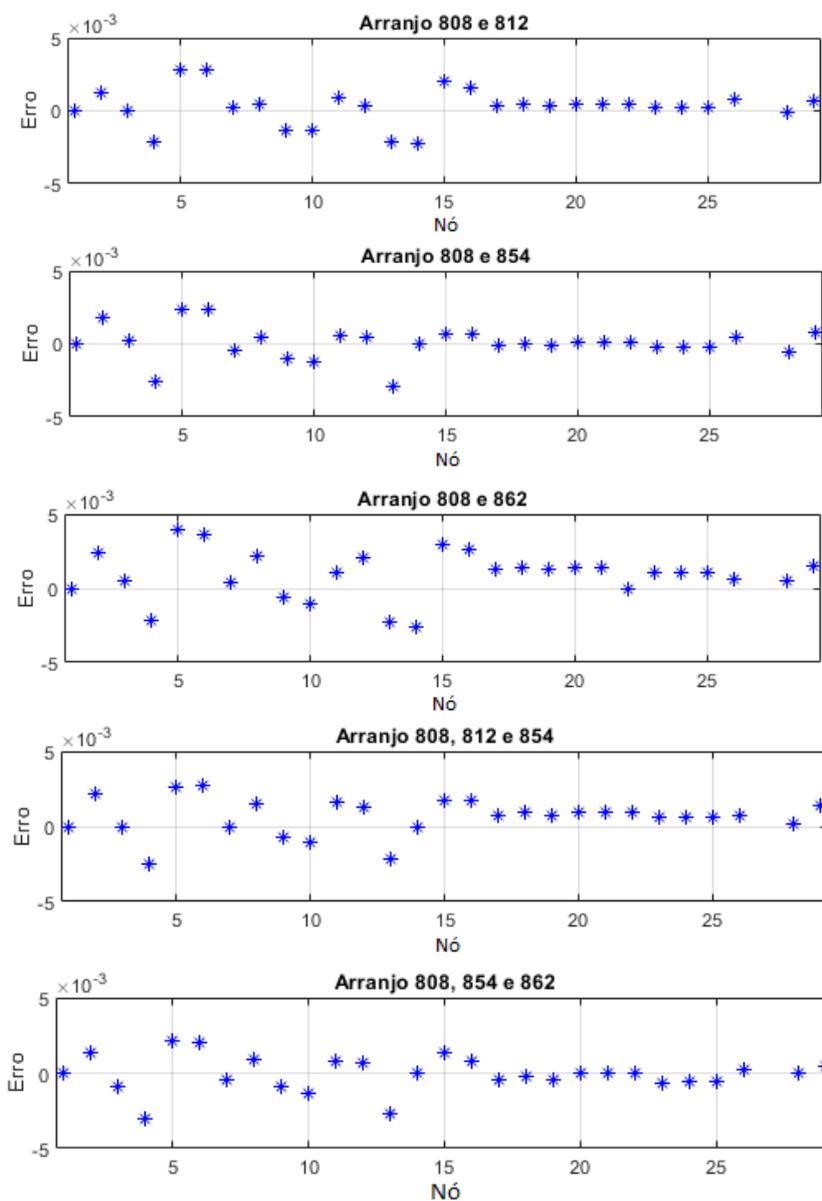
Por fim, os resultados de erros nos cálculos do Fator de Impacto, mostrados na Figura 14, apresentaram valores inferiores a 0,004, para todos os nós e arranjos de monitores, resultados não distantes do valor de 0,002, obtido no estudo de faltas no alimentador. Entre os arranjos de dois monitores, o arranjo composto por monitores nos nós 808 e 854 continuou apresentando o menor erro médio absoluto, com valor de 0,0011, este sim com patamar superior ao valor de 0,00027 encontrado anteriormente. Neste estudo de caso a inserção de um terceiro monitor nos arranjos, continuou não resultando em melhoras significativas nos resultados.

Tabela 13 – Erro de estimação frente a afundamentos causados por faltas externas.

Arranjo	FAE (%)	ANE (%)	Erro Total (%)
808 e 812	0,61%	0,60%	1,21%
808 e 854	0,54%	0,58%	1,12%
808 e 862	0,60%	0,64%	1,24%
808, 812 e 854	0,59%	0,65%	1,24%
808, 854 e 862	0,56%	0,66%	1,22%

Fonte: O autor, 2021.

Figura 14 – Erro de Estimação do Fator de Impacto relacionado a faltas externas ao alimentador.



Fonte: O autor, 2021.

6 CONCLUSÕES

Com base na vasta literatura sobre o tema, os afundamentos de tensão são distúrbios de incontestável relevância, com potencial de causar prejuízos igual, ou até mesmo superior a outros distúrbios, como interrupções sustentadas de energia. Embora o tema já tenha sido bastante explorado, nas últimas duas décadas, os avanços tanto em questão de tecnologias como questões regulatórias criam novos pontos a serem estudados.

Neste sentido a proposta apresentada nesta dissertação traz a luz uma ótica de atualização de métodos baseado no emprego de uma nova ferramenta de simulação de sistemas de distribuição. Propõe-se, mesmo que incipiente, uma metodologia para além de registrar afundamentos de tensão também determinar sua severidade em pontos não monitorados. Este segundo ponto, de determinar a severidade em diversos pontos de uma rede elétrica, tem o objetivo de permitir o cálculo do indicador determinado pela ANEEL, que ainda foi pouco abordado em trabalhos de pesquisa.

A utilização do OpenDSS para determinar as magnitudes de tensão durante falta permitiu um estudo muito mais amplo que anteriores. A técnica para localização de monitores, inicialmente aplicada através de cálculos de curto-circuito e posteriormente substituída por simulações, apresenta em diversas publicações simplificações e limitações, tais como: a consideração de apenas um tipo de falta, valor único de impedância de falta, apenas curtos-circuitos sólidos, valores fixos de magnitude de tensões pré-falta, normalmente igual a 1 pu.

Todas estas limitações e simplificações tornam os resultados menos abrangentes e distantes da realidade. A ferramenta utilizada permitiu superar estas questões com um modelo mais completo do sistema, onde os estudos incluíram não apenas todos os tipos de falta, mas também diferencia as fases envolvidas nos eventos, diversos valores de impedância de falta, variações das magnitudes de tensão pré-falta através de variações no carregamento e considerando a variação automática de reguladores de tensão.

A hipótese de que a localização de monitores, garantindo a observabilidade, considerando um caso brando de falta resultaria na observação de eventos com maior severidade, proposta por GOMES (2016), foi confirmada também neste estudo. Na metodologia aplicada nesta dissertação foi realizada a alteração de não apenas utilizar a matriz de cobertura

para faltas monofásicas da fase mais crítica, para a localização de monitores, mas realizar uma intersecção das três matrizes de cobertura para faltas monofásicas.

As alterações de carregamentos, para alterar as tensões pré-faltas permitiram uma análise de sensibilidade da técnica frente a esta variável, onde é concluído que a consideração de um caso mais brando não é trivial quando o modelo possui reguladores automáticos de tensão na rede. Desta forma também é necessário, para a efetiva aplicação da técnica, considerar as matrizes de cobertura para diferentes tipos de carregamento, variando de carregamentos leve a pesado.

Nesta dissertação a técnica de localização de monitores, apresentada primeiramente por OLGUIN; BOLLEN (2003), através de análise de faltas, garante a observação de todos os afundamentos com os parâmetros estabelecidos, para distúrbios causados por faltas dentro do sistema analisado. No entanto essa capacidade não é a mesma para afundamentos de tensão causados por faltas externas ao sistema. Desta forma para registro de todos os afundamentos de tensão, causados por faltas internas ou externas ao alimentador, é necessária a utilização complementar de outra técnica, sendo que neste trabalho considerou as informações de magnitudes de tensão e correntes no nó da subestação para identificar eventos externos a rede que resultem em afundamentos de tensão em algum nó do sistema. A abordagem utilizada para estimar as magnitudes de afundamentos de tensão, utilizando um banco de simulações de faltas, se mostrou viável, com baixos valores de erros de estimação a partir da observação de pelo menos dois pontos da rede. O aumento do número de pontos de monitoramento, além do número mínimo necessário para garantir a observabilidade de todo sistema, desde que igual ou maior que dois, não resultou em melhoras expressivas nos resultados.

Ressalvando que os bancos de simulações de faltas foram gerados de forma abrangente, com diversos níveis de variação para cada variável de entrada, sem o objetivo de reduzir o esforço computacional nesta atividade. Dito isto um ponto frágil desta abordagem são as alterações do sistema, tanto em relação a topologia quanto a grandes variações de cargas conectadas, que levam a necessidade de aumentos significativos dos bancos de dados para englobá-las.

Os resultados de valores estimados da magnitude de tensão durante faltas, obtidos através do método de estimação proposto possibilitou o cálculo do Fator de Impacto. Os resultados foram satisfatórios, apresentando diferenças na terceira casa decimal, entre os valores do indicador obtidos da estimação e diretamente das simulações, mesmo considerando uma taxa elevada de faltas nas redes elétricas estudadas. As diferenças apresentadas no valor do indicador podem ser consideradas de baixa significância, visto que o valor de referência para este é igual a um.

Conclui-se que os estudos realizados mostram que a metodologia proposta é promissora para a construção de um programa de monitoramento, com um número limitado de monitores, para quantificar o valor do indicador, definido pela agência reguladora, em

pontos não monitorados do sistema, o que proporciona uma visão abrangente da robustez do sistema, frente ao distúrbio, com um baixo custo relacionado a instalação de equipamentos de medição.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

A pesquisa realizada mostrou que a metodologia proposta, mesmo que incipiente, é promissora e tem potencial para desenvolver um programa de monitoramento, com baixo custo capaz de quantificar o Fator de Impacto em diversos pontos de um alimentador.

Para a sequência deste trabalho é possível incorporar o sistema de proteção dos alimentadores, o que possibilita determinar as durações dos afundamentos gerados por cada falta e quais destes afundamentos se tornaram interrupções, de curta duração ou sustentadas. Ainda podem ser incorporadas as sobretensões, tornando assim uma metodologia capaz de calcular o Fator de Impacto gerados por qualquer tipo de VTCD.

Outro ponto a ser abordado é o comportamento do método frente a inserção de gerações distribuídas. Embora pequenas gerações possam não possuir impactos relevantes em afundamentos de tensão causados por faltas no alimentador, as micro usinas e mini usinas de geração, conectadas à rede primária, podem ter efeitos relevantes. Ainda associado a esta linha são necessários a realização de variações de cargas individuais.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. F. M. **Metodologia para a Monitoração Eficiente de Variações de Tensão de Curta Duração em Sistemas Elétricos de Potência**. 2007. Dissertação (Mestrado em engenharia) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Brasília, 2020.
- BLANCO-SOLANO, J. et al. Voltage Sag State Estimation using Compressive Sensing in Power Systems. **2019 IEEE Milan PowerTech**, Milan, p.1–6, 2019. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8810771>>. Acesso em: 01 jun. 2021.
- DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M.; BEATY, H. **Electrical Power System Quality**. 2nd.ed. New York: McGraw-Hill, 1996. v.1.
- ESPINOSA-JUAREZ, E.; HERNÁNDEZ, A. A Method for Voltage Sag State Estimation in Power Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S.l.], v.22, n.4, p.2517–2526, 2007. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4302518>>. Acesso em: 01 jun. 2021.
- GOMES, D. P. S. **Metodologia e Simplificação do Espaço de Busca para a Alocação de Medidores de Qualidade da Energia Elétrica frente às Variações de Tensão de Curta Duração**. 2016. Dissertação (Mestrado em engenharia) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.
- HAGHBIN, M.; FARJAH, E.; MAZAHERIFAR, H. Improved power quality monitor placement using innovative indices. **4th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference**, Tehran, p.501–509, 2013. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6506760>>. Acesso em: 01 jun. 2021.
- IBRAHIM, A. A.; MOHAMED, A.; SHAREEF, H. Optimal placement of power quality monitors in distribution systems using the topological monitor reach area. **2011 IEEE International Electric Machines Drives Conference (IEMDC)**, [S.l.], p.394–399, 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5994627>>. Acesso em: 01 jun. 2021.

IBRAHIM, A. et al. A New Approach for Optimal Power Quality Monitor Placement in Power System Considering System Topology. **Przeglad Elektrotechniczny**, [S.l.], v.88, p.272–276, 09 2012. Disponível em:
<<http://pe.org.pl/articles/2012/9a/59.pdf>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

IEEE. **IEEE 34 Node Test Feeder**. Disponível em:
<<http://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>>. Acesso em: 18 jul. 2021.

IEEE. **IEEE 123 Node Test Feeder**. Disponível em:
<<http://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>>. Acesso em: 18 jul. 2021.

IEEE. IEEE Recommended Practice for Power Quality Data Interchange Format (PQDIF). **IEEE Std 1159.3-2019 (Revision of IEEE Std 1159.3-2003)**, [S.l.], p.1–185, 2019. Disponível em:
<<http://ieeexplore.ieee.org/document/8697192>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

JUNQUEIRA, C. M. d. S. **Um Algoritmo para Alocação Ótima de Detectores de Afundamentos de Tensão**. 2017. Dissertação (Mestrado em engenharia) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

KAZEMI, A. et al. Optimal power quality monitor placement using genetic algorithm and Mallow's Cp. **International Journal of Electrical Power e Energy Systems**, [S.l.], v.53, p.564–575, 2013.

KEMPNER, T. R. **A Robustez de um Sistema de Distribuição e a Alocação de Medidores de Qualidade de Energia Elétrica Frente aos Afundamentos de Tensão**. 2012. Dissertação (Mestrado em engenharia) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

KEMPNER, T. R. **Análise da Robustez e da Sensibilidade de Sistemas de Distribuição para a Alocação Otimizada de Medidores frente às Variações de Tensão de Curta Duração**. 2016. Tese (Doutorado em engenharia) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

MCGRANAGHAN, M.; ROETTGER, B. Economic Evaluation of Power Quality. **IEEE Power Engineering Review**, [S.l.], v.22, n.2, p.8–12, 2002. Disponível em:
<<http://ieeexplore.ieee.org/document/981339>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

OLGUIN, G.; BOLLEN, M. Optimal dips monitoring program for characterization of transmission system. **2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting**, [S.l.], v.4, p.2484–2490 Vol. 4, 2003. Disponível em:
<<http://ieeexplore.ieee.org/document/1271033>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

OLGUIN, G.; VUINOVICH, F.; BOLLEN, M. An optimal monitoring program for obtaining Voltage sag system indexes. **IEEE Transactions on Power Systems**, [S.l.], v.21, n.1, p.378–384, 2006. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1583736>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

ONS. Submódulo 2.9 - Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica. Rio de Janeiro, 2020.

TAO, S. et al. Fault Location estimation based on voltage sag information of PQMS. **2015 IEEE Power Energy Society General Meeting**, Denver, p.1–5, 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7286160>>. Acesso em: 01 jun. 2021.

TELLES, P. **Estimativa de Indicadores de Afundamentos de Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.** 2017. Dissertação (Mestrado em engenharia) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

WANG, B.; XU, W.; PAN, Z. Voltage sag state estimation for power distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, [S.l.], v.20, n.2, p.806–812, 2005. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1425576>>. Acesso em: 01 jun. 2021.