

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

MAX AUGUSTO PIRES

**DESENVOLVIMENTO DE UM ÍNDICE DE PERFORMANCE PARA ANÁLISE DA
QUALIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA NA INDÚSTRIA**

SÃO LEOPOLDO

2019

MAX AUGUSTO PIRES

**DESENVOLVIMENTO DE UM ÍNDICE DE PERFORMANCE PARA ANÁLISE DA
QUALIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA NA INDÚSTRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, pelo Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Orientador: Prof. José Vicente Canto dos Santos

SÃO LEOPOLDO
2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, pelo apoio incondicional na busca da melhor formação educacional, depositando em mim a confiança de um futuro melhor e a oportunidade que ela não teve.

Agradeço a minha esposa Vanessa, que soube pacientemente dividir com os livros a minha companhia durante vários anos e sempre me apoiar nos momentos de maior dificuldade.

Agradeço ao meu orientador José Vicente Canto dos Santos, pela oportunidade deste trabalho o qual prontamente se disponibilizou a orientação e sempre esteve à disposição para dúvidas e esclarecimentos.

Agradeço à coordenação do projeto em parceria com o IttChip, *Intelligent Factory*. Otimização do Custo Operacional de Fábricas para Microeletrônica via Internet das Coisas (IoT), em especial ao professor Paulo da Silva Pereira pela disponibilização dos dados determinantes para validação deste estudo.

Agradeço também a todos que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho ou para a conclusão do curso.

RESUMO

Este trabalho apresenta a pesquisa, projeto, desenvolvimento e implementação de um índice de performance para análise da condição de fornecimento de energia elétrica com base na tensão da rede e estudo para análise da operacionalidade de uma planta industrial. Com base nos conceitos de análise de segurança e das formulações para cálculo do fluxo de potência em sistemas elétricos de potência, propõem-se um índice de performance para detecção de contingências na rede elétrica de alimentação no que diz respeito ao nível da tensão entregue pela concessionária de energia. Com o advento da indústria 4.0, inúmeros dispositivos estão integrando diferentes níveis de operação nas indústrias para leitura dos mais diversos dados, abrindo espaço para as chamadas fábricas inteligentes. Através de medidas de tensão adquiridas a partir de analisadores instalados em pontos estratégicos de uma rede elétrica industrial, realiza-se um cálculo do índice de performance que relaciona o valor da tensão medida com o valor nominal para medir a distância e então estabelecer limites para a operação adequada da planta. Os resultados obtidos, tanto em testes com dados fictícios como com dados reais, demonstraram o sucesso da proposta inicial.

Palavras-chave: Análise de segurança. Fábrica inteligente. Índice de performance. Indústria 4.0.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Os quatro estágios da revolução industrial.	8
Figura 2: Integração na Indústria 4.0.....	10
Figura 3: Funções de supervisão e controle da rede.	15
Figura 4: Fluxograma da metodologia de trabalho.	24
Figura 5: Localização da medida.....	25
Figura 6: Representação da relação conforme limite.	27
Figura 7: Representação da relação conforme variação.....	29
Figura 8: Recorte do banco de dados das medições recebidas.....	32
Figura 9: Simulação de medidas de tensão.	33
Figura 10: Comparativo gráfico dos índices.	34
Figura 11: Sistema elétrico de entrada da planta.	37
Figura 12: Imagem ilustrativa do analisador fixo MQ700.	40
Figura 13: Imagem ilustrativa do analisador fixo PQ700	42
Figura 14: Organização do grupo de dados – tensões de fase.....	46
Figura 15: Cálculo do IP realizado no MS-Excel®.....	48
Figura 16: Gráfico do IP de LIV4 – Tensões de Fase.	49
Figura 17: Gráfico do IP de LIV4 – Tensões de Linha.....	50
Figura 18: Gráfico do IP de ATE_DIR – Tensões de Linha.....	52
Figura 19: Gráfico do IP de ATE_ESQ – Tensões de Linha.	54
Figura 20: Gráfico do IP de <i>Handler</i> – Tensões de Fase.	55
Figura 21: Gráfico do IP de <i>Handler</i> – Tensões de Linha.	56
Figura 22: Gráfico do IPG.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estados de operação de uma rede elétrica.	17
Tabela 2: Limites de Tensão em Regime Permanente – $V_{NOMINAL}$ 110/220V. ..	24
Tabela 3: Limites de Tensão em Regime Permanente – $V_{NOMINAL}$ 208/120V e 380/220V.	38
Tabela 4: Aplicações e recursos mais comuns em analisadores de energia. ..	41
Tabela 5: Maiores IP da Tensão de Fase no transformador TR4.	51
Tabela 6: Maiores IP da Tensão de Linha no transformador TR4.	51
Tabela 7: Maiores IP da Tensão de Linha dos registros de ATE_DIR.	53
Tabela 8: Maiores IP da Tensão de Linha dos registros de ATE_ESQ.	54
Tabela 9: Maiores IP da Tensão de Fase dos registros de <i>Handler</i>	56
Tabela 10: Maiores IP da Tensão de Linha dos registros de <i>Handler</i>	57
Tabela 11: Exemplo de classificação qualitativa baseada nos limites de tensão.	59
Tabela 12: Classificação do IP pelo valor nominal.	59
Tabela 13: Principais resultados do IP global.	63

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
AS	Análise de segurança
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CPS	<i>Cyber-Physical Systems</i>
CSV	<i>Comma Separated Values</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	Índice de Performance
IPG	Índice de Performance Global
IttChip	Instituto Tecnológico de Semicondutores da Unisinos
RFID	<i>Radio Frequency Identification Tags</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TAP	Transformador com tomada central
TI	Tecnologia da Informação
TL	Tensão de Leitura
ZIP	Formato comum para compactação de arquivos

LISTA DE SIMBOLOS

nm	Quantidade de medidores
nd	Quantidade de IP calculado por medidor
IP	Índice de performance de cada grandeza lida
IP_G	Índice de performance global
IP_I	Índice de performance inferior
IP_S	Índice de performance superior
PI_v	índice de performance para análise de tensão nas barras PQ
V_{Limite}	Valor do limite inferior ou superior de segurança para módulo de tensão
$V_{L_{Máximo}}$	Valor máximo da tensão para classificação precária superior
$V_{L_{Mínimo}}$	Valor mínimo da tensão para classificação precária inferior
V_{Med}	Valor da medida atual de tensão de leitura
V_{Medido}	Valor medido da tensão de leitura
$V_{Nominal}$	Valor da tensão nominal
V_i	módulo da tensão na barra i na situação pós-contingência
V_i^{lim}	limite inferior ou superior de segurança para módulo de tensão na barra i
V	Tensão Elétrica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	4
1.1 Objetivos	5
1.1.1 Objetivo geral.....	5
1.1.2 Objetivos específicos	5
1.2 Justificativa	6
2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	7
2.1 Indústria 4.0	7
2.1.1 <i>Intelligent Factory</i> – Fábricas Inteligentes	12
2.1.2 Indústria 4.0 no Brasil	13
2.2 Análise de segurança em redes elétricas	14
2.2.1 Análise de segurança.....	14
2.2.2 Análise e seleção de contingência	18
2.2.3 Índices de performance.....	19
3 METODOLOGIA	23
3.1 Procedimentos metodológicos	23
3.1.1 Formulação do índice de performance	25
3.2 Estudo de caso	31
3.3 Validações e verificações	33
4 ÍNDICE DE PERFORMANCE PARA TENSÃO	36
4.1 Sistema elétrico, analisadores e dados coletados	37
4.1.1 Sistema elétrico da planta industrial.....	37
4.1.2 Analisadores da qualidade de energia elétrica	39
4.1.3 Dados e registros recebidos.....	43
4.2 Classificação e seleção dos dados	45
4.3 Cálculo do IP	47
4.3.1 IP das medidas em LIV4	48
4.3.2 IP das medidas em ATE_DIR	52
4.3.3 IP das medidas em ATE_ESQ	53
4.3.4 IP das medidas em <i>Handler</i>	55
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	58
5.1 Proposta para classificação qualitativa do IP	59
5.2 Proposta de um índice global da planta industrial	60
6 CONCLUSÃO	65
REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Com a modernização das fábricas e das indústrias graças aos conceitos tecnológicos conduzidos pelos estudos da Indústria 4.0, têm crescido o número de estudos tratando de problemas industriais, anteriormente não levados em consideração. A capacidade de aquisição de dados importantes, sem muitas vezes, gerar alterações estruturais nas plantas industriais proporciona a leitura e monitoramento do conjunto industrial como um todo, que vai desde o acompanhamento da produção até a operacionalidade da planta.

As principais tecnologias habilitadoras por trás dessa revolução incluem a internet das coisas, o *big data*, a computação em nuvem, a robótica avançada, a inteligência artificial, novos materiais e as novas tecnologias de manufatura aditiva (impressão 3D) e manufatura híbrida (funções aditivas e de usinagem em uma mesma máquina) (CNI, 2016). Ao adotar a Indústria 4.0, os fabricantes podem aumentar sua competitividade, o que lhes permitirá expandir sua força de trabalho na indústria ao mesmo tempo em que sua produtividade aumenta (LORENZ et al., 2016). A Indústria 4.0 surge com o objetivo de desenvolver fábricas inteligentes, que visam a solucionar problemas enfrentados pelo setor industrial e trazer novos benefícios que vão além do aumento da produtividade (KAGERMANN et al., 2013; LU, 2017). Sensores distribuídos na planta ou acoplados aos equipamentos também são bastante eficazes em monitorar ocorrências específicas.

Nessas “indústrias inteligentes”, máquinas e insumos “conversam” ao longo das operações industriais com escala e flexibilidade do processo de fabricação, trabalhando de forma relativamente autônoma e integrada (CNI, 2016). Este avanço permite o desenvolvimento de inúmeros equipamentos para a instalação nas fábricas de modo a obter dados preciosos para sua análise de operação.

Neste contexto, esta pesquisa visa estudar e testar a viabilidade de aplicação do conceito de análise de segurança em sistemas de energia elétrica de potência, dirigido para uma aplicação na indústria contribuindo com uma análise de qualidade para o fornecimento de energia elétrica. Um fator importante que permite esta avaliação é o tamanho reduzido do sistema em questão e a possibilidade de processar os dados calculados de todos os elementos da rede. Se tratando de uma avaliação de um recurso básico para indústria, pode ser aplicada a todos os tipos de indústria que o termo abrange, pois, o recurso de energia elétrica certamente estará presente.

Obviamente nem todas as indústrias necessitam de uma avaliação quanto a qualidade do fornecimento de energia elétrica, contudo existem plantas indústrias de manufatura avançada que buscam certa estabilidade em virtude da preservação das máquinas e equipamentos da rede, bem como a uniformidade de operação.

Para realizar esta avaliação propõe-se o desenvolvimento de um estudo para avaliar a qualidade da energia da rede, através da formulação de um índice de performance modelado para refletir a condição de operação da planta, no que diz respeito a operação da rede elétrica dentro dos limites aceitáveis. O objetivo é relacionar os dados de forma a obter um indicador que permita identificar a operação do sistema dentro dos limites estabelecidos, identificar as situações de contingências, com destaque para aquelas eventualmente críticas, e servir como indicador de qualidade para o fornecimento de energia elétrica.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Propõe-se um estudo para avaliar a qualidade da energia da rede elétrica através do desenvolvimento e implementação de um índice de performance modelado para refletir a condição de fornecimento de energia elétrica de uma planta industrial. Para realizar esta análise pretende-se utilizar dados de leituras da tensão de rede em pontos específicos para análise. O objetivo é relacionar os dados de forma a obter um indicador que permita identificar a condição abastecimento de energia elétrica através nível da tensão dentro dos limites estabelecidos, identificar as situações de contingências e servir como indicador de qualidade para o fornecimento de energia elétrica.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Desenvolver um índice de performance para avaliar a qualidade da energia elétrica considerando medidas de tensão da rede elétrica;
- b) Estudo para avaliar o conceito da análise de segurança em ambiente industrial;
- c) Estudo para avaliar o índice desenvolvido quanto a identificação de contingências da planta;

d) Observar e analisar os resultados considerando dados de campo.

1.2 Justificativa

Considerada como a quarta revolução industrial, o desenvolvimento da Indústria 4.0 não para de crescer e seus conceitos estão cada vez mais presentes nas indústrias nos dias atuais. Isso torna cada vez mais comum o uso de dispositivos e sensores integrados na planta industrial para acompanhamento e monitoramento não só da produção, mas também dos recursos básicos necessários para o seu funcionamento, como por exemplo a energia elétrica. A utilização de sensores dos mais variados tipos permite observar a planta sob muitos aspectos e, alinhando-se a disponibilidade de aquisição e processamento de dados em tempo real, busca-se encontrar uma relação entre a leitura dos sensores e a operacionalidade da planta dentro dos limites estabelecidos.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Este trabalho surge em meio ao desenvolvimento de uma indústria inteligente equipada com sensores e equipamentos integrados que buscam coletar dados de operação das máquinas para avaliação dos recursos de operação.

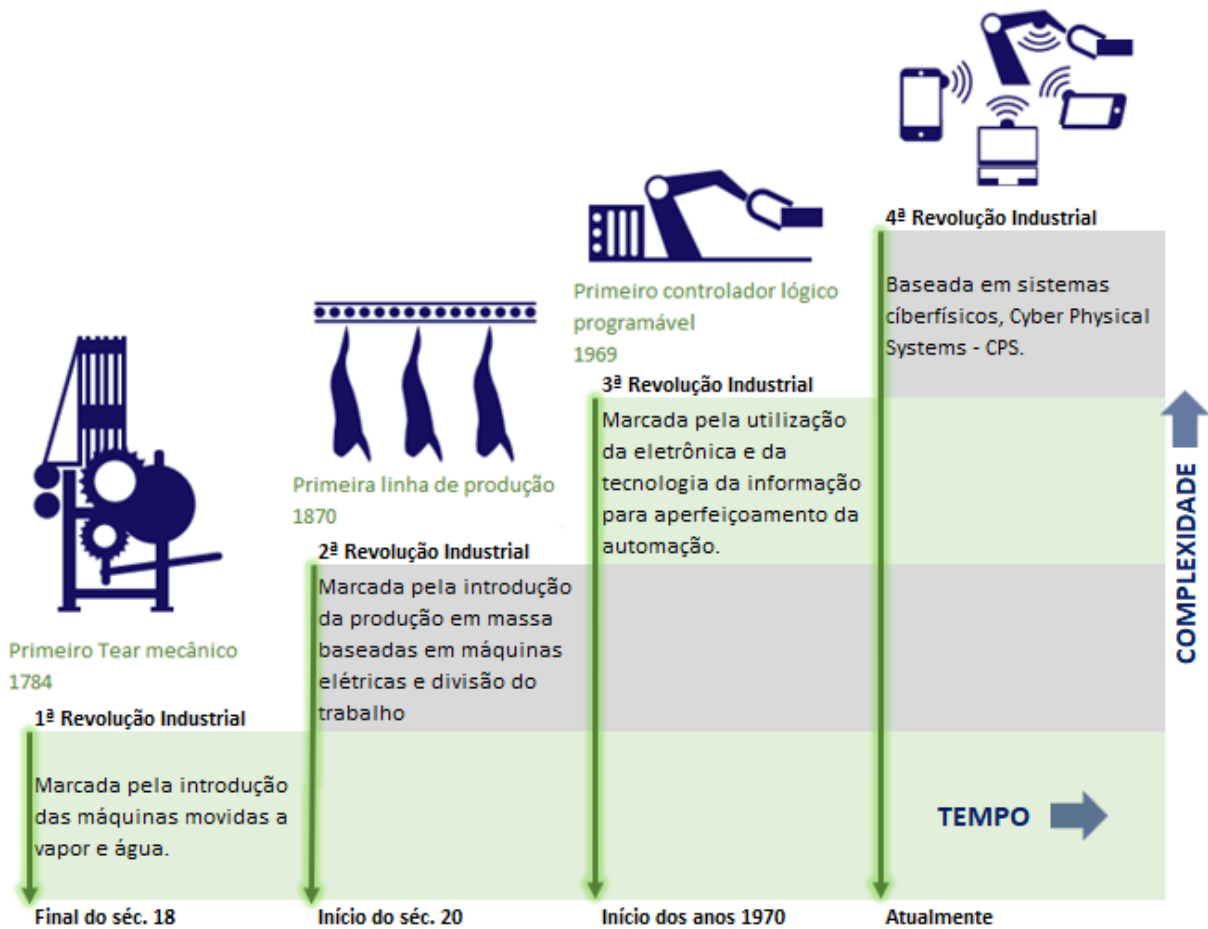
Este capítulo tem como finalidade embasar teoricamente os temas desta pesquisa. Aqui, apresentam-se premissas teóricas de diferentes autores, sobre as quais, serão feitas as fundamentações deste trabalho. Serão introduzidos os conceitos fundamentais que baseiam esse estudo, como o conceito da indústria 4.0, sobre a análise de segurança em redes de distribuição de energia e índices de performance.

2.1 Indústria 4.0

Com o atual desenvolvimento da tecnologia atrelado ao fenômeno da chamada indústria 4.0, as possibilidades de análise de produção e operação vêm se tornando realidade e são cada vez mais comuns. Para manter sua competitividade, todas as empresas precisarão acelerar seus esforços ao longo da jornada da Indústria 4.0 (LORENZ et al., 2016).

O conceito da indústria 4.0 ainda é recente, o termo surgiu em meio a grupo de trabalho e foi apresentado em um relatório de desenvolvimento da manufatura para o governo alemão. Esta proposta surgiu por meio da necessidade de fortalecimento da competitividade da indústria de manufatura no país (KAGERMANN et al., 2013). O conceito representa a quarta revolução industrial que sucede a máquina à vapor da primeira revolução industrial, as máquinas elétricas da segunda e a informática e a automação industrial (SERGI, 2015). A Figura 1 demonstra a evolução ao longo das quatro revoluções industriais ao longo do tempo marcadas pelas suas características principais. Nota-se que uma evolução incremental agregando proporcionalmente aumento da complexidade e alto nível tecnológico, marcadas pela introdução da máquina a vapor no final do século 18, a introdução das máquinas elétricas e da produção em massa no início do século 20, a introdução de tecnologia eletrônica com os CLPs proporcionando automação industrial até a quarta revolução industrial com a conectividade das máquinas e equipamentos formando sistemas *Cyber Físicos (Cyber Physical Systems – CPS)* (KAGERMANN et al., 2013).

Figura 1: Os quatro estágios da revolução industrial.



Fonte: Adaptado de *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0, Final report of the industry 4.0 Working Group, April 2013 – DFKI (2011)*.

A Confederação Nacional da Indústria – CNI 2016, aborda a indústria 4.0 como resultado de um processo de digitalização que tem o potencial de modernizar o cotidiano, oferecendo soluções para os desafios nacionais importantes.

A digitalização é um processo cada vez mais presente na vida das empresas e das pessoas. Associada às tecnologias da informação e comunicação (TICs), a digitalização está presente em aplicações como e-books, música em formato digital e até mesmo os aplicativos para táxi (CNI, 2016).

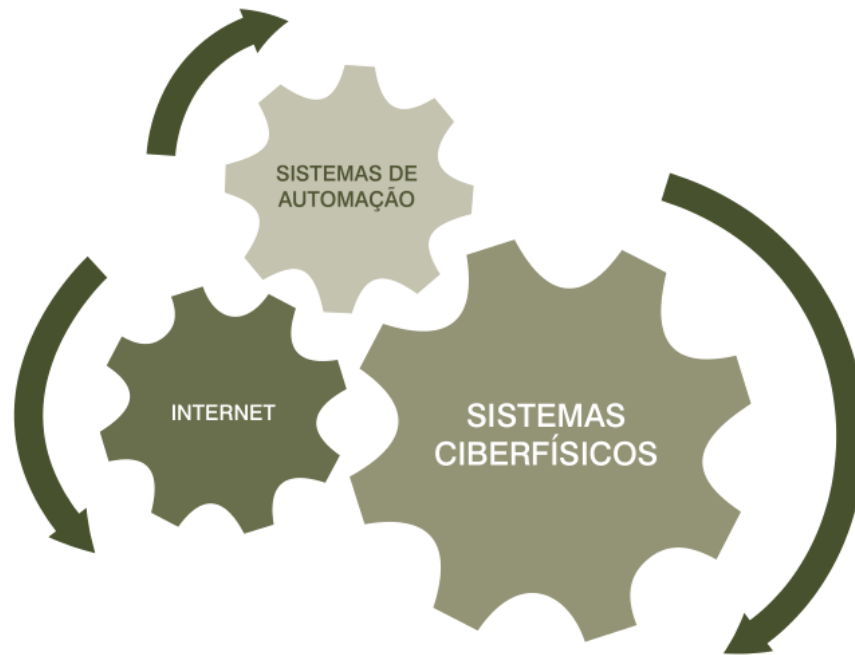
O avanço da digitalização se mostra presente em diversas áreas como: a mobilidade urbana, com a utilização e desenvolvimento de tecnologias ligadas ao conceito de cidades inteligentes, *smart cities*; eficiência energética, com a implantação de redes elétricas inteligentes, *smart grids*; melhoria no atendimento à saúde em

países de dimensões grandes como o Brasil, com o desenvolvimento de soluções como a saúde a distância; e a produtividade industrial e a Manufatura Avançada, com o desenvolvimento da indústria 4.0 propriamente dita (CNI, 2016). A quarta revolução industrial envolve o aumento da informatização na indústria de transformação, com máquinas e equipamentos totalmente integrados em redes de internet. Como resultado, tudo pode ser gerenciado em tempo real, até mesmo a partir de locais diferentes. A inteligência artificial, robótica, análise de dados e a internet das coisas trabalham de forma integrada e sensores permitem a rastreabilidade e o monitoramento remoto de todos os processos (ABDI, 2017).

A Confederação Nacional da Indústria – 2016 aponta que, “As tradicionais divisões entre indústria e serviços e as delimitações dos setores industriais serão alteradas”. As tecnologias permearão todas as áreas da economia, gerando múltiplas transformações econômicas e sociais nos próximos anos. A medida que os dispositivos se tornam capazes de comunicarem uns com os outros e coletarem dados de seu ambiente e dos usuários, as tecnologias associadas ao big data, computação em nuvem e novas tecnologias de tratamento de dados, abrem espaço para a criação de novos modelos de negócios e podendo alterar a forma como as empresas se relacionam com clientes e fornecedores (CNI, 2016).

Todas as tecnologias neste âmbito comumente compartilham do emprego da internet como principal meio comunicação entre os dispositivos e equipamentos, dando origem ao que se convencionou chamar internet das coisas, ou *IoT*, na sigla em inglês. Esta é outra característica da indústria 4.0, a possibilidade de aquisição, processamento e compartilhamento de dados para integração e controle a partir de sensores e equipamentos conectados em rede, fazendo uma fusão entre o mundo real e o mundo virtual, criando os chamados sistemas ciberfísicos com emprego inclusive de inteligência artificial (CNI, 2016). Esta integração entre as áreas de tecnologia pode ser vista na Figura 2. O programa *Industrie 4.0* pretende resultar novos métodos para agregação de valor e novos modelos de negócios. Para *star-ups* e pequenas empresas, pretende proporcionar a oportunidade para desenvolvimento e prestação de serviços (KAGERMANN et al., 2013).

Figura 2: Integração na Indústria 4.0.



Fonte: Desafios para Indústria 4.0 no Brasil, CNI, 2016.

Nos últimos anos, a Indústria 4.0 ganhou espaço na agenda de desenvolvimento industrial de diversos países, como: Alemanha, Estados Unidos, China, Japão e Coreia do Sul. Na Alemanha, o desenvolvimento da Indústria 4.0 é tratado como prioritário para o país ampliar sua competitividade (CNI, 2016). Industrias líderes no setor global estabelecem altas ambições com a Indústria 4.0, mas sabem que precisam acelerar esforços para implementação dos avanços tecnológicos e assim alcançar seus objetivos (LORENZ et al., 2016).

As universidades, assim como a iniciativa privada e o governo atuam, muitas vezes em conjunto, compartilhando ideias que estimulam a competitividade entre as indústrias da nação. É esperado da quarta revolução industrial que proporcione melhorias nos processos industriais envolvendo a operação, planejamento, engenharia, controle da produção, logística e análise contínua durante o ciclo de vida dos produtos e serviços. (QIN; LIU; GROSVENOR, 2016). O estudo ou implementação conta, muitas vezes, com uma parceria firmada entre universidades e empresas, visando o desenvolvimento de competências necessárias e difusão das tecnologias que possibilitam as chamadas fábricas inteligentes (KAGERMANN et al., 2013).

O estudo de Lorenz et al, 2016, demonstra que as empresas reconhecem o valor significativo da Indústria 4.0 e as dificuldades e desafios que precisam superar para a implementação das novas tecnologias. Para atingir a implementação total e se manter na liderança perante seus competidores, as empresas devem ampliar e aprofundar seu conhecimento prático sobre as tecnologias digitais e suas aplicações. A partir disso o conhecimento adquirido servirá como base para o desenvolvimento e implementação das estratégias de manufatura digital. As indústrias pioneiras na aplicação destes conceitos adotam um ritmo acelerado de implementação e renovação construindo capacidades que se destacam entre o mercado competitivo. Para manter sua competitividade, todas as empresas precisarão acelerar seus esforços ao longo da jornada da Indústria 4.0. (LORENZ et al., 2016).

Países com alto desenvolvimento no setor tecnológico industrial como a Alemanha e os Estados Unidos, possuem parques industriais desenvolvidos sobre o conceito da automação industrial da terceira revolução industrial, tendo assim uma base muito bem preparada para a implementação das fábricas inteligentes da quarta revolução industrial (KAGERMANN et al., 2013). Isto permite o destaque e traz muitos benefícios, em pesquisa realizada na Alemanha e nos EUA, três quartos dos entrevistados alemães e dois terços dos entrevistados americanos associam a Indústria 4.0 com maior a produtividade e redução de custos. Além disso, muitos entrevistados (48% na Alemanha e 43% nos EUA) associam também ao crescimento de receita (LORENZ et al., 2016). As tecnologias consideradas no conceito da Indústria 4.0 também habilitam o desenvolvimento de novos produtos com maior valor agregado. No futuro, as empresas estabelecerão redes globais, que incorporarão suas máquinas, estoques, instalações e produção na forma de Sistemas Físico-Cibernéticos – CPS (KAGERMANN et al., 2013).

Outro conceito que surge neste meio é a Internet das Coisas - *Internet of Things - IoT*, que corresponde à fase atual da internet em que os objetos se relacionam com objetos humanos e animais os quais passam a ser objetos portadores de dispositivos computacionais capazes de conexão e comunicação. Essas redes pervasivas têm a característica de conectar não apenas humanos a humanos, mas também humanos a objetos e objetos a objetos. Nesse sentido, os objetos tendem a assumir o controle de uma série de ações do dia a dia, sem necessidade de que as pessoas estejam atentas e no comando (SANTAELLA, 2013). À medida que as empresas se apressam em adotar a *IoT*, muitas delas conectam máquinas e

dispositivos sem pensar em como suas ações abordarão as dificuldades do cliente ou as necessidades não atendidas. Em vez disso, as empresas devem estar dispostas a derrubar e repensar como elas alcançam e atendem seus clientes (BHATIA, 2019).

2.1.1 *Intelligent Factory* – Fábricas Inteligentes

As fábricas inteligentes são o elemento chave da Indústria 4.0, com a responsabilidade de gerenciar a complexidade dos processos, sendo menos suscetíveis a interrupções, além de possuir manufatura mais eficiente (KAGERMANN et al., 2013).

Nas indústrias inteligentes máquinas, equipamentos e insumos comunicam-se durante a operação industrial com escala e flexibilidade no processo de fabricação que ocorre de forma relativamente autônoma e integrada. Os dispositivos estão localizados em diferentes pontos da planta ou mesmo em plantas diferentes e trocam informações de forma instantânea sobre a operação e os recursos de manufatura. O conceito vai além da integração da produção e distribuição, envolvendo, também, todas as diversas etapas da cadeia de valor partindo do desenvolvimento e projeto, testes, simulação das condições de produção e até mesmo pós-venda (CNI, 2016). A Internet das Coisas torna possível a criação de redes que abrangem todo o processo de produção e transformam as fábricas em um ambiente inteligente (KAGERMANN et al., 2013).

Os termos *smart factory* e *intelligent factory* são termos que descrevem a visão do que será uma fábrica de manufatura no futuro. As previsões são que as fábricas serão muito mais inteligentes, flexíveis, ágeis e dinâmicas. Outra definição para expressar o termo, é o conceito de fábrica que produz produtos de forma inteligente, em equipamentos inteligentes e uma cadeia de abastecimento inteligente (MACKENZIE, 2015).

Em uma *smart factory* – fábrica inteligente, as máquinas e equipamentos terão a capacidade de melhorar processos por meio de auto otimização e tomada de decisão autônoma. Isso está em contraste com a execução de operações de programa fixo, como é o caso hoje. Para fazer isso, a futura estrutura das fábricas será muito diferente: uma combinação interconectada de tecnologias de produção inteligentes, com as mais novas tecnologias de informação e comunicação de alto desempenho. A desvantagem de aumentar a conectividade e o uso de padrões abertos em redes industriais é um risco significativamente maior de incidentes de

segurança cibernética. O gerenciamento de rede e as ferramentas de segurança podem ser usados para monitorar o comportamento e o tráfego da rede. Eles também podem detectar possíveis ameaças, como padrões de tráfego anormais ou tentativas de acesso não autorizado, e tomar as contramedidas adequadas (MACKENZIE, 2015).

2.1.2 Indústria 4.0 no Brasil

No Brasil o desenvolvimento da Indústria 4.0 passa por desafios em questão de investimentos, uma vez que necessitam de equipamentos que incorporam essas tecnologias, assim como investimentos para alteração e adaptação de layouts processos e relacionamento entre empresas ao longo da cadeia produtiva. Com isso, surge a criação de novas especialidades abrindo espaço para o desenvolvimento de competências. Um segundo desafio diz respeito à identificação dos instrumentos de política industrial capazes de viabilizar e induzir o desenvolvimento da Indústria 4.0 no Brasil (CNI, 2016).

Os resultados desta nova revolução industrial vão muito além dos ganhos de produtividade no chão de fábrica e visa envolver o encurtamento dos prazos de lançamento de novos produtos no mercado, maior flexibilidade nas linhas de produção, com aumento da produtividade e da eficiência no uso de recursos, como por exemplo a energia elétrica. A customização em massa é, claramente, uma das novas características da atividade industrial moderna (CNI, 2016). O conselho aponta que a disseminação e consolidação da Indústria 4.0 no Brasil exigirá uma nova concepção de política industrial, entre algumas metas destacam: a redução das vantagens comparativas; a ampliação da cooperação entre agentes econômicos, cujas operações serão cada vez mais integradas; o reforço da competitividade; a ampliação da escala dos negócios; e o surgimento de novas atividades e novas profissões. Especialistas mapearam ainda a possibilidade de surgimento de duas novas profissões ligadas à indústria digital: a de cientista de dados industriais, responsável por análises avançadas de dados, e a de coordenador de robótica, profissional que deverá interagir com os robôs no chão de fábrica. (ESTÚDIO ABC, 2016). Para suprir esta demanda profissional, espera-se uma retaguarda acadêmica de qualidade, de modo a instruir o profissional com qualidade e contribuir com pesquisas para melhoria contínua do processo. No Brasil, o relatório do CNI, 2016, aponta propostas para garantir a base educacional como: a criação de novos cursos

técnicos para atender necessidades específicas; a reformulação de cursos nas áreas de engenharia, administração e entre outros, para adequar as novas necessidades dessas tecnologias; a criação de cursos de gestão da produção multidisciplinar com ênfase em Indústria 4.0; e incentivar programas de competências tecnológicas nas empresas (CNI, 2016).

2.2 Análise de segurança em redes elétricas

A fundamentação teórica sugerida para estudo e conhecimento cultural sobre o tema foi introduzida pelo orientador deste trabalho, para embasar o estudo para proposta deste trabalho. Este capítulo visa fundamentar os conceitos aplicados nos trabalhos anteriores, bem como detalhar a revisão bibliográfica estudada.

O avanço com que a tecnologia vem sendo empregada em ambiente industrial, surgem novas possibilidades e recursos para análises de qualidade e de segurança do sistema produtivo. A possibilidade de monitoramento da planta em tempo real permite gerenciar e prever situações de interrupções na produção. Análises de qualidade de energia elétrica podem ser realizadas para observar o efeito na eficiência energética da planta. Distúrbios na rede elétrica do sistema podem provocar o mau funcionamento de um equipamento e até mesmo a sua falha, tirando-o de operação. Níveis de tensão inadequados caracterizam baixa qualidade da energia, além de provocarem maiores perdas no sistema elétrico. Os sistemas elétricos em geral estão sujeitos a uma variedade de problemas de qualidade de energia capazes de interromper processos de produção, afetar máquinas e equipamentos sensíveis, além de causar indisponibilidades e prejuízos. Esta é uma das principais causas de parada em processos industriais ou comerciais (ROCHA, 2016). O estudo referencial abordado a seguir, busca resgatar os conceitos de análise de segurança em sistemas elétricos de potência, visando embasar um estudo de caso para aplicação destes conceitos na indústria.

2.2.1 Análise de segurança

A fundamentação sobre a análise de segurança foi encontrada em praticamente todos os trabalhos indicados pela pesquisa, em especial o de Quintela (2002), que apresenta um modelo para explicar o conceito. A Figura 3, apresentada em seu trabalho, proporciona uma visão sistema onde a análise de segurança está

inserida, mostrando as funções de supervisão e controle executados em um sistema de potência.

Figura 3: Funções de supervisão e controle da rede.



Fonte: Adaptado de Quintela 2002.

O sistema de análise como um todo, fica sujeito a uma restrição severa de tempo, de modo que suas funções precisam ser executadas o mais rápido possível. A área sombreada corresponde ao processo de análise comumente denominado *análise de segurança*. Quanto as quatro metodologias para aplicação do conceito em tempo real, este trabalho pretende explorar o item 2, obtenção de estratégias de análise eficientes para detecção de situações em que a rede opera em estados em

que ocorrem violações (QUINTELA, 2002). Grandes sistemas de energia exibem uma variedade de comportamentos que variam desde muito lento, de minutos a horas, até fenômenos extremamente rápidos na ordem de milissegundos. Controladores separados, geralmente projetados independentemente, têm sido desenvolvidos para abordar os vários fenômenos. (TOMSOVIC, 2005).

Em seu trabalho, Quintela, 2002, propõe uma implementação de índices de proximidade ao limite de estabilidade de tensão e uma avaliação do potencial quanto a sua utilização no processo de seleção de contingências. Para redes de grande porte com imensas redes de distribuição, a avaliação das contingências se torna inviável durante o ciclo de operação, desta forma é imperativo a seleção de contingências que necessitam de uma avaliação mais detalhada.

Uma importante tarefa realizada nos centros de controle é a Análise de Segurança (AS). Os Sistemas Elétricos de Potência são estruturas montadas para gerar e distribuir energia elétrica. Eles são compostos por grandes redes complexas e fortemente conexas de equipamentos. Nessas redes, os geradores operam de forma síncrona, em um equilíbrio dinâmico, adaptando a geração de energia às cargas existentes. O controle da operação das redes elétricas ocorre nos centros de controle, que são estruturas onde engenheiros observam e controlam um sistema elétrico, para manter a estabilidade e a segurança do sistema (TOMSOVIC, 2005).

A análise de segurança em redes elétricas envolve a avaliação e o processamento dos dados para estimar o estado de operação atual da rede e a possibilidade deste estado de operação evoluir em determinado, muitas vezes curto, espaço de tempo. O monitoramento da segurança da rede incide na medição das variáveis ambientais que afetam a segurança do sistema. Já a medição de segurança consiste em analisar os dados e estimar as dimensões do sistema, compreendidos pelos seus estados de operação. As melhorias envolvem a ampliação da qualidade do sistema através das ações de controle (BALU, 1992). As ações de controle são ações de proteção e segurança do sistema e são acionadas automaticamente por dispositivos elétricos ligados à rede, ou mesmo pelos engenheiros operadores pelos centros de controle. Os centros de controle são estruturas onde os engenheiros observam e controlam o sistema elétrico com o objetivo de manter o sistema estável e seguro. Este processo envolve diversas ferramentas de *software* e *hardware* para manter a operação da rede elétrica. O tamanho da rede impacta reflete o tamanho e nos controles necessários do seu centro de controle (TOMSOVIC, 2005). Uma das

funções sobre a responsabilidade dos centros de controle é a própria análise do sistema, que é o conceito base para a análise de segurança (GERHARDT, 2007).

Estas análises do sistema compreendem analisar os estados de operação de um sistema e desenvolver estratégias de controle para planejar adequadamente dos controles. Stott et al, em 1987 classifica os estados de operação de uma rede conforme a Tabela 1, podendo naturalmente ocorrer transições entre os estados.

Tabela 1: Estados de operação de uma rede elétrica.

Nível	Estado	Descrição
Nível 1	Seguro	Carga atendida. Não existem violações nos limites de operação. Caso alguma contingência ocorra, não haverá violações.
Nível 2	Corretivamente seguro	Carga atendida. Não existem violações nos limites de operação. Qualquer violação causada por uma contingência pode ser corrigida por uma ação de controle sem que haja perda de carga.
Nível 3	Alerta	Carga atendida. Não existem violações nos limites de operação. Algumas violações causadas por uma contingência não podem ser corrigidas sem perda de carga.
Nível 4	Emergência corrigível	Carga atendida, porém existem violações nos limites de operação. Essas violações podem ser corrigidas por ações apropriadas de controle sem que haja perda de carga.
Nível 5	Emergência não corrigível	Carga atendida, porém existem violações nos limites de operação. Essas violações não podem ser corrigidas por ações apropriadas de controle sem que haja perda de carga.
Nível 6	Restaurativo	Sem violação nos limites de operação, porém houve perda de carga.

Fonte: Adaptado de (GERHARDT, 2007) e (GUERRA, 2002), COSTA 2012.

Naturalmente, deseja-se operar a rede sempre no nível seguro. Hoje em dia isso é praticamente impossível, devido aos altos índices de carregamento dos equipamentos da rede. É comum então a operação nos níveis corretivamente seguro e de alerta, este último ocorrendo em horários de pico de demanda (QUINTELA, 2002).

Gerhardt, 2007, apresenta que a partir disso surgem a ideia de eliminar tais violações. A eliminação das violações é conseguida através da execução de ações de controles na rede. Por exemplo: pode-se eliminar a sobrecarga de uma linha de

transmissão através de um redespacho da geração e eliminar uma violação de tensão através da mudança de TAP de um transformador. Quando um sistema é enfraquecido a um nível onde uma contingência pode causar uma sobrecarga o sistema entra em estado de emergência corrigível. Se o distúrbio é muito severo, o estado de emergência não corrigível pode resultar diretamente no estado de alerta. A volta ao estado de operação normal, irá depender das condições do sistema.

O trabalho de Costa, 2012, aborda com detalhes o conceito da análise de segurança dividida em duas partes, a Análise de segurança Dinâmica e a Análise de segurança Estática.

A Análise de segurança Dinâmica, consiste em reproduzir, para estudo, o comportamento dinâmico, no domínio do tempo ou da frequência, de fenômenos que ocorram na rede. A simulação destes fenômenos é particularmente importante para a realização de estudos envolvendo a coordenação de controles e proteções, ou mesmo para a compreensão de fenômenos como instabilidades ou colapso de tensão. A Análise Dinâmica permite a simulação da cronologia dos eventos, o que requer aquisição e processamento de grandes quantidades de dados, aumentando assim os tempos de simulação envolvidos. Atualmente algumas aplicações como técnicas de simulação com passo de integração variável, simulação quase-dinâmica e processamento paralelo, vem reduzindo o tempo de simulação e propiciando o uso da análise dinâmica em aplicações de tempo real (FRANCISCO, 2005).

A Análise de segurança Estática considera os sistemas de potência em equilíbrio, ou seja, ela parte do pressuposto de que as transições de potência ativa e magnitudes de tensão são consideradas por outras técnicas. A segurança estática é alcançada em um sistema elétrico de potência quando todas as cargas são atendidas, as restrições de operação não são violadas e nenhuma contingência possível afetaria essas duas condições (CARPENTIER, 1993). O princípio do equilíbrio descrito acima permite que análises sejam realizadas de forma mais eficiente do que um estudo completo dos efeitos dinâmicos de um distúrbio (COSTA, 2012). “O principal objetivo da análise de segurança estática é determinar qual a contingência que causa o maior impacto à operação dos sistemas” (SANTOS, 1993).

2.2.2 Análise e seleção de contingência

Na análise de sistemas elétricos de potência, denomina-se uma *contingência* a saída de operação prevista ou imprevista de um ou mais equipamentos (linhas

transformadores, geradores, banco de reatores/capacitores) (SANTOS, 2019). Contingências podem ocorrer por problemas atmosféricos, incêndios, erros humanos, falhas em equipamentos, entre outros (ALMEIDA, 2005). As contingências podem ser classificadas como simples, indicando, por exemplo, quando apenas um equipamento sai de operação, ou podem ser classificadas como múltiplas, quando dois ou mais equipamentos saem de operação (BALU, 1992).

O estudo de Quintela, 2002, aponta que considerando a operação da rede em que não há violações dos limites operacionais e a carga está atendida, realiza-se uma análise para verificar o efeito da ocorrência de contingências na rede, sob o ponto de vista de violações dos limites operacionais. Esta é a análise que convém chamar de análise de contingências, que simula a ocorrência de contingências e avalia seu impacto sobre a operação da rede, permitindo que o sistema seja operado defensivamente. Os limites operacionais que são geralmente analisados neste tipo de estudo são os limites de sobrecargas em linhas de transmissão e transformadores, com a violação de MW e a sobretensão ou sobtensão em barramentos, com a violação dos limites de tensão. Uma medição de segurança é uma análise realizada para determinar a condição de operação, situando o sistema quanto a sua segurança a interferências sérias (BALU, 1992). “A tarefa da seleção de contingências é extremamente necessária em áreas como análise de confiabilidade, planejamento da expansão, planejamento da operação e controle em tempo real de sistemas de potência” (SANTOS, 1993). A análise de contingências é uma tarefa que tem por objetivo saber, dentre as contingências possíveis, quais levariam a rede a um estado de operação não seguro (CARPENTIER, 1993).

A tarefa da seleção de contingências é o fator central no processo de análise de segurança, dado que a avaliação de todas as contingências possíveis em um SEP de porte seria impraticável (COSTA, 2012). A dificuldade básica reside na complexidade dos modelos e métodos de solução disponíveis, que os tornam incompatíveis com as severas restrições de tempo da operação em tempo real (QUINTELA, 2002; GERHARDT, 2007).

2.2.3 Índices de performance

Normalmente a classificação de contingências é realizada com base no cálculo dos chamados *índices de performance* – IP, ou PI do inglês *Performance Indices*. O IP é um escalar que reflete o montante de violações ou a variação na

margem de estabilidade que ocorrerá caso uma contingência venha a ocorrer (QUINTELA, 2002).

Uma prática comum para medir a segurança de um SEP consistem em avaliar uma lista pré-definida de possíveis contingências, e classificar o sistema como inseguro, caso a ocorrência de alguma contingência da lista leve o sistema a um estado onde existiam violações em seus limites de operação ou não atendimento (BALU, 1992). Considerando a abordagem aplicada a uma rede elétrica, um método exato para a seleção de contingências consiste na solução de um fluxo de carga para a rede sem o ramo cuja saída de operação deseja simular (SANTOS, 1993).

Este é um problema genérico, independente de qual aspecto do problema está sendo considerado dinâmico ou estático, utiliza-se normalmente o conceito de índice de performance, para quantificação dos efeitos de contingências. Uma formulação geral pode ser dada como (CORTES; MENDEZ, 1999):

$$IP = \sum w_j |f_j(x)|^m \quad (2.1)$$

Onde:

w_j – é um peso relativo à função $f_j(x)$;

$f_j(x)$ – é a função que relaciona, em geral, uma grandeza elétrica e seu limite de operação;

m – é a ordem do índice de performance.

Normalmente, as contingências com os maiores valores de IP são consideradas as mais severas. Sabe-se também que, especialmente para redes de grande porte, a maioria das contingências acaba tendo um IP pequeno, ou seja, a ocorrência da maioria delas não resulta em violações ou em instabilidade de tensão. Daí a importância de se evitar uma análise detalhada e demorada de casos sem nenhum impacto no que diz respeito à violação ou estabilidade de tensão. Na arquitetura clássica, o procedimento de seleção constitui no cálculo dos IP para cada contingência, e a ordenação na ordem decrescente. As linhas correspondentes ao topo da lista são, então, as candidatas a compor a lista menor a ser analisada detalhadamente pelo processo de análise de contingências (SANTOS; GARCIA 1994; GUERRA, 2002; GERHARDT 2007).

Como o processo de seleção de contingências resulta em uma economia de tempo computacional considerável, o tema vem recebendo atenção de pesquisadores. Duas abordagens são consideradas: a) métodos indiretos: para os quais o cálculo do PI é realizado após a determinação de contingência; b) métodos diretos: para os quais o PI é calculado sem que se conheça o estado de operação da rede após a contingência. Alguns estudos em torno do PI sugerem pré-seleções de contingências antes de aplicar o PI. Assim o processo completo seria composto por pré-seleção, seleção e análise. Um método heurístico também foi proposto como meio de pós-seleção de contingência. Outra abordagem é o uso de sistemas especialistas para estabelecer uma lista de prováveis contingências (GRILO, 2005).

Em seu trabalho Canto dos Santos, 1993, apresenta a formulação de índices de performance para o problema de seleção de contingências na análise de segurança em sistemas elétricos de potência. As formulações têm o objetivo de quantificar os efeitos das contingências usando como parâmetro o caso base do sistema. Quando se divide o valor do desvio no ponto de operação pelo ponto de operação inicial (ou ideal), obtêm-se um valor que informa (como em um cálculo de porcentagem) a variação que ocorre no ponto de operação do sistema de maneira padronizada. Uma das formulações para análise de tensão da rede apresentadas em seu trabalho é da equação 2.2.

$$PI_v = \sum_{i \in K} \left(\frac{V_i^{lim} - V_i}{V_i^{lim}} \right)^n \quad (2.2)$$

Onde:

PI_v – índice de performance para análise de tensão nas barras PQ

K – grupo de barras PQ onde ocorrem violações de limites inferiores ou superiores de segurança para módulo de tensão

V_i^{lim} – limite inferior ou superior de segurança para módulo de tensão na barra i

V_i – módulo da tensão na barra i na situação pós-contingência

n – ordem do índice de performance

Não importa o parâmetro para quantificação dos efeitos de uma contingência no perfil do sistema, uma vez que a formulação é genérica. A expressão quantifica

apenas as magnitudes das violações de limites que acontecem devido as diferentes contingências analisadas (SANTOS, 1993).

Os estudos passados mostram que a maioria das contingências de um sistema elétrico de potência, costumam ter um IP de pequeno valor, isto é, grande maioria não resulta em violações dos limites operativos das redes analisadas. O objetivo é reduzir o valor do IP para contingências que não geram impacto sobre a operabilidade do sistema (SANTOS, GARCIA, 1994).

No estudo de heurísticas aplicadas para a determinação das zonas de TAP, Pereira, 2009, apresenta uma proposta para definir o TAP adequado do transformador a partir de faixas de tensão otimizadas, com objetivo de garantir valores adequados de tensão, dentro dos limites estabelecidos pela ANEEL em toda a extensão da rede secundária. Calcula-se os níveis de tensão secundária com base no fluxo de carga e das tensões primárias de cada transformador de distribuição. A partir disso e através de uma função de penalização apresentada, são avaliadas as transgressões de tensão em cada posição de TAP para cálculo e atribuição de uma nota para cada TAP do transformador. Esta nota que varia de 0 a 1, o melhor TAP, isto é, aquele com menor transgressão de tensão é definido pela maior nota. A equação 2.3 fornece um coeficiente de priorização, sendo o TAP mais adequado aquele com maior nível de tensão secundária dentro da faixa otimizada (PEREIRA, 2009).

$$\rho_{TAP}(i,j) = 1 - \mu(\lambda_S, \lambda_I) \quad (2.3)$$

Onde:

$\rho_{TAP}(i,j)$ – nota calculada para o TAP j do transformador i

$\mu(\lambda_S, \lambda_I)$ – função de penalização

λ_I – transgressão de tensão inferior

λ_S – transgressão de tensão superior

Os termos de transgressão de tensão representam o nível de violação dos níveis de tensão em cada um dos patamares de carga, dada a faixa de tensão estabelecida pela ANEEL. A função de penalização tem relação com o nível de afastamento da tensão calculada com a tensão desejada, a penalização é proporcional à transgressão de tensão, depreciando os TAP's apresentarem tensões mais distantes de uma faixa otimizada projetada (PEREIRA, 2009).

3 METODOLOGIA

O capítulo a seguir apresenta a metodologia utilizada para condução do trabalho proposto.

3.1 Procedimentos metodológicos

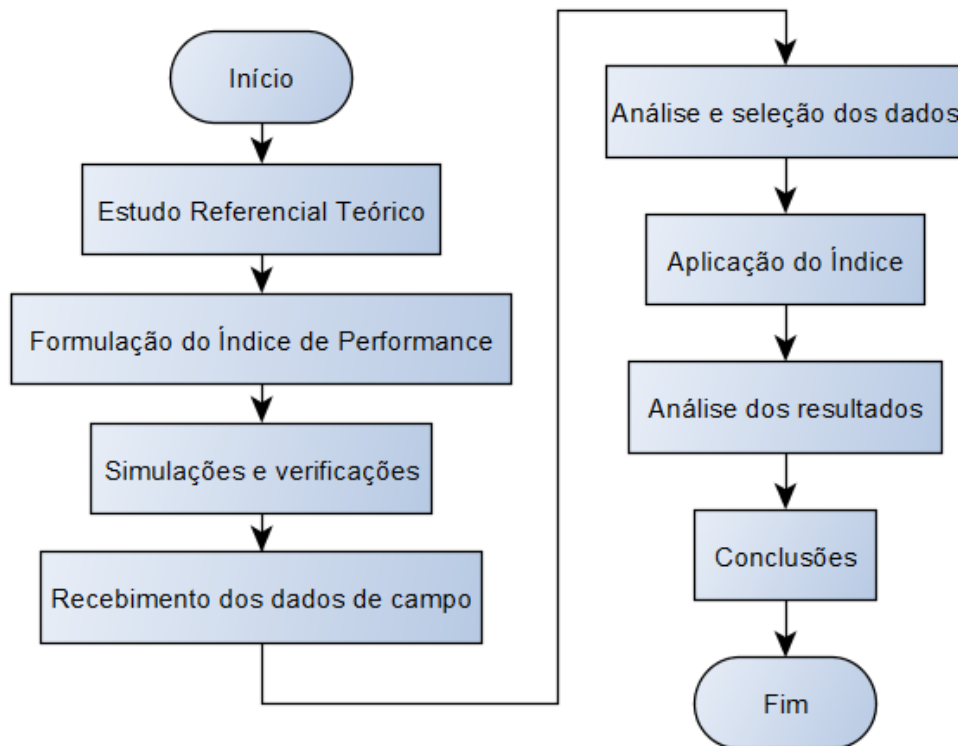
No âmbito da indústria 4.0, com a possibilidade de aquisição das mais variadas informações sobre a planta industrial, pretende-se analisar o fornecimento de energia elétrica através da coleta de dados a partir de sensores instalados em pontos chave do sistema de distribuição.

A proposta inicial para este projeto é desenvolver um índice de performance para analisar a qualidade do fornecimento de energia elétrica de uma planta industrial. Pretende-se estudar especificamente a magnitude de tensão da linha de abastecimento de energia elétrica da planta industrial e suas instalações. Para isso, será desenvolvido um modelo matemático com base nos valores nominais e limites de operação especificados no Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica do PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (ANEEL, 2018). Com base nessas informações, é proposto a formulação de um índice relacionando os valores normativos e os valores correspondentes a cada leitura de dados do sensor. Inicialmente será necessário descrever o problema e apontar as variáveis para modelar o índice, conforme o objetivo de análise que se propõe, que neste caso, é a avaliação do fornecimento dentro dos limites de tensão estabelecidos.

Para a obtenção de resultados satisfatórios, será realizado inicialmente a relação dos dados de duas maneiras diferentes a fim de estudar o comportamento de cada modelo com o resultado esperado. Basicamente pretende-se aplicar uma proposta muito parecida com a equação 2.2 descrita por Santos, 1993, e apresentada no capítulo 2.2.3, onde é feita uma relação dos valores medidos com os limites de operação, parecido com o cálculo de porcentagem. A ideia é obter uma relação que aponte a condição de fornecimento quanto aos limites críticos e ao mesmo tempo ser capaz de identificar possíveis contingências. “O mais importante é a identificação das contingências que levam o sistema a operações anormais ou próximas ao ponto crítico” (QUINTELA, 2002).

A metodologia para realizar este estudo é, resumidamente, ilustrada pelo fluxograma da Figura 4.

Figura 4: Fluxograma da metodologia de trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 2 apresenta as classificações de operação para as redes de fornecimento de 110V e 220V e mostra as faixas de operação adequada, precária e crítica conforme o nível limite da tensão de leitura – TL em regime permanente.

Tabela 2: Limites de Tensão em Regime Permanente – V_{NOMINAL} 110/220V.

Tensão Nominal	Faixa Crítica Inferior (V)	Faixa Precária Inferior (V)	Faixa Adequada (V)	Faixa Precária Superior (V)	Faixa Crítica Superior (V)
110V	$TL < 96$	$96 \leq TL \leq 101$	$101 \leq TL \leq 116$	$116 \leq TL \leq 117$	$TL > 117$
220V	$TL < 191$	$191 \leq TL \leq 202$	$202 \leq TL \leq 231$	$231 \leq TL \leq 233$	$TL > 233$

Fonte: Adaptado de PRODIST – Módulo 8. ANEEL. 2018.

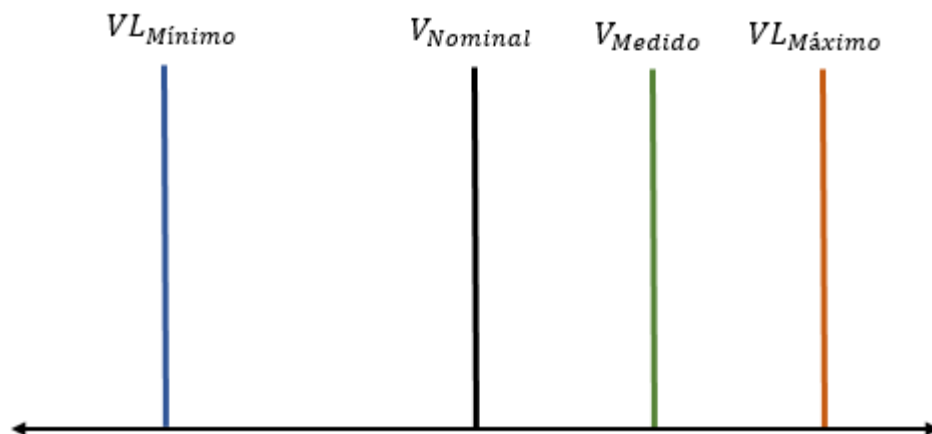
A Tabela 2 ilustra os limites de tensão das classificações de operação e atendimento do fornecimento de energia estabelecido para as concessionárias de energia elétrica do país. No estudo realizado as tensões de abastecimento são

apresentados nos capítulos seguintes, bem como os limites das classificações conforme a norma.

3.1.1 Formulação do índice de performance

A formulação do índice de performance se baseia na relação da tensão medida e o seu limite máximo até ser considerada precária, segundo o PRODIST. Para visualizar a relação considera-se o esboço da Figura 5 situando uma medição sobre o eixo de tensão e seus limites de operação.

Figura 5: Localização da medida.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

As barras em azul e vermelho são fixas e representam os valores máximos e mínimos correspondentes aos valores conforme especificado da Tabela 2, que alteram a classificação de fornecimento de energia de adequado para precário inferior ou superior. A barra em preto também é fixa e representa a tensão nominal de fornecimento. A barra em verde corresponde a tensão de leitura no momento da medição. Este diagrama situa a medição dentro dos limites adequados de fornecimento e ilustra com clareza a representação chave para entendimento deste estudo.

O objetivo é relacionar a grandeza, neste caso, a magnitude da tensão com os valores máximos e mínimos que, segundo o PRODIST, são classificados como zona precária de atendimento. Primeiramente realizou-se uma análise considerando o avaliar o valor atual de medição com o valor máximo até que a classificação do

fornecimento seja alterada de adequada para precária. A equação 3.1 demonstra esta relação.

$$IP = \left(\frac{V_{Med}}{V_{Limite}} \right)^n \quad (3.1)$$

Onde:

IP – índice de performance para análise da tensão de fornecimento;

V_{Med} – Valor da medida atual de tensão de leitura;

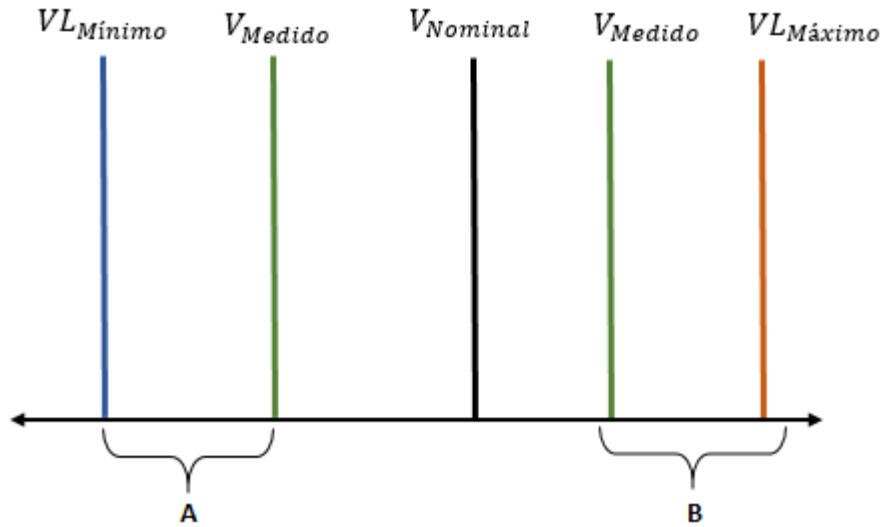
V_{Limite} – Valor do limite inferior ou superior de segurança para módulo de tensão;

n – Ordem do índice de performance

Esta equação 3.1 relaciona a tensão medida com um valor limite genérico considerando o mesmo valor em desvio de tensão tanto superior quanto inferior ao valor nominal. Independentemente disso, o que esta relação proporciona é avaliar a proximidade da tensão medida ao valor limite. Desta forma quando mais próximo o valor medido for do valor limite maior será o valor do índice. Em situações em que o índice de performance ultrapassar o valor unitário significa que o fornecimento de energia elétrica passou da classificação adequada para a classificação precária. Em termos do nosso estudo, temos uma contingência.

Uma formulação mais adequada para o problema considerando que os desvios da tensão nominal não são os mesmos para os limites inferior e superior, portanto um pequeno ajuste na relação é necessário para a correta representação do índice. Desta forma obtém-se uma formulação para quando a tensão está acima do valor nominal e outra para quando a tensão medida estiver abaixo da tensão nominal. A Figura 6 ilustra a relação o valor medido situado no quadro de operação.

Figura 6: Representação da relação conforme limite.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nesta representação nota-se que o valor do limite inferior está mais distante do valor nominal do que o valor do limite superior. Por conta disso se faz necessária a análise relacionando o limite correto quando o valor medido é menor que o valor nominal, situação A, e quando o valor medido é maior que o valor nominal, situação B. A equação 3.2 apresenta a formulação considerando diferentes variáveis para os limites de tensão inferior e superior.

$$IP = \begin{cases} \left(\frac{VL_{Mínimo}}{V_{Medido}} \right)^2, & V_{Medido} < V_{Nominal} \\ \left(\frac{V_{Medido}}{VL_{Máximo}} \right)^2, & V_{Medido} > V_{Nominal} \end{cases} \quad (3.2)$$

Onde:

IP – índice de performance para análise da tensão de fornecimento;

$V_{Nominal}$ – Valor da tensão nominal;

$VL_{Mínimo}$ – Valor mínimo da tensão para classificação precária inferior;

$VL_{Máximo}$ – Valor máximo da tensão para classificação precária superior;

V_{Medido} – Valor medido da tensão de leitura.

Esta formulação de segunda ordem é utilizada para distanciar os valores de modo a dar maior peso para aqueles resultados mais que estão mais próximos do limite de tensão, enquanto que aqueles resultados que são considerados adequados possuem peso menor no índice.

É nítido na visualização desta relação, que se o valor medido for igual ao valor limite o índice de performance é equivalente a um. Esta representação pode ser aplicada de forma genérica e não apenas na relação de tensão de fornecimento de energia. No que diz respeito ao trabalho em desenvolvimento, o resultado é interessante uma vez que é possível através de um condicionamento simples como, $IP \geq 1$, selecionar os resultados que representam contingências no abastecimento de energia elétrica.

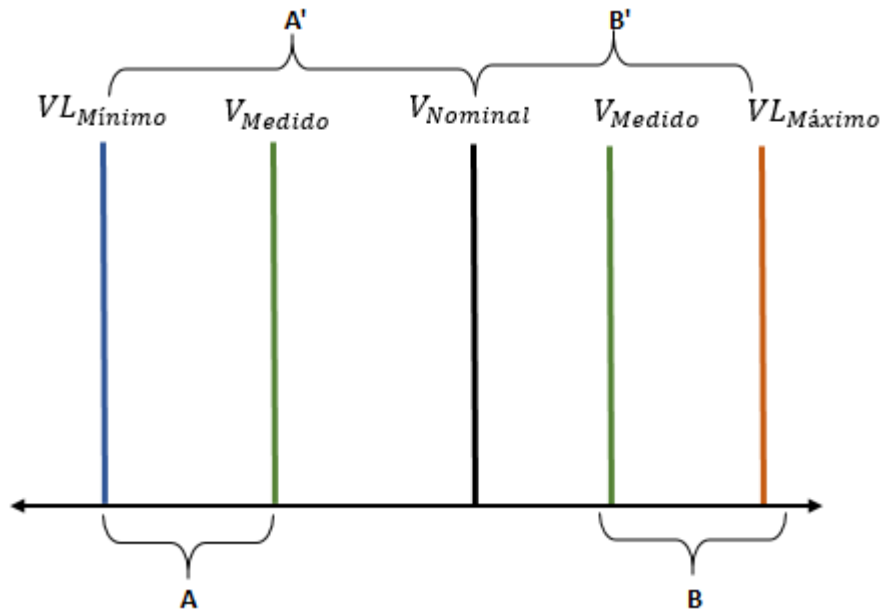
Uma segunda abordagem do problema considera como limite, não o valor total da medida de tensão, mas o valor correspondente a máxima variação de tensão a partir da tensão nominal ao limite máximo ou mínimo conforme a norma. Desta forma é prudente separar as variáveis para trabalhar com a relação.

$$V_{Superior} = VL_{Máximo} - V_{Nominal} \quad (3.3)$$

$$V_{Inferior} = V_{Nominal} - VL_{Mínimo} \quad (3.4)$$

Assim quantifica-se a tensão de desvio máxima permitida para que o fornecimento passe da classificação adequada para precária. Considerando por exemplo a tensão nominal de fornecimento de 220V. Conforme a Tabela 2, a tensão máxima para que se enquadre na faixa precária superior é 231V. Obtêm-se então que a variação máxima de tensão que pode superar o valor nominal é 11V. Da mesma forma o valor máximo inferior equivale a 18V, pois a tensão mínima da faixa adequada é 202V. O objetivo deste modelo é trabalhar a relação entre a variação máxima permitida e a variação atual do sistema. A Figura 7 apresenta graficamente a proposta da relação.

Figura 7: Representação da relação conforme variação.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Partindo desta apresentação gráfica, uma relação inicial como a da equação 3.5 pode servir como base para uma formulação mais completa considerando todas as variáveis.

$$IP = \frac{A' - A}{A'} \text{ ou } \frac{B' - B}{B'} \quad (3.5)$$

Com base nesta razão entre os valores limites, temos que A' equivale a $V_{Inferior}$ da equação 3.4 e B' equivale a $V_{Superior}$ da equação 3.3. A e B referem-se ao módulo da diferença entre o valor medido e o seu limite correspondente. Uma formulação que atende essa proposta pode ser implementada conforme a equação 3.6.

$$IP = \begin{cases} \frac{V_{Inferior} - (V_{Medido} - VL_{Mínimo})}{V_{Inferior}}, & V_{Medido} < V_{Nominal} \\ \frac{V_{Superior} - (VL_{Máximo} - V_{Medido})}{V_{Superior}}, & V_{Medido} > V_{Nominal} \\ 0, & V_{Medido} = V_{Nominal} \end{cases} \quad (3.6)$$

Esta formulação considera situar a localização do valor medido entre a variação máxima permitida conforme a classificação adequada de fornecimento de energia. A

formulação ainda pode ser melhorada considerando o nominador apenas pela diferença do valor medido pelo valor nominal, como apresentado na equação 3.7.

$$IP = \begin{cases} \frac{V_{Nominal} - V_{Medido}}{V_{Inferior}}, & V_{Medido} < V_{Nominal} \\ \frac{V_{Medido} - V_{Nominal}}{V_{Superior}}, & V_{Medido} > V_{Nominal} \\ 0, & V_{Medido} = V_{Nominal} \end{cases} \quad (3.7)$$

Considerando a variação de tensão simétrica, isto é, equivalente tanto para o limite máximo inferior quanto superior esta formulação poderia ser escrita de maneira ainda mais genérica, confirmando que este estudo e aplicação de índices não se encerra apenas no campo da análise de sistemas de abastecimento e fornecimento de energia elétrica. Desta forma a variação para mais ou para menos da tensão é a mesma.

$$IP = \frac{|V_{Nominal} - V_{Medido}|}{V_{VariaçãoMáxima}} \quad (3.8)$$

Ao utilizar o módulo da variação da tensão em relação ao valor nominal, obtêm-se o mesmo resultado que alterar a ordem de subtração dos elementos conforme a localização da tensão medida abaixo ou acima do valor nominal. Esta é a forma mais reduzida para representar a formulação do índice de performance base deste trabalho.

Em contrapartida, na busca por uma formulação para eliminar o fator condicional referente a seleção da equação adequada conforme o valor da tensão medida em relação a nominal, a expressão encontrada na equação 3.9 apresenta-se extensa. A ideia principal é organizar uma soma de forma que as contribuições negativas se cancelem. A equação 3.7 retorna um valor de IP negativo se aplicar a primeira função para um valor de tensão maior que o nominal, por exemplo. O cancelamento ocorre ao adicionar o módulo desta contribuição na soma. A base para esta formulação pode ser vista nas equações de transgressão de tensão inferior e superior apresentada em (PEREIRA, 2009), que representam o nível de violação dos limites de tensão nos patamares de carga.

$$IP = \frac{1}{2} \left[\frac{|V_{Nom} - V_{Med}|}{V_{Inf}} + \frac{V_{Nom} - V_{Med}}{V_{Inf}} + \frac{|V_{Med} - V_{Nom}|}{V_{Sup}} + \frac{V_{Med} - V_{Nom}}{V_{Sup}} \right] \quad (3.9)$$

Separando em dois conjuntos, pode-se obter a contribuição inferior do índice IP_I e a contribuição superior IP_S para integralizar o índice, de acordo com as equações 3.10, 3.11 e 3.12.

$$IP = IP_I + IP_S \quad (3.10)$$

$$IP_I = \frac{\left(\frac{|V_{Nom} - V_{Med}|}{V_{Inf}} + \frac{V_{Nom} - V_{Med}}{V_{Inf}} \right)}{2} \quad (3.11)$$

$$IP_S = \frac{\left(\frac{|V_{Med} - V_{Nom}|}{V_{Sup}} + \frac{V_{Med} - V_{Nom}}{V_{Sup}} \right)}{2} \quad (3.12)$$

Com base nestas formulações foram geradas algumas análises preliminares utilizando números aleatórios em simulações, para verificar o comportamento do índice. Estes resultados estão descritos na seção 3.3.

3.2 Estudo de caso

Após o estudo do referencial teórico e proposta de metodologia, será realizado um estudo de caso em uma aplicação real na indústria, visando verificar a eficácia da utilização do índice de performance como indicador de operação da planta e identificação de contingências, eventualmente críticas, no fornecimento de energia elétrica.

Atualmente está em curso o desenvolvimento de um projeto no âmbito da Indústria 4.0 voltado para monitoramento da planta industrial aplicado a empresa parceira, do qual originou-se a possibilidade de aplicação do estudo aqui realizado.

O projeto chamado de *Intelligent Factory* (2019), está em análise e desenvolvimento em conjunto entre a empresa e a universidade, representada pela equipe de pesquisa do ittChip, que entre outros objetivos, busca analisar a qualidade do fornecimento de energia elétrica da planta. Tendo acesso a um relatório preliminar compartilhado pelo instituto, intitulado "Relatório Parcial #1 - Análise da Qualidade da Energia", foi possível entender a aplicação real e conhecer os elementos do sistema

que estão sendo analisados e trabalhados pela equipe. Este relatório contém informações sobre a rede de distribuição de energia, que vai desde a concessionária até o centro de distribuição da fábrica, também cita máquinas e equipamentos que possuem sensores instalados e apresenta um resultado considerando os dados adquiridos de um ponto da rede. Novos sensores estão em etapa de desenvolvimento e instalação e após a conclusão está previsto novo compartilhamento dos dados adquiridos durante a operação normal da planta. A ideia é avaliar a possibilidade de utilizar estes dados para o estudo proposto por este trabalho.

Os primeiros dados obtidos já estão disponíveis o que possibilita a avaliação da proposta com dados reais de uma indústria produtiva com critérios rígidos quanto ao fornecimento de energia elétrica. A Figura 8 ilustra um recorte dos dados disponibilizados em planilhas do MS-Excel® em formato .csv.

Figura 8: Recorte do banco de dados das medições recebidas

	A	B	C	D	E	F
1	Registro	Vavg avg [V]	Van min [V]	Vbn min [V]	Vcn min [V]	Van avg [V]
2	28/05/2019 13:25	219,86	219,05	219,82	218,83	219,68
3	28/05/2019 13:30	219,95	218,93	219,79	218,8	219,75
4	28/05/2019 13:35	219,63	217,48	218,79	217,57	219,43
5	28/05/2019 13:40	219,26	218,37	219,22	217,97	219,11
6	28/05/2019 13:45	219,3	218,64	219,37	218,25	219,17
7	28/05/2019 13:50	219,51	218,92	219,56	218,49	219,43
8	28/05/2019 13:55	219,23	218,42	219,03	217,98	219,12
9	28/05/2019 14:00	218,92	218,15	218,78	217,65	218,83
10	28/05/2019 14:05	219,37	218,57	219,22	218,02	219,31
11	28/05/2019 14:10	219,55	218,66	219,29	218,3	219,46
12	28/05/2019 14:15	219,93	219,11	219,86	218,75	219,81
13	28/05/2019 14:20	220,13	219,48	220,25	219,11	220,02
14	28/05/2019 14:25	221,22	220,34	221,09	219,92	221,07
15	28/05/2019 14:30	221,38	220,68	221,41	220,34	221,27

Fonte: Elaborado pelo Autor.

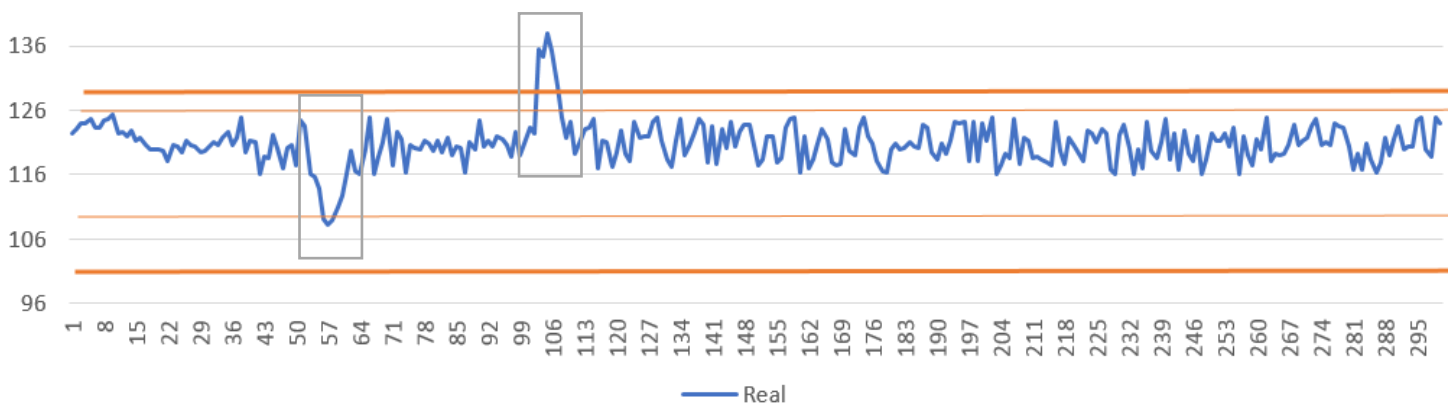
Os próximos trabalhos envolvem, resumidamente, em analisar os dados e classificar aqueles que são importantes para este trabalho, no caso as medições de tensão exclusivamente. Depois, submeter os dados às formulações realizadas, conforme as equações 3, 4 e analisar o comportamento das respostas de cada índice para posterior análise do problema em escala maior.

3.3 Validações e verificações

Com base nas informações que foram compartilhadas, foi utilizado o conceito proposto para a avaliação de um sistema real. Foram disponibilizados dados de uma fatia de tempo de operação da planta, representando uma base de dados referente a alguns dias ou semanas.

Pretende-se avaliar a eficiência do índice de performance quanto a identificação de contingências referente a tensão de alimentação das máquinas e equipamentos da planta, bem como a operação dentro dos limites estabelecidos na última revisão do PRODIST – Módulo 8 (ANEEL, 2018). Será analisado também a proposta de compilação dos dados de diversos pontos da planta, de modo que o índice possa refletir a operacionalidade da planta de modo geral, e não apenas sobre um único ponto de medida, ou equipamento da rede. Com base nesse conceito se utilizará das análises realizadas individualmente para analisar o sistema sob o ponto de vista da análise de contingências para a análise de segurança. A classificação e seleção de contingências através de simulação, como é utilizado na análise de segurança em redes elétricas de clássica não será necessária, pois se utilizará puramente os dados lidos para esta avaliação. Se houver alguma contingência, os dados irão mostrar e o índice deve ser capaz de identificar. Em uma análise preliminar, utilizando como fonte de dados de medida valores aleatórios gerados no MS-Excel®, obteve-se alguns resultados interessantes utilizando as duas propostas de índices.

Figura 9: Simulação de medidas de tensão.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

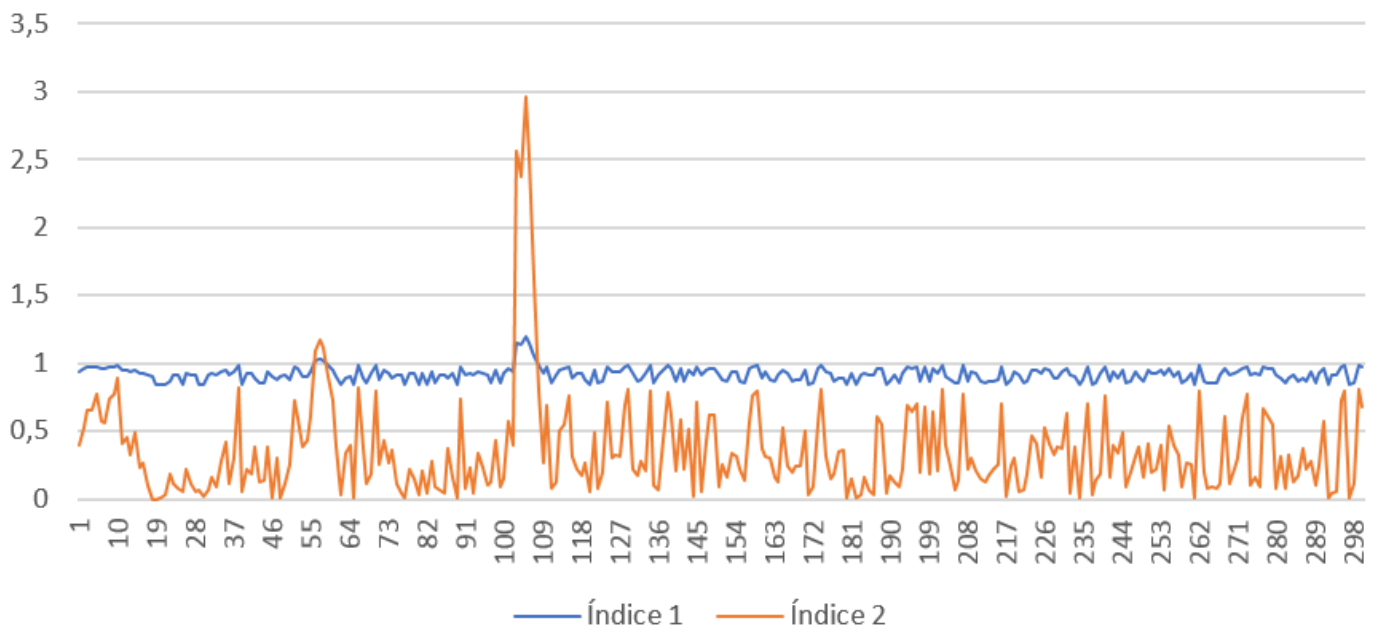
A Figura 9 demonstra a simulação de leituras utilizado o comando aleatório do MS-Excel® entre a faixa especificada, ao todo foram simuladas 300 medidas

representando dados de sensores. A Figura 9 apresenta graficamente a disposição das simulações de medidas de tensão. O eixo vertical representa a magnitude de tensão da medida e o eixo horizontal o número da medida. Escolheu-se a tensão nominal de 120V para simulação, em azul tem-se a representação dos valores de tensão e as linhas laranjas representam os pontos limites de tensão que separam as classificações adequada, precária e crítica conforme o PRODIST para esta tensão nominal de fornecimento.

As transgressões de tensão nas medidas de número 57 e 106, nas áreas destacadas, foram manualmente introduzidos na simulação para forçar distúrbios a fim de observar o comportamento dos índices quando submetidos aos cálculos.

Com a geração destes dados realizou-se o cálculo do IP para cada simulação de leitura. Este procedimento foi realizado em planilhas no MS-Excel® de modo que facilitaram o desenvolvimento deste trabalho. Após o cálculo realizou-se a plotagem dos resultados para possibilitar uma análise visual da resposta do índice diante dos valores medidos.

Figura 10: Comparativo gráfico dos índices.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 10 apresenta o Índice 1 e o índice 2 referentes as equações 3.2 e 3.7, respectivamente.

O gráfico da Figura 10 apresenta a resposta dos índices de performance formulados, para o mesmo conjunto de dados simulados. Este resultado compilado se faz muito importante, uma vez que é possível visualizar certos aspectos das repostas, como por exemplo a baixa expressão do índice 1, com resultados muito próximos um dos outros e a capacidade do índice 2 de ser nulo quando a tensão de fornecimento for exatamente igual a tensão nominal. Estes e outros aspectos merecem atenção e podem ser estudados na sequência deste trabalho.

De maneira preliminar ambas formulações foram capazes de identificar as contingências simuladas e os resultados mostram que é possível e relevante sua utilização para análise de um sistema real.

4 INDICE DE PERFORMANCE PARA TENSÃO

Sistemas de manufatura avançada em que as máquinas e equipamentos são sensíveis aos mais variados fatores de operação, seja por temperatura, pressão, entre outros, a alimentação da rede elétrica também pode ser um fator crítico devido a sua oscilação natural nos níveis de tensão causados por diversos fatores no sistema elétrico de potência e na rede de distribuição. A planta industrial ligada a esta rede elétrica está sujeita a diversos de problemas de qualidade de energia elétrica que podem interromper os processos de produção, afetar equipamentos sensíveis e causar indisponibilidade e prejuízos. As interrupções no fornecimento de energia e as oscilações de tensão de curta duração são as principais causas de parada de processos industriais ou comerciais. Este capítulo reúne em detalhes os procedimentos realizados neste estudo de caso, em que se propõe a validação do índice de performance formulado no capítulo anterior. Dividido em subtítulos, a ideia é apresentar maiores detalhes da rede elétrica da planta industrial, os equipamentos e dados lidos, assim como avaliar a ocorrência de transgressões de tensão baseado nos resultados do índice.

Com objetivo de validar a formulação do índice de performance proposto, neste capítulo será apresentado os dados de campo de uma planta industrial de manufatura avançada e a aplicação do índice para análise da qualidade da energia. Serão apresentadas as características do sistema da rede elétrica da planta industrial, bem como dos registradores que realizaram as medidas na rede. Também serão apresentados os dados recebidos, a classificação e o cálculo do índice de performance.

Os principais motivos que levam a análise e monitoramento da energia elétrica em redes elétricas sensíveis a distúrbios é justamente a detecção e verificação da ocorrência de distúrbios sejam eles oriundos de fatores internos ou externos. Outro objetivo é analisar a utilização da energia elétrica na rede interna e, principalmente, avaliar as condições de fornecimento de energia elétrica por parte das concessionárias e fornecedoras de energia elétrica.

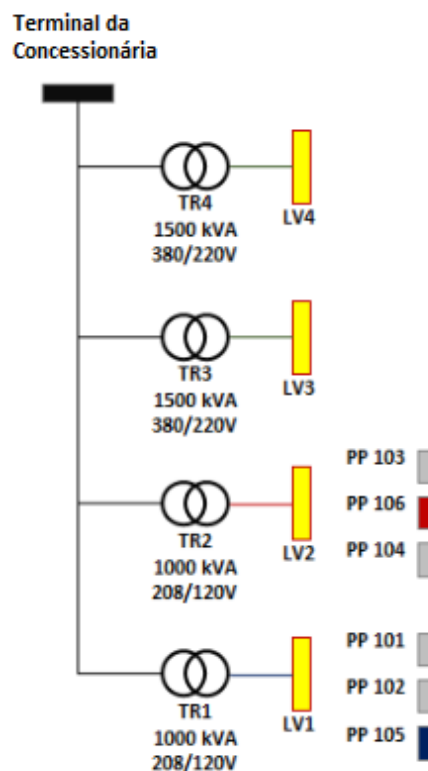
4.1 Sistema elétrico, analisadores e dados coletados

Esta sessão apresentará detalhes do sistema elétrico, dos analisadores e registrados de dados e dos dados propriamente ditos. Estruturado em três partes, a descrição base do sistema e dos dados é apresentada a seguir.

4.1.1 Sistema elétrico da planta industrial

A planta industrial em análise é formada pela alimentação primária através de 4 transformadores, que distribuem duas faixas de tensão para o circuito interno. Evidentemente não será apresentado o circuito elétrico de forma integral por questões óbvias de sigilo de informação privada e comercial.

Figura 11: Sistema elétrico de entrada da planta.



Fonte: Adaptado do relatório de Análise da Qualidade da Energia – *Intelligent Factory*. PEREIRA. 2018.

A Figura 11 apresenta uma representação do quadro de ligação da concessionária aos transformadores e parte da divisão interna dos circuitos de energia elétrica da planta. Como pode-se verificar no diagrama, dois transformadores TR1 e

TR2 possuem potência de 1000 kVA e tensão secundária de 208/120V, já os transformadores TR3 e TR4 são de 1500 kVA e possuem tensão secundária de 380/220V. As impedâncias destes transformadores são conhecidas e equivalem a 8,01%, 7,99%, 6,94% e 8,91%, respectivamente.

Os analisadores de rede foram instalados em diversos pontos do circuito a fim de avaliar as condições do fornecimento de energia por parte da fornecedora e também a verificação da ocorrência de distúrbios tanto na rede externa quanto na rede interna de energia.

A avaliação realizada neste trabalho baseou-se em dados de medidores instalados no transformador TR4 (LIV4) e de medidores instalados na entrada de um único equipamento da fábrica que possui três entradas de energias. Neste, foram instalados registradores em cada entrada de energia que foram descritos como módulo da direita – *ATE_DIR*, módulo da esquerda – *ATE_ESQ* e *Handler*.

Não se teve acesso a maiores detalhes dos equipamentos ligados a rede de LIV4, mas se tratando de máquinas de um sistema de manufatura avançada para fabricação de componentes semicondutores e memórias, tem-se uma noção quanto a sua capacidade e minúcia, bem como sua sensibilidade e necessidade de trabalho em ambiente extremamente limpo e controlado. Portanto, o recurso básico para o seu funcionamento, a energia elétrica, não ficaria de fora no âmbito do controle do ambiente de trabalho do sistema produtivo.

Tabela 3: Limites de Tensão em Regime Permanente – $V_{NOMINAL}$ 208/120V e 380/220V.

Tensão Nominal	Faixa Crítica Inferior (V)	Faixa Precária Inferior (V)	Faixa Adequada (V)	Faixa Precária Superior (V)	Faixa Crítica Superior (V)
120V	TL<104	104≤TL≤110	110≤TL≤126	126≤TL≤127	TL>127
208V	TL<181	181≤TL≤191	191≤TL≤218	218≤TL≤220	TL>220
220V	TL<191	191≤TL≤202	202≤TL≤231	231≤TL≤233	TL>233
380V	TL<331	331≤TL≤350	350≤TL≤399	399≤TL≤403	TL>403

Fonte: Adaptado de PRODIST – Módulo 8. ANEEL. 2018.

Consultando o PRODIST – Módulo 8 (ANEEL, 2018), pode-se extrair os limites das faixas de tensão de fornecimento do secundário dos transformadores, conforme apresentados na Tabela 3, para observar os limites dos pares de tensão em regime

permanente 380/220V e 208/120V, onde TL representa a tensão de leitura para verificação.

Os limites acima foram utilizados no cálculo do índice de performance apresentados nas sessões seguintes. Da mesma forma, baseou-se nessas faixas para criar uma classificação qualitativa para o índice atribuindo a relação do valor com a condição da tensão de fornecimento de energia.

4.1.2 Analisadores da qualidade de energia elétrica

Dentre os mais variados modelos de sensores para aplicação na Indústria 4.0, existem modelos integrados de alta capacidade capazes de adquirir uma densidade muito grande de dados e ainda compartilha-los em tempo real. O avanço nos sistemas de manufatura traz a demanda por equipamentos sofisticados na busca pela leitura exata dos mais variados pontos de operação da planta. Analisadores de qualidade de energia são equipamentos ideais para testes de qualidade de energia, resolução de problemas, registro e elaboração de relatórios detalhados muitas vezes em conjunto com softwares disponibilizados pelo próprio fabricante.

O projeto na qual baseou-se este trabalho utilizou sensores MQ700 da marca IMS® para a aquisição de medidas de elétricas, desde a entrada dos transformadores de fornecimento da concessionária até às máquinas e equipamentos da planta industrial. O projeto também conta com medidores portáteis capazes de serem instalados em diferentes pontos da planta. O modelo PQ700, da mesma fabricante, é também da mesma série do analisador fixo, possibilitando a aquisição em uma estrutura padrão de dados e utilização das mesmas ferramentas de análise. A seguir serão apresentados mais dados dos analisadores bem como os dados adquiridos.

Atualmente existem diversos analisadores e medidores industriais para análise da qualidade de energia no mercado, capazes de realizar medições em circuitos de alimentação de motores, máquinas e dispositivos industriais. Com recursos como registro de grandezas elétricas e análise de carga, o analisador é capaz de registrar diversas grandezas elétricas na memória interna para posterior extração e geração de gráficos e relatórios e a análise de carga verifica o comportamento das cargas com indicação dos principais parâmetros de qualidade de energia. Medições em subestações para sistemas de distribuição de energia e uso para rateio do custo de energia, com possibilidade de divisão do consumo total de energia dos circuitos monitorados, são outros recursos disponíveis nestes tipos de equipamentos.

O modelo PowerNET MQ-700 é um produto projetado para aplicação na indústria, capaz realizar medições da qualidade da energia elétrica em aplicações onde é extremamente importante o monitoramento permanente das cargas críticas e a detecção das perturbações da rede. Este analisador fixo da qualidade da energia foi desenvolvido para atender as necessidades do mercado que precisa cada vez mais de equipamentos para monitoramento da qualidade da energia em seus processos críticos (IMS, 2017). A Figura 12 apresenta o modelo utilizado nas aquisições deste projeto.

Figura 12: Imagem ilustrativa do analisador fixo MQ700.



Fonte: Catálogo PowerNET MQ700. IMS. 2017.

Este equipamento é indicado para análise e detecção de perturbações de curta duração em sistemas elétricos de potência, tais como redes de distribuição, motores, painéis solares e outros, registrando na memória interna o horário, a duração e a magnitude do evento, além da forma de onda e RMS dos ciclos associados ao evento, podendo também gerar dados de oscilografia. Além da medição de distúrbios, o modelo realiza a medição em regime permanente das principais grandezas elétricas relacionadas à qualidade da energia elétrica, entre elas os harmônicos e inter-harmônicos, fasores e flutuações (*flicker*) e desequilíbrio, disponibilizando os valores mínimos, máximos e médios de cada grandeza, conforme intervalo programado.

O produto acompanha software próprio como ferramenta de análise, PowerMANAGER Desktop PRO para análise gráfica das medições realizadas, geração de relatórios e atualização de firmware remotamente, bem como dispõe de módulo estatístico avançado para análise dos valores registrados pelo equipamento

(IMS, 2017). Esta ferramenta não será explorada neste trabalho. Algumas das aplicações mais típicas deste tipo de equipamento é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Aplicações e recursos mais comuns em analisadores de energia.

Geração de relatórios de conformidade com base no PRODIST (valor eficaz, harmônicos, flutuação e desequilíbrio de tensão)	Alocação de custos de energia e estudos de eficiência energética (horossazonal)
Detecção e análise de perturbações na rede (forma de onda e RMS do evento)	Medição de energia consumida e gerada em sistemas On Grid
Monitoramento permanente de cargas críticas (corrente de inrush e fator-k)	Interfaces ethernet, RS-485 e USB, com operação simultânea
Detecção de fugas de corrente (corrente de neutro)	Firmware atualizável
Automação industrial (alarmes de sobretensão, sobrecorrente e THD, saídas digitais com acionamento por relés)	

Fonte: Adaptado catálogo PowerNET MQ700. IMS. 2017.

Além das aquisições de dados a partir dos sensores e registros das grandezas mais comuns como a medição das tensões de fase e linha; corrente de fase, frequência e potência ativa, segundo dados da empresa (IMS, 2017), o equipamento ainda é capaz de realizar outros registros e cálculos como:

- Registro de tensão no período com médias, máximos e mínimos;
- Registro de corrente no período com médias, máximos e mínimos;
- Potência ativa, reativa e aparente;
- Energia ativa direta e reversa, bruta, líquida, capacitiva e indutiva;
- Energia reativa total, direta e reversa;

- Energia aparente total;
- Energia ativa total bruta e líquida;
- Energia Reativa total bruta e líquida;
- Demanda Ativa total;
- Demanda Reativa total;
- Demanda Aparente total;
- THD e Harmônicos de Tensão e corrente;
- TID e Inter-harmônicos de tensão e corrente (até 50° ordem) (médias e máximos);
- Flutuações de tensão instantânea, de curta e longa duração;
- Fasores e taxas de desequilíbrio de tensão e corrente;
- Distúrbios de tensão e corrente.

Já o modelo portátil da linha de analisadores de energia, o modelo PowerNET PQ700 é, segundo o fabricante, um dos equipamentos mais completos da categoria e também foi desenvolvido para empresas de consultoria, empresas de engenharia e de eficiência energética e possui amplas funcionalidades e avançadas ferramentas de análise dos fenômenos ligados a qualidade da energia (IMS, 2017). A Figura 13 apresenta o modelo utilizado nas aquisições deste projeto.

Figura 13: Imagem ilustrativa do analisador fixo PQ700.



Fonte: Catálogo PowerNET PQ700. IMS. 2017.

Este equipamento, assim como o analisador fixo, é indicado para detecção e análise de perturbações de curta duração em sistemas elétricos de potência, tais

como redes de distribuição, motores, painéis solares e outros. Ao mesmo tempo que faz a medição de transientes, o modelo também realiza a medição em regime permanente das principais grandezas elétricas relacionadas à qualidade da energia elétrica, entre elas os harmônicos e inter-harmônicas, flutuações e desequilíbrio, disponibilizando os valores mínimos, máximos e médios de cada grandeza, conforme intervalo programado. Este modelo de equipamento, apesar de mais compacto e portátil é capaz de realizar as mesmas medidas e análises que o modelo fixo e possui aplicações mais típicas conforme apresentado na Tabela 4, sendo os recursos e medidas os mesmo conforme apresentado anteriormente para o modelo fixo MQ700.

Os analisadores utilizados para aquisição dos dados utilizados neste trabalho foram organizados e instalados pelos agentes do projeto de análise da qualidade de energia. Não se teve acesso aos locais de instalação destes sensores na planta, bem como não obteve-se mais detalhes quanto ao sistema elétrico de ligação, mesmo que irrelevante para o estudo proposto no presente trabalho.

4.1.3 Dados e registros recebidos

Os dados disponibilizados para esta pesquisa correspondem a apenas uma das muitas medidas realizadas para o projeto *Intelligent Factory* (2019), e foram fornecidos em colaboração aos integrantes do projeto em parceria com o *IttChip*. Dado o diagrama elétrico de entrada da planta industrial apresentado na Figura 11, os registros recebidos referem-se as medidas realizadas pelos registradores instalados no transformador TR4 (LIV4) e de medidores instalados na entrada de um em equipamento que possui três entradas de energia.

A definição da agenda, definição das máquinas e equipamentos para análise foram todas definidas pelas equipes do projeto de engenharia da empresa em parceria com o instituto. Em todo, respeitando as normas do PRODIST – Módulo 8 (ANEEL, 2018), que refere que as medidas de tensão em regime permanente devem ser realizadas através de um conjunto de leituras obtidas por medição apropriada e as conformidades dos níveis de tensão devem ser avaliadas na rede de distribuição, nas distribuidoras e nos pontos de conexão com as unidades consumidoras. Os locais de instalação e motivos de escolha, bem como o período de análise e outras questões, são fatores de decisão por interesse da empresa responsável pela contratação, muitas vezes, em parceria com consultorias especializadas e centros de pesquisa – que não são exploradas neste trabalho, que se ateuve apenas a análise dos dados recebidos.

Um analisador fixo MQ700 foi instalado na saída do transformador em LIV4, enquanto os analisadores móveis PQ700 foram instalados nas entradas de energia da máquina. O pacote de dados recebidos em formato *.zip* contempla registros referente a nove dias de monitoramento, contendo mais de duzentos mil dados em registros realizados em um intervalo de 5 minutos. Isso tudo sem considerar que o medidor realiza amostras de intervalos de 200 milissegundos, apenas para se ter uma ideia da capacidade dos equipamentos e da quantidade de informação coletada por apenas um equipamento em um único ponto da rede. Pelas datas de coleta do dados, percebe-se que o analisador fixo foi instalado primeiro, iniciando as medidas em 28 de maio e, em seguida, os analisadores fixos foram instalados no equipamento em 31 de maio, sendo desligados no início do mês seguinte em 05 e 03 de junho, respectivamente.

Nesta avaliação realizada, os dados foram armazenados diretamente na memória interna dos analisadores, fator este que determinou também a definição do intervalo de registros, dado a limitação de armazenamento local destes dispositivos. Os registros das medições foram disponibilizados em arquivos no formato *.csv*, que foram manipulados e organizados com o uso do MS-Excel® apresentado em detalhes na seção seguinte.

Ao todos foram disponibilizadas vinte e oito planilhas contendo dados de cada um dos quatro analisadores instalados. A densidade de dados é bem alta com cada planilha possuindo diversos dados, não só pela quantidade de registros, mas pela quantidade de informação processada e registrada a cada intervalo. Registros de desequilíbrio de tensão, distúrbios de corrente, distúrbios de tensão, flutuação, harmônicos, inter-harmônicos e as demais medições, foram disponibilizadas uma em cada planilha, totalizando sete planilhas para cada registrador instalado. Contudo, nem todos dados serão utilizados no que se propõe, a sessão a seguir apresenta de forma clara a classificação e a seleção dos dados conforme interesse deste trabalho.

A continuidade de análise e processamento dos dados coletados deste e de outros ambientes da planta é prevista para ocorrer, se não inicialmente em tempo real, com armazenamento em servidores de banco de dados para análise posterior. A conexão do analisador fixo com o servidor no banco de dados, elimina a dependência da memória interna do dispositivo e permite uma aquisição de dados ainda mais densa, como no caso deste projeto em que isto permitiu o aumento na taxa de registros passando o intervalo de 5 minutos para 1 minuto.

No âmbito da Indústria 4.0 não é difícil imaginar dispositivos capazes de trabalhar com tais informações e gerar alertas e análises de qualidade do sistema. A possibilidade de trabalhar com os dados em tempo real permite inúmeras aplicações ligadas a análise da qualidade de energia elétrica.

4.2 Classificação e seleção dos dados

Apesar da densidade dados disponibilizados através das planilhas extraídas dos quatro analisadores instalados, para o desenvolvimento deste trabalho, selecionou-se apenas aqueles dados de interesse e que cabem para esta proposta. Se tratando de um índice de performance para análise da tensão da rede do circuito de alimentação de entrada e análise da tensão da rede dos circuitos internos, dentre os dados compartilhados, foram selecionados apenas os dados referentes as medidas de tensão nestes circuitos.

Dada a grande densidade de dados registrados selecionou-se aquele que importariam para a aplicação e verificação da qualidade da energia com base na variação da tensão. A classificação ocorreu diretamente nas planilhas e separando cada conjunto de dados de forma a avaliar a estrutura de registro das leituras. Dentre os registros recebidos e apresentados na sessão anterior, há uma planilha específica para registro dos distúrbios de corrente e tensão em cada analisador instalado. Após a análise dos dados das medidas, pretende-se verificar estes registros a fim de confrontar com os resultados obtidos pelo cálculo do índice.

Os dados de tensão estão disponíveis nas planilhas intituladas de "medições", e, como apresentado anteriormente, foram desmobilizadas uma para cada registrador. Assim, a avaliação se dará para um equipamento onde será analisado, não apenas suas condições de entrada de energia, mas desde a entrada no circuito LIV4 imediatamente após a conexão do transformador ao circuito. Isso possibilita uma análise mais completa da rede, uma vez que possibilita a verificação de distúrbios provenientes tanto da rede interna quanto da rede externa. Para avaliar os dados medidos através do cálculo do índice de performance, foram selecionadas as planilhas com as medições de cada registrador, totalizando quatro planilhas com os dados de cada ponto da rede.

Após a organização das planilhas de dados, foi realizada a classificação dos registros diretamente no MS-Excel®, abrindo as planilhas em formato de dados .csv e avaliando a estrutura e a organização dos dados. Cada coluna nessas planilhas

corresponde a uma diferente medida realizada no período. Totalizando 134 colunas em cada planilha de medições, removendo a coluna correspondente a data dos registros, restou ainda um equivalente de 133 colunas contendo medidas das mais diferentes grandezas apresentadas em detalhes na sessão anterior. A identificação inicial das colunas com os dados de tensão foi realizada através da criação de grupos de dados relacionados a partir da grandeza medida. No caso da tensão, além das medidas das tensões de fase e linha, também havia disponível os registros das médias e dos máximos e mínimos atingidos no intervalo de registro de 5 minutos. Desta forma os dados foram identificados e separados primeiramente em dois grupos. Um deles reunindo as tensões de fase medidas e o outro concentrando os registros das tensões de linha no período.

A maneira mais rápida encontrada para agrupar os dados foi colorir as colunas correspondentes de modo que foi possível visualizar a divisão dos grupos em uma única tela durante as manipulações dos dados. A Figura 14 a seguir exemplifica o método utilizado para a análise de seleção dos grupos de dados. A coluna de registros teve a data suprimida para preservar os dados compartilhados.

Figura 14: Organização do grupo de dados – tensões de fase.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1		Média Geral da Tensão de Fase	Mínimas das Tensões de Fase			Média das Tensões de Fase			Máximas das Tensões de Fase		
2	Registro	Vavg avg [V]	Van min [V]	Vbn min [V]	Vcn min [V]	Van avg [V]	Vbn avg [V]	Vcn avg [V]	Van max [V]	Vbn max [V]	Vcn max [V]
3	28/05/2019 13:25	219,86	219,05	219,82	218,83	219,68	220,48	219,41	220,11	220,95	219,86
4	28/05/2019 13:30	219,95	218,93	219,79	218,8	219,75	220,56	219,54	220,27	221,08	220,06
5	28/05/2019 13:35	219,63	217,48	218,79	217,57	219,43	220,29	219,16	220,11	220,99	219,9
6	28/05/2019 13:40	219,26	218,37	219,22	217,97	219,11	219,94	218,73	219,6	220,46	219,23
7	28/05/2019 13:45	219,3	218,64	219,37	218,25	219,17	219,93	218,79	219,55	220,29	219,15
8	28/05/2019 13:50	219,51	218,92	219,56	218,49	219,43	220,12	218,98	219,76	220,41	219,28
9	28/05/2019 13:55	219,23	218,42	219,03	217,98	219,12	219,83	218,73	219,68	220,35	219,25
10	28/05/2019 14:00	218,92	218,15	218,78	217,65	218,83	219,51	218,41	219,31	219,99	218,99
11	28/05/2019 14:05	219,37	218,57	219,22	218,02	219,31	219,97	218,82	219,89	220,63	219,39
12	28/05/2019 14:10	219,55	218,66	219,29	218,3	219,46	220,12	219,06	220,09	220,78	219,74
13	28/05/2019 14:15	219,93	219,11	219,86	218,75	219,81	220,55	219,42	220,34	221,13	219,9
14	28/05/2019 14:20	220,13	219,48	220,25	219,11	220,02	220,77	219,6	220,88	221,75	220,39
15	28/05/2019 14:25	221,22	220,34	221,09	219,92	221,07	221,9	220,7	221,43	222,27	221,08
16	28/05/2019 14:30	221,38	220,68	221,41	220,34	221,27	222,01	220,86	221,66	222,42	221,28
17	28/05/2019 14:35	221,03	220,47	221,19	220,09	220,96	221,65	220,49	221,36	222,02	220,92
18	28/05/2019 14:40	220,86	215,59	214,65	215,99	220,79	221,49	220,31	221,3	221,91	220,73
19	28/05/2019 14:45	220,87	220,33	220,73	219,85	220,8	221,49	220,33	221,22	222,03	220,76
20	28/05/2019 14:50	221,14	220,48	221,1	219,93	221,04	221,77	220,62	221,49	222,26	221,09

Fonte: Elaborado pelo Autor em MS-Excel®.

Este procedimento de agrupamento dos dados foi realizado nas quatro planilhas de medições de dados dos registradores e posteriormente foram salvas para

manipulação no Excel em formato *.xls/x*, e não mais sobre a estrutura de dados originais. Ainda dentre todos os dados adquiridos pelos sensores e processados pelo analisador, apenas as tensões de linha e as tensões de fase foram analisados, sendo utilizados para o cálculo do índice de performance.

Este processo é apresentado em detalhes na sessão seguinte deste capítulo. Uma vez organizado pode-se separar e trabalhar apenas com os registros de tensão, separando os dados de: Média Geral da Tensão de Fase, Mínimas das Tensões de Fase, Média das Tensões de Fase, Máximas das Tensões de Fase, Média Geral da Tensão de Linha, Mínimas das Tensões de Linha, Média das Tensões de Linha, Máximas das Tensões de Linha.

4.3 Cálculo do IP

Após a seleção dos dados, realizou-se a aplicação do índice de performance equacionado para a análise do módulo de tensão da rede em diferentes pontos da planta industrial, graças ao posicionamento de sensores em locais estratégicos da rede de abastecimento energético da indústria, como visto nas sessões anteriores. Nesta etapa apesar do estudo já com dados de ambientes reais, o estudo ainda é experimental e a análise dos dados foi realizada através de cálculos diretamente no do MS Excel. A partir da análise e classificação dos dados, realizou-se o cálculo do índice de performance para cada conjunto de dados selecionadas.

A execução dos cálculos do índice ocorreu diretamente nas planilhas, uma a uma, entre as quatro planilhas de dados das medições dos registradores. Optou-se por criar uma nova aba, onde manteve-se a estrutura original dos dados, mas o local dos valores medidos foi preenchido com o resultado do cálculo do índice para o valor medido, conforme a equação 3.7 apresentada no capítulo 3. A Figura 15 exemplifica a operação realizada no MS-Excel.

Escolheu-se a segunda formulação proposta no capítulo três por apresentar um cálculo simples e expressar leitura mais apropriada, como quando ultrapassado a unidade representa a mudança da faixa de operação de adequada para precária ou crítica, e quanto mais próximo a zero representa a melhor condição de fornecimento pois significa a operação em cima da tensão nominal da rede. A formulação dispensa o cálculo exponencial e na melhor condição de operação, isto é, no valor nominal de tensão, o valor do índice é nulo, o que não é obtido com a primeira formulação.

Figura 15: Cálculo do IP realizado no MS-Excel®.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1		Mínimas das Tensões de Fase			Máximas das Tensões de Fase			Mínimas das Tensões de Linha			Máximas das Tensões de Linha		
2	Registro	Van min [V]	Vbn min [V]	Vcn min [V]	Van max [V]	Vbn max [V]	Vcn max [V]	Uab min [V]	Ubc min [V]	Uca min [V]	Uab max [V]	Ubc max [V]	Uca max [V]
3	30/05/2019 16:00	0,0750	0,2017	0,0033	0,3100	0,4167	0,2350	0,1274	0,0830	0,0539	0,2287	0,1813	0,1609
4	30/05/2019 16:05	0,1283	0,2217	0,0417	0,3433	0,4333	0,2583	0,1487	0,0865	0,0809	0,2404	0,1935	0,1696
5	30/05/2019 16:10	0,1217	0,2633	0,0533	0,3267	0,4400	0,2500	0,1500	0,1087	0,0757	0,2396	0,1917	0,1657
6	30/05/2019 16:15	0,0933	0,2433	0,0533	0,3450	0,4617	0,2767	0,1417	0,1057	0,0726	0,2470	0,2039	0,1757
7	30/05/2019 16:20	0,1133	0,2783	0,0333	0,3250	0,4683	0,2683	0,1648	0,1065	0,0561	0,2439	0,2070	0,1661
8	30/05/2019 16:25	0,1417	0,2517	0,0717	0,3050	0,4200	0,2367	0,1548	0,1126	0,0813	0,2300	0,1843	0,1565
9	30/05/2019 16:30	0,1183	0,0550	0,0550	0,3617	0,4683	0,2817	0,0891	0,0487	0,0991	0,2539	0,2052	0,1813
10	30/05/2019 16:35	0,1800	0,1283	0,1033	0,4083	0,5100	0,3200	0,1226	0,0761	0,1161	0,2730	0,2239	0,2026
11	30/05/2019 16:40	0,1617	0,1583	0,0867	0,4467	0,5650	0,3483	0,1270	0,0865	0,0996	0,2987	0,2400	0,2139
12	30/05/2019 16:45	0,2617	0,3783	0,1983	0,4550	0,5750	0,3667	0,2078	0,1678	0,1400	0,3017	0,2487	0,2196
13	30/05/2019 16:50	0,2000	0,3167	0,1317	0,4600	0,5617	0,3267	0,1878	0,1352	0,1130	0,3035	0,2322	0,2113
14	30/05/2019 16:55	0,2433	0,3700	0,1567	0,4983	0,6150	0,4067	0,2070	0,1535	0,1230	0,3213	0,2665	0,2370
15	30/05/2019 17:00	0,3750	0,4750	0,2933	0,6833	0,8083	0,5967	0,2626	0,2104	0,1843	0,4043	0,3539	0,3213
16	30/05/2019 17:05	0,4533	0,5817	0,3700	0,6933	0,8150	0,6033	0,2957	0,2513	0,2200	0,4091	0,3565	0,3252
17	30/05/2019 17:10	0,3133	0,4533	0,2483	0,5783	0,7083	0,5033	0,2426	0,1913	0,1583	0,3561	0,3100	0,2813
18	30/05/2019 17:15	0,3700	0,4767	0,2700	0,5000	0,6133	0,4300	0,2600	0,2000	0,1835	0,3170	0,2726	0,2457
19	30/05/2019 17:20	0,3850	0,4833	0,2983	0,5100	0,6217	0,4350	0,2591	0,2148	0,1913	0,3196	0,2739	0,2522
20	30/05/2019 17:25	0,1917	0,2833	0,0983	0,4933	0,6033	0,4167	0,1726	0,1252	0,1004	0,3135	0,2657	0,2422
21	30/05/2019 17:30	0,1583	0,2650	0,0650	0,4450	0,5400	0,3383	0,1617	0,1113	0,0839	0,2900	0,2335	0,2113
22	30/05/2019 17:35	0,3217	0,4133	0,2200	0,6033	0,6833	0,4767	0,2348	0,1765	0,1561	0,3622	0,2952	0,2765
23	30/05/2019 17:40	0,3717	0,5017	0,2767	0,5933	0,7250	0,4867	0,2683	0,2135	0,1774	0,3687	0,3100	0,2726
24	30/05/2019 17:45	0,3533	0,5017	0,3183	0,5833	0,7017	0,5133	0,2504	0,2309	0,1870	0,3578	0,3152	0,2761
25	30/05/2019 17:50	0,4417	0,5533	0,3333	0,6133	0,7300	0,5350	0,2948	0,2417	0,1974	0,3704	0,3222	0,2909

Fonte: Elaborado pelo Autor em MS-Excel®.

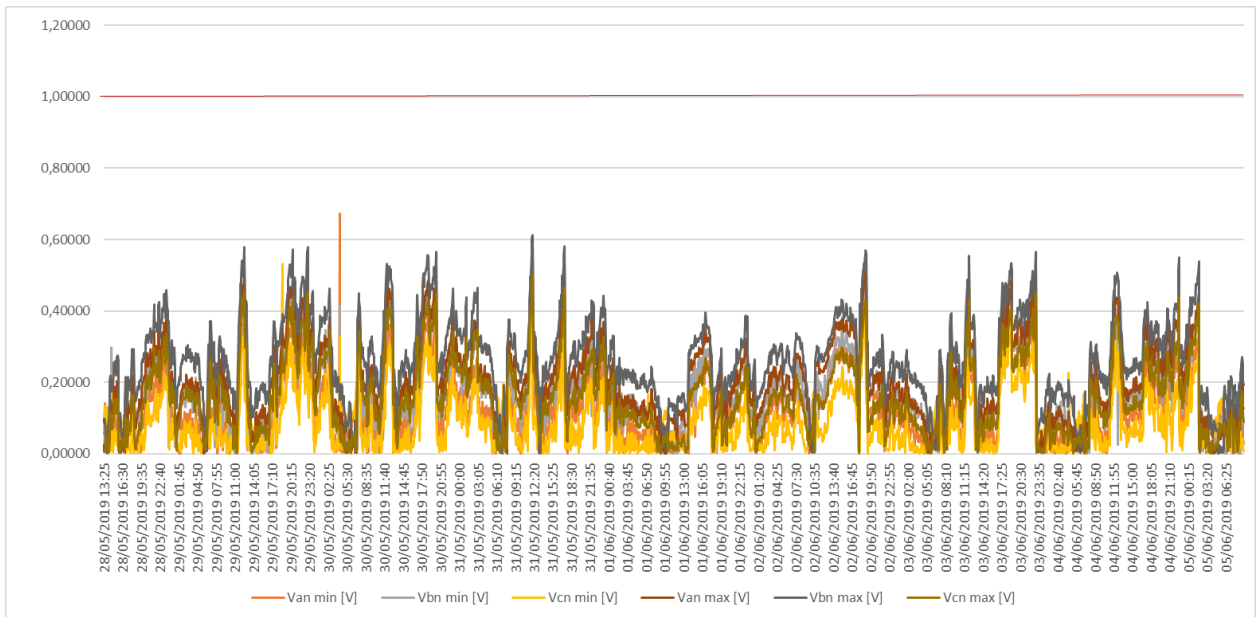
Uma vez selecionado o grupo de dados e mantido a estrutura para o cálculo do IP conforme a Figura 15, partiu-se dos dados de LIV4 para realizar uma análise preliminar dos resultados e então definir um método para encontrar os períodos mais turbulentos dos registros para realizar uma análise mais detalhada e verificar a ocorrência de transgressões de tensão através do índice. Para isso, optou-se em plotar a totalidade dos registros, referente aos 9 dias de aquisição – em um único gráfico no MS-Excel®. Assim obteve-se uma imagem única permitindo uma visão panorâmica de todas as medidas registradas no período analisado.

Uma análise detalhada das principais ocorrências na rede registrada em cada analisador é apresentada nos itens a seguir, onde serão expostos os registros que, através do índice, foram identificados como sendo os mais altos ou as maiores variações de tensão medidas.

4.3.1 IP das medidas em LIV4

O procedimento de análise gráfica, citado anteriormente, foi realizado sobre os registros de máximas e mínimas das tensões de fase do circuito LIV4, de modo a servir como base para a criação de um método próprio para análise dos dados de antemão aos demais passos deste estudo.

Figura 16: Gráfico do IP de LIV4 – Tensões de Fase.



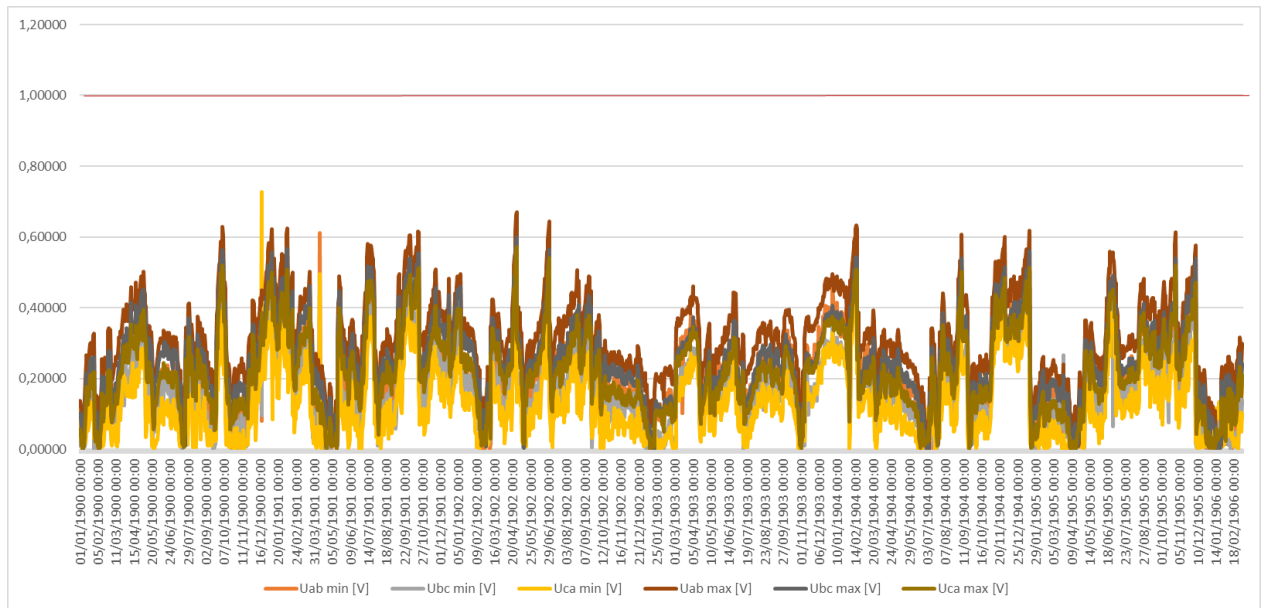
Fonte: Elaborado pelo Autor em MS-Excel®.

A Figura 16 mostra o gráfico gerado contendo todos os registros do período, totalizando mais de 2200 pontos calculados apenas para uma das seis medidas de tensão de fase registradas, no gráfico apresenta-se todas as seis medidas totalizando mais de 13000 valores. Uma linha traçada no nível 1 marca o cruzamento da tensão da faixa adequada para faixa precária, indicando que o circuito da rede elétrica ultrapassou os limites de tensão adequados, seja por afundamento ou elevação de tensão.

A partir deste gráfico pode-se averiguar com ampla visão dos registros, e percebe-se que não houve medidas além dos limites da faixa adequada segundo o PRODIST – Módulo 8 (ANEEL, 2018), para este nível de tensão. Seguiu-se a mesma análise para as tensões de linha de LIV4 como apresentado na Figura 17.

Pode-se notar certa semelhança entre os sinais medidos o que é esperado visto que se trata do mesmo transformador de tensão. Como visto na Figura 17, não houveram registros de tensão fora da faixa adequada, tendo um fornecimento completamente adequado no período analisado.

Figura 17: Gráfico do IP de LIV4 – Tensões de Linha.



Fonte: Elaborado pelo Autor em MS-Excel®.

Analisando os dados graficamente para obter uma visão geral dos registros, pode-se perceber os períodos em que ocorreram distúrbios relacionados a variação de tensão. Como pode-se verificar na Figura 17, não houveram registros de tensão fora da faixa adequada também nas tensões de linha, tendo um fornecimento completamente adequado no período analisado indicando um fornecimento de energia elétrica totalmente dentro da faixa adequada no período analisado.

Os registros neste ponto correspondem aos dados lidos entre 28 de maio a 05 de junho de 2019 totalizando 2258 registros em mais de 120 colunas de dados armazenados. A seguir será apresentado aqueles registros que tiveram o maior valor do IP calculado, apresentando a data do registro, o valor do IP e o valor da tensão lida.

A Tabela 5 apresenta os maiores registros nos dados de LIV4, dividida em dois blocos sendo o bloco superior os dados referentes as mínimas das tensões de fase medidas e o bloco inferior das máximas das tensões de fase. Segmentado em três grupos cada bloco traz o valor do IP calculado, o valor da tensão e a data e hora dos registros ordenados de forma decrescente. Adicionalmente para análise mais detalhada, normalizou-se os resultados pelo maior valor encontrado de modo a observar a importância da contingência, representado pelo valor na coluna N.

Tabela 5: Maiores IP da Tensão de Fase no transformador TR4.

Registro4	IP	N	Van min [V]	Registro	IP	N	Vbn min [V]	Registro	IP	N	Vcn min [V]
30/05/2019 04:15	0,6717	1,0000	207,91	02/06/2019 19:00	0,5291	1,0000	225,82	29/05/2019 18:50	0,5328	1,0000	210,41
29/05/2019 18:50	0,5222	0,7775	210,60	31/05/2019 12:00	0,5145	0,9725	225,66	02/06/2019 19:00	0,3945	0,7405	224,34
02/06/2019 19:00	0,4673	0,6957	225,14	02/06/2019 18:55	0,5118	0,9674	225,63	31/05/2019 12:00	0,3918	0,7354	224,31
31/05/2019 12:00	0,4545	0,6767	225,00	02/06/2019 18:45	0,4991	0,9433	225,49	31/05/2019 17:15	0,3700	0,6945	224,07
02/06/2019 18:55	0,4545	0,6767	225,00	02/06/2019 18:50	0,4936	0,9330	225,43	02/06/2019 18:45	0,3673	0,6894	224,04

Registro	IP	N	Van max [V]	Registro	IP	N	Vbn max [V]	Registro	IP	N	Vcn max [V]
31/05/2019 12:05	0,5555	1,0000	226,11	31/05/2019 12:05	0,6127	1,0000	226,74	31/05/2019 12:05	0,5018	1,0000	225,52
31/05/2019 12:00	0,5482	0,9869	226,03	31/05/2019 12:00	0,6064	0,9896	226,67	31/05/2019 12:00	0,4891	0,9746	225,38
31/05/2019 17:20	0,5309	0,9558	225,84	31/05/2019 17:20	0,5809	0,9481	226,39	31/05/2019 17:20	0,4673	0,9312	225,14
02/06/2019 19:00	0,5164	0,9296	225,68	29/05/2019 23:00	0,5791	0,9451	226,37	29/05/2019 23:00	0,4527	0,9022	224,98
31/05/2019 17:15	0,5118	0,9214	225,63	29/05/2019 12:30	0,5782	0,9436	226,36	29/05/2019 12:30	0,4527	0,9022	224,98

Fonte: Elaborado pelo autor em MS-Excel®.

Normalizando os dados obtém-se uma leitura relativa dos resultados, típica em situações em que se avalia resultados de índices de performance. Nessa linha, tem-se, por exemplo, para os resultados de *Van min* que o valor do IP de 0,5222 do dia 29 de maio as 18:50, representa 77,75% da gravidade do pior registro, ocorrido no dia 30 de maio as 04:15 com IP de 0,6717.

O mesmo foi realizado para analisar os dados da tensão de linha do transformador TR4 e os resultados mais importantes são apresentado a seguir na Tabela 6.

Tabela 6: Maiores IP da Tensão de Linha no transformador TR4.

Registro	IP	N	Uab min [V]	Registro	IP	N	Ubc min [V]	Registro	IP	N	Uca min [V]
30/05/2019 04:15	0,6120	1,0000	361,64	02/06/2019 19:00	0,5058	1,0000	389,61	29/05/2019 18:50	0,7260	1,0000	358,22
02/06/2019 19:00	0,5926	0,9684	391,26	31/05/2019 12:00	0,4995	0,9875	389,49	30/05/2019 04:15	0,4947	0,6814	365,16
02/06/2019 18:55	0,5758	0,9408	390,94	02/06/2019 18:55	0,4832	0,9553	389,18	02/06/2019 19:00	0,4621	0,6365	388,78
31/05/2019 12:00	0,5653	0,9236	390,74	02/06/2019 18:45	0,4784	0,9459	389,09	31/05/2019 12:00	0,4621	0,6365	388,78
02/06/2019 18:50	0,5626	0,9193	390,69	02/06/2019 18:50	0,4663	0,9220	388,86	31/05/2019 17:15	0,4484	0,6177	388,52

Registro	IP	N	Uab max [V]	Registro	IP	N	Ubc max [V]	Registro	IP	N	Uca max [V]
31/05/2019 12:05	0,6689	1,0000	392,71	31/05/2019 12:05	0,6011	1,0000	391,42	31/05/2019 12:05	0,5721	1,0000	390,87
31/05/2019 12:00	0,6632	0,9913	392,60	31/05/2019 12:00	0,5916	0,9842	391,24	31/05/2019 12:00	0,5600	0,9788	390,64
31/05/2019 17:20	0,6432	0,9614	392,22	29/05/2019 23:00	0,5679	0,9448	390,79	31/05/2019 17:20	0,5411	0,9457	390,28
02/06/2019 19:00	0,6332	0,9465	392,03	31/05/2019 17:20	0,5642	0,9387	390,72	31/05/2019 17:15	0,5205	0,9098	389,89
29/05/2019 12:30	0,6295	0,9410	391,96	29/05/2019 12:30	0,5621	0,9352	390,68	29/05/2019 12:30	0,5184	0,9062	389,85

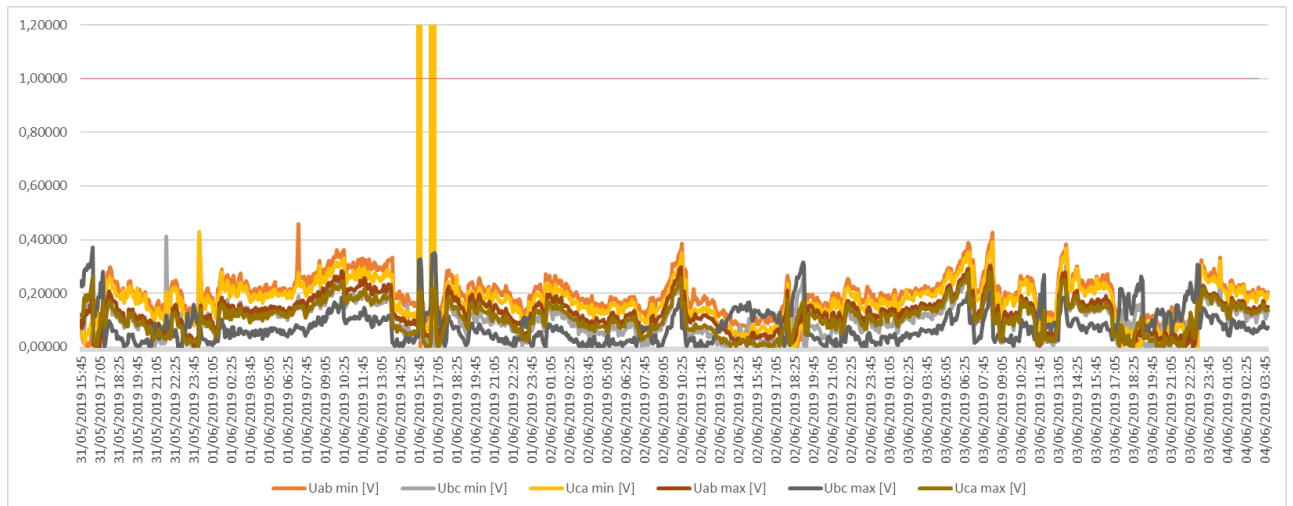
Fonte: Elaborado pelo Autor em MS-Excel®.

Como pode-se verificar nos resultados apresentados nas Tabelas 5 e 6, não houve registros de medidas além do nível adequado de tensão, pois não houve valores resultantes do cálculo do índice acima da unidade. Contudo, os dados mostram que houveram períodos em que os valores do índice aumentaram, indicando que naquele momento houve uma variação da tensão em relação o valor nominal, seja causada por um afundamento ou elevação da tensão. Os valores normalizados

4.3.2 IP das medidas em ATE_DIR

O equipamento em análise possui três entradas de energia trifásicas 208/120V, sendo duas entradas alimentadas apenas com as tensões de linha. Nesta sessão, a análise através do IP deu-se da mesma forma, realizando o cálculo sobre os registros e plotando um gráfico de saída para verificação sistêmica das medidas de ATE_DIR. A Figura 18 a seguir apresenta graficamente o resultado dos cálculos realizados para os 1012 registros, contendo milhares de dados medidos entre 31 de maio a 04 de junho de 2019.

Figura 18: Gráfico do IP de ATE_DIR – Tensões de Linha.



Fonte: Elaborado pelo Autor em MS-Excel®.

Como pode-se verificar na Figura 18, houveram registros acima do nível 1,0 do índice indicando que naquele período, o valor da tensão transgrediu a faixa adequada de tensão. Mais detalhes são apresentados na Tabela 7, onde estão listados os cinco registros com o maior valor do índice calculado.

Verificando os dados da Tabela 7 e o gráfico completo da Figura 18 do índice de performance para as tensões de linha do equipamento, constata-se que houve períodos de variações grandes na tensão da rede elétrica, uma vez que obteve-se resultado do IP maior que a unidade.

Tabela 7: Maiores IP da Tensão de Linha dos registros de ATE_DIR.

Registro	IP	N	Uab min [V]	Registro	IP	N	Ubc min [V]	Registro	IP	N	Uca min [V]
01/06/2019 15:45	12,2329	1,0000	0,04	01/06/2019 15:45	12,2329	1,0000	0,04	01/06/2019 15:45	12,2341	1,0000	0,02
01/06/2019 16:40	12,2329	1,0000	0,04	01/06/2019 16:40	12,2329	1,0000	0,04	01/06/2019 16:40	12,2341	1,0000	0,02
01/06/2019 16:45	12,2324	1,0000	0,05	01/06/2019 16:45	12,2324	1,0000	0,05	01/06/2019 16:45	12,2341	1,0000	0,02
01/06/2019 07:10	0,4576	0,0374	200,22	31/05/2019 21:50	0,4118	0,0337	201,00	01/06/2019 00:10	0,4288	0,0351	200,71
03/06/2019 08:25	0,4271	0,0349	200,74	01/06/2019 00:10	0,3235	0,0264	202,50	03/06/2019 08:25	0,3918	0,0320	201,34

Registro	IP	N	Uab max[V]	Registro	IP	N	Ubc max [V]	Registro	IP	N	Uca max [V]
03/06/2019 08:15	0,3047	1,0000	202,82	31/05/2019 16:35	0,3700	1,0000	211,70	03/06/2019 06:45	0,2782	1,0000	210,61
02/06/2019 10:20	0,2994	0,9826	202,91	01/06/2019 16:50	0,3500	0,9459	211,50	03/06/2019 08:15	0,2771	0,9958	210,19
03/06/2019 08:20	0,2965	0,9730	202,96	01/06/2019 16:40	0,3460	0,9351	211,46	03/06/2019 06:40	0,2700	0,9704	210,18
03/06/2019 06:45	0,2929	0,9614	203,02	01/06/2019 16:45	0,3450	0,9324	211,45	03/06/2019 08:20	0,2688	0,9662	210,19
02/06/2019 10:15	0,2900	0,9517	203,07	01/06/2019 16:55	0,3420	0,9243	211,42	31/05/2019 16:35	0,2610	0,9381	210,13

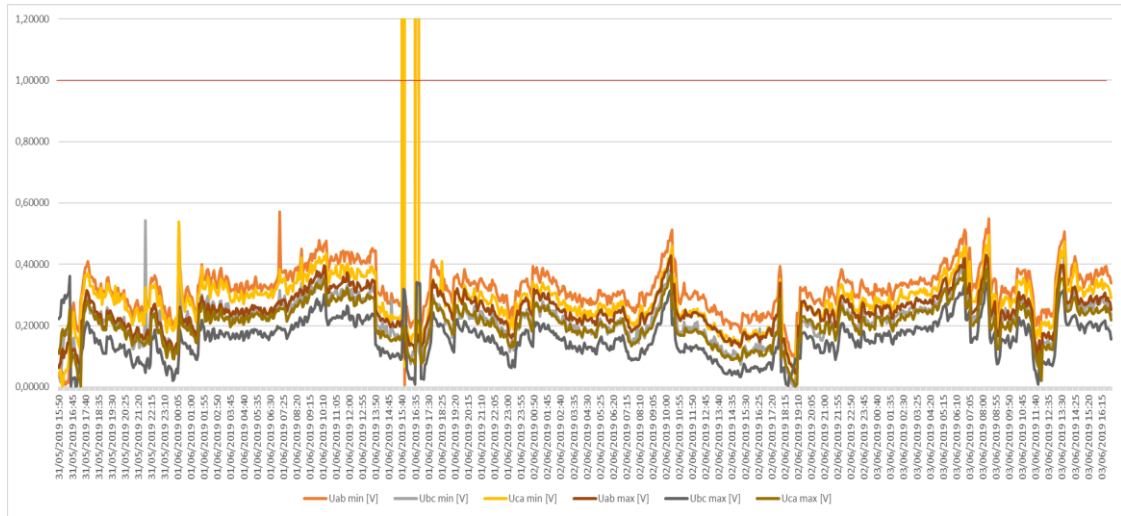
Fonte: Elaborado pelo autor em MS-Excel®.

Através dos dados apresentados da Tabela 7, referente aos índices maiores que um, no dia 01 de junho, percebe-se que as mínimas das tensões de linha lidas no intervalo do registro chegaram a praticamente zero Volts no intervalo das 15:45 e no intervalo das 16:40 às 16:45, o que leva a suspeitar de algum tipo de desconexão do circuito nesses dois períodos específicos. Entretanto, avaliando os registros das máximas das tensões de linha no mesmo período, percebe-se que houveram registros dentro da faixa adequada. O mesmo se tem ao avaliar os dados para a tensão média analisado os dados puros recebidos. Desta forma, leva-se a concluir que realmente houveram variações de tensão de curta duração no período.

4.3.3 IP das medidas em ATE_ESQ

Teve-se a mesma abordagem na avaliação dos resultados do cálculo do IP para os dados da entrada esquerda de energia do equipamento. Como resultado do cálculo das medidas, referente aos 878 registros coletados entre 31 de maio e 03 de junho de 2019, gerou-se o gráfico conforme apresentado na Figura 19.

Figura 19: Gráfico do IP de ATE_ESQ – Tensões de Linha.



Fonte: Elaborado pelo Autor em MS-Excel®.

Verifica-se novamente que houve uma variação grande no valor da tensão de linha do equipamento, uma vez que o valor do índice ultrapassa o nível máximo do gráfico de 1,2. Nos dados apresentados na Tabela 8 a seguir, percebe-se que o valor do índice e a data dos registros são idênticos ao valor do IP e das datas vistos anteriormente, indicando que este circuito também foi afetado pelo distúrbio na rede elétrica.

Tabela 8: Maiores IP da Tensão de Linha dos registros de ATE_ESQ.

Registro	IP	N	Uab min [V]	Registro	IP	N	Ubc min [V]	Registro	IP	N	Uca min [V]
01/06/2019 15:45	12,2335	1,0000	0,03	01/06/2019 15:45	12,2335	1,0000	0,03	01/06/2019 15:45	12,2335	1,0000	0,03
01/06/2019 16:40	12,2335	1,0000	0,03	01/06/2019 16:40	12,2335	1,0000	0,03	01/06/2019 16:40	12,2335	1,0000	0,03
01/06/2019 16:45	12,2329	1,0000	0,04	01/06/2019 16:45	12,2335	1,0000	0,03	01/06/2019 16:45	12,2335	1,0000	0,03
01/06/2019 07:10	0,5700	0,0466	198,31	31/05/2019 21:50	0,5424	0,0443	198,78	01/06/2019 00:10	0,5388	0,0440	198,84
03/06/2019 08:25	0,5482	0,0448	198,68	03/06/2019 08:25	0,4541	0,0371	200,28	03/06/2019 08:25	0,4959	0,0405	199,57

Registro	IP	N	Uab max [V]	Registro	IP	N	Ubc max [V]	Registro	IP	N	Uca max [V]
03/06/2019 08:15	0,4306	1,0000	200,68	31/05/2019 16:35	0,3610	1,0000	211,61	03/06/2019 08:15	0,3841	1,0000	201,47
02/06/2019 10:20	0,4276	0,9932	200,73	01/06/2019 16:40	0,3410	0,9446	211,41	03/06/2019 06:45	0,3818	0,9939	201,51
03/06/2019 06:45	0,4194	0,9740	200,87	01/06/2019 16:50	0,3390	0,9391	211,39	03/06/2019 06:40	0,3765	0,9801	201,60
03/06/2019 08:20	0,4194	0,9740	200,87	03/06/2019 08:15	0,3388	0,9386	202,24	03/06/2019 08:20	0,3747	0,9755	201,63
02/06/2019 10:15	0,4182	0,9713	200,89	03/06/2019 06:45	0,3388	0,9386	202,24	02/06/2019 10:20	0,3676	0,9571	201,75

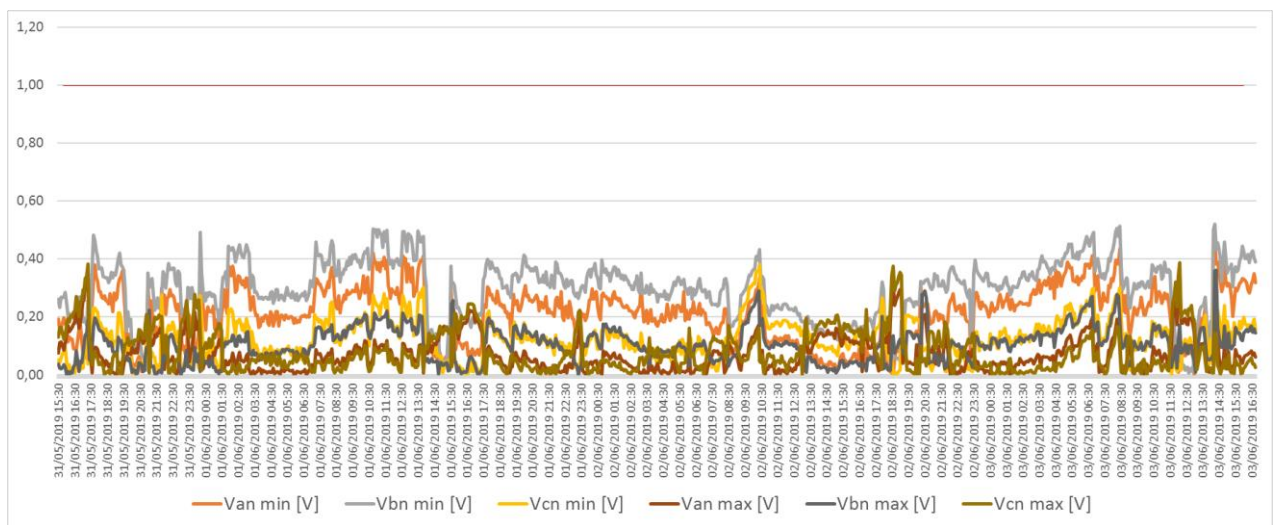
Fonte: Elaborado pelo Autor em MS-Excel®.

Analisando os valores do IP na Tabela 8, percebe-se três registros com valores altos, representando um valor de tensão bem baixo, neste caso praticamente 0V. Comparando com a Tabela 7, dos principais dados referentes a entrada de energia da direita, ATE_DIR, se observa que houve um distúrbio naquela rede de energia, pois dois circuitos analisados capturaram as mesmas variações.

4.3.4 IP das medidas em *Handler*

O outro analisador portátil utilizado no equipamento, completando a instalação nas três entradas de energia, coletou dados entre 31 de maio e 03 de junho de 2019, e gerou cerca de 880 registros no período. O cálculo do IP foi realizado e compilado nos gráficos apresentados nas Figuras 20 e 21, referente as tensões de fase a de linha, respectivamente.

Figura 20: Gráfico do IP de *Handler* – Tensões de Fase.

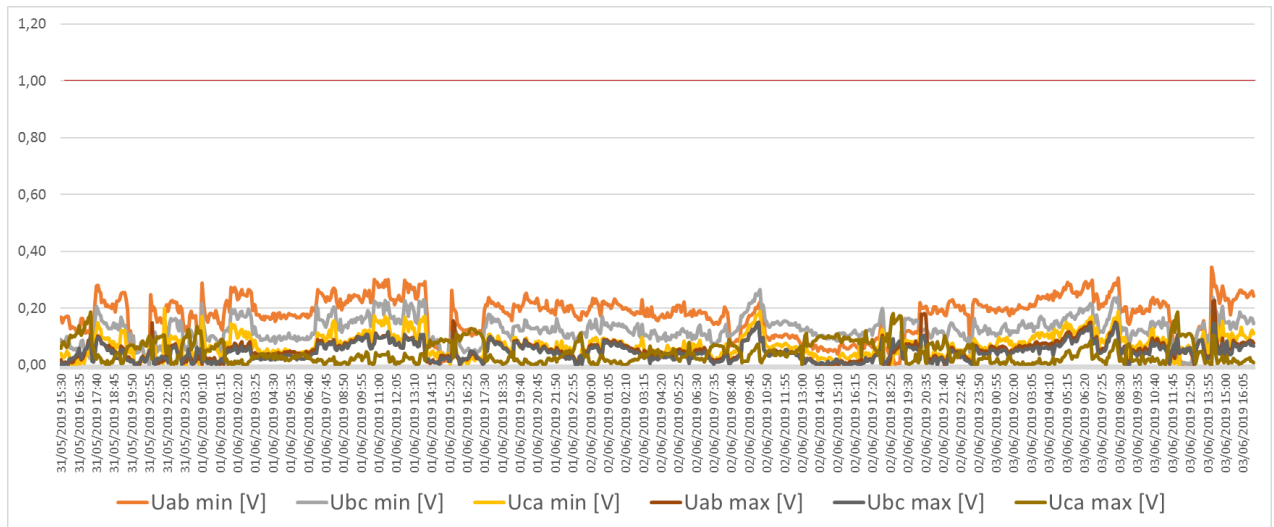


Fonte: Elaborado pelo Autor em MS-Excel®.

Os resultados mostram-se adequados pois não houve valores acima dos limites da faixa adequada de tensão, 110 a 126V, uma vez que o IP não resultou em valores maiores que um.

O gráfico da tensão de linha, apresentado na Figura 21, mostra que também não houve medições fora dos limites adequados para fornecimento de energia na tensão nominal de 208V.

Figura 21: Gráfico do IP de *Handler* – Tensões de Linha.



Fonte: Elaborado pelo Autor em MS-Excel®.

Tanto a tensão de fase quanto a tensão de linha nesta entrada de energia do equipamento, se manteve estável e dentro dos limites adequados de energia. A seguir são apresentados os cinco principais resultados com os maiores valores encontrados para cada tensão. Os resultados para a tensão de fase podem ser verificados na Tabela 9.

Tabela 9: Maiores IP da Tensão de Fase dos registros de *Handler*.

Registro	IP	N	Van min [V]	Registro	IP	N	Vbn min [V]	Registro	IP	N	Vcn min [V]
03/06/2019 14:10	0,4780	1,0000	115,22	03/06/2019 14:15	0,5190	1,0000	114,81	03/06/2019 14:15	0,3790	1,0000	117,03
03/06/2019 14:15	0,4550	0,9519	115,45	03/06/2019 08:25	0,5120	0,9865	114,88	03/06/2019 08:25	0,3610	0,9525	117,00
03/06/2019 08:25	0,4350	0,9100	115,65	03/06/2019 08:15	0,5060	0,9750	114,94	03/06/2019 08:15	0,3580	0,9446	117,24
01/06/2019 10:45	0,4210	0,8808	115,79	01/06/2019 10:45	0,5040	0,9711	114,96	01/06/2019 10:45	0,3560	0,9393	117,26
03/06/2019 06:50	0,4120	0,8619	115,88	01/06/2019 11:05	0,5010	0,9653	114,99	01/06/2019 11:05	0,3160	0,8338	117,63

Registro	IP	N	Van max [V]	Registro	IP	N	Vbn max [V]	Registro	IP	N	Vcn max [V]
31/05/2019 17:20	0,3517	1,0000	122,11	03/06/2019 14:20	0,3600	1,0000	116,40	03/06/2019 12:05	0,38667	1,0000	122,32
03/06/2019 12:05	0,3400	0,9668	122,04	03/06/2019 14:15	0,3580	0,9944	116,42	31/05/2019 17:20	0,38167	0,9871	122,29
31/05/2019 17:15	0,3150	0,8957	121,89	02/06/2019 10:20	0,2900	0,8056	117,10	02/06/2019 18:35	0,37500	0,9698	122,25
31/05/2019 17:10	0,3117	0,8863	121,87	02/06/2019 20:30	0,2890	0,8028	117,11	02/06/2019 19:00	0,35333	0,9138	122,12
02/06/2019 18:35	0,3117	0,8863	121,87	02/06/2019 20:20	0,2780	0,7722	117,22	03/06/2019 12:00	0,34333	0,8879	122,06

Fonte: Elaborado pelo Autor em MS-Excel®.

Já na Tabela 10, encontram-se os dados referentes as tensões de linha desse conjunto de dados analisados.

Tabela 10: Maiores IP da Tensão de Linha dos registros de *Handler*.

Registro	IP	N	Uab min [V]	Registro	IP	N	Ubc min [V]	Registro	IP	N	Uca min [V]
03/06/2019 14:10	0,3450	1,0000	197,65	02/06/2019 10:25	0,2653	1,0000	200,04	31/05/2019 21:50	0,1983	1,0000	202,05
03/06/2019 14:15	0,3200	0,9275	198,40	02/06/2019 10:20	0,2557	0,9636	200,33	03/06/2019 14:15	0,1917	0,9664	202,25
03/06/2019 08:25	0,3063	0,8879	198,81	02/06/2019 10:10	0,2507	0,9447	200,48	02/06/2019 10:25	0,1883	0,9496	202,35
01/06/2019 10:45	0,3013	0,8734	198,96	02/06/2019 10:15	0,2450	0,9234	200,65	03/06/2019 08:25	0,1880	0,9479	202,36
01/06/2019 11:35	0,3007	0,8715	198,98	03/06/2019 08:25	0,2403	0,9058	200,79	02/06/2019 10:15	0,1777	0,8958	202,67

Registro	IP	N	Uab max[V]	Registro	IP	N	Ubc max [V]	Registro	IP	N	Uca max [V]
03/06/2019 14:20	0,2283	1,0000	201,15	02/06/2019 10:20	0,1497	1,0000	203,51	03/06/2019 12:05	0,18739	1,0000	212,31
03/06/2019 14:15	0,2250	0,9854	201,25	03/06/2019 14:15	0,1450	0,9688	203,65	31/05/2019 17:20	0,18652	0,9954	212,29
02/06/2019 20:30	0,1820	0,7971	202,54	03/06/2019 08:15	0,1450	0,9688	203,65	02/06/2019 18:35	0,18261	0,9745	212,20
02/06/2019 20:20	0,1783	0,7810	202,65	03/06/2019 14:20	0,1447	0,9666	203,66	02/06/2019 19:00	0,17478	0,9327	212,02
02/06/2019 20:25	0,1760	0,7708	202,72	02/06/2019 10:15	0,1433	0,9577	203,70	31/05/2019 17:15	0,17217	0,9188	211,96

Fonte: Elaborado pelo autor em MS-Excel®.

Analisando os dados, pode-se afirmar que todos se encontram dentro da faixa adequada de tensão e não houve medidas além desta faixa neste período analisado, pois não constam medidas acima do nível um do IP.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A compilação dos resultados obtidos mostra que o índice foi eficaz, pois houve situações em que a tensão saiu da operação adequada e o valor do IP resultante foi maior que um.

Os resultados mostram que o nível de tensão nos quatro pontos analisados se manteve praticamente dentro da faixa adequada nos dois circuitos analisados, pois o valor do IP ficou bem abaixo do limite adequado. Apenas alguns desequilíbrios de tensão foram capturados pelos analisadores portáteis no período analisado.

Os resultados do IP para circuito de LIV4 não apontam para violações da faixa adequada em todo o período analisado. Apesar da visualização de pequenas variações de tensão de curto prazo, nenhuma delas ocorreu fora dos limites adequados de tensão, sendo a pior medida registrada resultado em um IP de valor 0,6717.

Os IPs das medidas de *Handler*, também não mostraram violações da faixa adequada no período analisado, pois não houveram valores acima da unidade nos dados analisados. Variações na tensão ocorreram, mas nenhuma além dos limites, resultando na operação adequada quanto a tensão de fornecimento. De modo geral, dadas as particularidades dos dois sistemas, ambos apresentaram variações nos níveis de tensão do barramento, que são inerentes das perturbações do sistema elétrico de potência da rede de distribuição da supridora, mas nada além dos valores limites para cada tensão nominal, conforme expostos no Módulo 8 do PRODIST.

Os IPs de ATE_DIR e ATE_ESQ por outro lado, mostram que houve períodos em que a tensão saiu fora dos limites adequados, chegando a 0V. Ambas medidas foram registradas nos mesmos intervalos, indicando que ocorreu um distúrbio na rede elétrica de alimentação do equipamento entre as 15:40 h e as 16:45 h do dia 01 de junho. Neste período, os valores de IP indicam que houve contingências na tensão de alimentação do equipamento, que podem ou não ter resultado na saída de operação da máquina elétrica. Uma análise mais detalhada poderia ser realizada cruzando esses dados com informações sobre a operacionalidade do equipamento, para entender se as variações de tensão de curta duração detectadas foram suficientes para tira-lo de operação.

5.1 Proposta para classificação qualitativa do IP

O valor do índice calculado representa a situação da grandeza de tensão elétrica em relação a máxima variação que pode ocorrer dentro dos limites conforme as normas vigentes. Pode-se dar um significado a este valor criando uma faixa de forma a representar uma situação de operação específica. A primeira relação que vem em mente é aquela conforme os limites de tensão do PRODIST, o valor do índice abaixo da unidade representa o fornecimento de tensão dentro da faixa adequada para determinado valor nominal. Após há outra faixa, correspondente ao intervalo de tensão precária e por fim um valor limite para fronteira com a faixa crítica. A Tabela 11 reúne essa ideia e sintetiza uma classificação trivial, considerando os limites para tensão nominal de 208V.

Tabela 11: Exemplo de classificação qualitativa baseada nos limites de tensão.

Valor do IP	Condição
IP < 1	Adequada
1 < IP < 1.2	Precário
IP > 1.2	Crítico

Fonte: Elaborado pelo autor.

Contudo estes valores fixos são verdadeiros apenas em situações em que o limite máximo de variação da tensão dentro da faixa nominal é simétrico. Também trabalha-se com diferentes valores nominais, gerando novos valores limites. Para entender melhor o cenário, realizou-se uma relação dos valores para verificação dos limites para transgressão do nível precário para o nível crítico, conforme a Tabela 12.

Tabela 12: Classificação do IP pelo valor nominal.

Tensão Nominal	Nível limite para condição precária e crítica inferior	Nível limite para condição precária e crítica superior
120V	1,6000	1,1667
208V	1,5882	1,2000
220V	1,6111	1,1818
380V	1,6333	1,2105

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 12 simplesmente apresenta os níveis máximos calculados a partir da equação 3.8 sobre os limites apresentados na Tabela 3. Os valores correspondem ao valor do IP que indicaria uma transgressão de tensão da faixa precária para a faixa crítica. Note que há diferenças entre os limites inferiores e os limites superiores, isso porque as tolerâncias não são simétricas, sendo os limites inferiores maiores que os limites superiores.

A alternativa mais segura é trabalhar com o valor mais baixo e que represente o primeiro risco no sistema. A seguir, novos níveis podem ser estabelecidos para analisar diferentes pontos de operação. Os critérios utilizados para a criação desses novos níveis devem estar embasados no conhecimento do sistema, de forma que o valor reflita os níveis de risco das máquinas e equipamentos se trabalhando neste ou naquele nível de tensão. Outros níveis, inclusive abaixo do valor unitário podem ser desenvolvidos a fim de identificar a mudança do nível relacionando com uma ocorrência na rede elétrica que levou a carga à saída de operação. Análises baseadas em ocorrências passadas, podem mostrar relações entre a saída de operação do equipamento devido a alimentação de energia elétrica, mesmo dentro da faixa adequada de tensão.

A interpretação do valor final calculado é dada de acordo com a aplicação desejada. Em sistemas mais complexos, por exemplo, pode-se trabalhar, inclusive, com o uso de heurísticas na formulação de índices que melhor descrevem o sistema, como aquele apresentado na equação 2.1, de modo que equipamentos mais importantes podem ter um peso maior na análise, sendo o valor do IP resultante multiplicado por um escalar.

5.2 Proposta de um índice global da planta industrial

Realizando o somatório do IP de diversos pontos da planta pode-se chegar a um valor correspondente a condição de atendimento no fornecimento de energia elétrica dentro dos padrões estabelecidos, sendo este valor final resultante maior que um determinado nível, um indicativo de alerta quanto ao recurso da energia elétrica. Nesta análise calculou-se mais de um IP em cada um dos quatro blocos de dados coletados para verificar a tensão dentro dos limites adequados, sendo cada bloco representado por um medidor. Desta forma, somando o valor dos índices resultantes de cada medida, tem-se um valor de que representa os dados coletados daquele medidor. Fazendo-se isso para os demais pontos de coleta, tem-se um índice que

representa toda a planta e indica a condição de fornecimento de tensão dentro dos limites adequados.

$$IP_G = \sum_{i=1}^{nm} \sum_{k=1}^{nd} IP_{i,k} \quad (5.1)$$

Onde:

IP_G – índice de performance global;

IP – índice de performance de cada grandeza lida;

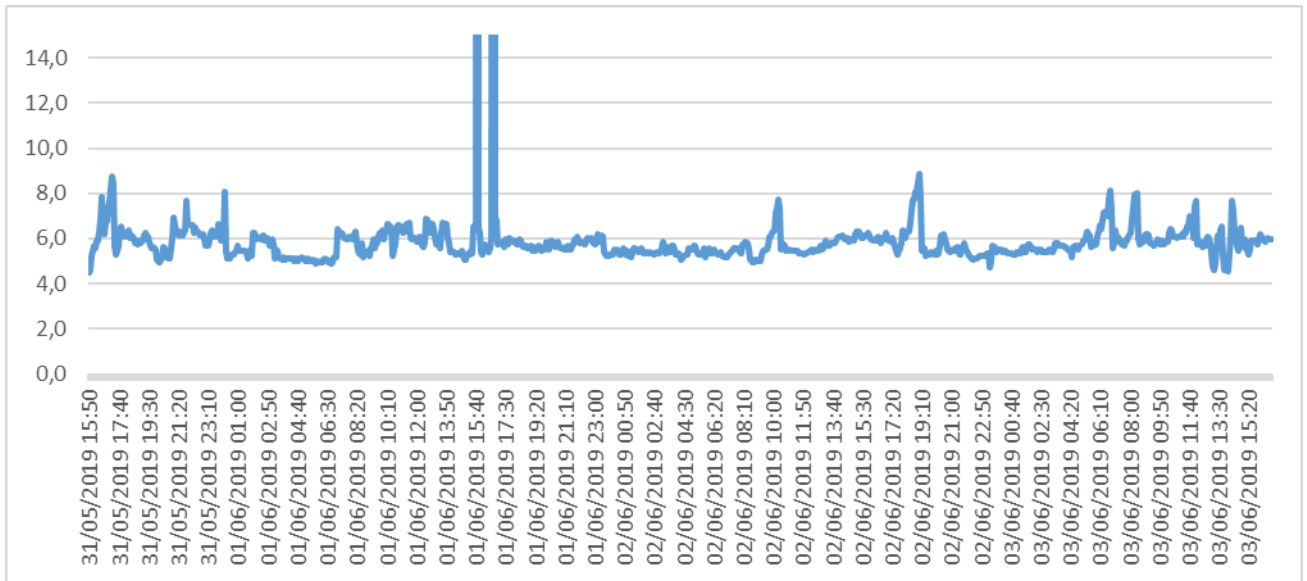
nm – quantidade de medidores;

nd – quantidade de IP calculado por medidor;

Nesta formulação da equação 5.1, é realizado o somatório de todos os índices calculados para obter um resultado contendo informação de todos os pontos de medida e, conseqüentemente, uma leitura única de toda a planta. Seguindo a mesma metodologia aplicada no capítulo anterior, organizou-se os dados para realizar uma análise considerando os quatro conjuntos de dados obtidos. Primeiramente, teve-se que recortar os dados visto que os registros iniciaram e terminaram em momentos diferentes. Uma vez separados os quatro conjuntos de dados de forma sequencial, que vai das 15:50 h do dia 31/05/201, às 16:45 h do dia 03/06/2019, reuniu-se todos para analisar graficamente o índice de performance global IPG, conforme apresentado na Figura 22. Assim pode-se avaliar as condições de fornecimento de energia elétrica, no que diz respeito a tensão, de forma geral podendo cruzar dados sobre ocorrências no sistema produtivo da planta com leituras da tensão de alimentação dos circuitos e então verificar se têm relação.

O valor máximo atingido foi cortado para melhor visualização do gráfico, assim pode-se observar períodos com maior oscilação e períodos mais estáveis no valor do índice. Períodos com maiores valores do índice e os picos, indicam que naqueles momentos os IP de tensão foram maiores indicando que a tensão de alimentação da rede sofreu uma pequena variação levando ao afastamento da tensão nominal, seja por afundamento ou elevação de tensão.

Figura 22: Gráfico do IPG.



Fonte: Elaborado pelo Autor em MS-Excel®.

Já os períodos em que o IPG se manteve com valor baixo e com pouca oscilação, indicam melhor operação dentro da faixa adequada e maior estabilidade da tensão dos circuitos da rede da planta.

Aplicando esse conceito nos dados obtidos e normalizando os resultados obteve-se o seguinte resultado apresentado a seguir na Tabela 13, correspondente aos 15 maiores valores ordenados em forma decrescente.

Percebe-se que os três maiores valores correspondem exatamente ao período em que houveram interrupções de curta duração nos circuitos de ATE_DIR e ATE_ESQ identificados anteriormente. Normalizando os resultados pelo maior valor obtido, possibilita a verificação das principais ocorrências em que o índice global – IPG_N foi mais alto. Verifica-se pelos valores da coluna N na Tabela 13, além do período em que houve a contingência, os demais equivalem a em média 10% da gravidade do pior caso registrado. Com estes dados pode-se afirmar que, além da ocorrência na tarde do dia 01 de junho, a planta operou dentro da faixa adequada em praticamente todo período, indicando um desempenho adequado de qualidade quanto a tensão da rede.

Necessário ainda, neste método de análise através do somatório dos índices, estabelecer os níveis para identificar a ocorrência de contingências na planta. Um nível poderia ser construído levando em consideração cada IP calculado, sendo o

valor desse nível equivalente a multiplicação do valor unitário do IP pela quantidade de IPs calculados.

Tabela 13: Principais resultados do IP global.

Registro	IPG	IPG_N
01/06/2019 16:45	79,6998	1,0000
01/06/2019 16:40	79,5308	0,9979
01/06/2019 15:45	79,4266	0,9966
02/06/2019 19:00	8,8649	0,1112
31/05/2019 17:15	8,7783	0,1101
02/06/2019 18:55	8,4881	0,1065
31/05/2019 17:20	8,4309	0,1058
31/05/2019 17:10	8,2421	0,1034
03/06/2019 06:45	8,1185	0,1019
02/06/2019 18:50	8,1057	0,1017
02/06/2019 18:45	8,0839	0,1014
01/06/2019 00:10	8,0687	0,1012
03/06/2019 08:25	8,0064	0,1005
03/06/2019 08:15	7,9576	0,0998
31/05/2019 16:35	7,8210	0,0981
03/06/2019 06:40	7,7910	0,0978

Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste cenário, uma violação do nível ocorreria quando todos os IPs violassem a faixa adequada. Considerando a quantidade de dados possíveis de leituras e adicionando a possibilidade mensurar não apenas características elétricas do sistema utilizando o mesmo índice, talvez a melhor maneira para estabelecer tais níveis seria com base em históricos passados ou ainda pela ponderação de determinados resultados referentes a pontos chaves da rede.

Tendo acesso a demais registros de ocorrências da planta fabril no que tange as máquinas e equipamentos de produção, uma análise mais completa poderia ser realizada, uma vez que determinados episódios de saída de operação podem ter relação com a qualidade de energia elétrica de alimentação. Outros distúrbios podem causar problemas em máquinas e equipamentos, desta forma o índice pode ser utilizado para analisar essas ocorrências e verificar sua relação com a tensão de alimentação, a procura de padrões que, em determinadas situações, podem até mesmo manifestarem-se dentro dos níveis adequados de tensão. Para isso, é claro, exige-se muita análise e registro de informações precisas sobre a operacionalidade

da planta industrial. Atualmente, já não soa estranho ouvir que empresas aplicam conceitos de inteligência artificial não só nos seus processos de manufatura, mas também para análise e monitoramento da fábrica como um todo.

6 CONCLUSÃO

Com base na revisão bibliográfica e nos resultados obtidos através da execução da metodologia, é possível concluir que o trabalho elaborado atingiu os objetivos propostos. A metodologia foi seguida e os resultados previstos foram alcançados, com os quais pode-se validar este estudo de caso no que diz respeito a utilização de índices de performance para análise abrangente do sistema elétrico industrial.

A segunda formulação do IP proposta para identificar os registros de tensão fora da faixa adequada de fornecimento segundo o PRODIST – Módulo 8 (ANEEL, 2018), teve um ótimo desempenho nos testes preliminares realizados através da simulação de dados. Este resultado positivo foi crucial para então ser aplicado e analisado considerando dados de campo de uma planta industrial.

A partir da análise com os dados de um sistema real, pode-se comprovar a utilidade e validar o IP desenvolvido, pois foi possível identificar os períodos em que ocorreram distúrbios na rede elétrica. Uma vez validado, pode-se utilizar dos resultados para analisar a condição da planta considerando os valores de todos os índices calculados para os diferentes dados de cada um dos quatro medidores instalados no período analisado.

Ainda que com apenas quatro pontos de medida na planta, uma análise breve através do somatório dos índices calculados foi realizada e apresentou resultados satisfatórios, uma vez que o índice global (IPG) refletiu em seu valor, períodos em que realmente houveram distúrbios críticos na rede elétrica da planta. Desta forma, validou-se também o índice global para análise da planta de modo geral, abrindo possibilidade inclusive para adição de índices sobre outras grandezas elétricas, o que resultaria num índice ainda mais completo para avaliar a condição da planta quanto ao recurso de energia elétrica.

Enfim, conclui-se que o trabalho implementado atende a proposta inicial e a formulação do índice utilizada é eficaz na identificação de contingências nas medidas de tensão, podendo inclusive ser utilizado em conjunto com outros pontos de medida para gerar um índice global capaz de refletir a operacionalidade da planta dentro dos limites adequados de tensão. Analisando os resultados obtidos conclui-se que a formulação do índice proposto neste trabalho, poderá contribuir para o desenvolvimento das fábricas inteligentes no Brasil, pois se, devidamente aplicado,

permite a identificação de contingências na rede elétrica da planta industrial, podendo inclusive estimar a condição de operação da planta.

Como sugestão de continuidade e seguindo esta mesma abordagem de trabalho, índices relacionados com a quantidade de leituras ou ao tempo de aquisição com a média do índice, são variantes do cálculo que podem ser utilizados a partir de custo computacional relativamente baixo, para prever distúrbios e ocorrências na rede elétrica de circuitos internos.

O acesso a mais dados do sistema com outros pontos de coleta de dados, permitiria analisar a planta industrial de forma completa. No âmbito da indústria 4.0 pode-se utilizar de dispositivos IoT para coleta de dados singulares, mas determinantes no processo em análise. A utilização do IP formulado não limita-se apenas a análise de tensão e o mesmo poderia ser utilizado para classificar e identificar contingências no sistema produtivo, com base em medidas determinantes quanto a operacionalidade da planta. Outros índices a partir dos dados registrados podem ser formulados, bem como outras classificações para o índice podem ser elaboradas aumentando ainda mais o nível de informação concentrada no valor do índice de performance.

REFERÊNCIAS

- ABDI. **Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial**. 2017. Disponível em: <<https://www.abdi.com.br/postagem/industria-4-0-pode-economizar-r-73-bilhoes-ao-ano-para-o-brasil>>. Acesso em: 02 mai. 2019.
- ALMEIDA, S. e Pestana, R. **Definição e análise de contingências severas na Rede Elétrica Portuguesa**, 9º Congresso Hispano-Luso de Engenharia Electrotécnica, 2005. 1-9.
- BHATIA, Akash et al. **Pioneers Are Pushing the Boundaries of IoT**. 2019. Disponível em: <<https://www.bcg.com/publications/2019/pushing-the-boundaries-of-iot.aspx>>. Acesso em: 05 mai. 2019.
- CARPENTIER, J. **STATIC SECURITY ASSESSMENT AND CONTROLL: A SHORT SURVEY**. IEFE/NTUA Athens Power Tech Conference: "Planning, Operation and Controlo f Today's Electric Power Systems". Atenas, Grécia: IEEE. 1993. p. 1-9.
- CNI, Conselho Nacional da Indústria - Brasil. **DESAFIOS PARA INDÚSTRIA 4.0 NO BRASIL**. 2016. Disponível em: <<http://pedbrasil.org.br/wp-content/uploads/2018/12/19.pdf>>. Acesso em: 08 mai. 2019.
- CORTES, Omar A. C.; MENDEZ, Osvaldo R.S. **Determinação do ranking de contingências em sistemas de energia elétrica utilizando MPI**. In: SECICOM, 1999, Lavras, INFOCOMP Journal of Computer Science, v. 1, p. 1-9, 1999.
- COSTA, Iverson Farias. **Algoritmo Genético para Seleção de Contingências na Análise de Segurança Estática em Redes Elétricas**. São Leopoldo: UNISINOS, 2012.
- GERHARDT, R. A. **Um Sistema Computacional para Análise de Segurança em Sistemas Elétricos de Potência**. São Leopoldo: UNISINOS, 2007.
- GRILO, Ahda. **Um método baseado em Lógica Nebulosa para Classificação de Contingências em Redes de Energia Elétrica**. Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, 2005.
- GUERRA, Antonio Fernandes. **Seleção de contingências para violações de MW em ramos de sistemas elétricos de potência utilizando abordagem multinível adaptativa**. 2002. 63p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/260124>>. Acesso em: 02 mai. 2019.
- Intelligent Factory**: Otimização do Custo Operacional de Fábricas para Microeletrônica via Internet das Coisas (IoT). Instituto Tecnológico em Semicondutores - IttChip. São Leopoldo: UNISINOS. 2019.

IMS. **Catálogo técnico PowerNET MQ-700**. Revisão: 1.00. 2017. Disponível em: <http://www.ims.ind.br/Uploads/Produto/646be653-bb33-4a97-8147-d94d171461dc/PowerNET_MQ-700_Cat%c3%a1logo_P.pdf>. Acesso em: 06 set. 2019.

IMS. **Catálogo técnico PowerNET PQ-700**. Revisão: 1.00. 2017. Disponível em: <http://www.ims.ind.br/Uploads/Produto/1b6f822f-2d7f-4ad4-ae10-763abc3ce05a/PowerNET_PQ700G4_Cat%c3%a1logo_P.pdf>. Acesso em: 06 set. 2019.

KAGERMANN, H., W. et al. **Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0**: Final report of the Industrie 4.0 Working Group. 2013. Disponível em: <https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf>. Acesso em: 11 mai. 2019.

LORENZ, Markus et al.. **Man and Machine in Industry 4.0**. 2015. Disponível em: <<https://www.bcg.com/publications/2015/technology-business-transformation-engineered-products-infrastructure-man-machine-industry-4.aspx>>. Acesso em: 30 abr. 2019.

LORENZ, Markus et al.. **Time to Accelerate in the Race Toward Industry 4.0**. 2016. Disponível em: <<https://www.bcg.com/publications/2016/lean-manufacturing-operations-time-accelerate-race-toward-industry-4.aspx>>. Acesso em: 30 abr. 2019.

MACKENZIE, H. **The Smart Factory of the Future – Part 1**. 2005. Disponível em: <<http://www.belden.com/blog/industrialethernet/The-Smart-Factory-of-theFuture-Part-1>>. Acesso em: 15 mai. 2019.

PEREIRA, PAULO R. DA S. **Relatório Parcial #1 Análise da Qualidade da Energia**. IttChip - Intelligent Factory. São Leopoldo: UNISINOS. 2018.

PEREIRA, PAULO R. DA S. **Métodos para Otimização dos Ajustes dos Reguladores de Tensão e Zonas de TAP em Sistemas de Distribuição**. Dissertação de mestrado. Santa Maria: UFSM, 2009.

PRODIST. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Revisão 10. ANNEL. 2018

QIN, Jian; LIU, Ying; GROSVENOR, Roger. **A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond**. *Procedia Cirp*, [s.l.], v. 52, p.173-178, 2016. Elsevier BV. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282711630854X?via=ihub#bib10005>>. Acesso em: 10 mai. 2019.

QUINTELA, Adriana Ferreira. **Estudo de índices de proximidade ao limite da estabilidade de tensão e aplicação na seleção de contingências**. Campinas: UNICAMP, 2002.

ROCHA, Joaquim Eloir. **Qualidade da Energia Elétrica**. Departamento de eletrotécnica. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2016.

RÜßMANN, Michael et al. **Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries**. 2015. Disponível em: <https://www.bcg.com/pt-br/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries.aspx>. Acesso em: 01 mai. 2019.

SANTAELLA, L.; GALA, A.; POLICARPO, C.; GAZONI, R. **Desvelando a Internet das Coisas**. Revista GEMInIS, v. 4, n. 2, p. 19-32, 15 dez. 2013.

SANTOS, J. V. Canto dos. **Análise de Segurança Estática de Sistemas de Potência: Um Estudo Sobre Critérios de Seleção de Contingências no Subproblema Reativo**. Campinas: UNICAMP, 1993.

SANTOS, J. V. Canto dos; GARCIA, Ariovaldo V. **Um Estudo Sobre Critérios de Seleção de Contingências no Subproblema Reativo da Análise de Segurança Estática de Sistemas de Potência**. In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA – VI CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CONTROLE AUTOMÁTICO. Rio de Janeiro, 1994.

SANTOS, José Vicente Canto dos; da Silva, Juarez Machado ; COSTA, I. ; Barbosa, Jorge Luis Victória ; Braun, T ; PESSIN, G. **Towards a More Reliable System for Contingency Selection in Static Security Analysis of Electric Power Systems**. IEEE Systems Journal. v. 2019, p. 1-12. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8835097>. Acesso em 08 nov. 2019.

SERGI, B. S. **Strategic Fator Analysis for Industry 4.0**. Journal of Security and Sustainability Issues. 2015. 8(2), 159-169.

STOTT B., Alsaç O., Monticelli A.J. **Security analysis and optimization, Proceedings of the IEEE**, 75(12):1623-1644, 1987.

TOMSOVIC, K. **Designing the Next Generation of Real-Time Control, Communication, and Computations for Large Power Systems**. PROCEEDINGS OF IEEE. Vol 93, p. 965-979, 2005.