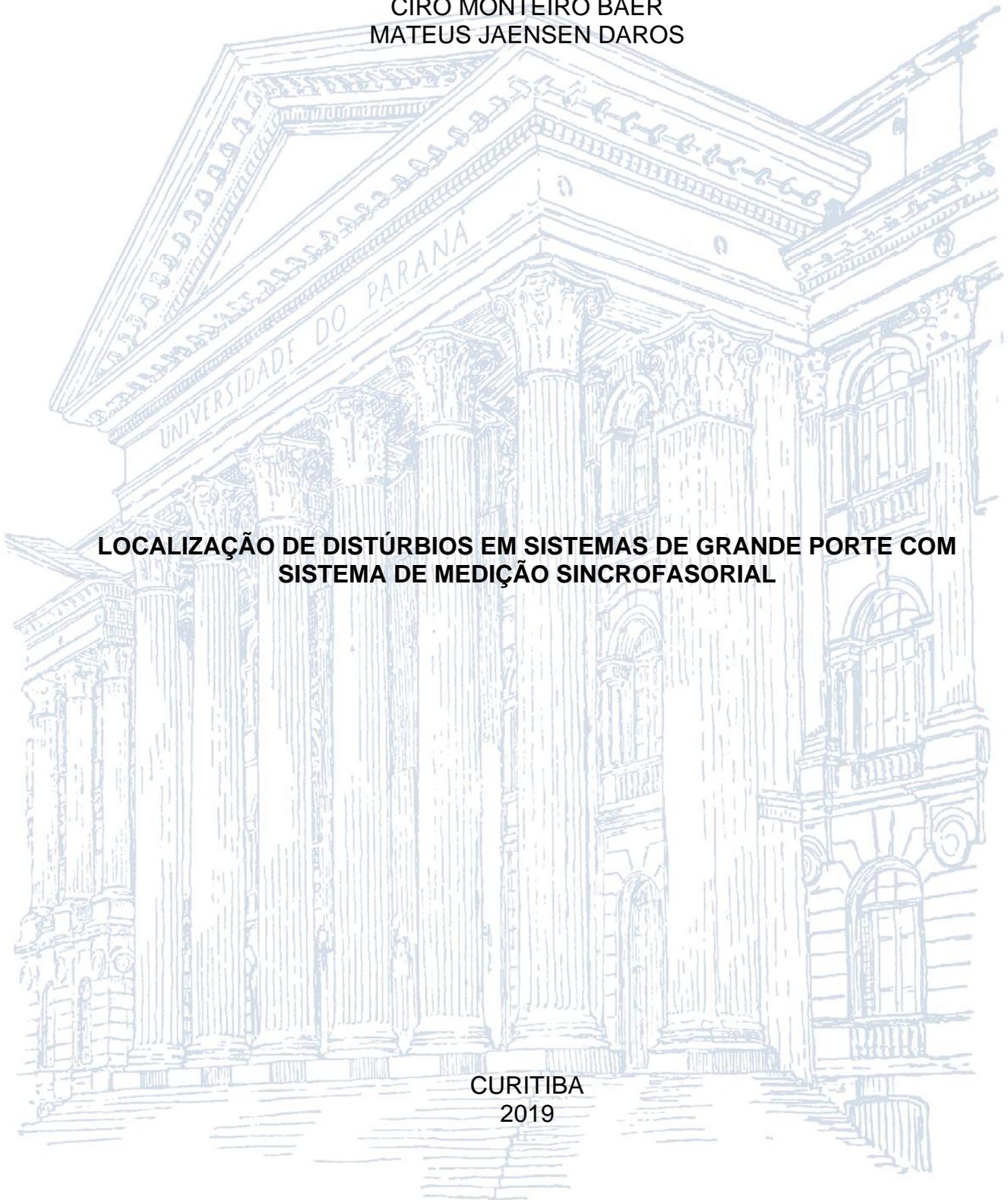


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CIRO MONTEIRO BAER  
MATEUS JAENSEN DAROS

**LOCALIZAÇÃO DE DISTÚRBIOS EM SISTEMAS DE GRANDE PORTE COM  
SISTEMA DE MEDIÇÃO SINCROFASORIAL**

CURITIBA  
2019



CIRO MONTEIRO BAER  
GRR20130948  
MATEUS JAENSEN DAROS  
GRR20136693

**LOCALIZAÇÃO DE DISTÚRBIOS EM SISTEMAS DE GRANDE PORTE COM  
SISTEMA DE MEDIÇÃO SINCROFASORIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação de Engenharia Elétrica, Ênfase em Eletrotécnica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná – *Campus* Curitiba, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki  
Coorientador: M.Sc. Rafael Rodrigues

CURITIBA  
2019

## **AGRADECIMENTOS**

Alexandre Rasi Aoki, por nos orientar não apenas utilizando toda sua bagagem científica e técnica, mas também compreendendo nossos momentos acadêmicos, pessoais e profissionais.

Rafael Rodrigues, por fazer além de sua obrigação para nos co-orientar, como abrir portas na Copel para nos dar a oportunidade de entender o funcionamento das unidades de medição sincrofasorial na prática e não apenas na literatura.

Nathan Maruch, por compartilhar seu esforço conosco e auxiliar ao longo de todo o processo com muita dedicação e trabalho duro.

## RESUMO

As unidades de medição sincrofasorias são uma tecnologia transformadora no que diz respeito ao campo de estudo de Sistemas de Medição de Sistemas de Grande Porte. Este trabalho tem como ponto de partida a problemática de localização de faltas em sistemas de transmissão utilizando essas unidades de medição. A partir disso, afunilou-se o escopo específico para a verificação de faltas com a premissa de um sistema de transmissão monitorado de forma completa através da existência de unidades de medição sincrofasorial em todas as barras do sistema e da ocorrência de faltas apenas nas barras e não nas linhas de transmissão. O método consiste na aplicação de algoritmo computacional para que através da análise dos valores de tensão e corrente retornados pelas unidades de medição, possa ser localizada a barra onde a contingência ocorreu. Os resultados mostraram-se consistentes com o esperado e isso foi validado através de simulações computacional utilizando o software Matlab para todos os tipos de falta (fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra, trifásica e perda carga) em uma barra de carga. Concluiu-se que o objetivo foi atingido dentro do limitado universo que foi estudado, o que abre espaço para trabalhos futuros que poderiam utilizar-se do mesmo conceito aqui aplicado para cobrir o problema da localização de faltas em sua totalidade.

Palavras-chave: Linhas de transmissão. Unidade de medição sincrofasorial. Controle de sistemas de grande porte. Localização de faltas. Sistemas de medição de grande porte.

## **ABSTRACT**

The phase measurement units are a transforming technology concerning the field of study of wide area measurement systems. This document has as starting point the problem of fault location in power transmission grids utilizing such measurement units. From that, the scope was narrowed specifically to the verification of faults with the premise of a transmission system fully monitored through the presence of phase measurement units in every bus of the system and the occurrence of faults exclusively on buses and not in the transmission lines. The method consists in the application of a computational algorithm so that through the analysis of the values of voltage and current read by the measurement units, the contingency location can be pinpointed. The results were shown to be consistent with the expected and such was validated by computational simulation using the Matlab software to every kind of fault (phase-ground, phase-phase, phase-phase-ground, triphase) in a load bus. It was concluded that the objective was achieved within the limited universe that was meant to be studied, which opens space for future work that could use the same concept here applied to cover the fault location problem in its totality.

Key words: Transmission lines. Phase measurement unit. Wide Area Control Systems. Fault location. Wide Area Measurement System.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – EXEMPLO DE SISTEMA ELÉTRICO DE GRANDE PORTE .....	15
FIGURA 2 – MAPA GEOELÉTRICO DA REDE DE OPERAÇÃO .....	16
FIGURA 3 – TOPOLOGIA DO SISTEMA DE 39 BARRA DE NEW ENGLAND .....	34
FIGURA 4 – SIMULAÇÃO EM REGIME TRANSITÓRIO COM FALTA NA BARRA 18 COM CURTO TRIFÁSICO .....	43
FIGURA 5 – SIMULAÇÃO EM REGIME TRANSITÓRIO COM FALTA NA BARRA 18 COM CURTO FASE-TERRA.....	44
FIGURA 6 – SIMULAÇÃO EM REGIME TRANSITÓRIO COM FALTA NA BARRA 18 COM CURTO FASE-FASE .....	44
FIGURA 7 – SIMULAÇÃO EM REGIME TRANSITÓRIO COM FALTA NA BARRA 18 COM CURTO FASE-FASE-TERRA .....	45
FIGURA 8 – SIMULAÇÃO EM REGIME TRANSITÓRIO COM FALTA NA BARRA 18 COM PERDA DE CARGA .....	45

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DAS PCS .....	27
TABELA 2 – RESULTADO APÓS FILTRAGEM DE ITENS QUE NÃO SÃO ARTIGOS, ITENS DE CONFERÊNCIA INTERNACIONAL E REVISTAS PUBLICADORAS .....	27
TABELA 3 – RESULTADO DA UNIÃO DAS PESQUISAS E CHECAGEM DE DUPLICATAS.....	27
TABELA 4 – RESULTADO DA FILTRAGEM APÓS LEITURA DOS TÍTULOS.....	28
TABELA 5 – RESULTADO.....	28
TABELA 6 – ARTIGOS SELECIONADOS .....	28
TABELA 7– INDICADORES DE PROCEDÊNCIA.....	29
TABELA 8 – RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE 39 BARRAS DE NEW ENGLAND.....	35
TABELA 9 – CARACTERÍSTICAS DOS GERADORES DO SISTEMA DE 39 BARRAS DE NEW ENGLAND.....	35
TABELA 10 – CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS E TRANSFORMADORES DO SISTEMA DE 39 BARRAS DE NEW ENGLAND .....	35
TABELA 11 – CARACTERÍSTICAS DAS BARRAS DO SISTEMA DE 39 BARRAS DE NEW ENGLAND.....	37
TABELA 12 – CARACTERÍSTICAS DAS CARGAS DO SISTEMA DE 39 BARRAS DE NEW ENGLAND.....	38
TABELA 13 – RESULTADOS DO FLUXO DE CARGA .....	39
TABELA 14 – RESULTADOS OBTIDOS PARA SIMULAÇÃO DO CURTO TRIFÁSICO .....	49
TABELA 15 – RESULTADOS OBTIDOS PARA SIMULAÇÃO DO CURTO FASE-TERRA .....	49
TABELA 16 – RESULTADOS OBTIDOS PARA SIMULAÇÃO COM CURTO FASE-FASE .....	49
TABELA 17– RESULTADOS OBTIDOS PARA SIMULAÇÃO DO CURTO FASE-FASE-TERRA.....	50
TABELA 18 – RESULTADOS OBTIDOS PARA SIMULAÇÃO COM PERDA DE CARGA .....	50

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - MATRIZ FORNECIDA PELA PST PARA SIMULAR FALTA .....	42
QUADRO 2 - ALGORITMO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTA COM CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO .....	46
QUADRO 3 - ALGORITMO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTA COM CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA .....	46
QUADRO 4 - ALGORITMO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTA COM CURTO-CIRCUITO FASE-FASE .....	47
QUADRO 5 - ALGORITMO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTA COM CURTO-CIRCUITO FASE-FASE-TERRA.....	47
QUADRO 6 - ALGORITMO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTA COM PERDA DE CARGA .....	48

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
1.1	CONTEXTO .....	12
1.2	OBJETIVOS .....	13
1.3	JUSTIFICATIVA .....	13
1.4	ESTRUTURA DA MONOGRAFIA.....	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	SISTEMAS ELÉTRICOS DE GRANDE PORTE .....	15
2.1	OPERAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO .....	16
2.3	<i>PHASOR MEASUREMENT UNITS</i> .....	19
2.4	<i>WIDE AREA CONTROL</i> .....	21
2.5	LOCALIZAÇÃO DE FALTAS.....	23
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	24
3	ESTADO DA ARTE .....	26
3.1	PROCESSO DE SELEÇÃO DE PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO.....	26
3.2	REVISÃO DA LITERATURA .....	29
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	32
4	ESTADO DA ARTE .....	34
4.1	MATERIAIS .....	34
4.1.1	<i>New England Power System</i> .....	34
4.1.2	Matlab.....	40
4.1.3	Power System Toolbox.....	41
4.2	MÉTODOS .....	41
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	51

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTO

No decorrer dos anos 2000, os Estados Unidos começaram a apresentar falhas em seu sistema de energia de grande porte, devido as catástrofes naturais e outros grandes apagões. Tais acontecimentos, evidenciaram as fragilidades no sistema e dessa forma mostraram a necessidade de se ter tecnologias que pudessem prover dados confiáveis para trabalhar na preparação do sistema contra eventuais falhas.

Assim como os norte-americanos, o Brasil, por volta do final dos anos 90 e início dos anos 2000, registrou diversos apagões, evidenciando as mesmas fragilidades do sistema. Um caso que repercutiu devido as proporções para época foi o blecaute no Centro-sul do Brasil em 2002, onde dez estados foram atingidos devido ao rompimento de uma linha de transmissão de energia que liga a Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira à subestação de Araraquara, em São Paulo. Tanto os Estados Unidos com os seus dois sistemas elétricos (*US West Coast Power system* e o *Eastern Interconnect*) quanto o Brasil com o Sistema Interligado Nacional (SIN), possuem dimensões continentais que requerem mais tecnologia voltada para o controle em tempo real e prevenção de eventuais distúrbios no sistema.

Portanto, tornaram-se necessárias tecnologias para realizar a medição de sistemas de energia de grande porte (do inglês *Wide-Area Measurement System* WAMS), as quais têm sido um elemento chave no desenvolvimento dos sistemas de transmissão inteligente nas últimas décadas. Estes sistemas são baseados em equipamentos sofisticados com tecnologia sincrofasorial chamados PMUs (do inglês, *phasor measurement units*). Estas unidades, estão sendo instalados em diferentes locais do sistema elétrico brasileiro, com a capacidade de armazenar e se comunicar via sincronização por *Global Positioning System* (GPS), com taxas de amostragem de (6-60 amostras/segundo). PMUs têm recebido muitas atenções voltadas para técnicas de uso dos WAMS para monitorar e gerar dados em tempo real no SIN, porém o uso do WAMS para respostas automáticas de controle, porém não tem recebido muita atenção da comunidade de pesquisa nacional, muito pelo fato da complexidade de tal assunto.

## 1.2 OBJETIVOS

De forma geral, objetivo deste trabalho consiste em apresentar o desenvolvimento da metodologia, junto com uma análise, de como realizar a localização de faltas em sistemas de grande porte através do sistema de medição sincrofasorial, levando em questão todas as classificações de distúrbios.

Entre os objetivos específicos destacam-se:

1. Analisar a literatura técnico-científica sobre localização de distúrbios de sistemas de grande porte e medição sincrofasorial;
2. Avaliar a infraestrutura de um sistema elétrico com medição sincrofasorial;
3. Desenvolver metodologia de controle de sistemas elétricos de grande porte para localização de distúrbios através das medições sincrofasoriais;
4. Aplicar a metodologia em simulação computacional no caso do sistema elétrico real de New England;

## 1.3 JUSTIFICATIVA

O principal sistema de aquisição de dados atualmente é o SCADA (do inglês, *supervisory control and data acquisition*), que gera dados como magnitudes da tensão, valores de potência ativa e reativa e topologia do sistema, possibilitando assim, estimar o estado do sistema. Periodicamente o sistema SCADA realiza uma varredura nos dispositivos que coletam as informações, onde a duração varia conforme o tamanho do sistema. Em condições normais de operação, quando está em regime permanente, o tempo não afeta a leitura das medidas, porém, quando o sistema apresenta alguma mudança de estado durante a varredura, o tempo passa afetar na análise do estado do sistema já que os dados apresentarão divergências. A diferença nas medições ocorre devido ao tempo de varredura que ficou elevado devido ao crescimento do sistema de energia. Portanto, com a natureza mais lenta do sistema SCADA fez surgir a necessidade de uma nova tecnologia com medições dinâmicas do sistema. Trata-se das PMUs, dispositivos de medição sincrofasoriais, que são sincronizadas através do sinal GPS e geram dados precisos do sistema.

Com as PMUs tornou-se possível realizar o monitoramento dos sistemas de energia de grande porte, já que estes equipamentos conseguem oferecer dados confiáveis para trabalhar. E algumas das dificuldades de monitoramento se dão pelos comportamentos oscilatórios e os ruídos, que escondem os distúrbios apresentados, junto com problemas apresentados na rede de comunicação do sistema. Mas com os dados confiáveis é possível desenvolver técnicas para localização dos distúrbios junto com o uso de uma rede de comunicação exclusiva para este fim.

Devido a modernização na pré-operação, operação e pós operação no Brasil, este trabalho visa desenvolver a metodologia para mapear o sistema e localizar os distúrbios em sistemas de grande porte, utilizando os dados obtidos através das PMUs.

#### 1.4 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

Este trabalho está dividido em seis capítulos. O capítulo 1, Introdução, apresenta brevemente o contexto, os objetivos a serem alcançados e a justificativa para a realização do trabalho. O capítulo 2, Fundamentação Teórica, discorre sobre os sistemas elétricos de grande porte, as linhas de transmissão, os fluxos de cargas, o *wide area control*, o *phasor measurement units* e localização de faltas. O capítulo 3, Estado da Arte, detalha o procedimento de obtenção do portfólio bibliográfico para o desenvolvimento deste trabalho, junto com a descrição dos materiais acadêmicos. O capítulo 4, Materiais e Métodos, descreve as ferramentas computacionais utilizadas, o sistema teste e abordagem que será realizada para realização do trabalho proposto. O capítulo 5, Teste e Análise de Resultados, abrange os testes simulados juntamente com a análise dos resultados obtidos a cada etapa. Por fim, o capítulo 6, Conclusões e Trabalhos Futuros, exhibe as principais conclusões obtidas com a realização do trabalho, bem como a perspectiva da realização de trabalhos futuros.

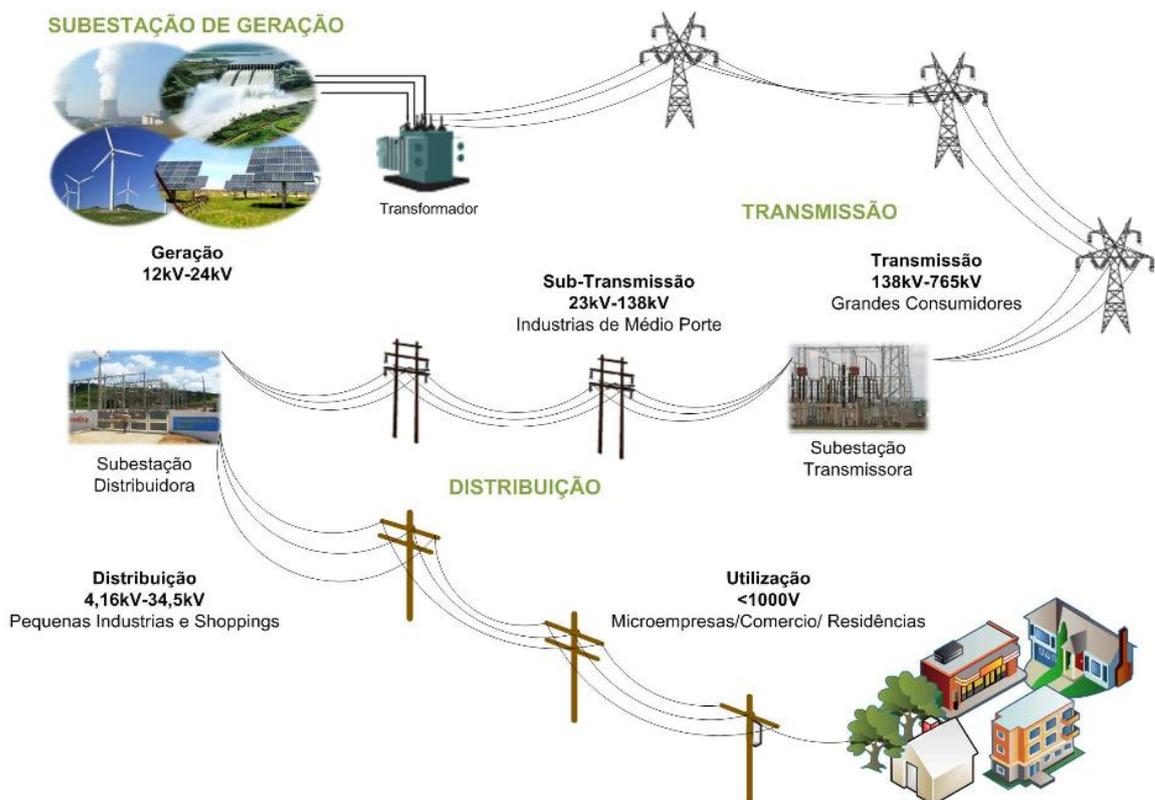
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 SISTEMAS ELÉTRICOS DE GRANDE PORTE

Segundo Fuchs (1983) a estrutura básica dos sistemas elétricos de grande porte é definida em cinco principais níveis, e como pode ser visto na FIGURA 1:

- Geração;
- Transmissão;
- Sub transmissão (Alta tensão da distribuição);
- Distribuição;
- Consumidores.

FIGURA 1 – EXEMPLO DE SISTEMA ELÉTRICO DE GRANDE PORTE



FONTE: Lopes *et al.* (2012)

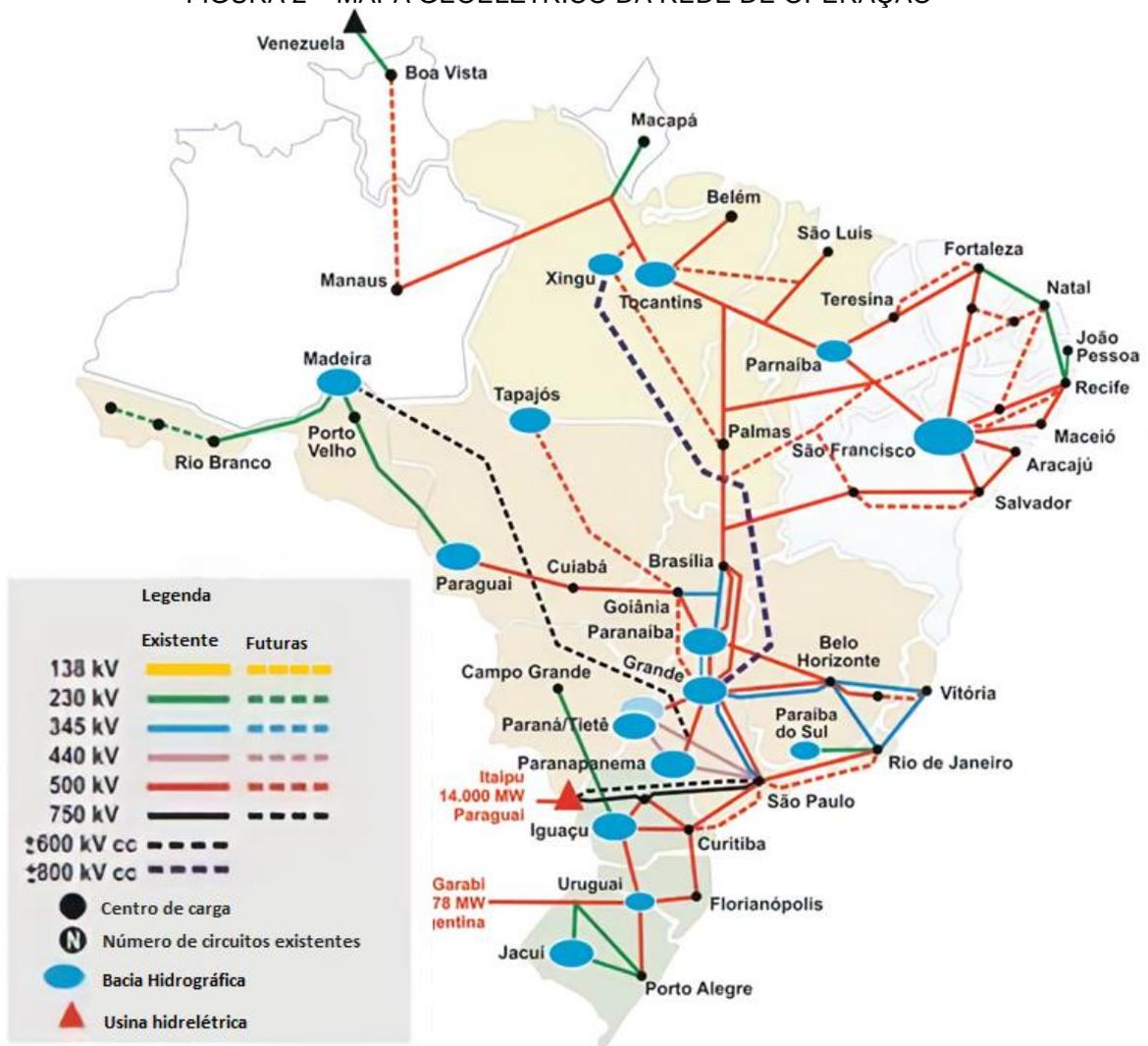
O transporte da energia é realizado em todos os níveis do sistema, onde a diferença entre eles está na tensão que cada um transporta e na quantidade de energia que é transmitida. Os elementos responsáveis por realizar o transporte são

linhas de cabos aéreos, ou subterrâneos, designados para cada nível do sistema elétrico.

## 2.1 OPERAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

De acordo com o módulo dez do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), as funções podem ser divididas de forma temporal, no caso, Pré Operação, Operação em Tempo Real e Pós Operação. Desta forma os processos realizados no sistema e as instalações que o compõem, são facilmente visualizados.

FIGURA 2 – MAPA GEOELÉTRICO DA REDE DE OPERAÇÃO



Fonte: CEMIG (2019)

### 2.2.1. Pré Operação

Conforme o submódulo 10.1 do ONS, nesta etapa são programadas as rotinas diárias do sistema elétrico, levando em consideração as condições elétricas, energéticas e hidráulicas do sistema e é minuciado os procedimentos operacionais e atividades que serão realizadas na operação em tempo real.

As atividades básicas da pré-operação são (Submódulo 10.1 do ONS):

- Processamento operacional das solicitações de intervenções, que consiste na análise das solicitações de intervenção, tratamento das intervenções sem desligamento e nas intervenções solicitadas no dia anterior a sua realização;
- Processamento operacional das diretrizes elétrica, energéticas e hidráulicas, que representa a definição de quais ações serão executadas em tempo real, com base nas diretrizes elétrica, energéticas, hidráulicas e nas condições operacionais da Rede de Operação;
- Consolidação e elaboração da programação, onde são validados os processamentos operacionais anteriores e também são consolidados o Programa Diário de Produção (PDP), Programa Diário de Intervenções (PDI), Programa Diário de Defluências (PDF), que compõem Programa Diário da Operação Eletroenergética (PDE) e que também consiste na construção do Programa Diário de Carga e Frequência (PDCF).

### 2.2.2. Operação em Tempo Real

Baseado no submódulo 10.1 do ONS, a operação em tempo real representa a coordenação, supervisão e controle de todo o processo operacional dos sistemas hidráulicos, energético e elétricos. Parte da operação em tempo real as deliberações para os agentes de operação realizarem os comandos, a supervisão e execução das operações das instalações.

As atividades são realizadas pelo desenvolvimento de processos no Sistema Interligado Nacional (SIN), as quais resumem (Submódulo 10.1 do ONS):

- Execução de intervenções que é descrita no submódulo 10.5 do ONS;
- Controle da geração que é descrita no submódulo 10.6 do ONS;
- Controle da transmissão que é descrita no submódulo 10.7 do ONS;
- Operação hidráulica de reservatórios que é descrita no submódulo 10.8 do ONS;
- Operação em contingência que é descrita no submódulo 10.9 do ONS;
- Gerenciamento da carga que é descrita no submódulo 10.10 do ONS;
- Recomposição da Rede de Operação após perturbação que é descrita no submódulo 10.11 do ONS.

### 2.2.3. Pós Operação

Como é descrito no submódulo 10.1 do ONS, a pós-operação representa a averiguação e triagem dos dados da operação em tempo real, no acompanhamento, análise e divulgação de informações, e no armazenamento das informações obtidas nas operações.

As atividades realizadas pela pós-operação são os últimos processos de operação do SIN, que são descritas (Submódulo 10.1 do ONS):

- Apuração dos dados, que consiste na obtenção das informações sobre as operações realizadas, através da coleta de dados a partir das ferramentas disponíveis que posteriormente é selecionado aqueles dados que melhor representam a operação realizada;
- Triagem de ocorrências e perturbações, onde a partir de critérios pré-estabelecidos os eventos são identificados para então serem analisados e posteriormente são emitidos relatórios específicos sobre eles;
- Elaboração de relatórios periódicos para divulgar os resultados das operações realizadas e para realimentar os processos da operação, onde os resultados são comparados com valores esperados ou programados;

- Elaboração de relatórios de análise de ocorrências, de análise de perturbações, de análise de operação e gestão das recomendações;
- Obtenção de dados e informações para contabilização, juntamente com a estruturação e classificação dos dados e informações para a elaboração de relatórios específicos;
- Cálculo e análise de indicadores, onde estes cálculos e análises são realizadas a partir dos dados e informações coletadas para proporcionar o acompanhamento e análise do desempenho do sistema e da operação.

### 2.3 PHASOR MEASUREMENT UNITS

De acordo com o submódulo 11.8 da ONS, a medição sincrofasorial foca na leitura da amplitude das tensões e das correntes, bem como os respectivos ângulos, com intuito de providenciar uma base de dados confiáveis para efetuar análise de distúrbios no sistema, principalmente no regime transitório, onde auxilia no processo de tomada de decisão no tempo real. Para realizar este processo, são implementados no sistema as PMUs, que fazem parte do Sistema de Medição de Sincrofasores (SMSF), sincronizadas pelo GPS.

Para os tipos de medição o submódulo 11.8 da ONS indica que as PMUs deverão ser configuradas no tipo M, e que devem conter nos Pacotes Computacionais de Sincrofasores as seguintes medições:

- Medição de tensão, módulo e ângulo de todas as fases dos terminais das linhas de transmissão selecionados pelo ONS e que pertencem à Rede de Operação. Quanto a medição de frequência e taxa de variação da mesma, é necessário apenas a medida de uma das fases devendo ser escolhida a mesma fase que tem a medição na barra da subestação da saída da linha de transmissão monitorada (Submódulo 11.8);
- Medição de módulo e ângulo de todas as fases das correntes em todos terminais da linha de transmissão, assim como a de tensão, indicados pelo ONS e que pertencem à Rede de Operação. Com relação aos cálculos dos sincrofasores de corrente, as PMU devem utilizar os sinais disponibilizados

pelos enrolamentos dos transformadores de corrente do Sistema de Proteção;

- Medição da fase da tensão, módulo, ângulo, frequência e taxa de variação de frequência na conexão do terminal da linha de transmissão com a barra;

Ainda com relação das medidas, todas as medições de tensão devem ser realizadas por equipamentos que apresentem uma exatidão mínima de 1%, e quanto as correntes, as medições devem apresentar uma exatidão mínima de 10%, conforme é informado pelo ONS. E dentro das exatidões das medidas, devem estar inclusos todos os equipamentos utilizados, como por exemplo, transformadores potenciais, transformadores de correntes, transdutores e os demais equipamentos que compõem a cadeia. Estas medições devem atender os requisitos de desempenho da norma IEEE C37.118.1-2011 e no seu adendo IEEE C37.118.1a-2014, onde dentro dessa norma está indicado que o *Total Vector Error* deve ser de no máximo 1% para atender a confiabilidade da medição.

Quando se trata da confiabilidade das medições, tem que ser levado em conta as maneiras que são transmitidos estes dados para tornar ainda mais fidedignos e não ocorrer nenhuma divergência. Para isso o submódulo 11.8 do ONS indica que as medições devem ser sincronizadas pelo *GPS* e precisam ser transmitidas a uma taxa de 60 amostras por segundo, com selo de tempo no padrão *Universal Time Coordinate* (UTC). E no âmbito da entrega de dados, o submódulo 11.8 do ONS descreve que todos dados são enviados por meio de rede telecomunicações estabelecidas exclusivamente para esta função, onde o índice de *Service Level Agreement* (SLA) da rede deve ser de 99,98% para garantir a máxima disponibilidade e qualidade na entrega de dados. Uma ressalva pode ser feita na questão da entrega, os agentes do ONS podem utilizar os dados fasoriais gerados nas próprias instalações, mas o fluxo de dados para o ONS deve ser enviado por uma porta exclusiva (Submódulo 11.8).

Para realizar as mesmas funções que as PMUs, existem os *Intelligent Electronic Device* (IED), mas é preciso fazer algumas ressalvas sobre estes dispositivos. Com descrito no submódulo 11.8 do ONS, os IEDs devem apresentar recursos que possibilitem a intervenção das equipes de manutenção sem a necessidade de desligar os componentes do primário. Além deste ponto, os

materiais e equipamentos a serem utilizados devem atender as revisões mais recentes da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), nos itens que relacionados à estes dispositivos, e caso não haja uma relação na ABNT, os aparelhos devem atender as revisões da *International Electrotechnical Commission* (IEC) ou da *American National Standards Institute* (ANSI), nessa ordem de preferência. Complementado as normas da ABNT, ou IEC ou ANSI, os IEDs devem atender a norma IEEE C37.118.1 2011 e seu adendo IEEE C37.118.1a-2014, bem como a norma IEEE C37.118.2-2011. Outro requisito está relacionado as compatibilidades eletromagnéticas, todos os equipamentos e sistemas digitais devem respeitar estas compatibilidades que são aplicáveis nos graus de severidade para instalação em subestações de extra-alta-tensão. E por último, os IEDs com função de PMU precisam ser suscetíveis a atualização de *firmware* que possibilita a correção de eventuais *bugs*, quando solicitados pelo ONS, e estes IEDs devem ser independentes dos IEDs de proteção (Submódulo 11.8)

## 2.4 WIDE AREA CONTROL

A. Chakraborty *et al.*, (2013) descrevem a relação direta entre os avanços do Wide Area Measurement System (WAMS) e o Wide Area Control (WAC), já que o avanço em uma destas áreas desencadeou avanço na outra área. No caso, o WAMS envolve o uso da tecnologia de sincrofasores que fornecem dados confiáveis do sistema em tempo real que são sincronizados através do GPS, esta tecnologia é referenciada como sistema de medição sincrofasorial, e são utilizadas realizar o monitoramento dos grandes sistemas de potência pois estão distribuídas em diversos pontos do sistema. Mas além de possibilitar o monitoramento, os dados fornecidos pelos sincrofasores possibilitam o controle automático do sistema, é onde entra o desenvolvimento do WAC.

Conforme cresce o número de instalação de PMUs, cresce o número de dados obtidos através delas e por isso o controle realizado por humanos tende a ficar mais preciso. Com um sistema automático de controle é possível aperfeiçoar o trabalho utilizando a grande quantidade de dados fornecidos pelo WAMS, mas para isso é necessário identificar alguns dos principais problemas que afetam o WAC:

- *Power oscillation damping*;
- Estabilidade de tensão
- Localização de distúrbios.

Como A. Chakraborty *et al.*, (2013) retratam, na questão de *power oscillation damping* é necessário o uso de controladores com o *Thyristor Controlled Series Compensator* (TCSC) ou *Static VAr Compensator* (SVC), ou então um conjunto de controladores distribuídos, como *Power System Stabilizers* (PSS), para realizar o amortecimento necessário do sistema em um circuito fechado com componentes de oscilação baixa. Quando se trata de estabilidade de tensão, é um problema mais crítico em sistemas de grande porte que operam com geração remota e suporte limitado de energia reativa que percorrem as linhas de transmissão. Os métodos mais tradicionais para lidar com este problema incluem dois extremos: em uma ponta estão os modelos detalhados que contém diversos barramentos que são utilizados para calcular as margens de estabilidade de tensão em casos e contingência, e na outra ponta, estão os modelos mais simples com linhas radiais que estão conectados a centros de cargas, que são conhecidos como *voltage instability predictor* (VIP).

Outro ponto crítico para o *wide area control* está relacionado a localização de distúrbios, que exige a compreensão fundamental de como as perturbações afetam o sistema de grande porte. Juntamente com este entendimento, é necessário analisar como os efeitos resultantes das perturbações se espalham pelas formas elétricas oscilatórias e as maneiras que a rede de componentes e estrutura da rede auxilia ou impede a propagação da perturbação, como descrevem A. Chakraborty *et al.*, (2013).

## 2.5 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

A localização dos distúrbios no sistema de transmissão impacta tanto o controle quanto a segurança na rede. A operação depende da informação de onde está a ocorrência para que o plano de ação, de forma manual ou automatizada, possa ser executado o mais rápido possível para isolar a contingência e reestabelecer o funcionamento do restante do sistema. Parte do processo consiste em identificar o tipo de falta: fase-terra, fase-fase, bifásica-terra, trifásica.

A necessidade da informação rápida e precisa, insere no estudo da localização de faltas a aplicação de unidades de medição sincrofasorial. A característica das PMUs de retornar uma alta taxa de dados, permite que o monitoramento do sistema elétrico seja muito mais aprofundado. As unidades podem ser utilizadas tanto para monitoramento quanto para realizar ações de proteção no sistema elétrico. O estado da arte evidencia as vantagens desse tipo de monitoramento, comprovando a precisão atingida quando se implementa diferentes métodos de localização a partir da análise dos dados gerados pelas PMUs. Devido ao maior custo, é importante levar em consideração análises que simulam o monitoramento com um número otimizado de unidades instaladas, isso permite mapear o sistema através da utilização de um número menor de PMUs, o que tornaria a aplicação mais factível do ponto de vista de viabilidade econômica.

O aumento da tecnologia da informação e da capacidade de processamento computacional aponta para a possibilidade do monitoramento, controle e proteção através das PMUs. Sendo capaz de analisar os dados, o monitoramento instantâneo será preciso para que a Operação tenha informações detalhadas de todas as zonas do sistema de transmissão. Esse cenário altera também a resposta no caso de contingência, pois a localização pode ser realizada com algoritmos mais complexos, aumentando a precisão e tempo de resposta, além de possibilitar a automatização das ações de proteção elétrica.

A previsão de faltas é um sub-tema que deve ser levado em consideração pois é facilitado através do monitoramento da rede com PMUs e do acompanhamento do seu comportamento de forma instantânea. Tendo como base os estudos da Pós-operação, pode-se entender de que maneira as alterações nos parâmetros do sistema estão interligadas às subseqüentes contingências e prevê-las de forma confiável. Isso

habilita a operação a “esperar” pelas faltas na linha e acompanhar a situação para agir caso realmente haja a falta no ponto previsto.

## 2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

No contexto geral, quando se trata da operação de sistemas de grande porte é possível observar que devido ao seu tamanho, a complexidade para operar cresce diretamente. Quando se olha para a pós operação, são encontrados alguns pontos que precisam de mais atenção, já que é neste segmento que são realizadas as análises dos resultados gerados pelas ações na operação. Com estes estudos, são sugeridas maneiras de como aperfeiçoar a pré-operação, e conseqüentemente, a operação para atingir os melhores resultados. E um dos pontos que mais precisam de atenção envolve os dados gerados pelo sistema, que devido ao tamanho dele a medição, quando assíncrona, pode apresentar uma divergência tornando o dado menos confiável.

Com o intuito de facilitar e aprimorar o trabalho dos operadores, foi desenvolvido um sistema que gera dados precisos e confiáveis, no caso, o sistema de medição sincrofasorial. Este sistema proporciona dados que estão sincronizados por sistemas de localização por satélite, e fornece uma quantidade muito maior de dados, funcionando como uma lupa no sistema mostrando exatamente o que está acontecendo. Com esta quantidade de informações foi desenvolvido o WAC, que seria um conjunto de ações para realizar o controle automático do sistema. E para realizar este controle, se leva em conta diversos eventos que ocorrem no sistema e um dos mais complexos seria a localização de distúrbios, que é o foco deste trabalho.

Chama a atenção a localização de distúrbios devido a possibilidade de propagação de faltas no sistema, devido alguma perturbação que atingiu ele, seja uma falta de fase na linha de transmissão, um curto-circuito na linha de transmissão ou até mesmo uma instabilidade no sistema. Devido a isto, é evidenciado o quão crítica é a situação quando envolve um distúrbio em um sistema de grande porte, onde uma perturbação pode ocasionar um efeito em cascata no sistema. Conseqüentemente a localização destes distúrbios está diretamente, relacionada as formas de controle do sistema.

E para realizar estas detecções são utilizados diversos métodos que são descritos no estado da arte, onde cada um possui uma taxa de precisão. Mas o que todos tem em comum, é que eles utilizam os dados obtidos das PMUs.

### 3 ESTADO DA ARTE

#### 3.1 PROCESSO DE SELEÇÃO DE PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO

Para obter os materiais acadêmicos de base utilizados para elaborar este trabalho foi empregado um método otimizado de busca de artigos, o qual foi desenvolvido por pesquisadores do Laboratório de Metodologias de Multicritério em Apoio à Decisão (LabMCDA) e nomeado como ProKnow-C (*Knowledge Development Process Constructivist*). Este instrumento apresenta um processo dividido em etapas para retornar no final uma base de dados acertada (ENSSLIN *et al.*, 2013), adaptada e aplicada ao tema proposto.

O ProKnow-C sugere que a primeira etapa do processo seja a definição das Palavras Chaves (PCs) relacionadas ao assunto, para isso, é necessário definir quais são os principais eixos de pesquisa que exercem a função de guiar o foco da pesquisa para tornar ela mais objetiva, e para isso, é realizado o cruzamento destes eixos. Com isso, para este trabalho a PC definida no campo de tecnologia foi *phasor measurement units*, cruzada com PCs no campo de aplicações de *wide area control* e *fault detection*. Com o intuito de avaliar se a escolha das PCs foi correta, é aconselhado realizar a leitura das palavras chaves dos artigos encontrados na busca. Dessa forma é checado se as PCs, tanto dos artigos quanto as escolhidas, são as mesmas validando a escolha das palavras chaves.

Após a definição das PCs, foi utilizado o *software Publish or Perish*, uma ferramenta capaz de otimizar o processo de busca de portfólio bibliográfico, onde realiza busca nas principais fontes de artigos e possibilita um tratamento dos dados. Como citado uma das principais, e mais confiáveis, fontes de artigos é o *Google Scholar* que apresenta indicadores de procedência dos materiais pesquisados, como o número de citações do artigo no total, número de citações por ano, índice h e revista de publicação. Para realizar a filtragem dos artigos, foi definido que os principais indicadores são os números de citações por ano e a revista de publicação. Outra métrica utilizada para a filtragem, foi a definição de artigos publicados na última década com o intuito de apresentar apenas os mais atuais. O resultado da busca é visto na tabela 1, onde o *software Publish or Perish* tem por limitação padrão o retorno de 1000 artigos que são os melhores artigos, levando em conta este fato, a busca é focada na qualidade dos artigos e não na quantidade.

TABELA 1 – RESULTADO DO CRUZAMENTO DAS PCS

Tecnologia / Aplicação	<i>Phasor Measurement Units</i>
<i>Fault Detection</i>	999
<i>Wide Area Control</i>	326

FONTE: Os autores (2019)

O ato de filtrar é iniciado com a desconsideração dos materiais científicos que não são artigos, itens de conferências internacionais, mantendo a seleção das mais conceituadas revistas publicadoras na área da engenharia elétrica. Após realizar o primeiro processo de filtragem, é retornado o número de artigos, que contém as PCs, na tabela 2.

TABELA 2 – RESULTADO APÓS FILTRAGEM DE ITENS QUE NÃO SÃO ARTIGOS, ITENS DE CONFERÊNCIA INTERNACIONAL E REVISTAS PUBLICADORAS

Tecnologia / Aplicação	<i>Phasor Measurement Units</i>
<i>Fault Detection</i>	681
<i>Wide Area Control</i>	208

FONTE: Os autores (2019)

Outro *software* foi utilizado para filtrar os artigos: Mendeley. Este verifica a existência de artigos duplicados ao realizar a busca nos dois eixos definidos, caso haja a duplicidade é desconsiderado um dos resultados. No caso, as duas pesquisas foram unidas em uma para utilizar o Mendeley e verificar a existência de duplicatas. Foram encontradas 52 duplicatas, portanto, foram retirados 26 artigos repetidos. O número de artigos pode ser encontrado na tabela 3.

TABELA 3 – RESULTADO DA UNIÃO DAS PESQUISAS E CHECAGEM DE DUPLICATAS

Tecnologia / Aplicação	<i>Phasor Measurement Units</i>
<i>Fault Detection and Wide Area Control</i>	837

FONTE: Os autores (2019)

A continuidade do processo de filtragem é feita através da leitura do título dos artigos que tenham a maior relação possível com o tema do trabalho, o resultado desse processo é exibido na tabela 4.

TABELA 4 – RESULTADO DA FILTRAGEM APÓS LEITURA DOS TÍTULOS

Tecnologia	<i>Phasor Measurement Units</i>
Aplicação	
<i>Fault Detection and Wide Area Control</i>	104

FONTE: Os autores (2019)

Do último resultado, é realizado a leitura dos resumos dos artigos para avaliar o quão relacionado estão ao tema, e dessa forma é descartado os artigos que estão fora do alinhamento. Com esta etapa realizada, o número de artigos resultante é visto na tabela 5.

TABELA 5 – RESULTADO

Tecnologia	<i>Phasor Measurement Units</i>
Aplicação	
<i>Fault Detection and Wide Area Control</i>	26

FONTE: Os autores (2019)

Por último, é feita a leitura da introdução e da conclusão dos artigos da tabela 5 para escolher aqueles que alinham ao tema e apresentam resultados, para então serem lidos por completo e que estão descritos no próximo capítulo. Portanto o portfólio ficou definido em 6 artigos, apresentados na tabela 6, que apresentam indicadores de procedência na tabela 7.

TABELA 6 – ARTIGOS SELECIONADOS

Ano	Título dos artigos	Autores
2012	PMU-based fault location using voltage measurements in large transmission networks	Z. Jiang <i>et al.</i> ,

Ano	Título dos artigos	Autores
2012	An effective fault location technique for transmission grids using phasor measurement units	Q. JIANG <i>et al.</i> ,
2015	Transmission line fault detection and localisation methodology using PMU measurements	P Gopakumar <i>et al.</i> ,
2016	Fault Detection and Faulted Line Identification in Active Distribution Networks Using Synchrophasors-Based Real-Time State Estimation	A. Ghaderi <i>et al.</i> ,
2017	High impedance fault detection: A review	M. Pignati <i>et al.</i> ,
2019	PMU Analytics for Power Fault Awareness and Prediction	M. Wanik <i>et al.</i> ,

FONTE: Os autores (2019)

TABELA 7– INDICADORES DE PROCEDÊNCIA

Indicadores de procedência	
Citações	274
Citações por ano	39,14
Índice H	5

FONTE: Os autores (2019)

### 3.2 REVISÃO DA LITERATURA

O *paper* de Z. Jiang *et al.*, (2012) apresenta uma técnica para localização de distúrbios em linhas de transmissão através de PMUs. O diferencial dos autores é buscar a implementação das PMUs de forma ótima, ao invés de partir da premissa de que o sistema terá várias unidades instaladas ao longo das linhas de transmissão. As simulações que validam o método utilizam-se do software (*Power System Computer Aided Design/Electromagnetic Transients including DC*) PSCAD/EMTDC e são realizadas sob o ponto de vista de análise de erro, regime permanente, transitório. O modelo para observar faltas aplicando PMUs na linha é descrito, assim como o algoritmo utilizado. O modelo para observação de faltas, baseado em unidades sincrofasoriais, procura otimizar a colocação das unidades na linha, propondo que haja uma PMU a cada outra barra da LT. Assim, a linha pode ser modelada de forma simplificada desde faltas fase-terra até faltas trifásicas. Através desse modelo de observação da linha, a técnica proposta para localização de faltas utiliza-se dos fasores de tensão e correntes retornados das PMUs. O algoritmo apresentado é aplicado a um sistema contendo três barras, dois geradores, 500kV/800 MVA/ 50Hz e

o resultado é avaliado através de simulação no software PSCAD/EMTDC. O método é considerado simples, mantendo alta performance por possuir sensibilidade, estabilidade e robustez.

No trabalho de Q. JIANG *et al.*, (2012), apresenta-se um método geral para encontrar faltas em grandes redes de transmissão. Medições de tensão são feitas através do cálculo da corrente injetada no ponto de falta partindo da variação de tensão e da impedância no local de qualquer ponto de conexão. O princípio baseia-se no conhecimento das tensões monitoradas pelas PMUs e dos parâmetros de sequência positiva do sistema. Assim, podem ser calculadas duas matrizes de impedância para qualquer ponto: uma em estado normal e outra considerando um evento na rede. São propostos estágios de identificação da região da falta e posteriormente de localização do ponto exato da ocorrência. Para a localização da região suspeita, calcula-se o índice do algoritmo (através das medidas de tensão das PMUs) e todas as barras que retornarem índices com graus muito baixos (próximos de zero) são marcadas como barras integrantes da zona da falta, por consequência, as linhas que conectam essas barras constituem a região da falta. A localização exata da ocorrência, segue o mesmo algoritmo, mas ao invés de ser aplicado às barras, a aplicação para cálculo do índice ocorre em todas as linhas pertencentes à zona selecionada. O intuito do fluxo proposto é poupar trabalho computacional, dividindo em dois estágios, a resposta se torna mais rápida do que seria caso houvesse apenas o passo de cálculo do índice em todas as linhas de uma grande rede de transmissão. Além disso, um método de implementação ótima dos PMUs ao longo da rede também é aprofundado no trabalho, sendo baseado em três regras para colocação das unidades na rede: deve haver pelo menos duas PMUs na rede; todos os terminais da linha de transmissão devem estar direta ou indiretamente ligados a alguma PMU; restrição para circuitos em anel (não radiais). Ao final do documento, são relatados estudos de casos para validação do modelo proposto. Foram utilizados três sistemas para estudo: o *IEEE 39-bus system*, o *ZJP 76-bus system* e o *ZJP 543-bus system*. As simulações utilizaram-se do software *power system analysis software package* (PSASP) e os resultados confirmam a precisão do modelo, afirmando a confiabilidade para localização de faltas.

Tocando na importância de redes *self healing*, e como a localização das contingências dentro do menor intervalo de tempo possível é parte crítica dessa operação, o trabalho de P Gopakumar *et al.*, (2014), aborda a questão utilizando os

PMUs para localizar de forma rápida e precisa as faltas em qualquer ponto das linhas de transmissão do sistema elétrico de potência. Para a detecção em tempo real, utilizam-se os fasores de tensão monitorados pelas PMUs colocadas nas barras do sistema utilizado como exemplo (WSCC-9). O método busca encontrar o fasor equivalente de tensão em qualquer uma das barras. Através da análise de frequência do fasor equivalente de tensão, pode-se identificar a barra mãe do ramo de ocorrência (barra conectada diretamente ao local de incidência da falta). Após discriminado o ramo de ocorrência, chega-se à etapa final de efetivamente localizar a falta a partir da barra mãe. Para isso, o método propõe a análise do outro fasor equivalente: corrente. O sistema de barras *IEEE-14* é simulado através do software MATLAB/SIMULINK e atinge-se o resultado de identificação e localização da falta. O sistema foi escolhido por se assemelhar ao *WSCC-9* apresentado anteriormente. É importante notar que o modelo se baseia na presença de PMUs em todas as barras do sistema estudado.

O trabalho de A. Ghaderi *et al.*, (2016) trata sobre a localização das faltas de alta impedância (do inglês *HIF*), que são as ocorrências de condutores que se rompem e tocam galhos de árvores ou o solo, formando um curto-circuito fase-terra. As HIFs possuem uma característica única no que diz respeito a sua localização pelo fato de não ocasionarem variações nos parâmetros clássicos de medição: tensão e corrente. No entanto, podem ser identificadas da mesma forma, contanto que o processamento de sinal esteja ajustado para tal. Assim sendo, existem três principais técnicas a serem utilizadas na identificação das faltas de alta impedância: impedância, *traveling wave* e comunicação. O artigo classifica as diferentes formas de ocorrência e suas especificidades e cita as PMUs como a inserção da tecnologia na identificação e atuação sobre distúrbios para aumento do controle dos sistemas de potência. A utilização das medições sincrofasoriais deve melhorar o processo de tomada de decisão na ocorrência de eventos, fornecendo uma alta taxa de dados sobre o comportamento ao longo de diferentes setores da rede.

O aspecto da proteção dos sistemas elétricos é alinhado com o da localização de distúrbios e controle de sistemas de grande porte. O trabalho de M. Pignati *et al.*, (2017) propõe um reconhecimento instantâneo utilizando a base de dados alimentada pelas PMUs distribuídos ao longo da rede, identificando a linha da ocorrência. O modelo utiliza as medidas das PMUs para monitorar valores de tensão e corrente para os cálculos das matrizes do algoritmo. Tendo PMUs em todas as barras e conhecendo os parâmetros da linha pode-se calcular os resíduos utilizados para localização da

falta. O sistema simulado através dos softwares *SimPowerSystem* e *OpalRT RTS* é o caso real de 18 barras, 10 kV, trifásico operado pela Alliander na Holanda. Todas as 18 barras possuem uma PMU equipada medindo corrente e tensão. Os resultados do modelo proposto são analisados através da simulação de uma rede de distribuição ativa real juntamente com um sistema baseado no monitoramento com unidades de medida sincrofasorial. São levados em conta faltas de alta impedância, diferentes simetrias de falta (fase-terra à trifásica), em diferentes pontos da linha, rede operada com ou sem neutro aterrado, diferentes condições de operação e geração distribuída. Através do resultado das simulações, pôde-se concluir que com a comparação da estimação de estado em tempo real em diferentes pontos é possível localizar diferentes tipos de falta de forma precisa e confiável independente das características de carga/geração da rede, o que possibilita o trabalho na presença de geração distribuída.

Outro enfoque para a problemática da localização dos distúrbios é a previsão dos mesmos. M. Wanik *et al.*, (2019) tocam na questão e reconhecem que além de serem muito efetivos na detecção das ocorrências em tempo real, a aplicação de modelos adequados pode não apenas classificá-las como também prever falhas no sistema. A utilização do abundante fluxo de dados gerados pelas PMUs instaladas na rede pode viabilizar a classificação e previsão das faltas tanto monofásicas quanto trifásicas. O objetivo do modelo é localizar e prever faltas através da análise dos dados extraídos das PMUs instaladas na rede. O processo atravessa três etapas: detecção da localização da PMU, detecção do tipo de falta, previsão do tipo de falta. Através de simulação (*OPAL-RT eMegasim PowerGrid Real-Time Digital Simulator*) dos resultados, pode-se inferir que o modelo é aplicável também a outros tipos de contingência, sendo possível generalizar a solução apresentada. A alta taxa de dados fornecida pelas PMUs permite localizar e prever faltas na rede monitorada utilizando modelos computacionais e algoritmos com base em *machine learning*. Os resultados mostram que é confiável a verificação apresentada para localização PMU e detecção e previsão de faltas. Tipos específicos de falta foram trabalhados e podem ser considerados de forma confiável (trifásico e fase-terra) na aplicação do método.

### 3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O estado da arte no que diz respeito as unidades de medição sincrofasoriais confirma que a tecnologia é algo moderno e presente entre a comunidade científica internacional. Esses dispositivos são capazes de gerar uma enorme quantidade de dados (um a cada ciclo), possibilitando o acompanhamento dos sistemas elétricos de potência em tempo real.

O controle de sistemas de grande porte requer o monitoramento mais aprofundado possível, o que se aplica também ao enfoque deste trabalho: a localização de distúrbios nas linhas de transmissão de potência. O estado da arte aponta para o aumento da precisão e da eficiência utilizando PMUs na rede para identificar a origem das ocorrências na linha.

Notou-se também a aplicabilidade do tema em sistemas de distribuição, que fogem do escopo deste trabalho, mas são pertinentes para estudos futuros. Sabendo que a geração distribuída será um fator cada vez mais proeminente, os sistemas de distribuição terão fluxo de potência bidirecional e as novas formas de monitoramento e proteção para o controle dessas redes, poderão se utilizar do mesmo conceito aqui apresentado.

Os artigos concentram-se na apresentação de diferentes métodos para classificar e localizar diferentes tipos de falta em diferentes tipos de sistema. As simulações computacionais sempre aparecem como forma de validação dos métodos propostos e é usual utilizar um sistema de barras real para estudo de caso.

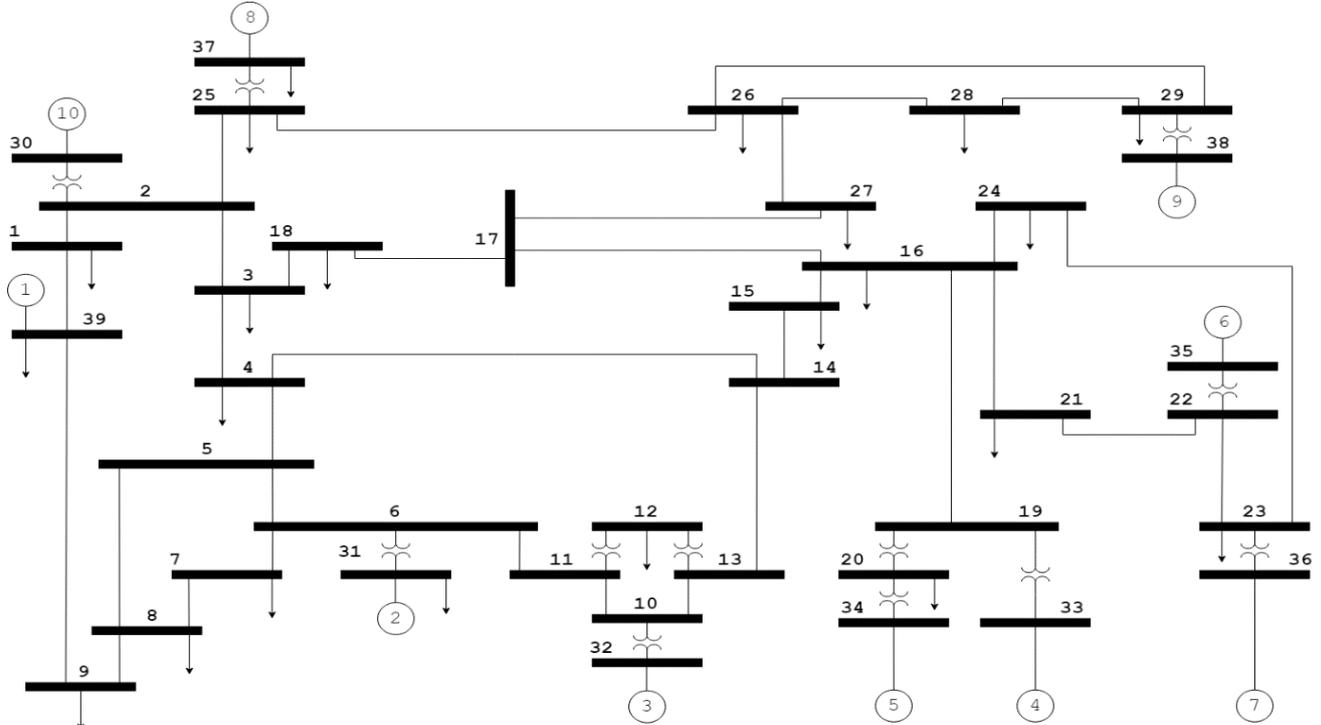
## 4 ESTADO DA ARTE

### 4.1 MATERIAIS

#### 4.1.1 *New England Power System*

O sistema real a ser utilizado é o modelo de New England com 39 barras com informações e resultados já desenvolvidos que são disponibilizados pelo IEEE com o intuito de possibilitar simulações de situações em sistema elétrico real. A topologia do sistema está demonstrada na figura 3.

FIGURA 3 – TOPOLOGIA DO SISTEMA DE 39 BARRA DE NEW ENGLAND



FONTE: Os autores. (2019)

Por se tratar de um sistema real, ele já apresenta PMUs instaladas o que torna ainda mais atrativo para realizar as simulações com ele. Outro ponto sobre o sistema é que o IEEE fornece todas as características de geradores, das linhas e das barras. O resumo das características do sistema está disposto na tabela 8.

TABELA 8 – RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE 39 BARRAS DE NEW ENGLAND

39-Bus New England Power System		
Item	Quantidade	Potência Total [MW]
Unidades Geradoras	10	7367(6298)
Cargas	21	6254
Transformadores	12	-
Linhas	46	-
Áreas	3	-
Linhas de interconexão	6	720

FONTE: Os autores (2019)

Quanto as características específicas dos geradores, dos transformadores, das linhas, das cargas e das barras o IEEE fornece tabelas com todas as componentes necessárias para realizar as simulações em regime transitório. Estes valores estão dispostos nas tabelas 9, 10, 11 e 12.

TABELA 9 – CARACTERÍSTICAS DOS GERADORES DO SISTEMA DE 39 BARRAS DE NEW ENGLAND

Número do gerador	$H$	$R_a$	$x'_d$	$x'_q$	$x_d$	$x_q$	$T'_{do}$	$T'_{qo}$	$x_l$
1	500	0	0.006	0.008	0.02	0.019	7	0.7	0.003
2	30.3	0	0.0697	0.17	0.295	0.282	6.56	1.5	0.035
3	35.8	0	0.0531	0.0876	0.2495	0.237	5.7	1.5	0.0304
4	28.6	0	0.0436	0.166	0.262	0.258	5.69	1.5	0.0295
5	26	0	0.132	0.166	0.67	0.62	5.4	0.44	0.054
6	34.8	0	0.05	0.0814	0.254	0.241	7.3	0.4	0.0224
7	26.4	0	0.049	0.186	0.295	0.292	5.66	1.5	0.0322
8	24.3	0	0.057	0.0911	0.29	0.28	6.7	0.41	0.028
9	34.5	0	0.057	0.0587	0.2106	0.205	4.79	1.96	0.0298
10	42	0	0.031	0.008	0.1	0.069	10.2	0	0.0125

FONTE: IEEE (2013)

TABELA 10 – CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS E TRANSFORMADORES DO SISTEMA DE 39 BARRAS DE NEW ENGLAND

Linhas					Transformadores	
Da barra	Para barra	Resistência	Reatância	Carga	Magnitude	Angulo
1	2	0.0035	0.0411	0.6987	-	-
1	39	0.001	0.025	0.75	-	-
2	3	0.0013	0.0151	0.2572	-	-
2	25	0.007	0.0086	0.146	-	-
3	4	0.0013	0.0213	0.2214	-	-

Linhas					Transformadores	
Da barra	Para barra	Resistência	Reatância	Carga	Magnitude	Angulo
3	18	0.0011	0.0133	0.2138	-	-
4	5	0.0008	0.0128	0.1342	-	-
4	14	0.0008	0.0129	0.1382	-	-
5	6	0.0002	0.0026	0.0434	-	-
5	8	0.0008	0.0112	0.1476	-	-
6	7	0.0006	0.0092	0.113	-	-
6	11	0.0007	0.0082	0.1389	-	-
7	8	0.0004	0.0046	0.078	-	-
8	9	0.0023	0.0363	0.3804	-	-
9	39	0.001	0.025	1.2	-	-
10	11	0.0004	0.0043	0.0729	-	-
10	13	0.0004	0.0043	0.0729	-	-
13	14	0.0009	0.0101	0.1723	-	-
14	15	0.0018	0.0217	0.366	-	-
15	16	0.0009	0.0094	0.171	-	-
16	17	0.0007	0.0089	0.1342	-	-
16	19	0.0016	0.0195	0.304	-	-
16	21	0.0008	0.0135	0.2548	-	-
16	24	0.0003	0.0059	0.068	-	-
17	18	0.0007	0.0082	0.1319	-	-
17	27	0.0013	0.0173	0.3216	-	-
21	22	0.0008	0.014	0.2565	-	-
22	23	0.0006	0.0096	0.1846	-	-
23	24	0.0022	0.035	0.361	-	-
25	26	0.0032	0.0323	0.513	-	-
26	27	0.0014	0.0147	0.2396	-	-
26	28	0.0043	0.0474	0.7802	-	-
26	29	0.0057	0.0625	1.029	-	-
28	29	0.0014	0.0151	0.249	-	-
12	11	0.0016	0.0435	0	1.006	0
12	13	0.0016	0.0435	0	1.006	0
6	31	0	0.025	0	1.07	0
10	32	0	0.02	0	1.07	0
19	33	0.0007	0.0142	0	1.07	0
20	34	0.0009	0.018	0	1.009	0
22	35	0	0.0143	0	1.025	0
23	36	0.0005	0.0272	0	1	0
25	37	0.0006	0.0232	0	1.025	0
2	30	0	0.0181	0	1.025	0
29	38	0.0008	0.0156	0	1.025	0
19	20	0.0007	0.0138	0	1.06	0

FONTE: IEEE (2013)

TABELA 11 – CARACTERÍSTICAS DAS BARRAS DO SISTEMA DE 39 BARRAS DE NEW ENGLAND

Barra	Tipo de barra	Tensão	Carga		Gerador		
		[pu]	P [MW]	Q [Mvar]	P [MW]	Q [Mvar]	Núm. Do gerador
1	PQ	-	0	0	0	0	-
2	PQ	-	0	0	0	0	-
3	PQ	-	322	2,4	0	0	-
4	PQ	-	500	184	0	0	-
5	PQ	-	0	0	0	0	-
6	PQ	-	0	0	0	0	-
7	PQ	-	233,8	84	0	0	-
8	PQ	-	522	176	0	0	-
9	PQ	-	0	0	0	0	-
10	PQ	-	0	0	0	0	-
11	PQ	-	0	0	0	0	-
12	PQ	-	7,5	88	0	0	-
13	PQ	-	0	0	0	0	-
14	PQ	-	0	0	0	0	-
15	PQ	-	320	153	0	0	-
16	PQ	-	329	32,3	0	0	-
17	PQ	-	0	0	0	0	-
18	PQ	-	158	30	0	0	-
19	PQ	-	0	0	0	0	-
20	PQ	-	628	103	0	0	-
21	PQ	-	274	115	0	0	-
22	PQ	-	0	0	0	0	-
23	PQ	-	247,5	84,6	0	0	-
24	PQ	-	308,6	-92	0	0	-
25	PQ	-	224	47,2	0	0	-
26	PQ	-	139	17	0	0	-
27	PQ	-	281	75,5	0	0	-
28	PQ	-	206	27,6	0	0	-
29	PQ	-	283,5	26,9	0	0	-
30	PV	1,0475	0	0	250	-	Gen10
31	PV	0,982	9,2	4,6	-	-	Gen2
32	PV	0,9831	0	0	650	-	Gen3
33	PV	0,9972	0	0	632	-	Gen4
34	PV	1,0123	0	0	508	-	Gen5
35	PV	1,0493	0	0	650	-	Gen6
36	PV	1,0635	0	0	560	-	Gen7
37	PV	1,0278	0	0	540	-	Gen8
38	PV	1,0265	0	0	830	-	Gen9
39	PV	1,03	1104	250	1000	-	Gen1

FONTES: IEEE (2013)

TABELA 12 – CARACTERÍSTICAS DAS CARGAS DO SISTEMA DE 39 BARRAS DE NEW ENGLAND

Barra	Carga	
	P [pu]	Q [pu]
1	0.000	0.000
2	0.000	0.000
3	3.220	0.024
4	5.000	1.840
5	0.000	0.000
6	0.000	0.000
7	2.338	0.840
8	5.220	1.760
9	0.000	0.000
10	0.000	0.000
11	0.000	0.000
12	0.075	0.880
13	0.000	0.000
14	0.000	0.000
15	3.200	1.530
16	3.290	0.323
17	0.000	0.000
18	1.580	0.300
19	0.000	0.000
20	6.280	1.030
21	2.740	1.150
22	0.000	0.000
23	2.475	0.846
24	3.086	-0,92
25	2.240	0.472
26	1.390	0.170
27	2.810	0.755
28	2.060	0.276
29	2.835	0.269
31	0.092	0.046
39	11.040	2.500

FONTE: IEEE (2013)

Outro dado fornecido pelo IEEE é a resolução do fluxo de carga que é necessário para realizar a simulação em regime transitório, com isso, os resultados do fluxo de carga estão dispostos na tabela 13.

TABELA 13 – RESULTADOS DO FLUXO DE CARGA

Núm. Barra	Tensão [pu]	Ângulo [graus]	Barra		Carga		Gerador		
			P [MW]	Q [Mvar]	P [MW]	Q [Mvar]	P [MW]	Q [Mvar]	Núm.
1	1,0474	-8,44	0	0	0	0	-	-	-
2	1,0487	-5,75	0	0	0	0	-	-	-
3	1,302	-8,60	-322	-2,4	-322	-2,4	-	-	-
4	1,0039	-9,61	-500	-184	-500	-184	-	-	-
5	1,0053	-8,61	0	0	0	0	-	-	-
6	1,0077	-7,95	0	0	0	0	-	-	-
7	0,997	-10,12	-233,8	-84	-233,8	-84	-	-	-
8	0,996	-10,62	-522	-176	-522	-176	-	-	-
9	1,0282	-10,32	0	0	0	0	-	-	-
10	1,0172	-5,43	0	0	0	0	-	-	-
11	1,0127	-6,28	0	0	0	0	-	-	-
12	1,0002	-6,24	-7,5	-88	-7,5	-88	-	-	-
13	1,0143	-6,10	0	0	0	0	-	-	-
14	1,0117	-7,66	0	0	0	0	-	-	-
15	1,0154	-7,74	-320	-153	-320	-153	-	-	-
16	1,0318	-6,19	-329	-32,3	-329	-32,3	-	-	-
17	1,0336	-7,30	0	0	0	0	-	-	-
18	1,0309	-8,22	-158	-30	-158	-30	-	-	-
19	1,0499	-1,02	0	0	0	0	-	-	-
20	0,9912	-2,01	-628	-103	-628	-103	-	-	-
21	1,0318	-3,78	-274	-115	-274	-115	-	-	-
22	1,0498	0,67	0	0	0	0	-	-	-
23	1,0448	0,47	-247,5	-84,6	-247,5	-84,6	-	-	-
24	1,0373	-6,07	-308,6	92,2	-308,6	92,2	-	-	-
25	1,0576	-4,36	-224	-47,2	-224	-47,2	-	-	-
26	1,0521	-5,53	-139	-17	-139	-17	-	-	-
27	1,0377	-7,50	-281	-75,5	-281	-75,5	-	-	-
28	1,0501	-2,01	-206	-27,6	-206	-27,6	-	-	-
29	1,0499	0,74	-283,5	-26,9	-283,5	-26,9	-	-	-
30	1,0475	-3,33	250	146,16	-	-	250	146,16	10
31	0,982	0,00	511,61	193,65	-9,2	-4,6	520,81	198,25	2
32	0,9831	2,57	650	205,14	-	-	650	205,14	3
33	0,9972	4,19	632	109,91	-	-	632	109,91	4
34	1,0123	3,17	508	165,76	-	-	508	165,76	5
35	1,0493	5,63	650	212,41	-	-	650	212,41	6
36	1,0635	8,32	560	101,17	-	-	560	101,17	7
37	1,0278	2,42	540	0,44	-	-	540	0,44	8
38	1,0265	7,81	830	22,84	-	-	830	22,84	9
39	1,03	-10,05	-104	-161,7	-1104	-250	1000	88,28	1

FONTE: IEEE (2013)

Vale ressaltar que os resultados fornecidos pelo IEEE, na resolução do fluxo de carga, não apresentam as potências ativas e reativas em pu, portanto, é necessário realizar a transformação de base para utilizar na simulação em regime transitório. No caso deste projeto a base escolhida foi de 100MVA e a frequência base, ou de rede, foi de 60 Hz.

#### 4.1.2 Matlab

O Matlab é um software focado em cálculos numéricos de forma interativa, onde possui capacidades de manipulação de matrizes, plotagem de funções e dados, implementação de algoritmos, criação de interfaces e interações com outras linguagens de programação. Dentro do Matlab, também existe um pacote de softwares que ampliam as operações que podem ser realizadas, bem como *scripts* desenvolvidos por outros usuários que podem ser integrados ao Matlab para desenvolver funções específicas conhecidos como *toolbox*.

Quando inicializado, o usuário se depara com uma janela dividida em outras 3 janelas, onde a principal é a janela de comando que é usada de forma interativa. A outra janela seria a *Workspace* que mostra as variáveis que foram criadas e seus respectivos valores. E por último a janela da pasta atual indica onde serão salvos os arquivos lidos e criados pelo Matlab. Vale ressaltar que o usuário pode personalizar as janelas que serão exibidas de forma a otimizar a utilização do software, como no caso do usuário precisa executar um *script* e alterá-lo para é aberta uma janela de exibição deste *script*.

Além de ser um software, o Matlab é considerado uma linguagem de programação voltada para matemática e por ter essa especificidade se torna uma ferramenta otimizada quando é necessário a resolução de problemas numéricos. Esta facilidade está relacionada aos nomes das funções que são familiares com as funções matemáticas, e por ser amplamente utilizada por cientistas e engenheiros, o Matlab possui uma ampla biblioteca de códigos que desempenham funções que não são padrões do programa.

### 4.1.3 Power System Toolbox

A Power System Toolbox (PST), é uma ferramenta implementada ao Matlab que possibilita realizar simulações de fluxo de carga e simulações dinâmicas de sistemas de potência. E de acordo com seu manual, para o fluxo de carga, a PST necessita que a estrutura do sistema seja especificada junto com as potências ativas e reativas dos geradores, assim como as potências ativas e reativas das cargas. Essa necessidade está relacionada com os cálculos algébricos não lineares que para apresentar as magnitudes e ângulos, é indispensável as especificações das cargas. O fluxo de carga é também o ponto inicial para realizar as simulações dinâmicas.

Quando se trata das simulações dinâmicas a PST fornece modelos de máquinas e sistemas de controle para realizar as simulações de estabilidade transitória de um sistema de energia. Estes modelos dinâmicos são fornecidos em códigos de Matlab possibilitando realizar as análises em regime transitório sem a necessidade de adicionar novos modelos. Os códigos apresentam uma estrutura que segue uma série de regras, mas que podem ser replicadas para outros modelos, ou seja, o código pode ser personalizado para rodar outro sistema de potência.

## 4.2 MÉTODOS

Em um primeiro momento para entender como deveria ser realizado o projeto, foi necessário realizar a simulação de um caso base fornecido pela PST, que elucidou como os dados do sistema de New England devem estar dispostos em um script para conseguir simular. Além de disponibilizar o caso base, a ferramenta também fornece o script para realizar a simulação em regime transitório, com isso, é possível simular o caso base, para estudar e entender como deve ser implementado para o caso de New England.

No caso base também foi analisado que para reproduzir uma falta é necessário adicionar uma matriz, fornecida pela própria PST, que gera uma falta no sistema. Dentro desta matriz é possível definir o início da falta, a duração e a causa da falta. No caso do sistema de New England a barra escolhida para receber a falta foi a 18 com início em 0.1s e com duração de 0.05s. A descrição da matriz está no quadro 1.

QUADRO 1 - MATRIZ FORNECIDA PELA PST PARA SIMULAR FALTA

Tempo da falta (s)	Número da barra com falta	Número da barra distante	Impedância de falha de sequência zero (pu)	Impedância de falha de sequência negativa (pu)	Tipo de Falta	Intervalo de tempo para o período de falha (s)
Tempo de início	0	0	0	0	0	Início do intervalo de tempo
Instante de ocorrência da falta	Barra com falta	Barra distante	0	0	0 - Falta Trifásica; 1 - Falta Fase-Terra; 2 - Falta Fase-Fase-Terra; 3 - Falta Fase-Fase; 4 - Perda de linha sem falta; 5 - Perda de carga; 6 - Sem falta.	Falta no intervalo de tempo
Início da falta	0	0	0	0	0	Intervalo de tempo
Fim da Falta	0	0	0	0	0	Intervalo de tempo
Tempo para trocar o intervalo de tempo						Intervalo de tempo
Fim do tempo						

FONTE: Power System Toolbox (1999)

Para realizar a simulação da falta, deve-se preencher a matriz com os valores desejados. Vale ressaltar que através da matriz do quadro 1, é possível simular o sistema de medição sincrofasorial já que a matriz apresenta um campo que representa a taxa de amostragem da simulação que seria “Intervalo de tempo para o período de falha”. De modo a emular o formato dos dados de um PMU, considerou-se uma taxa de amostragem de 10 amostras por ciclo e com frequência de rede de 60 Hz. Assim sendo, tem-se um período de amostragem dada pela equação 1.

$$T_{PMU} = \frac{1}{N_{sfrede}} \therefore T_{PMU} = 1,667 \text{ ms} \quad (1)$$

Onde:

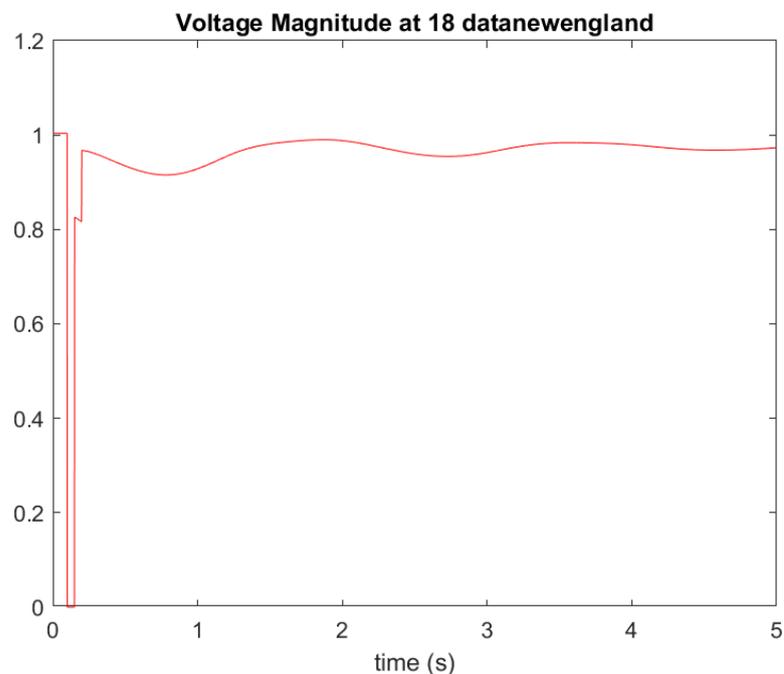
$T_{PMU}$  – Período de amostragem da PMU;

$N_s$  – Número de amostras por ciclo;

$f_{rede}$  – frequência da rede;

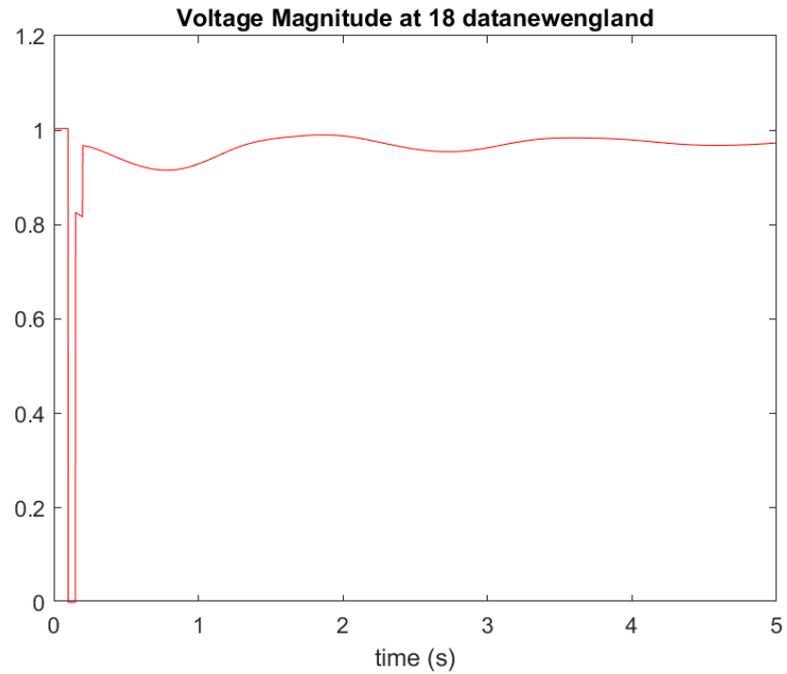
No segundo momento, para realizar a localização de distúrbios, foram necessários realizar simulações prévias, no regime transitório, que geram dados que representam a ocorrência de uma falta no sistema devido algum curto-circuito, podendo ser: trifásico, fase-fase, fase-terra, fase-fase-terra, além de uma falta gerada pela perda de carga. Nas situações de curto-circuito, percebe-se que as barras com faltas apresentam uma queda de tensão próxima de 0 e já na situação de perda de carga, nota-se a elevação da tensão. Outra questão que é analisada e precisa ser ressaltada, é que todas as barras apresentam leituras, isso significa que na analogia com o mundo real que todas barras possuem PMUs implementadas para realizar estas medidas. As simulações que possibilitaram realizar as análises estão dispostas nas figuras 1, 2 ,3,4 e 5.

FIGURA 4 – SIMULAÇÃO EM REGIME TRANSITÓRIO COM FALTA NA BARRA 18 COM CURTO TRIFÁSICO



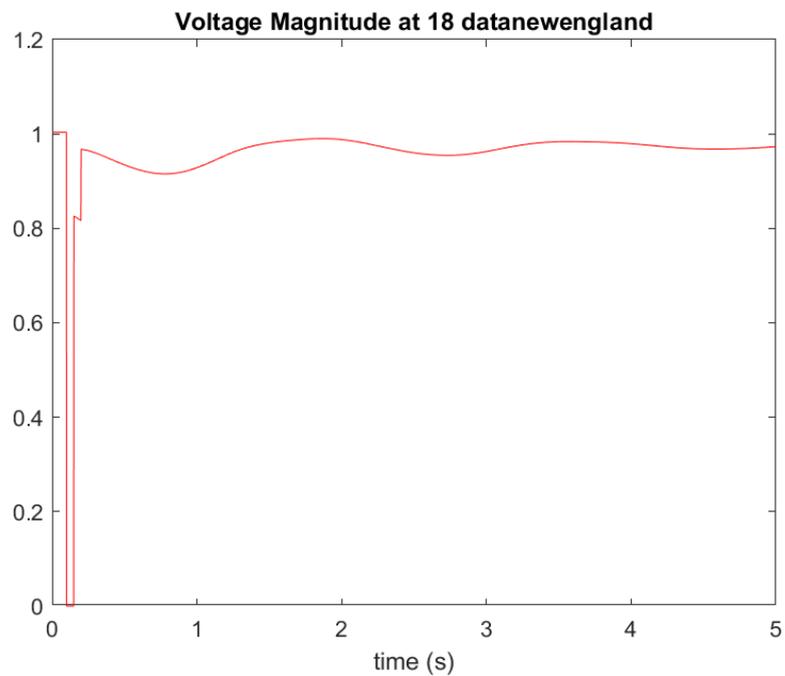
FONTE: Os autores (2019)

FIGURA 5 – SIMULAÇÃO EM REGIME TRANSITÓRIO COM FALTA NA BARRA 18 COM CURTO  
FASE-TERRA



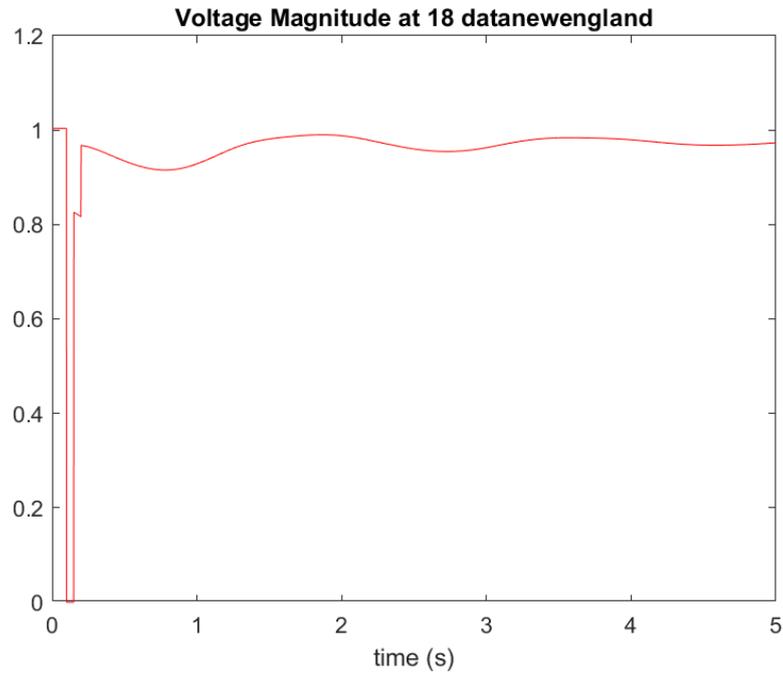
FONTE: Os autores (2019)

FIGURA 6 – SIMULAÇÃO EM REGIME TRANSITÓRIO COM FALTA NA BARRA 18 COM CURTO  
FASE-FASE



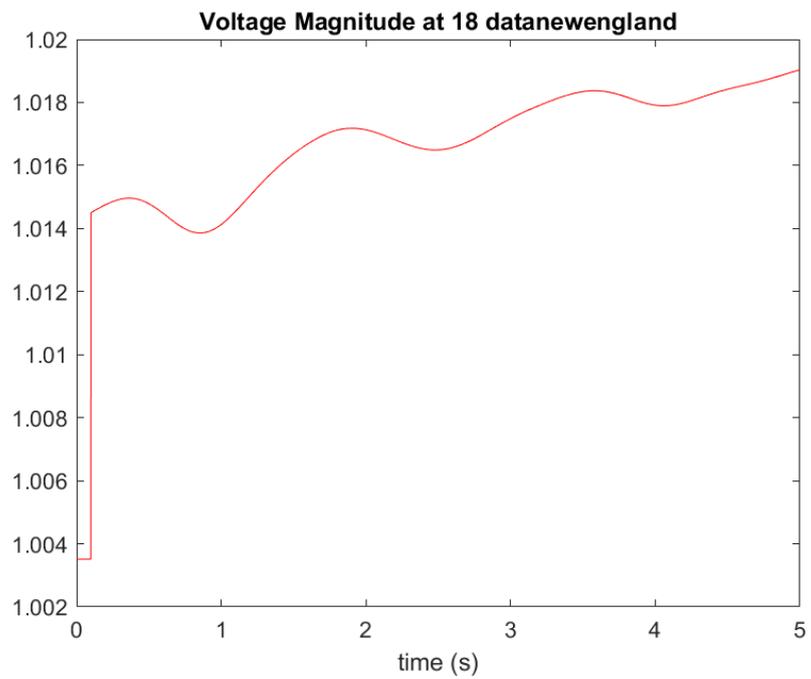
FONTE: Os autores (2019)

FIGURA 7 – SIMULAÇÃO EM REGIME TRANSITÓRIO COM FALTA NA BARRA 18 COM CURTO  
FASE-FASE-TERRA



FONTE: Os autores (2019)

FIGURA 8 – SIMULAÇÃO EM REGIME TRANSITÓRIO COM FALTA NA BARRA 18 COM PERDA  
DE CARGA



FONTE: Os autores (2019)

No terceiro momento, com todos os dados de tensões a cada instante de tempo, é possível desenvolver um algoritmo para realizar a leitura desses dados e retornar onde ocorreu a falha, quando ocorreu e a sua duração. Portanto, cada tipo de falha apresenta um algoritmo para realizar a localização e como os dados variam conforme a causa da falha, é necessário adequar a sensibilidade do algoritmo em relação aos dados. Para os casos de curto-circuito os scripts estão dispostos nos quadros 1, 2, 3 e 4.

QUADRO 1 - ALGORITMO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTA COM CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO

```

%% SCRIPT PARA AVALIAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DE FALTA EM BARRA
% Desenvolvido por Mateus e Ciro
% Orientação Prof. Aoki
% Premissa: Sistema completamente monitorado por PMUs

%% CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO
load('Result_neDataTrifasico.mat')
[linhas,colunas]=size(bus_v);
for a=1:colunas
    Vmin=min(abs(bus_v(1:end-1,a)));
    if Vmin<1e-5
        bus_fault=find(abs(bus_v(1:end-1,a))==Vmin)
        a_fault=a
    end
end
end

```

FONTE: Os autores (2019)

QUADRO 2 - ALGORITMO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTA COM CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA

```

%% SCRIPT PARA AVALIAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DE FALTA EM BARRA
% Desenvolvido por Mateus e Ciro
% Orientação Prof. Aoki
% Premissa: Sistema completamente monitorado por PMUs

%% CURTO-CIRCUITO LINE TO GROUND
load('Result_neDataLineGround.mat')
[linhas,colunas]=size(bus_v);
for a=1:colunas
    Vmin=min(abs(bus_v(1:end-1,a)));
    if Vmin<1e-5
        bus_fault=find(abs(bus_v(1:end-1,a))==Vmin)
        a_fault=a
    end
end
end

```

FONTE: Os autores (2019)

QUADRO 3 - ALGORITMO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTA COM CURTO-CIRCUITO FASE-FASE

```

%% SCRIPT PARA AVALIAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DE FALTA EM BARRA
% Desenvolvido por Mateus e Ciro
% Orientação Prof. Aoki
% Premissa: Sistema completamente monitorado por PMUs

%% CURTO-CIRCUITO LINE-LINE
load('Result_neDataLineLine.mat')
[linhas,colunas]=size(bus_v);
for a=1:colunas
    Vmin=min(abs(bus_v(1:end-1,a)));
    if Vmin<1e-5
        bus_fault=find(abs(bus_v(1:end-1,a))==Vmin)
        a_fault=a
    end
end
end

```

FONTE: Os autores (2019)

QUADRO 4 - ALGORITMO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTA COM CURTO-CIRCUITO FASE-FASE-TERRA

```

%% SCRIPT PARA AVALIAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DE FALTA EM BARRA
% Desenvolvido por Mateus e Ciro
% Orientação Prof. Aoki
% Premissa: Sistema completamente monitorado por PMUs

%% CURTO-CIRCUITO LINE-LINE-GROUND
load('Result_neDataLineLineGround.mat')
[linhas,colunas]=size(bus_v);
for a=1:colunas
    Vmin=min(abs(bus_v(1:end-1,a)));
    if Vmin<1e-5
        bus_fault=find(abs(bus_v(1:end-1,a))==Vmin)
        a_fault=a
    end
end
end

```

FONTE: Os autores (2019)

Nos casos de curto-circuito, a sensibilidade de  $1 \times 10^{-5}$  foi definida pela análise dos dados no momento em que ocorre a falta, onde o valor coincidiu para todos os casos falta devido ao curto-circuito. Quando se trata de uma falta causada pela perda de carga, é necessário realizar um ajuste no algoritmo e na sensibilidade, devido a diferença gerada pelos dados já que com uma perda de carga a tensão tende a aumentar. Para sensibilidade da perda de carga, foi necessário realizar a razão entre o valor em que ocorre a falta com o anterior a ocorrência da falta, resultando em 1,01. No qual o algoritmo está apresentado no quadro 5.

## QUADRO 5 - ALGORITMO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTA COM PERDA DE CARGA

```
%% SCRIPT PARA AVALIAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DE FALTA EM BARRA
% Desenvolvido por Mateus e Ciro
% Orientação Prof. Aoki
% Premissa: Sistema completamente monitorado por PMUs

%% PERDA DE CARGA
load('Result_neDataLossOfLoadVeri.mat')
[linhas,colunas]=size(bus_v);
for t=2:colunas
    DeltaVmax=max(abs(bus_v(1:end-1,t))./abs(bus_v(1:end-1,t-1)));
    if DeltaVmax>1.01
        bus_fault=find(abs(bus_v(1:end-1,t))./abs(bus_v(1:end-1,t-
1))>=DeltaVmax)
        t_fault=t
    end
end
end
```

FONTE: Os autores (2019)

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a execução do script nós temos a indicação de onde ocorreu a falta assim como em qual amostra ocorreu a falta. Pelo fato do algoritmo determinar a apenas a amostra, para saber qual seria o início e a duração em segundos é necessário realizar a conversão de amostra para segundos.

A relação é que uma amostra equivale a 0,0017s, que é a emulação da PMU, onde esta conversão foi aplicada em todas as simulações para conseguir validar os resultados obtidos.

TABELA 14 – RESULTADOS OBTIDOS PARA SIMULAÇÃO DO CURTO TRIFÁSICO

Curto Circuito Trifásico				
Barra onde ocorreu	Início em amostra	Duração em amostras	Início em segundos	Duração em segundos
18	60	28	0,10	0,05

FONTE: Os autores (2019)

Na tabela 14 o resultado indica que o algoritmo apresenta a localização da barra em que sofreu com o curto-circuito trifásico responsável pela falta no sistema. Além da localização, também o início e duração da falta correspondem aos valores pré-estabelecidos.

TABELA 15 – RESULTADOS OBTIDOS PARA SIMULAÇÃO DO CURTO FASE-TERRA

Curto Circuito Linha-Terra				
Barra onde ocorreu	Início na amostra	Duração em amostras	Início em segundos	Duração em segundos
18	60	28	0,10	0,05

FONTE: Os autores (2019)

Os resultados obtidos pelo algoritmo para o curto-circuito entre linha e terra indicados na tabela 15, mostram-se fidedignos com os valores que foram pré-estabelecidos.

TABELA 16 – RESULTADOS OBTIDOS PARA SIMULAÇÃO COM CURTO FASE-FASE

Curto Circuito Linha-Linha				
Barra onde ocorreu	Início na amostra	Duração em amostras	Início em segundos	Duração em segundos
18	60	28	0,10	0,05

FONTE: Os autores (2019)

Na tabela 16 os valores obtidos pelo algoritmo para o curto circuito entre linha-linha apresentaram os resultados esperados já que os valores estão de acordo com o que foi estabelecido previamente.

TABELA 17– RESULTADOS OBTIDOS PARA SIMULAÇÃO DO CURTO FASE-FASE-TERRA

Curto Circuito Linha-Linha-Terra				
Barra onde ocorreu	Início na amostra	Duração em amostras	Início em segundos	Duração em segundos
18	60	28	0,10	0,05

FONTE: Os autores (2019)

Assim como nos outros casos, os resultados da tabela 17 que foram obtidos pelo algoritmo do curto circuito entre linha-linha-terra são os valores esperados, tanto para localização da barra quanto para início da falta e duração da falta.

TABELA 18 – RESULTADOS OBTIDOS PARA SIMULAÇÃO COM PERDA DE CARGA

Perda de Carga		
Barra onde ocorreu	Início na amostra	Início em segundos
18	60	0,05

FONTE: Os autores (2019)

No caso da perda de carga os resultados da tabela 18 estão corretos, mas uma observação é necessária, o algoritmo não é capaz de indicar a duração da falta, apenas o início dela.

Todas as simulações realizadas levam em conta que o sistema em questão, apresenta uma PMU em cada barra, sendo o cenário ideal, mas também um fator teórico limitante para os algoritmos que foram utilizados. Esta limitação se deve pelo fato que com a retirada de uma PMU de qualquer barra do sistema significaria a retirada de uma leitura de dados, dessa forma caso a falta ocorresse nesta barra o algoritmo não seria capaz de realizar a localização do distúrbio e muito menos a mensuração da duração da falta.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho tem o intuito de iniciar o estudo sobre a aplicação de métodos computacionais para realizar simulações de localização de falta de forma simples e replicável.

O objetivo principal foi atingido ao passo que foi possível rodar um sistema elétrico de caso real, o New England de 39 barras, tanto para fluxos de potência em um momento inicial para entender a natureza e comportamento do sistema, quanto para atingir a meta de realizar simulações que retornassem qual barra que sofria uma contingência de qualquer tipo.

É importante levar em consideração que as simulações realizadas no Matlab devem ser analisadas do ponto de vista elétrico pois o software faz apenas conversões matemáticas para suas simulações. Um exemplo é a tentativa de inserir uma falta tendo retirado uma linha do sistema. Do ponto de vista elétrico, isso é possível. No entanto, este é um caso em que o método matemático converge sem reconhecer a inserção da falta, retornando um resultado fisicamente incorreto. Dito isso, os resultados obtidos e analisados estiveram de acordo com o esperado para os casos de interesse, localizações de faltas para o sistema completo e monitorado completamente com PMUs em todas as barras.

As conclusões levam naturalmente às possibilidades de expansão deste trabalho como sugestões de futuras pesquisas.

Um primeiro trabalho poderia ser a localização de faltas não ocorridas em barras, mas sim nas linhas de transmissão. O conceito de ondas viajantes poderia ser aplicado para encontrar a que distância da barra ocorreu a falta. Assim, saber-se-ia o ponto exato de uma falta ocorrida ao longo de qualquer uma das linhas do sistema monitorado.

O próximo passo, seria simular redes com um número ótimo de PMUs instaladas nas barras. Dessa maneira, o monitoramento seria feito e o mesmo resultado atingido, porém com um número menor de unidades instaladas, aumentando a viabilidade econômica da instalação na prática. Seria indicado localizar inicialmente faltas somente nas barras, conforme realizado neste trabalho.

O último passo, que concluiria todo o conceito aqui abordado, seria juntar todas as partes localizando faltas nas barras, ao longo das linhas da transmissão e

com um número ótimo de PMUs instaladas na rede (número de PMUs instaladas menor que número de barras no sistema).

## REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 6023 Informação e documentação - Referências - Elaboração. [s.l: s.n.].
- BHALADHARE, S. B.; TELANG, A. S.; BEDEKAR, P. P. P-V , Q-V Curve – A Novel Approach for Voltage Stability Analysis. National Conference on Innovative Paradigms in Engineering & Technology (NCIPET-2013), p. 31–35, 2013.
- CAI, L.; THORNHILL, N. F.; KUENZEL, S.; PAL, B. C. Wide-Area Monitoring of Power Systems Using Principal Component Analysis and k-Nearest Neighbor Analysis. IEEE Transactions on Power Systems, v. 33, n. 5, p. 4913–4923, 2018.
- CHAKRABORTTY, A.; KHARGONEKAR, P. P. Introduction to wide-area control of power systems. Proceedings of the American Control Conference, p. 6758–6770, 2013.
- CHE WANIK, M. Z.; SANFILIPPO, A.; SINGH, N.; JABBAR, A.; CEN, Z. PMU Analytics for Power Fault Awareness and Prediction. *IEEE Conference on Smart Grids*, p. 1–8, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8784461/>.
- CHOW, J. H.; CHEUNG, K. W. A Toolbox for Power System Dynamics and Control Engineering Education and Research. IEEE Transactions on Power Systems, v. 7, n. 4, p. 1559–1564, 1992.
- CHOW, J.; ROGERS, G. Power System Toolbox. Ontario, 2008. p.1-123. Disponível em: <https://www.ecse.rpi.edu/~chow/PSTMan.pdf> . Acesso em: dia 15/10/19.
- FIGURA 1- [Lopes et al. 2012] Lopes, Y., Frazão, R. H., Molano, D. A., dos Santos, M. A., Calhau, F. G. a., Bastos, C. A. M., Martins, J. S. B., and Fernandes, N. C. (2012). Smart Grids IEC 61850: Novos Desafios em Redes e Telecomunicações para o Sistema Elétrico. In Minicursos do XXX Simposio Brasileiro de Telecomunicações, pages 1–44. (SBrT), Sociedade Brasileira de Telecomunicações, 1 edition.
- FIGURA 2 – Disponível em: [https://www.cemig.com.br/pt-br/A\\_Cemig\\_e\\_o\\_Futuro/sustentabilidade/Recursos\\_Hidricos/PublishingImages/Imagem%20sistema%20interligado.jpg](https://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/sustentabilidade/Recursos_Hidricos/PublishingImages/Imagem%20sistema%20interligado.jpg) , Acesso em: 13/10/19
- GHADERI, A.; GINN, H. L.; MOHAMMADPOUR, H. A. High impedance fault detection: A review. Electric Power Systems Research, v. 143, p. 376–388, 2017. Elsevier. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779616304187>. .
- GOPAKUMAR, P.; REDDY, M. J. B.; MOHANTA, D. K. Transmission line fault detection and localisation methodology using PMU measurements. IET Generation, Transmission and Distribution, v. 9, n. 11, p. 1033–1042, 2015. IET. Disponível em: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-gtd.2014.0788>. .
- [https://pt.wikipedia.org/wiki/Blecaute\\_no\\_Centro-Sul\\_do\\_Brasil\\_em\\_2002](https://pt.wikipedia.org/wiki/Blecaute_no_Centro-Sul_do_Brasil_em_2002)

JIANG, Q.; LI, X.; WANG, B.; WANG, H. PMU-based fault location using voltage measurements in large transmission networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 27, n. 3, p. 1644–1652, 2012. [ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org). Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6218212/>>. .

JIANG, Z.; MIAO, S.; XU, H.; LIU, P.; ZHANG, B. An effective fault location technique for transmission grids using phasor measurement units. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 42, n. 1, p. 653–660, 2012. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061512000750>>. .

KHARGONEKAR, P. P.; DAHLEH, M. A. Advancing systems and control research in the era of ML and AI. *Annual Reviews in Control*, v. 45, p. 1–4, 2018. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2018.04.001>>. .

MOEINI, A.; KAMWA, I.; BRUNELLE, P.; SYBILLE, G. Open data IEEE test systems implemented in SimPowerSystems for education and research in power grid dynamics and control. *Proceedings of the Universities Power Engineering Conference*, v. 2015-Novem, p. 1–6, 2015. IEEE.

MONTICELLI, A. Fluxo de carga em redes de energia elétrica. São Paulo, 1983.

NI, H.; HEYDT, G. T.; MILI, L.; MEMBER, S. Robust Wide Area Control. *Power*, v. 17, n. 4, p. 1123–1131, 2002.

ONS. Submódulo 10.1. Rio de Janeiro, 16/12/2016. p. 1-16. Disponível em: [http://www.ons.org.br/\\_layouts/download.aspx?SourceUrl=http://www.ons.org.br%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2010%2FSubm%C3%B3dulo%2010.1%2FSubm%C3%B3dulo%2010.1%202016.12.pdf](http://www.ons.org.br/_layouts/download.aspx?SourceUrl=http://www.ons.org.br%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2010%2FSubm%C3%B3dulo%2010.1%2FSubm%C3%B3dulo%2010.1%202016.12.pdf) Acesso em: 02/10/19.

ONS. Submódulo 11.8. Rio de Janeiro, 16/12/2016. p. 1-7. Disponível em: [http://www.ons.org.br/\\_layouts/download.aspx?SourceUrl=http://www.ons.org.br%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2011%2FSubm%C3%B3dulo%2011.8%2FSubm%C3%B3dulo%2011.8%202016.12.pdf](http://www.ons.org.br/_layouts/download.aspx?SourceUrl=http://www.ons.org.br%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2011%2FSubm%C3%B3dulo%2011.8%2FSubm%C3%B3dulo%2011.8%202016.12.pdf) Acesso em: 22/09/19.

PIGNATI, M.; ZANNI, L.; ROMANO, P.; CHERKAOUI, R.; PAOLONE, M. Fault Detection and Faulted Line Identification in Active Distribution Networks Using Synchrophasors-Based Real-Time State Estimation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 32, n. 1, p. 381–392, 2017. [ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org). Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7439849/>>. .

SANAD AHMED, A.; ATTIA, M. A.; HAMED, N. M.; ABDELAZIZ, A. Y. Modern optimization algorithms for fault location estimation in power systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, v. 20, n. 5, p. 1475–1485, 2017. Karabuk University. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2017.11.006>>. .

SOUZA, A. R. R. DE et al. Virtual Power Plant Management considering Energy Storage Systems and Multiple Power Sources. *The 8th IFAC Power Plant and Power System Control Symposium. Anais...2012*

UFPR. Manual de normalização de documentos científicos de acordo com as normas da ABNT. [s.l: s.n.].

WILSON, D. H.; HAY, K.; ROGERS, G. J. Dynamic model verification using a continuous modal parameter estimator. 2003 IEEE Bologna PowerTech - Conference Proceedings, v. 2, p. 233–238, 2003.