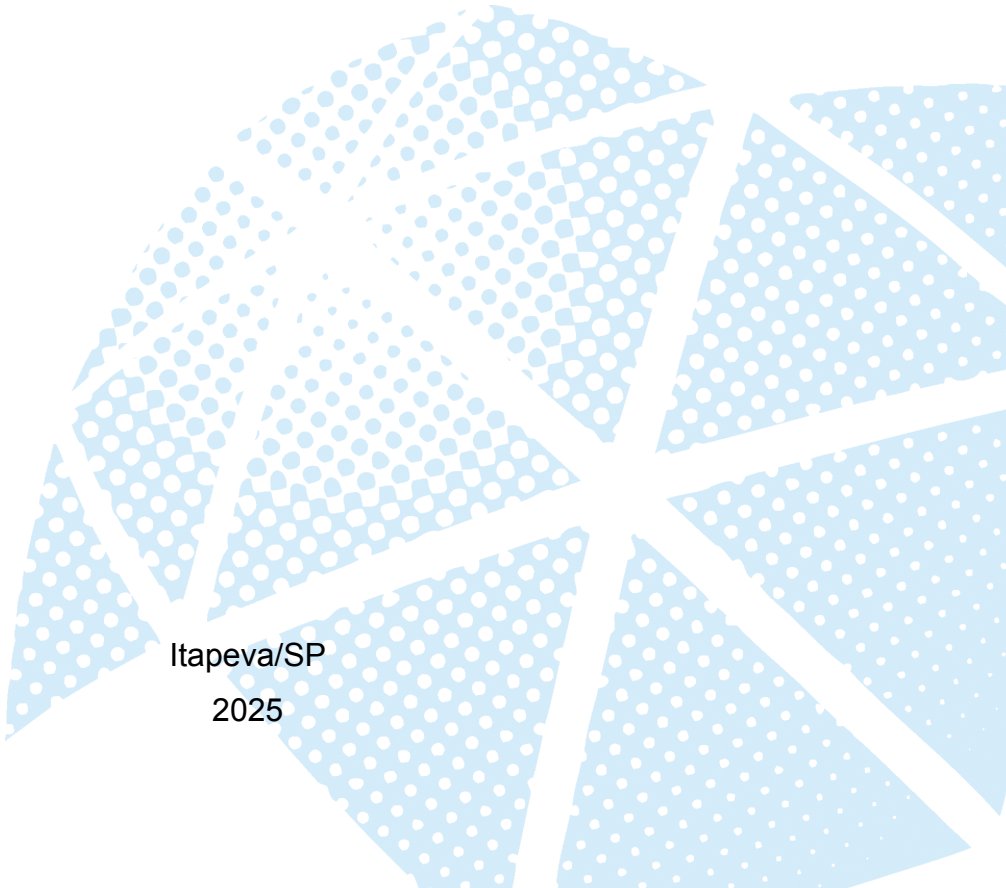


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
Instituto de Ciências e Engenharia - Campus de Itapeva

ERICK GAESKI

**AVALIAÇÃO DA RESILIÊNCIA DE PROCESSOS INDUSTRIAIS FRENTE A
DISTÚRBIOS ELÉTRICOS E MATURIDADE PARA A INDÚSTRIA 4.0**

Itapeva/SP
2025



ERICK GAESKI

**AVALIAÇÃO DA RESILIÊNCIA DE PROCESSOS INDUSTRIAIS FRENTE A
DISTÚRBIOS ELÉTRICOS E MATURIDADE PARA A INDÚSTRIA 4.0**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Instituto de Ciências e
Engenharia, Itapeva, para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia de
Produção.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Pita Rolle

Itapeva/SP

2025

G128a Gaeski, Erick
Avaliação da resiliência de processos industriais
frente a distúrbios elétricos e Maturidade para a
Indústria 4.0 / Erick Gaeski. -- Itapeva, 2025
111 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado -
Engenharia de Produção) - Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Instituto de Ciências e
Engenharia, Itapeva
Orientador: Rodrigo Pita Rolle

1. Processos Produtivos. 2. Distúrbios Elétricos.
3. Avaliação de Resiliência. 4. Indústria. 5. Indústria
4.0. I Título

ERICK GAESKI

**AVALIAÇÃO DA RESILIÊNCIA DE PROCESSOS INDUSTRIAIS
FRENTE A DISTÚRBIOS ELÉTRICOS E MATURIDADE PARA A
INDÚSTRIA 4.0**

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **RODRIGO PITA ROLLE**
Data: 27/06/2025 09:34:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Pita Rolle
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

Documento assinado digitalmente
 **FABIO DE OLIVEIRA CARVALHO**
Data: 30/06/2025 09:43:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

2º Examinador: Fábio de Oliveira Carvalho
IFSP - Itapetininga.

Documento assinado digitalmente
 **ANTONIO FRANCISCO SAVI**
Data: 30/06/2025 09:50:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

3º Examinador: Prof. Dr. Antônio Francisco Savi
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

Itapeva, 13/06/2025.

Dedico este trabalho à minha família — minha mãe, Miriam, meu pai, Zilto, e minha irmã, Monique — pelo amor incondicional, apoio constante e pela base sólida que sempre representaram em minha vida. A presença de cada um foi essencial para que eu me tornasse quem sou, e sou profundamente grato por toda a trajetória construída com vocês ao meu lado.

Dedico também a pessoas muito especiais que já não se encontram mais neste plano, mas que permanecem vivas em minha memória e em cada passo da minha caminhada: minha tia Rosa Maria, e minhas avós Marlene e Liosina. Que a lembrança de vocês continue me guiando e inspirando.

Por fim, dedico este trabalho a todos os colegas de graduação com quem tive o privilégio de conviver. Compartilhar tantos momentos, desafios e conquistas com vocês tornou essa jornada acadêmica mais leve, rica e memorável.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao Prof. Dr. Rodrigo Pita Rolle, orientador deste Trabalho de Conclusão de Curso, pelo suporte prestado na adaptação e atualização do material de pesquisa, assim como pela orientação dedicada, disponibilidade e acolhimento ágil, aspectos fundamentais para a consolidação desta etapa final do projeto.

Ao Prof. Dr. Juan Carlos Cebrian Amasifen, agradeço pela orientação e acompanhamento ao longo do desenvolvimento da pesquisa durante o período de Iniciação Científica, contribuindo diretamente para a estruturação dos conteúdos aqui apresentados.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro concedido por meio do Processo nº 2018/20573-9.

Agradeço ainda às empresas participantes deste estudo, em especial àquelas que possibilitaram visitas técnicas e participaram ativamente como respondentes do questionário, fornecendo dados essenciais para a realização da pesquisa.

“A verdadeira medida de um homem não é como ele se comporta em momentos de conforto e conveniência, mas como ele se mantém em tempos de controvérsia e desafio.”

(Martin Luther King Jr.)

RESUMO

O presente trabalho realizou uma pesquisa de campo em indústrias com o objetivo de analisar o comportamento dos processos produtivos frente a diferentes distúrbios elétricos e, como consequência, quantificar níveis de resiliência em termos de custo de paradas involuntárias. Para isso, foi elaborado um questionário com foco em: i) informações técnicas dos equipamentos e processos durante os distúrbios; ii) os custos unitários associados às paradas produtivas; e iii) as lacunas tecnológicas e operacionais que influenciam a preparação das empresas para a adoção de práticas da Indústria 4.0. Como parte da análise, foi identificado o Tempo de Imunidade do Processo (PIT) frente a distúrbios e sua interconexão com outros subprocessos, caracterizado por valor médio, desvio padrão e distribuição de probabilidade. O PIT e o Custo de Interrupção (CI) foram utilizados como indicadores-chave de desempenho, permitindo avaliar a resiliência dos subprocessos e o impacto econômico das interrupções. Os resultados apontaram uma ampla variação entre os setores industriais analisados, revelando que empresas com maior maturidade tecnológica tendem a apresentar menor vulnerabilidade frente a falhas elétricas. Constatou-se também que muitas indústrias ainda operam com baixa visibilidade dos seus gargalos energéticos, o que dificulta a implementação de ações preventivas. Como conclusão, o estudo propõe soluções tecnológicas alinhadas à Indústria 4.0, tais como sistemas de automação, proteção e gestão energética, agrupadas conforme os indicadores PIT e CI. Essas propostas visam aumentar a resiliência dos processos produtivos, respeitando as particularidades de cada empresa e promovendo uma transição mais segura e eficiente rumo à digitalização industrial.

Palavras-chave: Processos Produtivos, Distúrbios Elétricos, Avaliação de Resiliência, Indústria 4.0.

ABSTRACT

This study conducted field research in industrial companies to analyze the behavior of production processes in response to electrical disturbances and, consequently, to quantify resilience levels in terms of unplanned downtime costs. A structured questionnaire was developed to gather data on: i) technical information regarding equipment and processes during disturbances; ii) unit costs associated with production interruptions; and iii) technological and operational gaps that affect companies' preparedness for adopting Industry 4.0 practices. As part of the analysis, the Process Immunity Time (PIT) was identified and characterized through mean value, standard deviation, and probability distribution, considering its interconnection with other subprocesses. Alongside PIT, the Interruption Cost (CI) was used as a key performance indicator to assess both operational and economic resilience. Results revealed significant variation across industrial sectors, showing that companies with higher technological maturity tend to be less vulnerable to power quality issues. It was also found that many industries still lack visibility over their energy-related bottlenecks, limiting the adoption of preventive measures. As a conclusion, the study proposes technological solutions aligned with Industry 4.0 — such as automation, protection, and energy management systems — grouped according to PIT and CI indicators. These proposals aim to enhance process resilience while considering the specific characteristics of each company and supporting a safer and more efficient transition toward industrial digitalization.

Keywords: Production Processes, Electrical Disturbances, Resilience Assessment, Industry 4.0.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Onda de tensão elétrica e impactos ocasionados por distúrbios elétricos	22
Figura 2 – Curva CBEMA de 1978	23
Figura 3 – Curva ITIC de 2000	23
Figura 4 – Motivadores para implantação de REIs no exterior	25
Figura 5 – Motivadores para implantação das Redes Elétricas Inteligentes (REIs) no Brasil	26
Figura 6 – Representação dos afundamentos e elevações de tensão	31
Figura 7 – Representação da a) modo fundamental, b) 3º harmônico, c) 5º harmônico, d) onda distorcida causada pela somatória dos modos	31
Figura 8 – Faixas de tensão em relação à de referência	39
Figura 9 – Histograma e gráfico normalizado do Custo de Interrupção por fornecimento de energia	54
Figura 10 – Distribuição normal do PIT	55
Figura 11 – Distribuição normal da probabilidade da duração de interrupção	56
Figura 12 – Histograma e curva parametrizada através de parâmetro Burr da probabilidade da duração de interrupção	57
Figura 13 – Localização geográfica das empresas participantes	72
Figura 14 – Atividades que mais consomem energia elétrica	73
Figura 15 – Comparativo entre as avaliações do IASC 2019 e avaliação realizada com os entrevistados	74
Figura 16 – Períodos considerados mais críticos para a ausência de energia elétrica	75
Figura 17 – Intensidade de redução de impactos ao consumidor para diferentes intervalos de aviso prévio da interrupção de energia	76
Figura 18 – Curva da distribuição normal do DMIC referente ao fornecimento de energia às empresas participantes	77
Figura 19 – Distribuição normal do Tempo de Reinício do Processo	78
Figura 20 – Distribuição normal do Custo de Interrupção	79
Figura 21 – Probabilidade acumulada do Custo de Interrupção por evento	79
Figura 22 – Classificação do nível tecnológico das empresas participantes	80
Figura 23 – Amostra de compensação de queda de tensão de 40% do valor nominal pelo SET-DVR	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das VTCD pela ANEEL	27
Tabela 2 – Classificação das VTCD pelo IEEE	28
Tabela 3 – Índice de satisfação dos consumidores da companhia Elektro de 2010 a 2015	38
Tabela 4 – Pontos de conexão em Tensão Nominal inferior a 1 kV (220/127)	40
Tabela 5 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)	42
Tabela 6 – Limites dos indicadores de continuidade anuais (A), trimestrais (T) e mensais (M) por consumidor	43
Tabela 7 – Indicadores de continuidade para o município de Itapeva	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA DO TEMA	17
1.2	OBJETIVOS	18
1.2.1	Objetivo geral	18
1.2.2	Objetivos específicos	18
1.3	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	CONCEITOS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	20
2.2	TIPOS DE DISTÚRBIOS ELÉTRICOS	26
2.2.1	Variações na tensão e interrupções	27
2.2.2	Distorções harmônicas	31
2.2.3	Frequência	32
2.3	INDICADORES	33
2.3.1	Fator de potência	33
2.3.2	Indicadores de qualidade do serviço	34
2.3.3	Tempo de Imunidade do Processo	35
2.3.4	Tempo de Reinício do Processo	35
2.3.5	Custo de Interrupção	36
2.4	REGULAÇÃO E QUALIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA	38
2.4.1	Variações do nível de tensão	39
2.4.2	Fator de potência	41
2.4.4	Frequência	41
2.4.5	Distorções harmônicas	41
2.4.5	Interrupções de fornecimento	43
2.5	INDÚSTRIA 4.0	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1	METODOLOGIA CIENTÍFICA	47
3.2	SELEÇÃO DE EMPRESAS	48
3.3	DEFINIÇÃO DO QUESTIONÁRIO	49
3.4	METODOLOGIA DE TRATAMENTO DE DADOS	53
4	DESENVOLVIMENTO	58
4.1	FILTRAGEM NA SELEÇÃO DAS EMPRESAS	58
4.2	DEFINIÇÃO DO QUESTIONÁRIO	60
4.2.1	Informações Gerais	60
4.2.2	Utilização da Energia Elétrica	61
4.2.3	QEE e Custos Associados	61
4.2.4	Maturidade para Indústria 4.0	64
4.2.5	Estratégia de Avaliação	66
4.3	ENVIO DO QUESTIONÁRIO	69

5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
5.1	EFETIVIDADE DE APLICAÇÃO DO QUESTIONÁRIO	71
5.2	RESULTADOS DO QUESTIONÁRIO	71
5.3	SOLUÇÕES E ALTERNATIVAS PARA MELHORIA DA RESILIÊNCIA	81
5.3.1	Órgão regulador – ANEEL	82
5.3.2	Concessionária	84
5.3.3	Empresas	85
6	CONCLUSÃO	88
6.1	DIFICULDADES ENCONTRADAS E PONTOS DE MELHORIA	89
6.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
6.3	TRABALHOS CIENTÍFICOS APRESENTADOS	91
	REFERÊNCIAS	93
	APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO	101
	APÊNDICE B – CARTA-CONVITE PARA EMPRESAS	111

1 INTRODUÇÃO

A modernização dos processos industriais, impulsionada pela incorporação crescente de equipamentos eletrônicos, tem ampliado a dependência das empresas em relação à qualidade do fornecimento de energia elétrica (Pelegri *et al.*, 2012). Em virtude deste aumento, o mercado corporativo aumenta a sua busca em compreender melhor os problemas relacionados à qualidade da energia fornecida pelas concessionárias de energia elétrica, principalmente porque seus equipamentos podem ser afetados por distúrbios elétricos, podendo causar paradas involuntárias e inesperadas nos seus processos produtivos contínuos (Pelegri *et al.*, 2012; Elphick *et al.*, 2015; Weldemariam *et al.*, 2016; Kumar, 2017), ou até mesmo prejuízos mais graves como a perda de equipamentos e dispositivos essenciais para a continuidade do sistema produtivo. Tendo que o uso da energia elétrica em indústrias se iniciou no começo do século XX e que alimenta cada vez mais complexos processos industriais (Kumar, 2017), a presença de distúrbios elétricos podem afetar gravemente um sistema produtivo e, quando sua ocorrência se torna mais frequente durante um determinado período de tempo, mostrar-se como um dos altos custos dentro da formação do preço de produtos ou serviços fornecidos à população.

Tal como destacado em Cebrian, Milanović e Kagan (2015), existe uma necessidade em correlacionar o comportamento dos modernos equipamentos utilizados nas indústrias com os fenômenos que podem afetar o normal suprimento da energia, isso com o intuito de aumentar a resiliência dos processos produtivos e direcionar, adequadamente, a inserção e utilização de modernas tecnologias (Vegunta ; Milanovic, 2011).

Esta preocupação se dá principalmente pela relação diretamente proporcional entre o nível de automação de uma indústria e a sensibilidade de seus equipamentos frente aos diversos distúrbios elétricos que possam estar sujeitos, ou seja, a evolução tecnológica constante e ampliação da utilização de equipamentos industriais eletrônicos trouxe consigo uma maior exigência quanto à confiabilidade no sistema de fornecimento da energia elétrica. Como consequência, tanto a empresa concessionária de energia quanto os consumidores alocados nas suas áreas de concessão procuram métodos de avaliar e mitigar os custos associados com as paradas de produção (Bollen, 2010).

A falta de energia, ou quando fornecida de forma inadequada, pode ocasionar perdas na produção, paradas nos processos, perdas de insumos, de oportunidades de negócios, custos associados à mão de obra, reparos de equipamentos danificados e, conseqüentemente, acarretar em custos para as indústrias e concessionárias de energia (Coelho *et al.*, 2006). Assim como comentado em Vegunta e Milanovic (2011) e Coelho *et al.* (2006), os prejuízos econômicos relacionados aos problemas no fornecimento de energia nos consumidores dependem tanto das características próprias do consumidor, como sua finalidade de consumo, porte da empresa, ramo de atividade e nível de dependência da energia, quanto das características dos distúrbios, como duração do evento, intensidade do impacto, frequência e momento da ocorrência.

Neste contexto, é necessário um levantamento de dados que permita obter informações a respeito dos custos associados a problemas de qualidade de energia por meio de indicadores, já que a avaliação dos prejuízos econômicos poderá permitir um melhor auxílio para uma tomada de decisão quanto às medidas que devem ser tomadas tanto pela concessionária quanto pelas empresas. Por exemplo, a empresa concessionária pode direcionar melhor os seus recursos na ampliação, manutenção e modernização do sistema elétrico, procurar formas de atenuar as perturbações no sistema de transmissão e distribuição, como descargas atmosféricas, quedas de tensões ou sobretensões devido à entrada e saída de grandes cargas e outros, tudo isto a fim de minimizar as ocorrências de perdas financeiras relatadas por seus consumidores por conta da baixa qualidade do suprimento de energia. As indústrias, por sua vez, podem reestruturar os seus processos produtivos e selecionar equipamentos menos sensíveis a distúrbios elétricos (Kumar, 2017).

Ao longo da história, o setor industrial passou por transformações significativas conhecidas como revoluções industriais, que marcaram avanços tecnológicos e mudanças profundas nos processos produtivos. A primeira revolução industrial, iniciada no final do século XVIII, destacou-se pela mecanização e pelo uso da energia a vapor, substituindo o trabalho manual pelo sistema de produção mecânica (Schwab, 2016). Já a segunda revolução, que se desenvolveu entre o final do século XIX e início do XX, foi marcada pela eletrificação e pela adoção da produção em massa, possibilitando maior escala e eficiência em busca de maior eficiência e lucro, características alavancadas pela evolução do modelo socioeconômico capitalista (Sakurai ; Zuchi, 2018). De acordo com Rocha, Lima e Waldman (2020), a terceira revolução não foi marcada por uma mudança nos meios físicos de produção, como nas anteriores, mas sim por um avanço nos processos de inovação tecnológica, impulsionado pelo desenvolvimento de diferentes áreas do conhecimento. Esse avanço possibilitou a automação de processos e a incorporação de recursos da eletrônica e da computação nas atividades industriais, permitindo um controle mais preciso e digitalizado dos sistemas produtivos, além de abrir espaço para a criação de novas estratégias operacionais baseadas em tecnologia.

Atualmente, vivencia-se a quarta revolução industrial, ou Indústria 4.0, caracterizada pela integração de tecnologias digitais avançadas, como a inteligência artificial, a internet das coisas e sistemas ciberfísicos, que conectam máquinas, dados e sistemas em tempo real. O conceito da Quarta Revolução Industrial surge como um marco de transformação que eleva a eficiência produtiva por meio da integração de tecnologias inteligentes aos sistemas industriais. Essa nova fase é caracterizada pela presença de dispositivos e serviços conectados que operam de forma autônoma, com pouca ou nenhuma intervenção humana, realizando ajustes e adaptações baseados na coleta de dados, que são processados, convertidos em informações e, posteriormente, utilizados como base para a tomada de decisões dentro do próprio ambiente produtivo (Rolle, 2019).

Essa nova etapa amplia significativamente o nível de automação e integração, promovendo ganhos expressivos em produtividade e flexibilidade, mas também aumenta a sensibilidade dos processos produtivos a falhas sistêmicas, especialmente distúrbios elétricos que podem ocasionar paradas inesperadas e danos a equipamentos essenciais.

Diante disso, e considerando que a modernização dos processos industriais tem ampliado a dependência das empresas em relação à qualidade do fornecimento de energia elétrica, é essencial avaliar não apenas a vulnerabilidade dos sistemas produtivos a esses distúrbios, mas também o grau de preparação das empresas para lidar com essa nova realidade tecnológica, buscando soluções que aumentem a resiliência e minimizem impactos financeiros e operacionais.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA

A realização deste estudo se justifica pela crescente relevância dos impactos causados por distúrbios elétricos nos sistemas produtivos industriais, especialmente em um cenário em que a digitalização e a automação tornam os processos cada vez mais sensíveis às variações no fornecimento de energia elétrica. A necessidade de mitigar prejuízos financeiros decorrentes de paradas não programadas, associada à busca por maior eficiência e competitividade, evidencia a importância de se quantificar e analisar os custos envolvidos, bem como propor soluções tecnológicas alinhadas ao contexto da Indústria 4.0. A ausência de informações consolidadas sobre os efeitos econômicos e operacionais destes distúrbios dificulta a tomada de decisão tanto por parte das concessionárias quanto pelas próprias indústrias. Assim, este trabalho busca preencher essa lacuna ao propor uma metodologia de avaliação da resiliência dos processos produtivos frente aos distúrbios elétricos, contribuindo com subsídios técnicos que possam orientar ações de melhoria e investimentos em tecnologias mais adequadas à realidade das empresas analisadas.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos que destacados como referências para o desenvolvimento da pesquisa são:

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho possui o objetivo de analisar a resiliência de processos industriais frente a distúrbios elétricos, quantificando seus impactos operacionais e econômicos e propondo soluções baseadas nos conceitos da Indústria 4.0.

1.2.2 Objetivos específicos

- Elaborar e aplicar um questionário para levantamento de dados sobre distúrbios elétricos, processos produtivos e maturidade tecnológica das empresas;
- Identificar o Tempo de Imunidade do Processo (PIT) e o Custo de Interrupção (CI) em diferentes setores industriais;
- Avaliar o comportamento estatístico dos indicadores PIT e CI com base nas respostas obtidas e seus impactos nas operações industriais;
- Correlacionar o nível de maturidade tecnológica das empresas com sua vulnerabilidade a distúrbios elétricos;
- Propor soluções tecnológicas e operacionais, alinhadas à Indústria 4.0, que aumentem a resiliência dos processos produtivos analisados.

1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este trabalho está organizado em cinco seções principais. A introdução apresenta o contexto, a problemática, os objetivos e a metodologia da pesquisa. A seção de Revisão Bibliográfica aborda os principais conceitos relacionados à qualidade de energia elétrica, tipos de distúrbios, indicadores de desempenho, legislação vigente e o contexto da Indústria 4.0, fornecendo a base teórica necessária para o desenvolvimento do estudo. Em Materiais e Métodos descreve os critérios de seleção das empresas, a composição do questionário aplicado e a metodologia adotada para o tratamento estatístico dos dados. Em seguida, a seção

de Desenvolvimento apresenta os resultados do processo de seleção das empresas, a taxa de adesão, uma visão geral das informações disponíveis e uma amostra do instrumento de coleta. Na seção de Resultados e Discussões, são analisadas as informações coletadas, avaliando a qualidade da energia elétrica nas empresas participantes, suas maturidades tecnológicas frente à Indústria 4.0 e as soluções propostas, classificadas conforme os atores envolvidos (órgãos reguladores, concessionárias e empresas). Por fim, a Conclusão retoma o problema de pesquisa, apresenta os principais achados e contribuições do estudo, bem como propõe direções para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta etapa do projeto foi realizada a revisão bibliográfica, tratando a respeito de conceitos de qualidade de energia elétrica, indicadores que poderão futuramente destacar os impactos nos consumidores sensíveis investigados e também uma síntese da legislação brasileira atual quanto ao tema em questão, dando um destaque a um dos pontos a serem discutidos por conta da definição dos valores nominais definidos pelo órgão regulador responsável, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Também foram analisadas algumas pesquisas que continham questionários referente aos custos associados a distúrbios elétricos em diferentes tipos de consumidores, de forma que auxiliasse algumas tomadas de decisão quanto a definição do questionário.

Para que seja possível compreender o comportamento de processos industriais frente a distúrbios elétricos, é importante que seja estudado o contexto em que estas perturbações estão inseridas e de que forma são tratadas antes de propormos soluções para a melhoria dos processos produtivos que serão estudados. Assim, o estudo da rede elétrica em que estas instalações estão inseridas auxiliará uma tomada de decisão mais inteligente e abrangente frente aos diferentes tipos de variações que a energia elétrica fornecida possa apresentar. Sendo assim, entende-se que é necessário que se realize a análise quantitativa dos equipamentos industriais através da captura de valores referente ao produto “energia elétrica”, porém se torna imprescindível uma análise qualitativa que ligue os distúrbios gerados dentro da rede elétrica com as suas consequências nos consumidores finais.

Para cumprir tal finalidade, são apresentados alguns conceitos que circundam a análise da qualidade de energia elétrica.

2.1 CONCEITOS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

De acordo com Bollen (2003), o conceito de “Qualidade da Energia”, ou em inglês “*Power Quality*”, possui diversas interpretações por diferentes autores. Alguns interpretam o termo como as possíveis variações de tensão ou corrente no fornecimento de energia, enquanto outros também consideram essencial a avaliação da interação dos consumidores com a rede de distribuição a qual estão conectados.

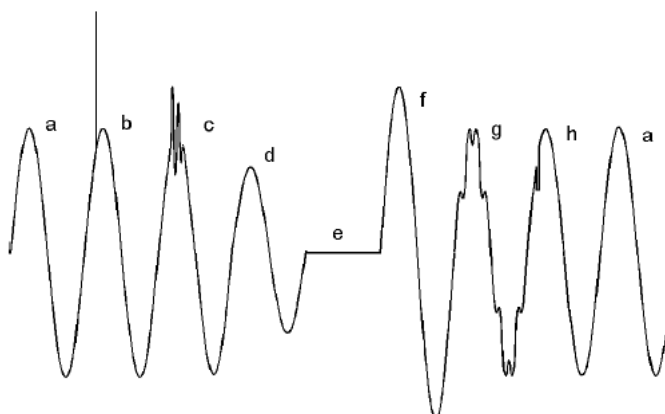
Ainda de acordo com o autor, os distúrbios na qualidade de energia estão relacionados a um conjunto de alterações que podem ocorrer na energia elétrica fornecida, portanto, entende-se como boa qualidade aquele sistema elétrico que apresentar dados relacionados à onda da energia elétrica próximos dos valores nominais, sendo alguns dos aspectos: os níveis de tensão no fornecimento, equilíbrio e simetria do sistema de fornecimento, manutenção da frequência adequada e demais aspectos condizentes com a variação da voltagem ou corrente fornecida, assim como a ocorrência de eventos que possuam um impacto maior com duração mais prolongada.

Por sua vez, problemas de qualidade da energia foram definidos por Dugan *et al.* (2012) como “qualquer problema de energia manifestado na tensão, corrente ou nas variações de frequência que resulte em falha ou má operação de equipamentos de consumidores”. Algo destacado por Mehl (2012) é que, para muitos consumidores de energia elétrica, a questão da qualidade da energia elétrica se relaciona apenas pela constatação de interrupções de seu fornecimento e também que, conforme maior a sofisticação tecnológica destes usuários, demais fatores de qualidade começam a ser notados e serem tomados como importantes para garantir um nível de produção adequado.

O devido estudo da Qualidade de Energia Elétrica (QEE) está envolvido em todos os procedimentos de fornecimento, desde a geração de energia até os procedimentos de normalização para os níveis adequados de acordo com a legislação em vigor, e também na manutenção da energia conforme a rede elétrica é modificada por seus usuários devido à característica de funcionamento de equipamentos eletrônicos que solicitam picos de energia momentâneos (Sankaran, 2002) e alteram a forma da energia elétrica originada pelo sistema de geração.

Para compreender melhor o que se entende como qualidade na onda de tensão elétrica, deve-se entender quais são as características principais de uma onda fundamental e como ela se comporta frente a diferentes distúrbios elétricos. Na Figura 1 pode-se observar o comportamento de uma onda senoidal teórica (Mehl, 2012) da energia elétrica devido a perturbações elétricas, tendo que no ponto “a” é demonstrado o seu comportamento ideal, enquanto nos demais pontos existem diversas formas de perturbações elétricas que modificam a forma da onda ideal.

Figura 1 – Onda de tensão elétrica e impactos ocasionados por distúrbios elétricos



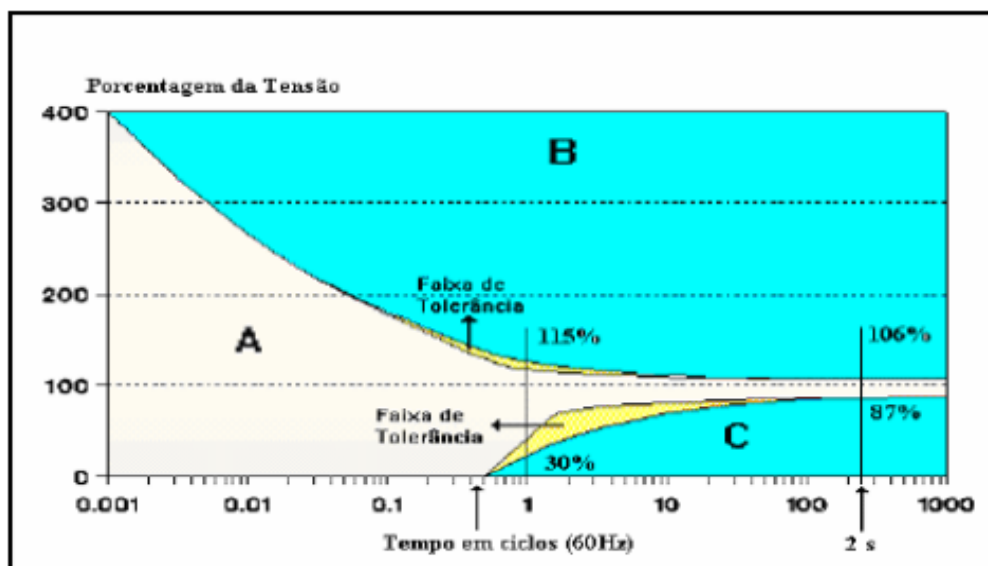
Fonte: Bronzeado *et al.* (1997).

Cada uma das alterações dentro do formato da onda pode vir a acarretar falhas nos equipamentos, trazendo consequências de diferentes formas em processos contínuos de produção, tendo como resultado um custo não estimado pela empresa. Na figura acima, observam-se os seguintes pontos:

- a. Tensão nominal (sem distúrbios)
- b. Surto de Tensão
- c. Transitório Oscilatório de Tensão
- d. Subtensão Momentânea
- e. Interrupção Momentânea de Tensão
- f. Sobretenção Momentânea
- g. Distorção Harmônica
- h. Cortes na Tensão

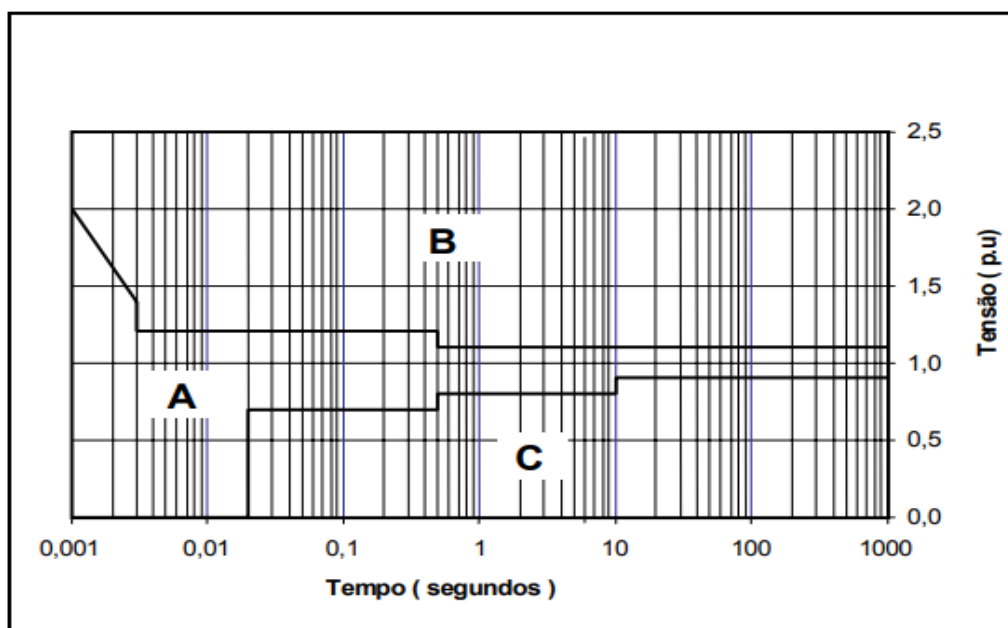
Outro modo de visualizar o comportamento da energia elétrica em diversos equipamentos é através da curva *Computer Business Equipment Manufacturers Association* (CBEMA), representada na Figura 2, assim como a curva *Information Technology Industry Council* (ITIC), destacada na Figura 3.

Figura 2 – Curva CBEMA de 1978



Fonte: Assumpção e Matos (2007).

Figura 3 – Curva ITIC de 2000



Fonte: Leborgne (2003).

As duas figuras demonstram a sensibilidade de equipamentos computacionais frente a faixas de tensão diferentes em função do tempo, entretanto, a curva ITIC possui uma melhor adaptação para equipamentos eletrônicos utilizados a partir da década de 90 (Carvalho, 2000) e representa a porcentagem da tensão nominal de funcionamento em função do tempo. Em ambas, também pode-se

observar três regiões particulares: a) região de imunidade, na qual os equipamentos irão suportar os eventos decorridos; b) região de susceptibilidade, em que ocorrerá elevação de tensão, levando alto risco de dano aos equipamentos; c) região de sensibilidade, onde ocorrem afundamentos de tensão trazendo baixo risco de dano aos equipamentos, mas que podem trazer a interrupção do funcionamento ou uma operação incorreta (Assumpção; Matos, 2007).

Além do quesito de *Power Quality*, outro aspecto importante e citado por diversos autores é a confiabilidade no fornecimento, em inglês “*Power Reliability*”, que trata a respeito da continuidade dos serviços prestados pelas concessionárias de energia elétrica, principalmente em questão de interrupções não programadas e pela constância da qualidade na onda citada anteriormente. Segundo Macedo *et al.* (2023), este aspecto de confiabilidade se refere a capacidade do sistema alternar entre os estados operacional e não operacional, se demonstrando disponível para ser utilizado quando necessário. Outros aspectos que devem ser considerados dentro do contexto do fornecimento de energia elétrica, sendo estes:

- Suficiência no fornecimento: levando em consideração o quão eficiente é a operação e quão disponíveis são as fontes geradoras de energia;
- Segurança energética: lidando com aspectos como a interrupção do fornecimento e a resiliência do sistema de fornecimento e distribuição à impactos ou ataques físicos;
- Segurança cibernética: responsável pela proteção de dados, operações e processos envolvidos dentro de meios digitais, sendo este último mais atrelado a consumidores mais tecnológicos.

O terceiro ponto a ser considerado é quanto os distúrbios elétricos são prejudiciais para a qualidade comercial de um produto ou serviço. A inexistência de um controle de qualidade em uma linha de produção, ou até mesmo o seu mau desempenho, pode resultar em aprovação de produtos com qualidade inferior ao desejado pelos clientes de uma indústria. Pode-se pensar também na dificuldade da recepção de pedidos por um sistema integrado ao fornecedor, o que atrasaria o recebimento de insumos da linha de produção, tornando-se um novo gargalo produtivo. Todos estes problemas podem ser ocasionados por problemas advindos

de um sistema elétrico de qualidade inferior, levando, portanto, a empresa em questão a arcar financeiramente com tais distúrbios elétricos (Milanovic *et al.*, 2011).

Um sistema elétrico de qualidade pode trazer diversos benefícios para diferentes regiões, entretanto, cada região pode apresentar suas particularidades do ponto de vista de evolução tecnológica, do sistema socioeconômico do local, das suas políticas regulatórias e aspectos ambientais (Rivera; Esposito; Teixeira, 2013). Na Figura 4 são destacados alguns motivadores em diferentes partes do mundo para a implementação do conceito de Redes Elétricas Inteligentes (REIs, ou “*smart grids*” em inglês), ou seja, uma infraestrutura do sistema elétrico que seja capaz de prover segurança, agilidade e resiliência, bases fundamentais para o uso das tecnologias da Indústria 4.0 (Amin; Wollenberg, 2005).

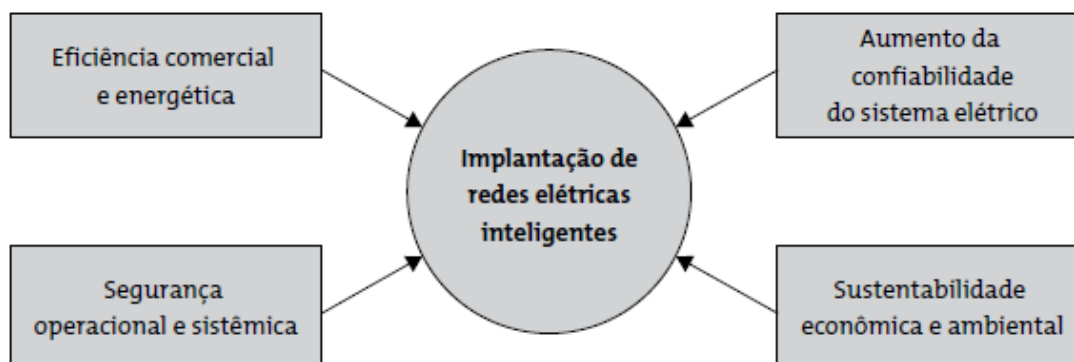
Figura 4 – Motivadores para implantação de REIs no exterior

EUA	Europa	Japão	China
• Agenda tecnológica para recuperação econômica • Infraestrutura obsoleta • Geração distribuída de energia • Confiabilidade, segurança e eficiência do sistema • Uso de veículos elétricos e híbridos	• Integração de diversas fontes de energia renováveis • Infraestrutura envelhecida • Uso de veículos elétricos	• Diversificação energética (acidentes nucleares) • Uso de veículos elétricos • Implantação de cidades inteligentes	• Implantação de cidades inteligentes e protagonismo mundial em IoT • Eficiência energética • Diversificação energética (renováveis)

Fonte: Rivera, Esposito e Teixeira (2013).

Com um intuito comparativo, pode-se observar através da Figura 5 quais são os motivadores da implementação de Redes Elétricas Inteligentes no Brasil, destacando principalmente fatores que lidam com o aproveitamento de recursos renováveis disponíveis no país e até mesmo a falta de qualidade dos sistemas elétricos atuais.

Figura 5 – Motivadores para implantação das Redes Elétricas Inteligentes (REIs) no Brasil



Fonte: Rivera, Esposito e Teixeira (2013).

A Figura 5 mostra quatro elementos motivadores para a implementação das redes elétricas no Brasil, isso mostra uma constante busca na aprimoração das atuais redes elétricas para que seja possível alcançar métodos produtivos mais eficientes.

2.2 TIPOS DE DISTÚRBIOS ELÉTRICOS

Eventos que podem ocasionar distúrbios elétricos podem ocorrer em várias partes do sistema de energia, seja nas instalações dos próprios consumidores ou no sistema (transmissão ou distribuição) supridor de energia da concessionária. No caso das instalações das indústrias, as causas podem ser: o uso extensivo de cargas não lineares, o dimensionamento inadequado dos condutores e transformadores, entre outros (Pelegrini *et al.*, 2012). Por sua vez, do ponto de vista da concessionária de energia, podem-se citar: as desconexões de unidades geradoras, os chaveamentos de bancos de capacitores, as faltas elétricas (ou curtos circuitos) na rede elétrica, entre outros (Bollen, 2010).

Os tipos de distúrbios podem ser diversos dependendo da característica, magnitude e momento de ocorrência de tais eventos. Alguns dos principais distúrbios foram contemplados neste trabalho e são descritos de acordo com a seguinte ordem:

- Variações na tensão e interrupções;
- Fator de potência;

- Distorções Harmônicas;
- Oscilações de Frequência.

2.2.1 Variações na tensão e interrupções

De acordo com Pelegrini *et al.* (2012) e Bollen (2000), os afundamentos de tensão e as interrupções (momentâneas, temporárias e permanentes) de energia são os problemas de qualidade de energia mais importantes enfrentados por muitas empresas. Normalmente, os afundamentos de tensão são causados por faltas (curto-circuitos) no sistema elétrico ou energização/desenergização de grandes cargas (por exemplo: motores). Por outro lado, as interrupções momentâneas e temporárias de energia são causadas principalmente pelo acionamento de dispositivos de proteção (religadores) em resposta a faltas elétricas, como tentativas de eliminar faltas não permanentes.

Tanto os afundamentos de tensão de curta duração, quanto as interrupções momentâneas e temporárias estão englobadas dentro de um grupo chamado de Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD). Em Arruda (2003) são destacadas as diferentes classificações, quanto à duração e magnitude das anomalias elétricas, confeccionadas pela ANEEL (2018) e pelo IEEE (1995). Para efeito comparativo são apresentados os valores das grandezas referentes às VTCD de acordo com as Tabelas 1 e 2, entretanto, para este projeto, apenas os valores de classificação denominados pela ANEEL (2018) serão utilizados devido a necessidade de aplicação futura dessa pesquisa no padrão das normas nacionais vigentes.

Tabela 1 – Classificação das VTCD pela ANEEL

Classificação		Magnitude (m)	Duração (d)
Momentânea	Elevação	$m > 1,1pu^1$	$1c^2 \leq d \leq 3s$
	Afundamento	$0,1pu < m < 0,9pu$	$1c \leq d \leq 3s$
	Interrupção	$m < 0,1pu$	$d \leq 3s$
Temporária	Elevação	$m > 1,1pu$	$3s < d < 180s$
	Afundamento	$0,1pu < m < 0,9pu$	$3s < d < 180s$
	Interrupção	$m < 0,1pu$	$3s < d < 180s$

Fonte: ANEEL (2018).

¹ pu – valor em por unidade em relação a um valor de referência (geralmente o valor nominal)

² 1c – 1 ciclo = 16,6 milissegundos para frequência de 60Hz

Tabela 2 – Classificação das VTCD pelo IEEE

Classificação		Magnitude (m)	Duração (d)
Instantâneo	Elevação	$1,1 \text{ pu} < m \leq 1,8 \text{ pu}$	$0,5 \text{ c} < d \leq 30 \text{ c}$
	Afundamento	$0,1 \text{ pu} \leq m < 0,9 \text{ pu}$	
Momentâneo	Elevação	$1,1 \text{ pu} < m \leq 1,4 \text{ pu}$	$30 \text{ c} < d \leq 3 \text{ s}$
	Afundamento	$0,1 \text{ pu} \leq m < 0,9 \text{ pu}$	
	Interrupção	$m < 0,1 \text{ pu}$	$0,5 \text{ c} < d \leq 3 \text{ s}$
Temporário	Elevação	$1,1 \text{ pu} < m \leq 1,2 \text{ pu}$	$3 \text{ s} < d \leq 60 \text{ s}$
	Afundamento	$0,1 \text{ pu} \leq m < 0,9 \text{ pu}$	
	Interrupção	$m < 0,1 \text{ pu}$	

Fonte: Arruda (2003) *apud* IEEE (1995).

Embora existam muitos casos relatados de eventos ocorridos nas instalações da empresa concessionária de energia, existem também casos onde os curtos-circuitos têm sua origem dentro das instalações das próprias indústrias (Pelegri *et al.*, 2012; Küfeoğlu; Lehtonen, 2013). Nestes casos, os afundamentos de tensão são de níveis menores devido a impedância do transformador de entrada que limita a corrente de curto-circuito, além disso se o tipo de conexão do transformador é Delta-Estrela, a corrente de sequência zero, oriunda de faltas assimétricas, é eliminada do circuito. Contudo podem existir alguns afundamentos de tensão que podem afetar instalações vizinhas ou equipamentos conectados no mesmo ponto de acoplamento comum (Bollen, 2000).

Nesse sentido, ambos, afundamentos de tensão e interrupções de energia, podem causar paradas não intencionais ou falhas em dispositivos eletrônicos que controlam processos industriais (Cebrian; Milanović; Kagan, 2015). Nestes casos, os processos industriais, controlados por esses dispositivos, podem também parar ou falhar, o que leva a perdas financeiras significativas para o setor industrial devido a interrupções inesperadas de seus processos de produção (McGranaghan, 1995). Este é um ponto importante que correlaciona a necessidade de tecnologias modernas nos processos produtivos com a necessidade de um suprimento de energia com alta confiabilidade e com qualidade.

Eventos que possuam sua duração acima de 3 minutos serão incluídos no grupo de Variações de Tensão de Longa Duração (VTLD). As VTLD são denominadas por McGranaghan (1995) como desvios maiores do que 10% do valor da tensão nominal, e seguindo os parâmetros da agência reguladora nacional. Tais variações normalmente são ocasionadas por variações de carga e operações de chaveamento do sistema (IEEE, 1995) e serão divididas em três tipos de fenômenos: interrupções permanentes, afundamentos de tensão sustentados e elevações de tensão sustentadas (Arruda, 2003).

Uma interrupção permanente de energia é definida como a diminuição da magnitude da tensão de alimentação abaixo de 10% do valor de referência por mais de 180 segundos, sem que se haja planejamento prévio. Essas interrupções geralmente são causadas por queda de árvores ou postes, tempestades ou descoordenação de dispositivos de proteção e normalmente necessitam de intervenção manual para o retorno de seu funcionamento normal (IEEE, 1995). É importante ressaltar que a rede elétrica tem o dever de manter o mínimo número de interrupções possível e, além disso, fazer com que as interrupções de energia existentes durem o menor tempo possível e que este fenômeno afete o menor número de consumidores (Arruda, 2003).

Tais interrupções podem trazer consequências nos processos produtivos por conta do desligamento dos equipamentos, podendo prejudicar toda a linha de produção. Até mesmo dispositivos que possuam um sistema *nobreak* ou demais formas de armazenamento de energia mais complexas, podem ser prejudicados por interrupções depois de um determinado período (Gonçalves, 2008).

Afundamentos de tensão sustentados são eventos que apresentam uma redução da tensão para uma faixa entre 10% e 90% do valor nominal. Assim como os afundamentos de curta duração, os de tensão sustentado também podem ser ocasionados por curto-circuitos no sistema elétrico e entrada/saída de energia realizadas por grandes cargas. Ainda mais, McGranaghan (1995) acrescenta que a saída de banco de capacitores e a falta de suporte à reativos também podem originar tal distúrbio.

Algumas consequências apontadas por Arruda (2003) em relação às quedas de tensões de longa duração são: redução da iluminação em lâmpadas incandescentes, menor potência reativa fornecida por banco de capacitores,

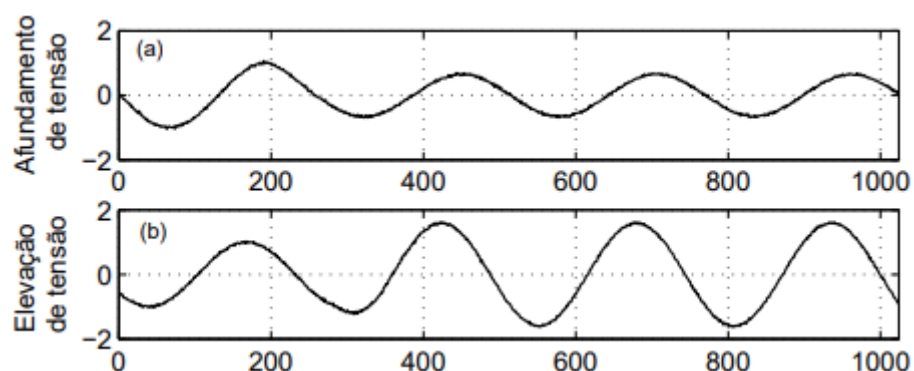
possível interrupção dos equipamentos, sobreaquecimento de motores devido a maiores valores de corrente e maior tempo de partida de máquinas de indução.

Por fim, temos os efeitos de elevação de tensão sustentado, os quais ocorrem em níveis de tensão acima de 110% do valor nominal. Normalmente, este evento ocorre devido a sistemas elétricos subdimensionados para a voltagem necessária ou então os controladores são inadequados ou insuficientes (Dugan *et al.*, 2012). Também podem ser ocasionados por desligamento de grandes cargas, energização de capacitores, configurações incorretas de transformadores e variações na compensação de reativos da rede elétrica (McGranaghan, 1995; Gonçalves, 2008). É ressaltado por Bollen e Gu (2006) que o processamento das elevações de tensões é muito similar às de afundamento.

Esta anomalia no sistema elétrico pode acarretar em rompimento de dielétricos, redução de vida útil ou até perda de equipamentos, danos a dispositivos eletrônicos, riscos de acidentes em casos de equipamentos de armazenamento de energia mal dimensionados (McGranaghan, 1995; Arruda, 2003). Em geral, tanto a concessionária quanto as indústrias utilizam bancos de capacitores para lidar com problemas relacionados com a sobretensão do sistema elétrico (Gonçalves, 2008).

Através da Figura 6 pode-se observar o comportamento da onda ao sofrer afundamentos e elevações de tensão. Tal imagem representa os fenômenos de curta e longa duração, se diferenciando apenas pelo período que tal efeito ocorre, conforme demonstrado anteriormente. No eixo das ordenadas, o autor plota o valor coletado da tensão e o representa em função do valor de referência (pu), enquanto no eixo das abscissas é representado qual o número de cada amostra coletada. Pode-se observar que, aproximadamente a partir da amostra de número 250, a onda se deforma em relação a seu estado anterior, caracterizando, no primeiro gráfico, um afundamento de tensão, e no segundo uma elevação de tensão.

Figura 6 – Representação dos afundamentos e elevações de tensão

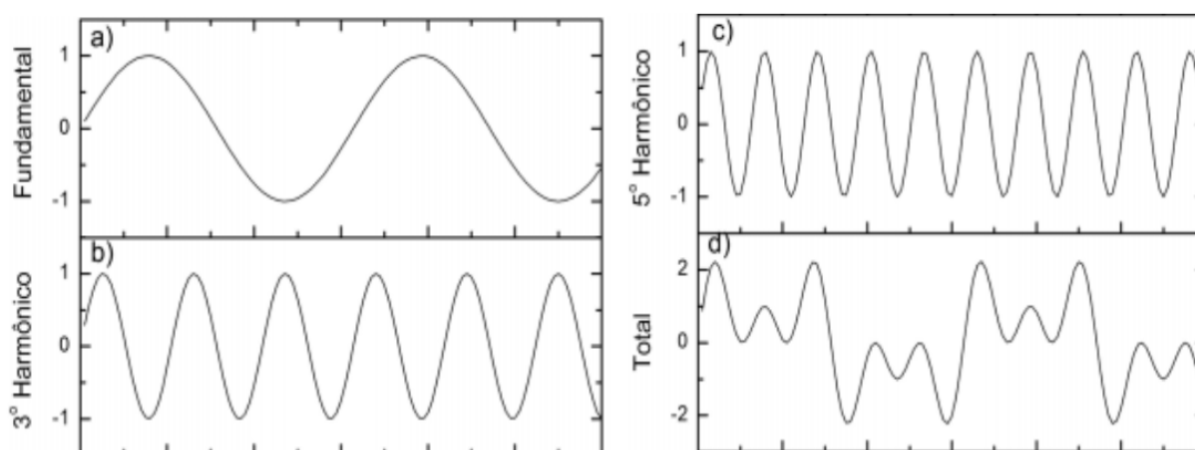


Fonte: Ferreira *et al.* (2009).

2.2.2 Distorções harmônicas

É definido por Arruda (2003) que harmônicos são “tensões ou correntes senoidais de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental na qual opera o sistema elétrico”. A interação com o sistema distorce a onda fundamental da rede, o que faz com que a onda teoricamente “pura” se transforme em uma combinação com as demais componentes harmônicas (Figura 7).

Figura 7 – Representação da a) modo fundamental, b) 3º harmônico, c) 5º harmônico, d) onda distorcida causada pela somatória dos modos



Fonte: Ferreira *et al.* (2009).

De acordo com Azevedo, Romao e Menegatti (2019), tal combinação de ondas se dá através de uma combinação quadrática das demais componentes, sendo chamada então de DHT.

Este tipo de distúrbio é apontado por diversos autores (McGranaghan, 1995; Ferreira *et al.*, 2009; Holmes; Lipo, 2003) como sendo resultado da troca de corrente alternada para contínua devido à necessidade de operar equipamentos como transformadores, motores, retificadores, sistemas eletrônicos de chaveamento, ou seja, em sua grande maioria, cargas não lineares muitas vezes presentes no próprio consumidor industrial.

Em curto prazo, os efeitos desse distúrbio podem ser: vibrações, envelhecimento precoce de equipamentos e alguma sobrecarga. Portanto, dependendo do nível destes distúrbios, tal efeito pode passar despercebido pelos consumidores. Entretanto, com a soma das demais harmônicas e o agravamento da distorção da onda de origem, podem acarretar prejuízos econômicos devido a paradas no setor de produção (Ferreira *et al.*, 2009).

2.2.3 Frequência

Para Bronzeado *et al.* (1997), este distúrbio apresenta pequenos desvios de valores da frequência fundamental da tensão ocasionados pelo desequilíbrio entre a demanda e geração da energia elétrica, ou seja, o número de oscilações da onda fundamental é alterado no mesmo período de tempo avaliado.

O valor da frequência está relacionado com a demanda das cargas alimentadas pelos geradores, ou seja, variações na demanda podem influenciar o valor da frequência em função da resposta do regulador de velocidade dos geradores (IEEE, 1995). Normalmente, estas variações de frequência da onda são acompanhadas por variações de tensão, e deve-se ressaltar que as cargas que são alimentadas por tal sistema devem suportar tais variações (Holmes; Lipo, 2003).

Alguns dos problemas relatados por McGranaghan (1995), e que podem ser enfrentados por tal distúrbio, são a perda de sincronismo de motores, turbinas e outras máquinas síncronas, ou seja, equipamentos que dependem diretamente da frequência da energia elétrica para o seu funcionamento, principalmente tendo uma relação diretamente proporcional com a velocidade de operação (Guedes, 1992).

2.3 INDICADORES

Nesta seção são apresentados alguns indicadores de desempenho que auxiliarão ao entendimento de quais anomalias estão presentes em diferentes locais. Também será possível visualizar o desvio dos valores característicos da onda dentro de uma indústria e compará-los com as faixas de funcionamento normalizadas pela ANEEL. Desta forma, poderá se entender posteriormente nesta pesquisa dois aspectos importantes: se o fornecimento de energia elétrica nos locais estudados está dentro dos padrões determinados e se estas faixas de funcionamento definidas através do PRODIST, módulo 8, são suficientes para atender os processos produtivos que serão analisados futuramente.

Além dos indicadores tradicionais que já são utilizados como marcos regulatórios, outros serão apresentados a fim de auxiliar a compreensão dos impactos ocasionados pelo fornecimento inadequado de energia elétrica.

2.3.1 Fator de potência

Segundo a ANEEL (Arruda, 2003), o valor do fator de potência (fp) deve ser calculado utilizando os valores registrados da potência ativa e reativa (P , Q), ou então, das suas respectivas energias ativa (EA) e reativa (ER). Potência ativa da carga é aquela que se transforma totalmente em trabalho ou calor, já a potência reativa é utilizada para magnetizar os circuitos de equipamentos eletrônicos e retorna para o sistema elétrico. A soma vetorial dessas duas potências é chamada de potência aparente, que nada mais é que a própria potência fornecida ao consumidor (Sallam; Malik, 2011). A fórmula utilizada para tal fim é:

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (1)$$

ou

$$fp = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad (2)$$

Quanto maior for o fator de potência calculado, ou seja, quanto menor a energia reativa, menor será a perda e o superdimensionamento de sistemas

elétricos. É de grande importância se ater aos valores do fator de potência devido à taxação por parte da concessionária aos consumidores devido aos insumos de energia elétrica fornecidos e não consumidos. É destacado por Abdelhay A. Sallam e Om P. Malik (2011), que a potência reativa ocupa certo “espaço” em que poderia estar sendo utilizado para o uso da potência ativa.

2.3.2 Indicadores de qualidade do serviço

O DIC (Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora) tem como objetivo relatar o tempo de interrupção total do fornecimento de energia para cada consumidor. A resolução confeccionada pela ANEEL, não diferencia tratamento entre consumidores residenciais, comerciais e industriais, algo que pode ser discutido por conta das diferentes necessidades quanto à continuidade do fornecimento. A fórmula utilizada para se calcular o DIC, que é expresso é:

$$DIC = I = \sum_{i=1}^n t(i) \quad (3)$$

Na fórmula acima, considera-se que “n” representa o número de interrupções ocorridas, “i” é o índice da interrupção relatada, e “t” o tempo de duração de cada interrupção.

Seguindo ainda as definições realizadas pela ANEEL, descreve-se que FIC (Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora) tem a função de quantificar o número de ocorrências de interrupções por cada ponto de conexão, logo temos que:

$$FIC = n \quad (4)$$

Por sua vez, tem-se o DMIC (Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora) que tem como função relatar qual foi a maior quantidade de tempo com interrupção de energia em um único evento. Sua fórmula é expressa por:

$$DMIC = t(i)_{max} \quad (5)$$

Todos os indicadores que foram apontados neste capítulo (DIC, FIC e DMIC) são advindos de Arruda (2003), seguindo as definições realizadas pela ANEEL.

2.3.3 Tempo de Imunidade do Processo

O Tempo de Imunidade do Processo (ou em inglês, *Process Immunity Time* – PIT) é definido em Bollen (2010) como “o intervalo de tempo entre o início da interrupção de energia e o momento em que o parâmetro do processo afetado ultrapassa um limite de tolerância aceitável, ou seja, fica abaixo de um valor de referência operacional”. Em outras palavras, na ocorrência de um afundamento de tensão ou uma interrupção de curta ou longa duração, alguns dispositivos podem ser desligados ou desconectados do suprimento da energia. Depois dessa desconexão, o PIT definirá se todo o processo terá que ser também desligado. Por exemplo, se o suprimento normal da energia elétrica retorna antes do PIT, isso significa que todo o processo pode suportar essa perturbação; conseqüentemente, o processo não será desligado. Porém, se o suprimento normal da energia elétrica retorna depois do PIT, o processo será desligado provocando, como consequência, perdas financeiras ao consumidor.

Usando PIT como uma referência, processos e equipamentos podem ser agrupados em dois grupos. O primeiro, processos com altos valores de PIT. Eles são capazes de operar sem suprimento da energia por um longo período maior que a típica duração de um afundamento de tensão (por exemplo, um sistema de ventilação). O segundo grupo, processos com valores baixos de PIT. Esses valores são menores que a duração típica de um afundamento de tensão. Processos como controle de velocidade são afetados rapidamente depois da ocorrência de um afundamento de tensão (Bollen, 2010).

2.3.4 Tempo de Reinício do Processo

Este indicador é definido por Cebrian, Milanović e Kagan (2015) como sendo o tempo necessário para a retomada do funcionamento normal de um processo após a existência de uma parada. Neste caso esta variável será

considerada para o cálculo do tempo ocioso total da produção, o que possibilitará futuramente obter o custo total de perda de produção.

Tais custos relacionados ao Tempo de Reinício do Processo (T_{PRS}) mostrarão os dispêndios extras que indústrias necessitam realizar com arranque de motores, configuração de *softwares*, aquecimento de fornos, gastos com horas extras de funcionários e tantos outros fatores que serão somados ao Custo de Interrupção.

2.3.5 Custo de Interrupção

Os prejuízos que as empresas devem enfrentar como consequência de distúrbios elétricos são nomeados na literatura de diferentes formas; por exemplo, em Vegunta e Milanovic (2011) são chamados de Custos de Inatividade ou “*Cost of Downtime - COD*”, na norma 1346 do Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) são chamados de Custos de Disrupção (Milanovic *et al.*, 2011), em Rivera, Esposito e Teixeira (2013) são chamados de Danos Econômicos, e em Cebrian, Milanović e Kagan (2015) são chamados de Perdas financeiras devido a paradas de processos ou (em inglês *Financial Losses Due to Process Trips - FLPT*).

No Brasil, a nota técnica publicada pela ANEEL (Amin; Wollenberg, 2005) chama este tipo de prejuízo como Custo da Interrupção (CI). O CI, portanto, representa o prejuízo de um usuário (industrial, comercial ou residencial) resultante da interrupção de fornecimento sem prévio aviso. Assim, para cada tipo de empresa afetada por uma interrupção, existe um valor associado a esse prejuízo, ou seja, o CI de uma indústria têxtil é diferente de um grande comércio ou de uma residência. Por esse motivo, nas pesquisas sobre esse tema, os custos da interrupção publicados são agregados por tipos de empresa e por atributos relacionados com a interrupção (horário da interrupção, tempo de interrupção, estação do ano, etc.). Estes valores agregados também são conhecidos como “funções de custos dos consumidores”.

De forma similar, Bollen (2010) lista alguns fatores que podem afetar o Custo da Interrupção (CI) quando o processo produtivo é interrompido devido a uma falha em um equipamento ou dispositivo. Os fatores destacados pelos autores são agrupados em três principais categorias: custos diretos; custos de reinicialização; e

custos “ocultos”. Os custos diretos são os acréscimos ao custo de produção como consequência da duração do distúrbio, por exemplo, matéria-prima, energia, mão de obra, despesas gerais, economia de energia, perda de oportunidades, etc. Os custos de reinicialização incluem os custos de avaliação dos danos acumulados (como resultado da contratação de consultores internos ou externos ou contratados); equipamentos e materiais de produção perdidos; custos de danos, conserto e substituição; energia desperdiçada; e custos de ociosidade, reinício e horas extras para restabelecer a produção. Os custos “ocultos” são aqueles que geralmente resultam de danos ou perdas, não imediatamente ou prontamente observados, entre eles: diminuição da competitividade, reputação e insatisfação do cliente; insatisfação dos funcionários como resultado de paralisações, entre outros.

Em termos quantitativos, o CI pode ser avaliado tendo em consideração dois fatores associados com os distúrbios elétricos, ou seja, a duração e a frequência. A duração dos distúrbios elétricos, mais especificamente as interrupções de energia, está intimamente ligada à gestão e aos procedimentos adotados pelas distribuidoras de energia na operação e manutenção das redes, e à infraestrutura existente (tecnologias) para se recuperar o sistema após cada interrupção. No caso da frequência, um valor elevado caracteriza a fragilidade do sistema frente ao meio ambiente (causas externas) e a degradação do sistema por envelhecimento e/ou falta de manutenção adequada. Além dos anteriores, existe mais um fator a ser considerado, ou seja, como se deu a interrupção, de forma programada (com aviso prévio) ou intempestiva (não-programada), sendo que os prejuízos associados às interrupções sem aviso prévio são sensivelmente maiores quando comparados aos prejuízos causados pela interrupção programada.

Quanto à segmentação do Custo de Interrupção (CI), diversos autores seguem uma estrutura muito similar quanto à seleção das variáveis que irão compor tal valor (Hideki *et al.*, 2003; Cruz *et al.*, 2007; Magalhães, 2008; Teixeira *et al.*, 2011). Entre os principais custos que foram diversas vezes destacados para compor o CI estão:

- Custo de perda de material (produtos acabados, em processo ou matéria prima)
- Custo de reparos
- Custo de proteção e solução dos distúrbios

- Custo de perda de informações
- Custo de retomada ou reinício da produção
- Custo de geração própria
- Custo de horas extras
- Custo de atraso da produção

As informações apresentadas anteriormente foram de substancial importância para a elaboração do questionário a ser aplicado nas indústrias.

2.4 REGULAÇÃO E QUALIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA

O crescimento de consumidores de energia elétrica no país está presente até mesmo nos dias atuais (2,5% entre 2018 e 2019 para consumidores residenciais na região de Itapeva) (Teixeira *et al.*, 2011; ANEEL, 2019), mesmo que em menor escala do que as décadas passadas. A preocupação com o atendimento ao maior número de habitantes já parece estar sanada em certas regiões; entretanto, a evolução da qualidade na distribuição parece não ter acompanhado a evolução tecnológica presente em diversas indústrias, conforme pode ser notado em avaliações de satisfação (Tabela 3) realizadas a respeito da concessionária Elektro entre os anos de 2010 e 2015.

Tabela 3 – Índice de satisfação dos consumidores da companhia Elektro de 2010 a 2015

ITENS DE AVALIAÇÃO	ELEKTRO						
	2010	2012	2013	2014	2015	% Var 2015 / 2014	
Qualidade Percebida	77,13	68,60	74,77	71,12	56,39	-20,71%	▼
Satisfação	72,16	67,88	55,91	73,23	57,00	-22,16%	▼
Confiança	71,87	70,22	74,31	70,02	56,59	-19,18%	▼
Fidelidade	45,05	33,82	47,60	39,41	40,03	1,58%	▲
Valor	37,86	35,18	41,38	41,16	26,22	-36,29%	▼

Fonte: ANEEL (2018).

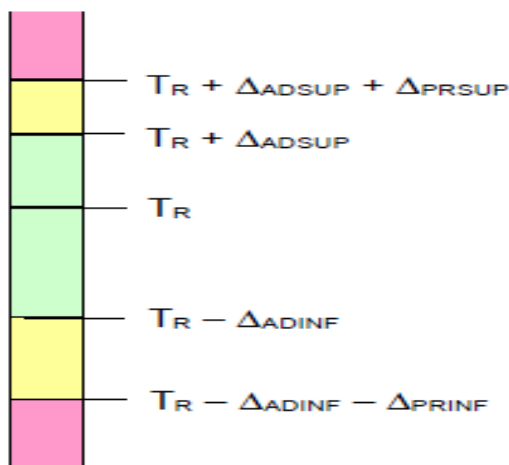
Em seguida são destacados alguns indicadores de desempenho definidos no módulo 8 do PRODIST de acordo com a ANEEL para avaliar a qualidade do produto e do serviço prestado pelas empresas concessionárias de energia. A obtenção de dados amostrais feita pelas distribuidoras, a qual irão ser comparados com as metas pré-estabelecidas pela ANEEL, é realizada trimestralmente e contém um conjunto de 1008 leituras com um intervalo de 10 minutos entre cada uma (totalizando 168 horas). Caso exista reclamação do consumidor, poderá existir uma coleta de dados eventuais para que seja avaliada a situação.

2.4.1 Variações do nível de tensão

As tensões de leitura realizada pela ANEEL são classificadas de acordo com a Figura 8, sendo:

- a) Tensão de Referência: T_R ;
- b) Faixa Adequada de Tensão: $(T_R - \Delta_{ADINF}, T_R - \Delta_{ADSUP})$;
- c) Faixas Precárias de Tensão: $(T_R + \Delta_{ADSUP}, T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP})$ ou $(T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}, T_R - \Delta_{ADINF})$;
- d) Faixas Críticas de Tensão: $>T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$ ou $<T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$.

Figura 8 – Faixas de tensão em relação à de referência



Fonte: Arruda (2003).

Os valores de T_R e suas respectivas faixas de nível precário e crítico são dados por tabelas de acordo com a tensão nominal contratada (exemplo: Tabela 4) e a partir desta referência são avaliadas as leituras referentes a qualidade do produto oferecida.

Tabela 4 – Pontos de conexão em Tensão Nominal inferior a 1 kV (220/127)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233) /$ $(110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$

Fonte: ANEEL (2018).

Através destas tabelas, são avaliadas as faixas consideradas como adequadas de acordo com a agência reguladora e então discutidos se tal regulamentação ainda prejudica de alguma forma os consumidores industriais.

Algo que deve ser destacado é que não existe na resolução da agência uma diferenciação do impacto causado quanto ao tipo de consumidor (residencial, comercial ou industrial), entretanto, a agência adota um cálculo chamado Fator de Impacto (FI) que tem como função reduzir o valor cobrado pelo fornecimento de acordo com a duração de eventos que tornaram a energia elétrica com menor qualidade.

Todavia, os prejuízos enfrentados pela baixa qualidade de energia não se limitam aos valores pagos em conta de energia elétrica, e, a partir do momento que não existe uma mensuração eficiente dos custos relacionados a tais distúrbios, o processo de compensação financeira aos consumidores prejudicados se torna ineficaz e muitas vezes incorreto.

2.4.2 Fator de potência

Em relação ao fator de potência, a agência reguladora solicita medição permanente e obrigatória dos valores de referência apenas para consumidores de média e alta tensão que possuem tensão contratada inferior a 230 kV, sendo que o fator de potência calculado deverá estar compreendido entre 0,92 e 1 de acordo com cálculo já demonstrado.

A constatação de valores que estiverem abaixo de 0,92 resultam em multas para o consumidor, constatadas nas faturas de cobrança ao fim do período de leitura definido.

2.4.4 Frequência

As distribuidoras devem fornecer uma energia elétrica que esteja operando dentro dos limites de frequência entre 59,9 Hz e 60,1Hz. Em caso da ocorrência de quaisquer distúrbios relacionados à frequência da onda, a distribuidora possui a obrigação de retornar para faixa entre 59,5 Hz e 60,1Hz em um intervalo de 30 segundos após o evento.

Se a distribuidora tiver a necessidade da parada de geração de energia ou então interrupção no fornecimento, com o intuito de restabelecer o equilíbrio entre a demanda e a geração, durante tais distúrbios deverão ser seguidos os seguintes padrões de frequência:

- a) não exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz
- b) permanecer no máximo 30 segundos acima de 62 Hz e máximo de 10 segundos acima de 63,5 Hz,
- c) permanecer no máximo 10 segundos abaixo de 58,5 Hz e máximo de 5 segundos abaixo de 57,5 Hz.

2.4.5 Distorções harmônicas

Para serem realizados os cálculos das distorções harmônicas, são realizadas somas vetoriais dos valores de diferentes ordens de harmônicas,

resultando em quatro conjuntos de Distorções Harmônicas Totais (DTTs). O cálculo realizado para cada uma delas se dá por:

$$DTT_a = \frac{\sqrt{\sum_h^n V_h^2}}{V} \quad (6)$$

Em que “ V_h ” representa a tensão harmônica de ordem “h” e “V” é a tensão fundamental medida. Enquanto isso, “a” representa o conjunto de harmônicos, tendo seus próprios valores de “n” e “h”, de acordo com a relação abaixo.

- Para DTT : h = todas as ordens harmônicas de 2, e n = máxima ordem harmônica encontrada;
- Para DTT_p : h = todas as ordens harmônicas pares não múltiplas de 3, e n = máxima ordem harmônica par não múltipla de 3;
- Para DTT_i : h = todas as ordens harmônicas ímpares não múltiplas de 3, e n = máxima ordem harmônica ímpar não múltipla de 3;
- Para DTT_3 : h = todas as ordens harmônicas múltiplas de 3, e n = máxima ordem harmônica múltipla de 3.

Tendo os valores de DTT , DTT_p , DTT_i e DTT_3 calculados, são usados os indicadores fornecidos na Tabela 5 de acordo com a tensão nominal contratada para identificar os distúrbios relacionados às anormalidades das distorções harmônicas.

Tabela 5 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
$DTT_{95\%}$	10,0%	8,0%	5,0%
$DTT_p_{95\%}$	2,5%	2,0%	1,0%
$DTT_i_{95\%}$	7,5%	6,0%	4,0%
$DTT_3_{95\%}$	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: ANEEL (2018).

2.4.5 Interrupções de fornecimento

Quanto as interrupções, a ANEEL se baseia nos indicadores DIC, FIC e DMIC para estabelecer limites para as concessionárias de energia, seguindo os valores da Tabela 6, de acordo com a quatro categorias separadas em função da tensão nominal fornecida para os consumidores pela distribuidora de energia.

Tabela 6 – Limites dos indicadores de continuidade anuais (A), trimestrais (T) e mensais (M) por consumidor

Categorias	DIC (horas)			FIC (interrupções)			DMIC (horas)
	A	T	M	A	T	M	M
Categoria 1 TC $\geq$ 230 kV	1,30	0,98	0,65	2,00	1,50	1,00	0,49
Categoria 2 230 kV > TC $\geq$ 138 kV	2,62	1,97	1,31	2,66	2,00	1,33	1,08
Categoria 3 138 kV > TC $\geq$ 69 kV	3,94	2,96	1,97	3,34	2,51	1,67	1,50
Categoria 4 69 kV > TC $\geq$ 1 kV	5,24	3,93	2,62	4,00	3,00	2,00	2,28

Fonte: ANEEL (2018).

A partir dos indicadores de continuidade individuais, a agência também calcula indicadores por conjuntos regionais, podendo assim avaliar melhor quais regiões apresentam maiores índices de interrupção em questão de duração e frequência. O cálculo para ambos os indicadores DEC e FEC é realizado através da média aritmética dos valores de DIC e FIC, respectivamente. A ANEEL (2015) disponibiliza os valores destes indicadores coletivos por municípios. Pode-se notar através da Tabela 7 que os valores admitidos dificultam a operação totalmente satisfatória de consumidores industriais sensíveis no município de Itapeva, possivelmente trazendo um alto nível de perda de produtividade em função destes gargalos produtivos ligados a distúrbios elétricos.

Tabela 7 – Indicadores de continuidade para o município de Itapeva

Urbano			DIC (em horas)			FIC (número de interrupções)			DMIC (em horas)	DICRI (em horas)
Conjunto	DEC	FEC	ANUAL	TRIM.	MENSAL	ANUAL	TRIM.	MENSAL	MENSAL	INTERRUPÇÃO
ITAPEVA	10	7	20,30	10,15	5,07	12,70	6,35	3,17	2,86	12,22

Não urbano			DIC (em horas)			FIC (número de interrupções)			DMIC (em horas)	DICRI (em horas)
Conjunto	DEC	FEC	ANUAL	TRIM.	MENSAL	ANUAL	TRIM.	MENSAL	MENSAL	INTERRUPÇÃO
ITAPEVA	10	7	41,19	20,59	10,29	29,79	14,89	7,44	5,48	16,60

Fonte: ANEEL (2015).

Para que consumidores industriais atinjam um nível satisfatório em sua produção, é de grande importância que se observem as paradas de produção relacionadas a distúrbios elétricos e que sejam mitigadas as suas causas. Para que se possa alcançar tal objetivo é importante que as concessionárias invistam adequadamente na aprimoração de suas linhas de geração, transmissão e distribuição, podendo então alcançar cada vez mais melhores avaliações em relação à qualidade dos serviços por ela prestado.

2.5 INDÚSTRIA 4.0

Atualmente, as empresas de manufatura vêm desenvolvendo produtos funcionais com menor custo de produção, maior qualidade, menor tempo de entrega e maior responsabilidade socioambiental para atender às constantes necessidades da sociedade (ANEEL, 2018). Entretanto, desenvolver novos produtos é um processo complexo devido às diferentes incertezas durante todo o processo produtivo (mudança nas tecnologias disponíveis de fabricação, inconstância de mercado e mudanças no design do produto, etc.). Visando atender essa complexidade, o conceito de "Indústria 4.0", ou também chamado de "a quarta revolução industrial", está sendo usado para agregar a atual tendência de automação e troca de dados em tecnologias de fabricação.

Segundo Geissbauer, Vedso e Schrauf (2016), a visão da Indústria 4.0 é a formação de uma rede global que incorpora as instalações existentes de uma empresa, as novas máquinas inteligentes, os sistemas de armazenamento de informação, etc., todas elas capazes de trocar informações de forma autônoma,

desencadeando ações e controlando umas às outras independentemente. O objetivo do conceito de Indústria 4.0 é realizar “fábricas inteligentes”, nas quais máquinas e recursos se comunicam, trocam informações umas com as outras, semelhante a uma rede social. Em outras palavras, uma fábrica inteligente produzirá produtos inteligentes — “*smart products*” — os quais têm o conhecimento de como foram produzidos.

A Indústria 4.0 é um conceito baseado em uma combinação de tecnologias. Uma delas é o *cyber-physical system*, capaz de monitorar, através de sensores e softwares, um conjunto de dispositivos, máquinas e equipamentos em um processo de fabricação e fazê-los se comunicar uns com os outros (Kagermann; Wahlster, 2013). Outras tecnologias são: o *big data* (Jiang, 2017), usado para extrair tendências de grandes volumes de informações produzidas por máquinas; a internet das coisas (Yan *et al.*, 2017), que coleta e transfere dados à distância; a manufatura aditiva ou impressão 3D, que permite que os fabricantes produzam produtos personalizados (Montes, 2016), etc. Essas tecnologias permitem que as empresas trabalhem com um nível mínimo de estoque e conectem vários elos da cadeia produtiva.

No Brasil, existem empresas já em fase madura da Indústria 4.0, mas, infelizmente, são consideradas casos de exceção (Montes, 2016). A inclusão da Indústria 4.0 no atual setor industrial poderia contribuir para melhorar a resiliência dos processos de produção durante falhas no fornecimento da energia elétrica e encontrar novas formas de lidar com os principais desafios globais, como as mudanças climáticas, a falta de acesso à energia limpa e a estagnação econômica (Marques, 2017a; Marques, 2017b). No entanto, a fim de compreender as potenciais oportunidades que a Indústria 4.0 pode apresentar em países com vários níveis de industrialização, é necessário delinear os desafios, limites, barreiras e riscos que ela pode representar no setor industrial atual (Geissbauer; Vedso; Schrauf, 2016). Nesse cenário, alguns setores industriais terão que investir e modificar seus processos mais antigos para entrar no conceito de Indústria 4.0, o que não poderá ser feito sem incentivos governamentais (Montes, 2016). Adicionalmente, em termos energéticos, se a energia elétrica é fornecida com qualidade insuficiente, isso pode desencorajar investimentos públicos e privados em Indústria 4.0. Nesse sentido, a Indústria 4.0 poderá atingir o seu patamar pretendido quando as empresas e

concessionárias de energia estiverem preparadas para enfrentar os diversos distúrbios elétricos dentro e fora das suas instalações.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de alcançar os objetivos específicos propostos neste trabalho, foram adotadas estratégias metodológicas que permitissem a coleta, organização e interpretação de informações relacionadas à resiliência de processos industriais frente a distúrbios elétricos. Inicialmente, realizou-se a elaboração de um questionário estruturado, desenvolvido a partir da literatura técnica e científica sobre qualidade de energia, processos industriais e Indústria 4.0, com foco na obtenção de dados junto a empresas industriais.

A partir da aplicação desse instrumento, foi possível reunir informações sobre os distúrbios elétricos enfrentados pelas empresas, o comportamento de seus processos produtivos, os custos associados a paradas involuntárias e o nível de maturidade tecnológica. Tais informações foram fundamentais para a identificação dos indicadores centrais deste estudo: o Tempo de Imunidade do Processo (PIT) e o Custo de Interrupção (CI), os quais servem como referência para avaliação da vulnerabilidade e desempenho dos sistemas produtivos.

Os dados coletados também possibilitaram o desenvolvimento de análises voltadas à caracterização estatística dos indicadores e à verificação de possíveis relações entre a maturidade tecnológica das empresas e sua exposição a distúrbios elétricos. A partir dessas análises, buscou-se ainda fundamentar a proposição de alternativas tecnológicas e operacionais que possam contribuir para o aumento da resiliência dos processos produtivos, considerando os princípios da Indústria 4.0.

3.1 METODOLOGIA CIENTÍFICA

A metodologia científica adotada neste trabalho baseou-se em uma abordagem quantitativa, com suporte em revisão bibliográfica e coleta de dados empíricos por meio da aplicação de um questionário estruturado (*survey*) em indústrias. A revisão da literatura forneceu os fundamentos teóricos necessários para a construção do instrumento de coleta e para a definição dos principais conceitos e indicadores utilizados. As informações obtidas junto às empresas foram organizadas e tratadas estatisticamente, permitindo a análise da resiliência dos processos produtivos frente a distúrbios elétricos. A metodologia foi orientada pela

busca de evidências que possibilitam mensurar impactos operacionais e econômicos, além de embasar a proposição de soluções tecnológicas alinhadas às diretrizes da Indústria 4.0.

3.2 SELEÇÃO DE EMPRESAS

No primeiro momento, o único critério adotado para a listagem de possíveis empresas participantes do projeto foi que elas possuam processos produtivos contínuos. Deste modo, a avaliação das alterações no ritmo normal de produção será menos influenciada por interrupções ou empecilhos na produção que não sejam originadas de distúrbios relacionados à energia elétrica.

A Tabela 8 lista as 30 empresas que foram inicialmente selecionadas para que fossem contatadas/convidadas a participar da pesquisa, conforme carta-convite apresentada no Apêndice B. A lista de empresas foi agrupada por tipo de atividades com o intuito de comparar as suas relações de resiliência frente a distúrbios elétricos e o seu nível de inserção no contexto da indústria 4.0.

Quadro 1 – Lista de empresas selecionadas até o mês de agosto de 2019

Empresa	Atividade	Cidade
Maringá Ferro-Liga S.A.	Fáb. ³ . de aço	Itapeva/SP
Nutriceler - Ind. de Fertilizantes Especiais	Fáb. de adubos e fertilizantes	Itapeva/SP
Votorantim Cimentos S.A.	Fáb. de cal e gesso	Itapeva/SP
Suzano Papel e Celulose S.A.	Fáb. de celulose, papel e produtos de papel	Itararé/SP
Fibria Celulose S.A.	Fáb. de celulose, papel e produtos de papel	Capão Bonito/SP
Santana Indústria e Com. de Embalagens	Fáb. de embalagens de madeira	Itapeva/SP
Ipe Indústria de Paletes e Embalagens	Fáb. de embalagens de madeira	Itapeva/SP
Cemi Com. de Embalagens de Madeira e Ind.	Fáb. de embalagens de madeira	Itapeva/SP
Fasapel	Fáb. de embalagens de material plástico	Itararé/SP
Seller Mecânica Indústria Com.	Fáb. de equipamentos Ind.is	Itapeva/SP
Nutrien Ag Solutions	Fáb. de fertilizantes	Itapetininga/SP
Indústrias PGG	Fáb. de máquinas, aparelhos e materiais elétricos	Sorocaba/SP
Hurth Infer Ind. de Máquinas e Ferramentas	Fáb. de máquinas, aparelhos e materiais elétricos	Sorocaba/SP
International Paper do Brasil	Fáb. de papel	Nova Campina/SP

³ Fáb. - Fábrica

Taquari Ind. e Com. de Papeis Ltda	Fáb. de papel	Itapeva/SP
Melida Com. Indústria	Fáb. de plástico	Sorocaba/SP
Itaگران Marmoraria e Marcenaria	Fáb. de produtos minerais não-metálicos	Itapeva/SP
Concretix Concreto e Argamassa Ltda	Fáb. de produtos minerais não-metálicos	Itapeva/SP
SBS Minérios Indústria e Com. Ltda	Fáb. de produtos minerais não-metálicos	Itapeva/SP
3M do Brasil Ltda	Fáb. de produtos químicos	Itapetininga/SP
Avon Cosméticos Ltda	Fáb. de produtos químicos	São Paulo/SP
Ind. e Com. de Cosméticos Natura Ltda.	Fáb. de produtos químicos	Cajamar/SP
Matsuko Indústria Ltda	Fáb. de produtos têxtil	Sorocaba/SP
Sorvetes Gygabon	Fáb. de sorvetes	Marília/SP
Indústria Gráfica Ita News	Indústria de produtos gráficos	Itapeva/SP
Resineves Agroflorestal Ltda	Produção de produtos não-madeireiros	Itapeva/SP
Art Pinnus Resineira	Produção de produtos não-madeireiros	Itapeva/SP
Sguario Ind. De Madeiras Ltda	Serraria	Nova Campina/SP
Serraria Paineira Ltda	Serraria	Itapeva/SP
Línea Paraná Madeiras	Serraria	Sengés/PR

Fonte: Autoria Própria (2025)

3.3 DEFINIÇÃO DO QUESTIONÁRIO

Para a definição do questionário foram consultadas diversas pesquisas relacionadas com o tema em questão, como Melo e Cavalcanti (2003), Ardito, Malgarotti e Prudenzi (2003), Schuh *et al.* (2017), Nascimento (2021), Kjølle, Samdal, Singh e Kvitastein (2008), Ortmeyer e Fisk (2012) e Melo e Cavalcanti (2003), além de outras pesquisas correlatas. Estes documentos auxiliaram o direcionamento de quais seriam as informações relevantes a serem levantadas, assim como direcionaram a confecção do questionário de uma forma que se adaptasse ao assunto específico tratado neste projeto. A seguir, são ressaltadas, em ordem cronológica, as principais características destas pesquisas, assim como semelhanças e diferenças notadas a respeito delas.

Em Melo e Cavalcanti (2003), observa-se que a separação das indústrias pesquisadas, nas quais totalizaram 400, é feita de acordo com os respectivos tipos de atividade e também com três faixas referentes à sua tensão nominal de funcionamento (baixa, média e alta voltagem). Os processos produtivos são classificados em quatro tipos: contínuo e três tipos de troca de turno de produção (de uma a três). São relatadas as frequências de ocorrência dos distúrbios por ano e

os tipos são divididos em três grupos (elevações de tensão, flutuação e interrupções de curta duração). As empresas também foram questionadas quanto ao tempo de interrupção do processo quando afetadas pelos distúrbios citados anteriormente, assim como sobre quais tipos de equipamentos foram submetidos a tais eventos. Um aspecto também considerado nesta pesquisa é a presença de dispositivos na empresa que possam mitigar os distúrbios presentes, elemento que foi tomado como importante na confecção do questionário apresentado posteriormente. Por fim, os chamados “custos relacionados a problemas de qualidade” foram coletados por meio de uma avaliação qualitativa, segmentando as respostas entre desprezível, baixo, médio, alto e muito alto.

O questionário criado por Martelli Filho *et al.* (2005) se assemelha ao questionário anterior de Melo e Cavalcanti (2003) quanto à segmentação dos tipos de empresas em relação ao setor de atividade, tensão nominal, tipo de funcionamento dos processos; entretanto, também agrupou empresas conforme a quantidade de funcionários, perfil da utilização de energia para máquinas, percepção da qualidade de energia, necessidade de aviso prévio das interrupções de energia e percepção do impacto ocasionado pelos distúrbios. Quanto ao Custo de Interrupção (CI), a pesquisa avaliada, assim como em Ardito, Malgarotti e Prudenzi (2003), considera o custo da utilização da energia não fornecida propriamente, além de destacar os seguintes custos:

- Custos de geração própria: resultante de energia elétrica produzida pela própria empresa decorrente da falta de suprimento;
- Custo de proteção: devido a necessidade de proteção da indústria quanto aos possíveis eventos;
- Custo de reparos de equipamentos: originados por conta da necessidade de consertar quaisquer equipamentos da linha produtiva
- Custo relacionado a produtos (matéria-prima, em processo ou acabados): prejuízos relacionados a matéria-prima, produtos primários, produtos que estavam na linha de produção ou finalizados que foram danificados ou deteriorados;
- Custo de retomada ou reinício da produção: custo originado do tempo que a indústria necessita para retomar seu ritmo comum de produção;

- Custo de horas extras: custo proveniente do prolongamento do seu período comum de produção;
- Custo de perda de informação: devido à perda de informações contida em equipamentos eletrônicos, como configurações ou definições do funcionamento da linha produtiva;
- Custo de outros fatores ou custos extras: demais custos que não foram citados anteriormente pelo autor.

Nota-se que o autor em Melo e Cavalcanti (2003) realizou uma importante segmentação para que as ações de mitigação nos distúrbios pudessem ser selecionadas de acordo com o maior prejuízo identificado na linha produtiva.

A pesquisa seguinte, Hideki *et al.* (2003), é pouco diferente da anterior quanto à definição dos custos; entretanto, acrescenta outros dois não considerados: custos relacionados à solução dos distúrbios sofridos pela empresa e custos referentes a vendas não realizadas que foram impactadas pela parada produtiva. Quanto ao agrupamento dos entrevistados a respeito de suas particularidades, não se notou uma grande disparidade quanto aos questionários analisados anteriormente. Porém, os autores consideraram coletar informações a respeito da produção de cada empresa (custos anuais, receita líquida da empresa, possibilidade de recuperação da produção por meio de horas extras, etc.). Além disso, os participantes foram questionados quanto à existência de equipamentos de medição da qualidade energética, algo que auxiliaria a empresa a identificar a presença de anomalias no fornecimento da concessionária. Ainda, questionou-se quanto à preferência de horário em que a empresa sofresse tais eventos. Dessa forma, seria possível um gerenciamento dos horários menos suscetíveis a grandes perdas econômicas.

Apesar de que Cruz *et al.* (2007) não se diferenciem quanto à separação de informações gerais e custos relacionados à interrupção do fornecimento de energia elétrica, são inseridas no questionário informações quanto a tempos admissíveis de interrupção, tempos de uso dos equipamentos (produtivos ou de geração própria) e até mesmo tempo de funcionamento máximo de equipamentos de proteção (como *nobreaks*). Este documento ainda amplia questões relacionadas à percepção qualitativa do consumidor industrial, coletando informações das situações já vivenciadas pela empresa, dificuldades encontradas quanto a tais

eventos e até mesmo o posicionamento das concessionárias responsáveis pelo fornecimento.

As informações coletadas em Magalhães (2008) se apresentam menos segmentadas do que as demais pesquisas. Entretanto, é importante destacar a diversidade de equipamentos que são relatados nos resultados deste documento. Nota-se que a evolução tecnológica trouxe uma grande lista de equipamentos eletrônicos mais sensíveis e que a necessidade de reduzir os impactos referentes à falta de qualidade de energia elétrica é crescente com o passar dos anos. O processo de automação na indústria é essencial para criar processos produtivos mais eficientes, porém os investimentos para alcançar esse objetivo precisam considerar a qualidade da energia fornecida aos equipamentos participantes nos processos produtivos.

Um método eficaz de se identificar a resiliência dos processos produtivos frente a distúrbios elétricos é avaliar como é o comportamento destes em relação à duração da anomalia. Em Hideki *et al.* (2003), Cruz *et al.* (2007) e Magalhães (2008), são segmentados de diferentes formas os períodos de duração dos distúrbios elétricos e qual a intensidade dos seus respectivos impactos nos processos produtivos.

Por outro lado, quanto às avaliações de maturidade da Indústria 4.0 nas empresas, foram encontradas várias pesquisas semelhantes. Entre algumas delas estão os estudos de Silva (2018), Storolli *et al.* (2018) e Schuh *et al.* (2017), os quais muito se assemelham quanto à sua estruturação. É possível identificar um padrão nos questionários que avaliam os seguintes grupos de perguntas: estruturação da empresa quanto à interface com seus clientes e a eficiência desse sistema; recursos da empresa (lidando com o nível de tecnologia dos equipamentos nela presentes); cultura dos colaboradores quanto à mentalidade e habilidades inerentes à Indústria 4.0; e sistemas de informação que lidam com todo armazenamento, processamento e troca de dados inerentes à produção.

Uma ferramenta que auxiliou na confecção do questionário, assim como em sua divulgação e coleta de dados, foi a plataforma online chamada “Online Pesquisa”, da empresa suíça Enuvo GmbH. Tal aplicativo foi o que melhor se adaptou ao questionário confeccionado, de acordo com os tipos de perguntas realizadas (avaliações gradativas, tabelas de preenchimento, questões de múltipla

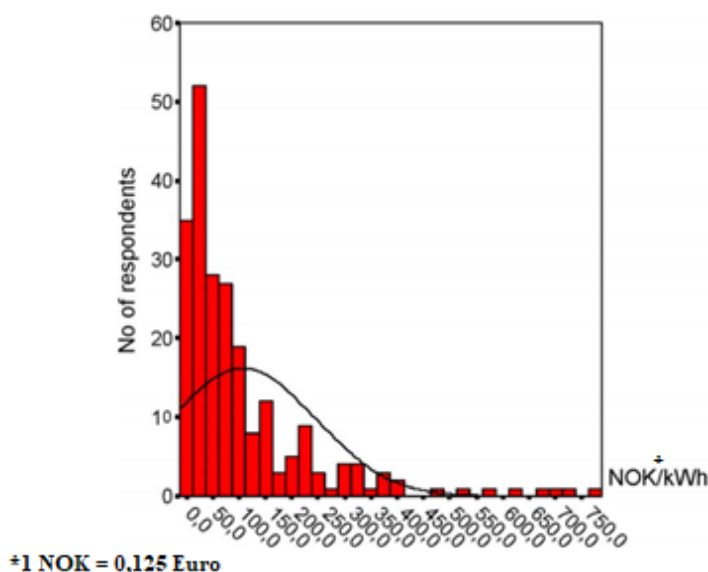
escolha, etc.), além de ter sido possível utilizá-lo gratuitamente devido ao plano “Estudante”, característica que poupou o uso da Reserva Técnica da Bolsa FAPESP.

3.4 METODOLOGIA DE TRATAMENTO DE DADOS

Segundo Goenemann (2018), a utilização de métodos estatísticos auxilia o desenvolvimento dos resultados de acordo com a previsão comportamental de determinados dados que podem ser considerados equivalentes a um modelo matemático específico. Segundo Teixeira (2003), a principal diferença entre os métodos experimentais e os métodos estatísticos é que o experimental determina seus resultados exclusivamente de forma empírica, dependendo apenas da assertividade da prática exercida, enquanto que o estatístico também deve estudar qual o modelo mais adequado para a realização das devidas manipulações matemáticas. Tendo isto em vista, o tratamento de dados foi realizado por meio de métodos estatísticos utilizados em outros projetos de pesquisa similares.

Em Martelli Filho *et al.* (2005) destacam-se as diferenças entre a análise dos resultados para diferentes tipos de consumidores, em que são realizados dois agrupamentos. O primeiro grupo é composto por consumidores residenciais e comerciais/industriais de pequeno porte, enquanto que o segundo grupo engloba os usuários comerciais/industriais de médio e grande porte. Pode-se afirmar que para este segundo grupo, deve-se coletar as informações por método de custeio direto, ou seja, as informações relacionadas ao Custo de Interrupção (CI) são coletadas diretamente do público-alvo, sendo então posteriormente calculada a média destes valores amostrais através de valores normalizados, como visto na Figura 9.

Figura 9 – Histograma e gráfico normalizado do Custo de Interrupção por fornecimento de energia



Fonte: Choi *et al.* (2006).

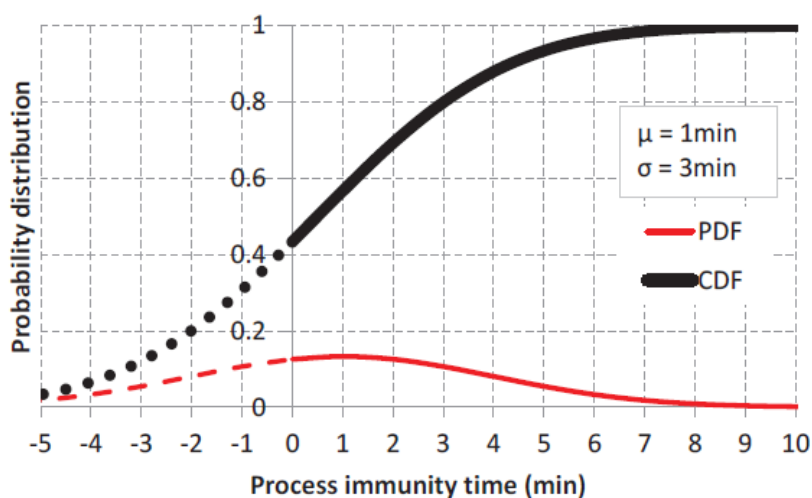
A figura apresenta os dados coletados de diferentes respondentes a respeito do CI e do total de energia não fornecida durante o intervalo de interrupção. A partir desses dados, foi possível realizar uma organização estatística dos resultados, evidenciando um comportamento de distribuição normal no gráfico gerado.

Outras pesquisas também utilizam a abordagem do valor médio para definir o CI em seus resultados (Nascimento, 2021; Choi *et al.*, 2006; KjØlle *et al.*, 2008), agrupando-os de forma coerente de acordo com características específicas dos consumidores entrevistados como, por exemplo, tipo de consumidor — residencial, comercial ou industrial —, setor de atividade, porte da empresa, consumo de energia, duração da interrupção e outros.

Em relação ao Tempo de Imunidade do Processo (PIT), não foram localizadas referências que lidam com a coleta e tratamento de dados diretamente com diversos clientes a respeito de seus processos mais críticos com o objetivo de determinar a resiliência a distúrbios elétricos em determinada região ou tipo de empresa. Entretanto, alguns documentos realizam estudos de caso para este parâmetro em todos os processos envolvidos em uma determinada linha de produção (Dialynas; Megaloconomos; Dali, 2001; Stockman; Driessens, 2010). Estes trabalhos determinam qual o valor mais crítico do processo produtivo e propõem soluções de forma que esta sequência produtiva se torne mais resiliente. Ainda

assim, Teixeira *et al.* (2011) e Reusel, Stockman e Driessens (2010) apontam a representação do comportamento do tempo de imunidade através da mesma modelagem matemática do CI — uma distribuição normal, como pode ser visualizado na curva vermelha da Figura 10.

Figura 10 – Distribuição normal do PIT



Fonte: Reusel, Stockman e Driessens (2010).

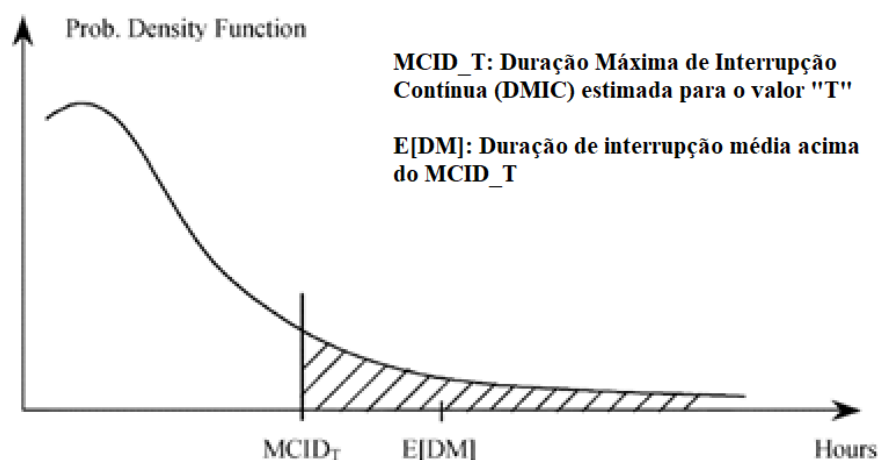
Na figura, a curva em vermelho mostra a *Probability Density Function* (PDF), que indica a densidade de probabilidade para cada valor de PIT. Já a curva em preto representa a *Cumulative Distribution Function* (CDF), ou função de distribuição acumulada, que mostra a probabilidade do processo ter um PIT menor ou igual a determinado valor. O gráfico considera uma média de 1 minuto e um desvio padrão de 3 minutos para os resultados obtidos.

Outro parâmetro que deve ser considerado como crucial na análise do cenário de parada de produção devido a presença de distúrbios elétricos é o tempo de reinício do processo - T_{PRS} , já que este parâmetro determina o tempo real que as indústrias conseguem retomar suas condições normais de produção após o retorno do fornecimento de energia. Este valor pode variar de acordo com a característica do distúrbio presente, ou seja, diferentes anomalias podem representar uma redução ou aumento no tempo de reinício do processo (Kjølle *et al.*, 2008). Portanto, tal parâmetro deve ser analisado juntamente com a probabilidade da duração da interrupção para que seja validado, tendo assim um valor médio mais preciso.

Por fim, a análise estatística da duração de interrupção pode ser observada, na maioria dos estudos envolvendo este parâmetro, com um comportamento similar a uma distribuição normal (Cebrian; Kagan; Milanovic, 2014; Silva *et al.*, 2005). Entretanto também existem pesquisas específicas quanto a utilização de modelos matemáticos mais precisos quanto a esta variável, como em Schuerger, Arno e Dowling (2016), que utiliza o parâmetro de Burr – um modelo de distribuição de probabilidade contínua para variáveis não negativas – para avaliar a duração das interrupções .

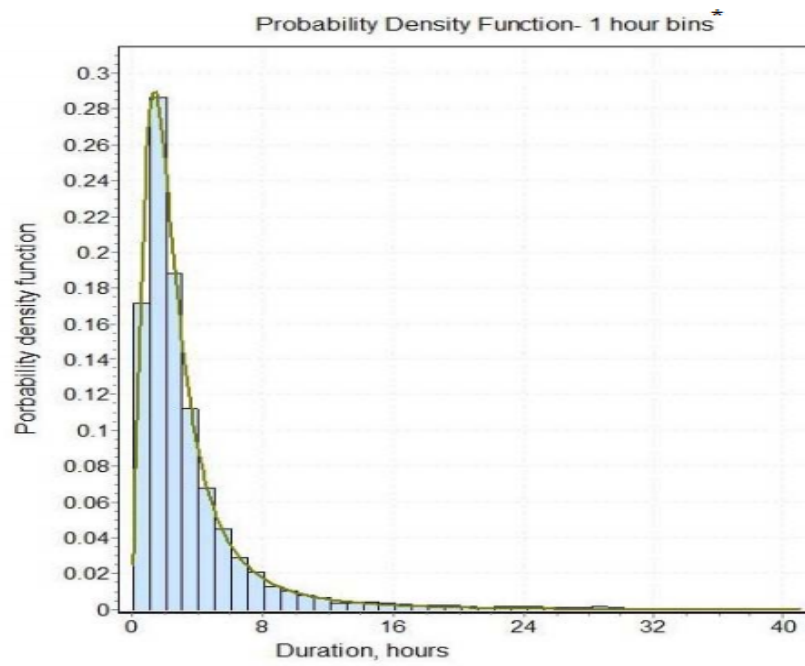
Tanto as aproximações gráficas da distribuição normal, quanto do modelo que utiliza o parâmetro de Burr, podem ser vistas na Figura 11 e Figura 12, respectivamente. Novamente, é importante destacar a necessidade da coleta de dados históricos para que se possa obter uma maior assertividade quanto a parametrização do modelo matemático utilizado.

Figura 11 – Distribuição normal da probabilidade da duração de interrupção



Fonte: Cebrian, Kagan e Milanovic (2014).

Figura 12 – Histograma e curva parametrizada através de parâmetro Burr da probabilidade da duração de interrupção



*Barras representam intervalos de 1 hora

Fonte: Schuerger, Arno e Dowling (2016).

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 FILTRAGEM NA SELEÇÃO DAS EMPRESAS

Embora o critério inicial de seleção tenha priorizado empresas com processos produtivos contínuos, resultando na relação apresentada na Tabela 8, tornou-se igualmente necessário estabelecer uma delimitação geográfica entre as possíveis participantes da pesquisa. Essa definição visou minimizar a interferência de variáveis externas na avaliação da qualidade da energia fornecida pela concessionária. Fatores como condições climáticas, variações no padrão de horário comercial entre diferentes regiões do estado, entre outros aspectos locais, também poderiam influenciar significativamente os resultados obtidos.

Portanto, com o intuito de evitar a dispersão dos resultados a serem coletados, uma nova lista foi gerada, ela pode ser vista na Tabela 9. Esta alteração na estratégia adotada para selecionar as empresas traz consigo algumas vantagens, entre estas estão:

- Maior nível de precisão/certeza dos resultados devido às características geográficas comuns da região observada;
- Facilidade em aplicar o questionário devido a possibilidade de realizar um contato presencial com os colaboradores responsáveis pela participação com o projeto;
- Maior proximidade entre empresas entrevistadas e instituição de ensino.

Portanto, foi possível realizar um novo levantamento de indústrias em um raio de 50 quilômetros do centro da cidade de Itapeva/SP, tendo como o objetivo a coleta de informações do maior número de respondentes possíveis dentro deste limite estabelecido. Diante do maior tempo dedicado para a realização da etapa de coleta de dados e das primeiras dificuldades encontradas para obtenção de respostas por meio dos contatos inicialmente planejados, tornou-se necessário ampliar a lista de empresas a serem contatadas.

Quadro 2 – Lista de empresas selecionadas a partir do mês de agosto de 2019

Empresa	Atividade	Cidade
Cooperativa Agroindustrial Holambra	Agroindústria	Itapeva/SP
Nutriceler - Ind. de Fertilizantes Especiais	Agroindústria	Itapeva/SP
Capal Cooperativa Agroindustrial	Agroindústria	Taquarivaí/SP
C Luz Papeis Ltda	Fáb. de celulose, papel e produtos de papel	Itararé/SP
Cipapel	Fáb. de celulose, papel e produtos de papel	Itararé/SP
Fasapel	Fáb. de celulose, papel e produtos de papel	Itararé/SP
Suzano Papel e Celulose S.A.	Fáb. de celulose, papel e produtos de papel	Itararé/SP
Fibria Celulose S.A.	Fáb. de celulose, papel e produtos de papel	Capão Bonito/SP
Taquari Ind. e Com. de Papeis Ltda	Fáb. de celulose, papel e produtos de papel	Itapeva/SP
International Paper do Brasil	Fáb. de celulose, papel e produtos de papel	Nova Campina/SP
Fort Paletes	Fáb. de produtos de madeira	Itararé/SP
Urnas Maderit	Fáb. de produtos de madeira	Itararé/SP
Rivarolli Madeiras	Fáb. de produtos de madeira	Itapeva/SP
Ipe Indústria de Paletes e Embalagens	Fáb. de produtos de madeira	Itapeva/SP
Santana Indústria e Com. de Embalagens	Fáb. de produtos de madeira	Itapeva/SP
Cagama	Fáb. de produtos de madeira	Itapeva-SP
Águia Branca Prendedores	Fáb. de produtos de madeira	Itapeva/SP
Casa Flex Indústria e Comércio de Móveis	Fáb. de produtos de madeira	Itapeva/SP
Cemi Com. de Embalagens de Madeira e Ind.	Fáb. de produtos de madeira	Itapeva/SP
Fábrica Pagotto Movelaria	Fáb. de produtos de madeira	Itapeva/SP
G. Côrtes Ind. e Com. Ltda.	Fáb. de produtos de metal	Itararé/SP
Mineração Itapeva Ltda	Fáb. de produtos minerais	Itapeva/SP
Mineração longa vida	Fáb. de produtos minerais	Nova Campina/SP
Maringá Ferro-Liga S.A.	Fáb. de produtos minerais	Itapeva/SP
Dolomitamix	Fáb. de produtos minerais	Bom Sucesso de Itararé/SP
Silicate	Fáb. de produtos minerais	Nova Campina/SP
Concretix Concreto e Argamassa Ltda	Fáb. de produtos minerais	Itapeva/SP
Itagran Marmoraria e Marcenaria	Fáb. de produtos minerais	Itapeva/SP
SBS Minérios Indústria e Com. Ltda	Fáb. de produtos minerais	Itapeva/SP
Votorantim Cimentos S.A.	Fáb. de artefatos de gesso, cerâmica ou cimento	Itapeva/SP
Cerâmica Itapeva do Taquari	Fáb. de artefatos de gesso, cerâmica ou cimento	Itapeva/SP
Lajes Kau	Fáb. de artefatos de gesso, cerâmica ou cimento	Itapeva/SP
Móble Concreto	Fáb. de artefatos de gesso, cerâmica ou cimento	Itapeva/SP
San gesso	Fáb. de artefatos de gesso, cerâmica ou cimento	Itapeva/SP
Jornal No Alvo	Indústria de produtos gráficos	Itapeva/SP
Jornal e Gráfica A Tribuna	Indústria de produtos gráficos	Itapeva/SP
Indústria Gráfica Ita News	Indústria de produtos gráficos	Itapeva/SP

Seller Mecânica Indústria Com.	Produção de máquinas e equipamentos	Itapeva/SP
Diafer	Produção de máquinas e equipamentos	Itapeva/SP
Branfer	Produção de máquinas e equipamentos	Itapeva/SP
Aços Itapeva	Produção de máquinas e equipamentos	Itapeva/SP
IMMA - Grupo Itamaq	Produção de máquinas e equipamentos	Itapeva/SP
Resineves Agroflorestal Ltda	Produção de produtos não-madeireiros	Itapeva/SP
Art Pinnus Resineira	Produção de produtos não-madeireiros	Itapeva/SP
Aramade Industrial Madeireira Ltda - EPP	Serraria	Itapeva/SP
Sguario Ind. De Madeiras Ltda	Serraria	Nova Campina/SP
Serraria Paineira Ltda	Serraria	Itapeva/SP

Fonte: Autoria Própria (2025)

4.2 DEFINIÇÃO DO QUESTIONÁRIO

O questionário confeccionado passou por certas modificações visando o melhor aprofundamento no tema em que se insere e até mesmo por conta da aceitação dos entrevistados. O questionário final que foi aplicado para obtenção de resultados pode ser observado no APÊNDICE A.

A seguir, é relatado como foi realizada a segmentação do novo questionário e os motivos da escolha das questões nele colocadas.

4.2.1 Informações Gerais

Nesta etapa da pesquisa são recolhidas informações a respeito da empresa como nome, localização, atividade desenvolvida e outras, assim como informações das pessoas responsáveis por preencher esta avaliação.

A partir das informações (questões 1 e 3-5) da empresa será possível agrupar resultados em função de proximidade geográfica, tipos de atividades, horário de funcionamento e até mesmo porte da empresa, podendo desta forma verificar a existência de padrões de resiliência produtiva frente aos distúrbios elétricos, prejuízos econômicos similares e até mesmo nível de maturidade para a entrada da empresa no contexto da Indústria 4.0.

Por outro lado, as informações dos entrevistados (questão 2) auxiliarão a manter um contato com a pessoa que forneceu as respostas nesta avaliação, assim como reconhecer o tamanho da percepção dos entrevistados quanto aos problemas tratados neste documento. Por exemplo, pode-se dizer que funcionários de cargo

mais alto na hierarquia da empresa possuirão acesso mais fácil a um determinado tipo de informações (financeiras, instalações da empresa, mapeamento dos processos, etc). Por outro lado, outros funcionários terão mais facilidade para responder aspectos específicos ligados aos processos produtivos avaliados (tempo de parada de máquina, valor dos produtos no processo, especificações técnicas do uso de energia, etc).

A partir desta coleta de informações a respeito da empresa e dos funcionários participantes da avaliação, serão discutidas formas similares de solucionar problemas enfrentados pelos consumidores industriais frente a problemas da qualidade de energia elétrica.

4.2.2 Utilização da Energia Elétrica

É importante compreender quais são as utilidades da eletricidade dentro do local que está sendo avaliado. Para isso, foi proposto na questão 6 que o entrevistado destaque quais operações comuns consomem energia e quanto cada uma dessas atividades representa no consumo total da empresa. Também foi inserida uma opção na qual a pessoa possa listar outras atividades não citadas na tabela; dessa forma, serão atendidas atividades específicas que possam existir em empresas diferentes.

Para avaliarmos o quanto de energia é utilizada e em que categoria definida por Arruda (2003) a empresa está enquadrada, foi criada a questão 7, que coleta em uma tabela informações referentes ao faturamento da energia elétrica da empresa junto à concessionária. A partir desta informação, será possível realizar o cálculo do gasto da empresa com energia elétrica durante os períodos destacados.

4.2.3 QEE e Custos Associados

A fim de conhecer a opinião do consumidor industrial quanto a qualidade percebida do fornecimento de energia elétrica, foi levantada a questão 8. As pessoas responsáveis terão de associar uma nota aos serviços prestados pela concessionária de uma forma geral.

A questão 9 verifica a existência de fontes alternativas em caso de falta de fornecimento de energia elétrica ou até mesmo por política adotada pela

empresa. Caso a alternativa seja positiva quanto à presença destes equipamentos, o entrevistado irá responder perguntas específicas referente ao seu uso (10-12), em caso de resposta negativa o entrevistado não terá a necessidade de responder tais questões.

Nas questões 13 até 15, os entrevistados terão de selecionar quais os períodos mais críticos para que ocorra interrupção do fornecimento de energia em relação ao:

- Período do dia (Manhã, tarde, noite e madrugada);
- Dia da semana;
- Trimestre.

Desta forma será possível visualizar quais são os intervalos que a empresa mais teria perdas produtivas e quais são aqueles que teriam menor impacto na produção. É importante realizar tal avaliação para verificar quais períodos os consumidores tendem a preferir que sejam realizadas paradas de fornecimento de energia relacionadas a manutenção realizada pela concessionária.

O item 16 do questionário cria um cenário em que a concessionária realiza um aviso preventivo a respeito da interrupção do fornecimento de energia e questiona a empresa quão benéfico seria esta atitude preventiva para reduzir as perdas por conta desta interrupção. Por exemplo, no caso que a empresa concessionária de energia responsável pelo fornecimento de energia informe a data/hora e a duração de uma interrupção de energia para realizar uma manutenção preventiva, o consumidor industrial poderia usar esse aviso prévio para, de alguma forma, reduzir os seus prejuízos produtivos e financeiros. Assim, foi construída uma tabela que pondera o tamanho do benefício deste aviso prévio em função do tempo de antecedência de tal comunicado em relação ao evento.

A seguir, é informado aos entrevistados que no intervalo das questões 17 a 27 será avaliado o processo considerado mais crítico em questão financeira caso ocorresse eventuais paradas. Desta forma será possível focar a avaliação para tomar respostas mais concisas a respeito do processo avaliado e aplicar possíveis mudanças que irão auxiliar tais processos a possuir mais resiliência frente aos distúrbios avaliados.

As interrupções de fornecimento do processo escolhido como mais crítico foram destacadas nas perguntas 17, 18 e 19, questionando a empresa quanto ao registro de tais eventos, a sua frequência de ocorrência e o PIT associado ao distúrbio, respectivamente.

A questão 20 verifica qual é o T_{PRS} do processo considerado mais crítico, tendo que os problemas ocasionados por distúrbios elétricos não se dão até o tempo de retomada do fornecimento de energia elétrica, mas sim após o retorno das condições normais de operação da empresa.

A pergunta 21 verifica a existência de dispositivos de proteção elétrica do processo selecionado, tendo em vista a necessidade de que este processo considerado mais crítico seja protegido eletricamente.

Para que pudesse ser obtido uma melhor aceitação do questionário e melhor obtenção de valor do CI, a questão 22 divide os entrevistados em dois grupos. Para isto é questionado se a empresa possui informações a respeito dos diferentes custos que as interrupções elétricas ocasionam, verificando o nível de informação em relação ao prejuízo financeiro da empresa por conta da falta de energia durante diferentes períodos. Em caso positivo, o entrevistado deverá responder apenas à questão 23, e em caso negativo apenas à questão 24.

A tabela da questão 23 segmenta os custos em diferentes tipos, tendo que empresas que possuem maior detalhamento de informação quando a suas perdas poderão informar quais os tipos de prejuízos financeiros presentes em diferentes períodos de interrupção no fornecimento de energia elétrica. A partir destas informações individuais serão agrupados os custos mais presentes em diferentes tipos de empresas. Um exemplo simples de tal agrupamento é de que enquanto empresas de pequeno porte possuem um custo maior com a retomada de produção, empresas de maior porte podem possuir perdas maiores nos produtos que estão sendo processados. Para diferentes situações poderão ser pesquisadas diferentes formas de mitigar os problemas enfrentados e aumentar os respectivos PITs e reduzir os T_{PRS} .

Por outro lado, a tabela da questão 24 não segmenta os diferentes tipos de custos que a empresa pode demonstrar, deixando apenas em evidência o aumento do CI para diferentes períodos de interrupção de energia. Caso esta tabela seja majoritariamente preenchida quando comparada a da questão 24, poderá ser

concluída a ausência de uma gestão de custos na maioria das empresas entrevistadas.

Entre as questões 25 e 27 é levantado se existem ocorrências dos demais distúrbios referente a QEE dentro da empresa, qual a frequência de tais eventos no período de um mês e qual o impacto destas anomalias no processo mais crítico da empresa, identificando a existência de paradas de produção por conta delas e por quanto tempo decorrem tais paradas.

4.2.4 Maturidade para Indústria 4.0

Neste segmento da avaliação são levantadas informações a respeito de quão a empresa aparenta estar preparada para operar dentro do contexto da quarta revolução industrial. Tal avaliação permitirá propor soluções proporcionalmente tecnológicas ao nível de maturidade avaliado.

Inicialmente, é proposta uma tabela de avaliação na questão 28 que irá possibilitar identificar quais elementos característicos de cada revolução industrial possam ainda estar presentes na empresa. A partir desta tabela, poderá ser avaliado se as empresas participantes ainda apresentam utilização de equipamentos que já são considerados como não habituais em um ambiente industrial tecnológico.

Para se verificar a possibilidade de conexão da empresa com o conceito de Indústria 4.0, às questões 29 e 30 investigam a existência e a qualidade do acesso dos computadores a redes de internet e intranet. Desta forma será possível verificar a existência de comunicação entre processos, meios de viabilizar armazenamentos em servidores online e outros benefícios relacionados.

Para que o processo possa ser aprimorado, é necessário que se verifique o nível de qualidade que está atuando, desta forma, na questão 31 é perguntado a existência de sistemas estatístico que garantem certa padronização da produção ou até mesmo indicadores de produtividade que possam ser aprimorados de acordo com as mudanças propostas.

A seguir, a questão 32 levanta informações quanto ao nível de planejamento e execução de investimentos em tecnologias dentro dos processos da empresa.

A partir deste ponto da avaliação de maturidade da empresa, as respostas irão apresentar respostas em cinco níveis, sendo considerado o nível mais

à esquerda como menos adequado para o contexto do tema avaliado, e o nível à direita como mais bem avaliado neste quesito. Desta forma será mais facilmente mensurado o nível em que a empresa se encontra em métodos e práticas que caminham em direção da Indústria 4.0. As perguntas serão separadas em cinco agrupamentos que são descritos a seguir.

As questões do primeiro bloco (33-36) avaliam a cadeia de suprimentos e sua relação com a tecnologia. É verificado se existem métodos operando que facilitem a troca de informações entre cliente-empresa e empresa-fornecedor, se esta tecnologia agregada leva algum valor agregado ao cliente final e até mesmo se a empresa possui uma linha de produção adaptável com uma possível mudança de demanda de seus clientes.

O agrupamento seguinte (37-39) trata a respeito dos recursos humanos da empresa e a conexão destes com o contexto da Indústria 4.0. É verificado se existem capacitações necessárias para que todos da empresa estejam situados com uso da tecnologia, além de questionar se os colaboradores estão preparados tecnicamente e gerencialmente para lidar com tais processos. A última questão trata a respeito da comunicação entre funcionários para transparecer dúvidas a respeito de tal evolução e até mesmo inseri-los no processo de melhoria contínua.

No penúltimo bloco (40-43) são levantadas informações a respeito das instalações da empresa. Muito deste bloco de pergunta se liga com aspectos relacionados com a Indústria 3.0 (automação, sensores e simulações), pois, é de grande importância que a empresa possua tais aspectos bem consolidados para avançar para a etapa seguinte. Também é verificado a existência de equipamentos com inteligência artificial, capazes de realizar a tomada de dados, verificar possíveis melhorias e implementá-las autonomamente.

Por fim, as questões do último grupo, 44 e 45, verificam a existência de procedimentos de segurança da informação produtiva. É questionado se existe algum nível de armazenamento e processamento das informações e dados em nuvem, assim como a devida proteção dos dados enquanto armazenados, transmitidos e processados. Desta forma irá se avaliar o quanto as informações da empresa estão passíveis de roubos, perdas ou danos.

4.2.5 Estratégia de Avaliação

Neste trabalho, alguns indicadores foram escolhidos ou equacionados para avaliar o desempenho dos consumidores industriais frente aos distúrbios elétricos. Os valores para realizar essas avaliações são obtidos das respostas após as entrevistas com as empresas, estes indicadores são:

- Uso da energia elétrica (PUUE):

Este indicador avalia a percentagem do uso da energia elétrica nas diferentes atividades dentro da empresa, ou seja, serão apontadas quais são as operações mais custosas para as indústrias em questão de consumo de energia elétrica. Em (7) é possível visualizar a relação com os valores coletados.

$$\% \text{ do Consumo Elétrico}_i = \frac{1*MB_i + 2*B_i + 3*R_i + 4*A_i + 5*MA_i}{\sum_i (1*MB_i + 2*B_i + 3*R_i + 4*A_i + 5*MA_i)} \quad (7)$$

Sendo que, i representa o tipo de operação realizada (iluminação, climatização, força mecânica e outras, listadas na questão 6 do APÊNDICE A) enquanto MB_i , B_i , R_i , A_i e MA_i , a quantidade de notas “muito baixo”, “baixo”, “razoável”, “alta” e “muito alta”, respectivamente, associadas com esta atividade i .

Em seguida, na seção do questionário que avalia as perguntas relacionadas à QEE fornecida, são calculadas as médias dos dados coletados referentes às seguintes informações:

- Avaliação da concessionária de energia (Questão 8);
- Utilização de fontes alternativas de energia (Questão 9);
- Operações alimentadas por fontes alternativas (Questão 10);
- Frequência do uso das fontes alternativas (Questão 11);
- Armazenamento de energia sobressalente (Questão 12).

- Tempo de retomada do processo (TPRS)

O T_{PRS} pode variar de acordo com a característica do distúrbio presente, ou seja, diferentes anomalias podem representar redução ou aumento no T_{PRS} . Portanto, tal parâmetro deve ser analisado juntamente com a probabilidade da duração da interrupção de forma a obter um valor médio mais preciso. Em (8), p_i é a probabilidade de que ocorra uma interrupção de energia de duração “ i ” e T_{PRS_i} é o tempo de retomada do processo no caso da ocorrência de uma interrupção de energia de duração “ i ”.

$$T_{PRS} = \sum_{i=0}^{\infty} p_i * T_{PRS_i} \quad (8)$$

Para obter os valores de p_i , é necessário realizar a normalização dos dados da Duração Média das Interrupções (*DMI*) dos últimos 48 meses, obtidos através de (9). Nesta equação, os valores de Duração Equivalente de Interrupção por Unidade (*DEC*) e de Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (*FEC*) são disponibilizados pela ANEEL (Boneberg *et al.*, 2017), tanto o DEC e o FEC são extraídos mês a mês no período de 48 meses correspondente à concessionária de energia responsável pelo fornecimento da empresa entrevistada.

$$DMI = DEC/FEC \quad (9)$$

- Tempo de imunidade do processo (PIT)

Em relação ao *PIT*, ele é determinado a partir da combinação da distribuição normal da *DMI* com os dados coletados referente a imunidade do processo, tendo, portanto, a fórmula abaixo.

$$PIT = \sum_{i=0}^{\infty} p_i * PIT_i \quad (10)$$

- Custo da Interrupção (CI)

Para que se defina uma curva de probabilidade do *CI*, também é combinada a distribuição normal da *DMI* com a somatória dos diferentes tipos de custos para os intervalos de interrupção provenientes das tabelas de coletas de dados. Sendo assim, a fórmula abaixo calcula o *CI* a partir de p_i , e de $C_{i,j}$ que é o tipo de custo “*j*”, em reais, devido a uma interrupção de duração “*i*”.

$$CI = \sum_i (p_i * \sum_j C_{i,j}) \quad (11)$$

- Nível de maturidade para a Indústria 4.0 (I4.0)

Quanto a avaliação do nível de maturidade para a Indústria 4.0, todas as respostas quantitativas do questionário, em relação a este quesito, foram transformadas para níveis percentuais de avaliação, por exemplo, questões que solicitam notas de 1 á 5 serão transformadas para valores de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%.

Usando (12)-(15) é possível avaliar a posição evolutiva até o conceito de Indústria 4.0 das empresas entrevistadas. Essas equações permitem avaliar valores percentuais de quanto estas empresas se assemelham com as características de cada revolução industrial. O termo Q_m representa o valor percentual coletado da questão “*m*”, por exemplo, Q_{28a} significa o valor percentual da resposta à questão 28a (ver APÊNDICE A); enquanto o termo $\bar{Q}_n$ é a média dos resultados de todas as questões que estiverem no índice “*n*”.

- Indústria 1.0 ($I_{1.0}$)

$$I_{1.0} = \left(\frac{Q_{28a} + Q_{28b}}{2} \right) * (1 - I_{2.0}) * (1 - I_{3.0}) * (1 - I_{4.0}) \quad (12)$$

- Indústria 2.0 ($I_{2.0}$)

$$I_{2.0} = \left(1 - 0,25 * Q_{28b} \right) * Q_{28c} \quad (13)$$

- Indústria 3.0 ($I_{3.0}$)

$$I_{3.0} = \left(1 - 0,5 * Q_{28a}\right) * \frac{(Q_{28d} + Q_{28e})}{2} * 0,5 + 0,5 * \bar{Q}_{29,30,32,34,37,38,40,42} \quad (14)$$

- Indústria 4.0 ($I_{4.0}$)

$$I_{4.0} = I_{3.0} * \left(\frac{\bar{Q}_{29-32} + \bar{Q}_{33-36} + \bar{Q}_{37-39} + \bar{Q}_{40-43} + \bar{Q}_{44-45}}{5}\right) \quad (15)$$

4.3 ENVIO DO QUESTIONÁRIO

O objetivo principal desta etapa é o alcance do maior número de empresas entrevistadas que atendam aos requisitos de sua participação. Entretanto, a execução desta etapa demonstrou-se como mais dificultosa, apresentando altos prazos de retorno dos contatos realizados com as empresas ou até mesmo nenhum retorno, conseqüentemente, isto levou uma taxa de resposta abaixo do esperado.

A seguir são comentadas as experiências aprendidas durante a abordagem das empresas entrevistadas. No primeiro caso estão as serrarias, neste tipo de empresas foram realizadas duas visitas técnicas. As empresas que se disponibilizaram a receber foram: Sguario Indústria de Madeiras Ltda e Serraria Paineira Ltda. Pode-se observar uma grande diferença tecnológica entre ambas, tendo que a Sguario possui equipamentos mais aprimorados quanto ao aumento de sua produtividade e aproveitamento de sua matéria prima, tendo um grande nível de automação em seus processos quando comparada a Serraria Paineira. A partir destas visitas percebeu-se a necessidade de aprimorar o questionário de forma a identificar o nível de tecnologia da empresa e propor perguntas mais específicas considerando as particularidades das empresas.

Durante o projeto, quase a totalidade dos contatos foi realizada da seguinte forma: contato através de ligação telefônica para empresa, tentativa de contato direto com o responsável pelo setor referente à produção; envio de e-mail para o responsável contendo a carta convite, resumo do projeto e link para o questionário. A partir do envio deste convite e da resposta positiva da empresa quanto a participação da pesquisa foi possível agendar uma visita pessoal na empresa com o intuito de conhecer melhor seus processos produtivos.

Em quesito de organização, todos os registros de contatos realizados com as possíveis empresas participantes foram organizados em um arquivo de planilhas eletrônicas de nome “Registro de Contato com Empresas”. Este arquivo contém uma planilha com todos os contatos realizados, com por exemplo: conteúdo dos contatos, pessoas contatadas, datas e observações pertinentes. Também será possível visualizar de forma mais facilitada o status em que se encontram todas as empresas listadas, de acordo com as seguintes classificações:

- Contato não realizado
- Contato em andamento
- Respondendo a pesquisa
- Aplicação da pesquisa finalizada
- Não foi possível aplicar pesquisa

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Posterior a todo embasamento bibliográfico para a construção do projeto e sua aplicação, nesta seção são destacados os principais resultados e considerações.

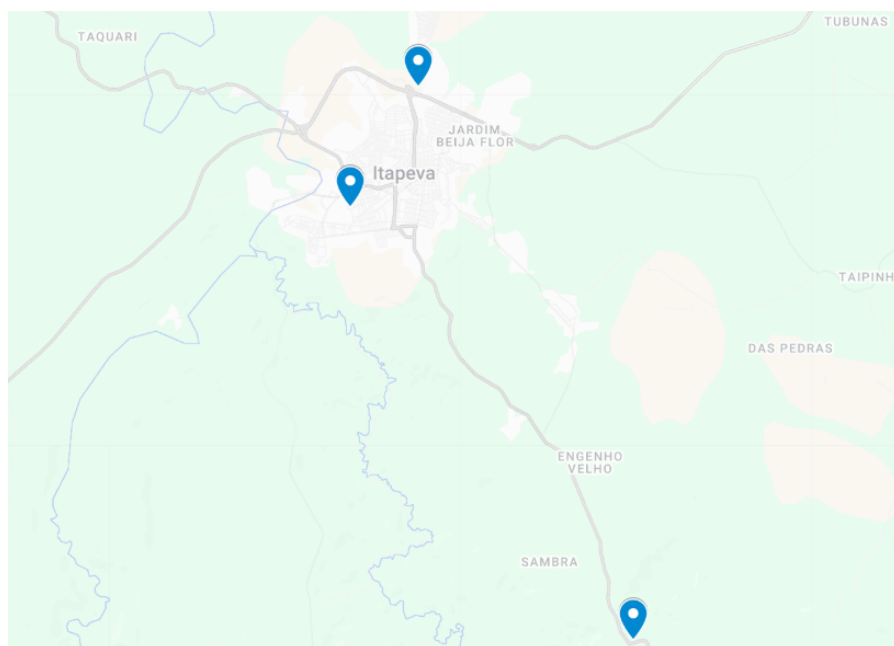
5.1 EFETIVIDADE DE APLICAÇÃO DO QUESTIONÁRIO

A aplicação do questionário proposto possibilitou a coleta de respostas de três participantes, ou seja, empresas localizadas dentro da cidade Itapeva/SP, possuindo em comum a mesma concessionária de energia (Elektro). Desta forma, observou-se uma efetividade de participação de 6,3% frente às 48 empresas inicialmente mapeadas para participação. As dificuldades enfrentadas serão destacadas nas considerações finais.

5.2 RESULTADOS DO QUESTIONÁRIO

No primeiro bloco do questionário (coletadas informações gerais da empresa e dos funcionários responsáveis), foi possível coletar as respectivas localizações de cada indústria participante e identificá-las geograficamente. A Figura 13, mostra a localização geográfica das três empresas participantes desta pesquisa. Da figura é possível identificar que as três empresas seguem o critério de limite geográfico dentro de um raio de 50 km a partir do endereço Praça Anchieta, 176 - Centro, Itapeva - SP, 18400-450.

Figura 13 – Localização geográfica das empresas participantes



Fonte: Autoria própria (2025)

Em relação aos responsáveis pelo fornecimento de dados, as três empresas participantes apresentaram participantes diretamente ligados ao setor de produção da empresa, isso permitiu uma visão mais concreta sobre os problemas enfrentados diariamente nos seus processos produtivos. Quanto a hierarquia destes colaboradores, em duas das empresas entrevistadas, o gestor do setor de produção foi o encarregado de responder o questionário, enquanto na terceira, o responsável foi o próprio proprietário, como a empresa é de pequeno porte, ele pode acompanhar pessoalmente o ritmo de produção diário da empresa.

Em relação a quantidade de funcionários que trabalham nas empresas entrevistadas, a Tabela 10 mostra as quantidades em função do tipo de atividade da indústria e do período de funcionamento. Desta tabela, as empresas com atividade Gráfica e Serraria podem ser consideradas de microempresas e com a atividade Mineradora pode ser considerada de grande porte.

Quadro 3 – Informações gerais das empresas entrevistadas

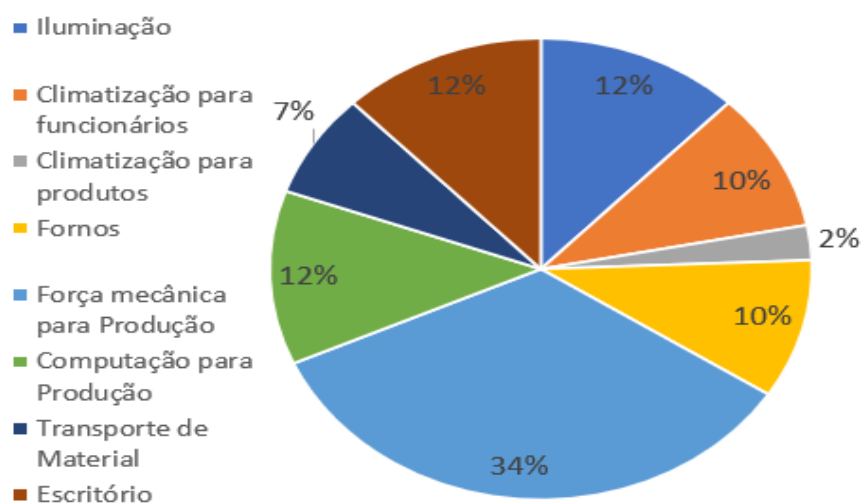
Atividade Industrial	Qtde. de funcionários	Período de funcionamento
Gráfica	Menos de 10	Segunda a Sexta: Manhã e Tarde
Mineradora	101 a 300	Segunda a Sexta: Todos os períodos
Serraria	11 a 30	Segunda a Sexta: Manhã e Tarde

Fonte: Autoria Própria (2025)

Para apresentar os dados e informações coletadas, assim como realizar considerações a respeito de cada uma das três empresas, serão utilizadas as identificações referentes à atividade industrial de cada uma delas. Sendo assim, as empresas serão chamadas de: Gráfica, Mineradora e Serraria.

A respeito da percepção de consumo dos diferentes tipos de atividades na empresa, a média demonstrou um destaque muito grande para aquelas que utilizam energia elétrica para ser convertida em força mecânica para produção, algo que é consistente tendo a natureza da atividade das empresas, os resultados podem ser vistos na Figura 14. Da figura, 34% da energia elétrica consumida nas indústrias entrevistadas tem como finalidade a conversão para “Força mecânica para produção”, algo que destaca a substituição do uso humano de força física por máquinas. Por outro lado, o menor uso de eletricidade destas empresas (2% do total) é em atividades relacionadas a “Climatização para produtos”, algo que está diretamente relacionado à necessidade do produto final de cada empresa. É importante dar destaque também para o baixo gasto de energia com o transporte de material, representando apenas 10% do consumo, este resultado que destaca um baixo nível de automação destas indústrias pela ausência de esteiras transportadoras para movimentar seus materiais.

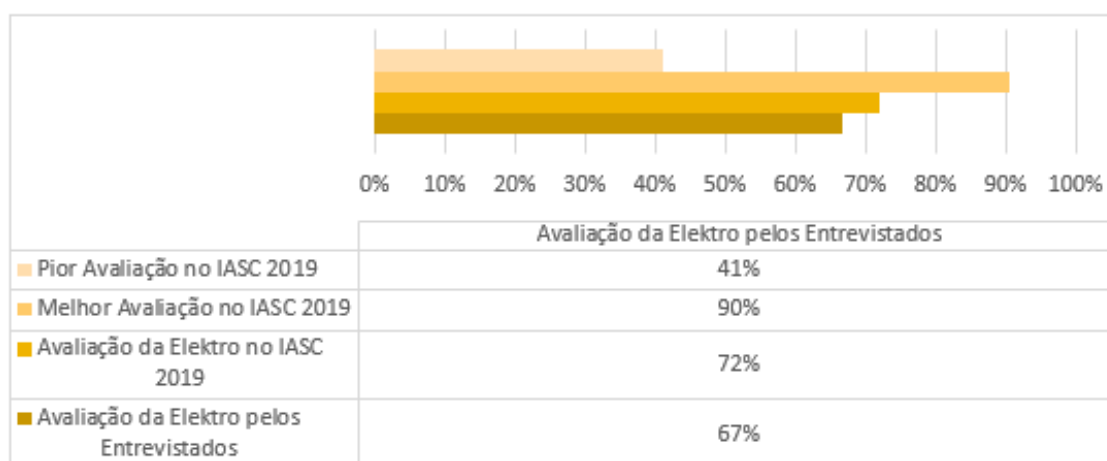
Figura 14 – Atividades que mais consomem energia elétrica



Fonte: Autoria Própria (2025)

A avaliação quanto à satisfação dos entrevistados pelo produto e/ou serviços fornecidos pela concessionária de energia é mostrada na Figura 15, juntamente com as notas obtidas através do Índice ANEEL de Satisfação do Consumidor (IASC) 2019, avaliação que utiliza como parâmetros os seguintes temas: qualidade, valor, confiança e fidelidade (Boneberg *et al.*, 2017). Em 2019, as concessionárias que demonstraram a pior e melhor avaliação no IASC de seus consumidores apresentaram notas de 41% e 90%, respectivamente. Enquanto isso, a concessionária Elektro, responsável pelo fornecimento de energia para as empresas entrevistadas, apresentou uma nota de 72% neste mesmo índice, enquanto a nota para satisfação coletada em questionário foi de 67%.

Figura 15 – Comparativo entre as avaliações do IASC 2019 e avaliação realizada com os entrevistados



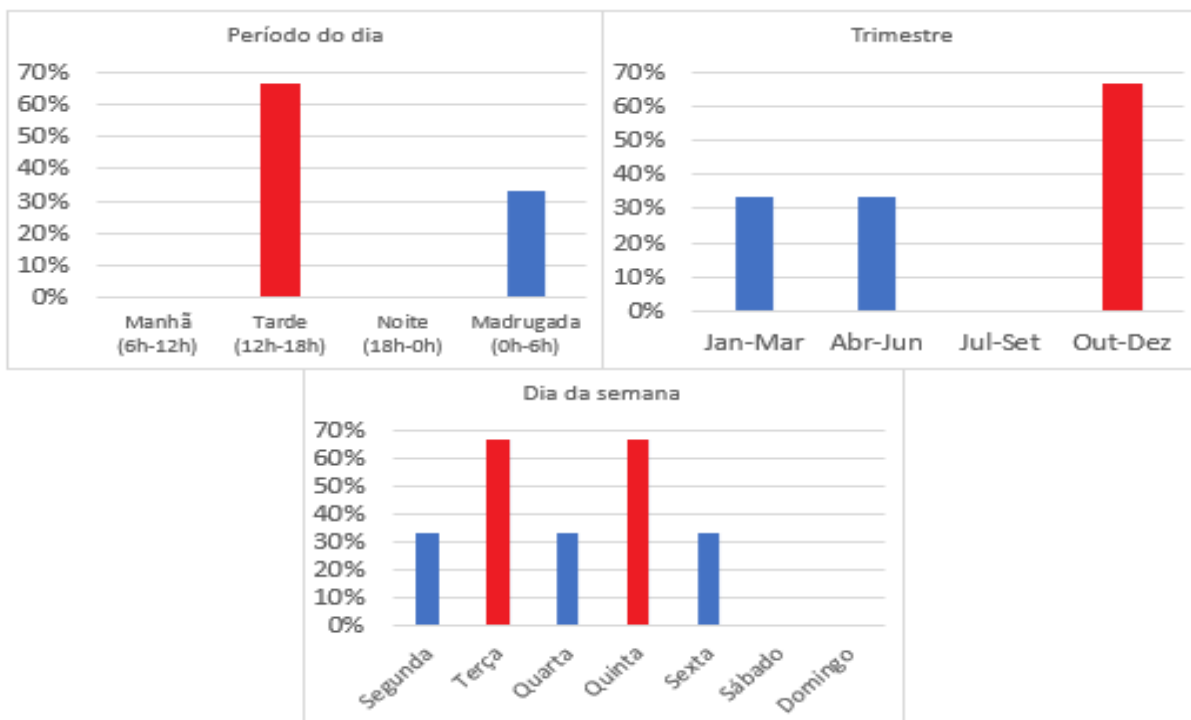
Fonte: Adaptado de ANEEL (2019b).

Dentre as empresas avaliadas, apenas a Serraria utiliza fonte alternativa de energia elétrica, sendo a principal, a energia solar. A Serraria informou que esta fonte é utilizada apenas para se manter dispositivos de segurança e manutenção parcial da produção, entretanto já possui projeções para que toda a demanda de energia seja fornecida por este tipo de fonte renovável. Algo a ser destacado é de que não existem equipamentos na empresa capazes de armazenar a energia excedente gerada, sendo assim, esse montante é injetado no sistema elétrico da concessionária.

A Figura 16 mostra em vermelho os períodos considerados mais críticos. Segundo os entrevistados, o horário crítico para interrupção é o turno da tarde (das

12 às 18 horas), enquanto os dias da semana terça e quinta-feira são considerados mais críticos. Por fim, o trimestre que coincide com o verão (outubro a dezembro) é o mais crítico.

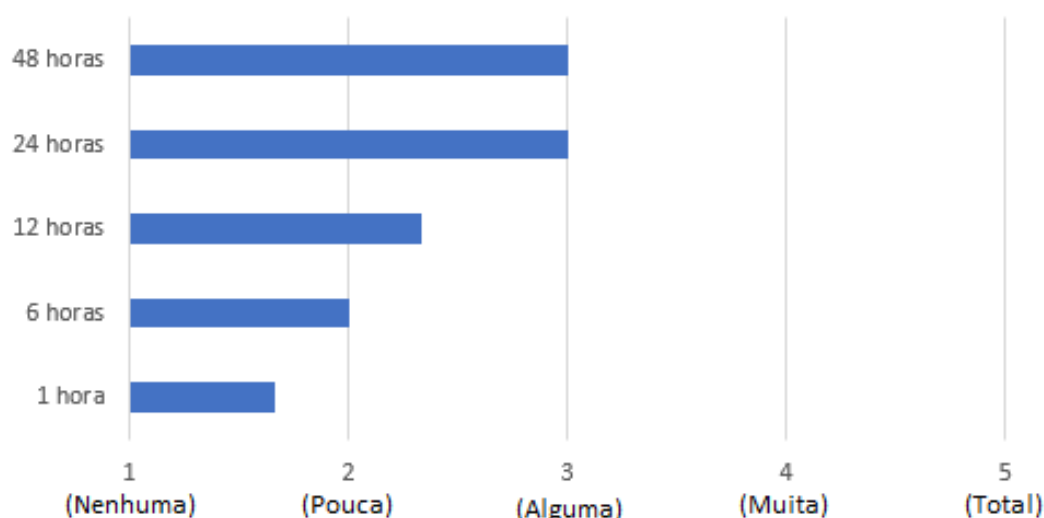
Figura 16 – Períodos considerados mais críticos para a ausência de energia elétrica



Fonte: Autoria Própria (2025)

Quanto ao benefício dado às empresas entrevistadas, na possibilidade de avisos prévios por parte da concessionária de energia antes da ocorrência de interrupções programadas, obtiveram-se resultados que demonstram um nível de preparação considerado fraco, ou seja, avisos prévios de 24 ou 48 horas só obtiveram classificações de benefício considerados razoáveis. As médias podem ser observadas na Figura 17. Isso mostra que as empresas possuem um reduzido plano de contingências, com isso elas não tomam proveito dos avisos feitos pela concessionária.

Figura 17 – Intensidade de redução de impactos ao consumidor para diferentes intervalos de aviso prévio da interrupção de energia

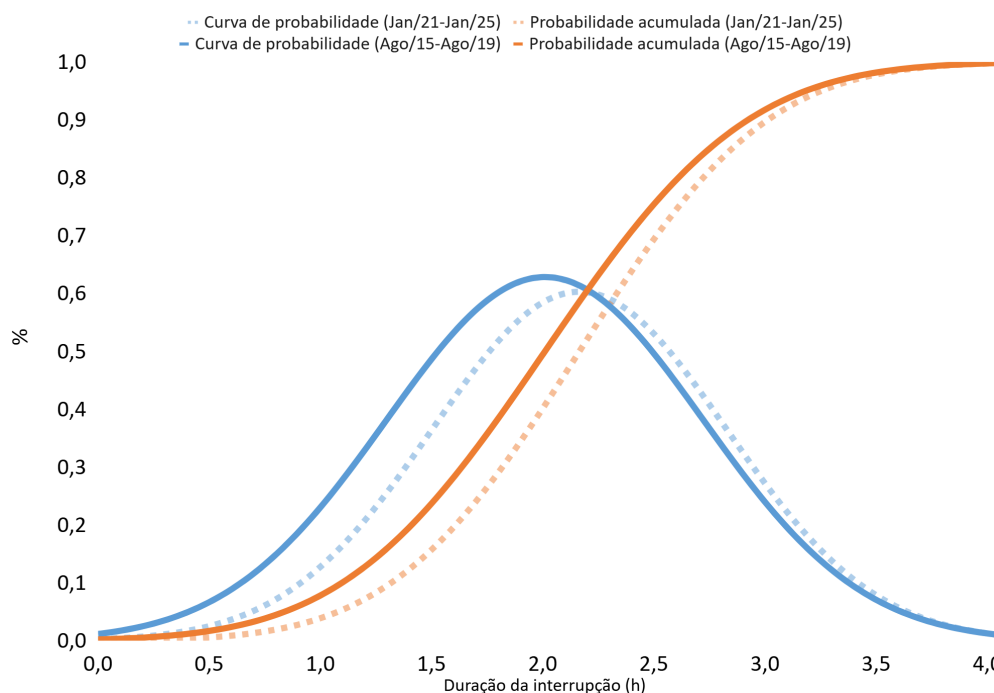


Fonte: Autoria Própria (2025)

Em relação ao PIT, a empresa Serraria informou não saber tal dado, enquanto as outras duas empresas informaram que seus valores são iguais a zero, ou seja, no mesmo momento que existe a parada de fornecimento de energia elétrica para seu sistema produtivo, também ocorre a parada imediata do seu processo considerado mais crítico. Tal fato demonstra a grande dependência das indústrias avaliadas quanto à qualidade de fornecimento e confiabilidade deste serviço. Portanto, destaca-se aqui a grande necessidade de investimentos que tragam maior resiliência por parte das indústrias e, por outro lado, investimentos por parte da concessionária para que se mantenha um padrão de alta qualidade e consistência para as empresas da região avaliada.

Além disso, realizou-se o cálculo do *DMIC* para um período histórico de 48 meses anteriores ao período da aplicação do estudo, realizando-se posteriormente a normalização destes dados e, deste modo, obteve-se a curva de distribuição normal visualizada na Figura 18, com uma média de 1,79 horas e desvio padrão de 0,6349 horas. Neste mesmo gráfico é possível observar dados mais recentes que demonstram que a qualidade do fornecimento de energia elétrica teve uma piora neste indicador, com uma média de 2,17 horas e desvio padrão de 0,6617 horas.

Figura 18 – Curva da distribuição normal do DMIC referente ao fornecimento de energia às empresas participantes



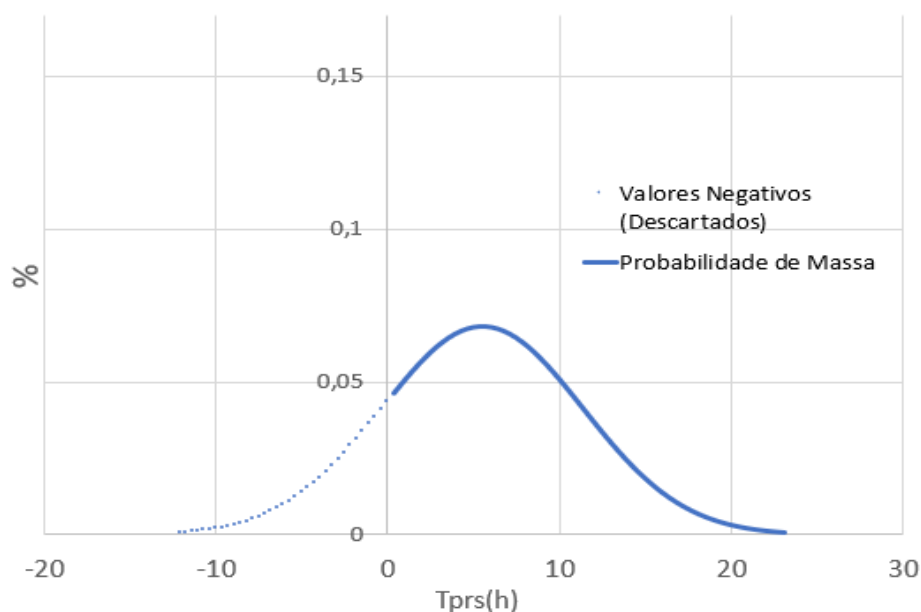
Fonte: Adaptado de ANEEL (2019b, 2025).

Outro aspecto avaliado neste trabalho é a qualidade dos registros de eventos de interrupção de energia em cada empresa entrevistada. Esta avaliação visa diagnosticar a preocupação das empresas quanto à qualidade do fornecimento de energia, ou até mesmo da cobrança de seus direitos frente a prejuízos provenientes de tal origem. Após as entrevistas pode se constatar que nenhuma das empresas realiza este registro interno, seja por desconhecimento da importância dessa informação ou por falta de recursos de tecnologia de informação.

Por outro lado, as indústrias puderam informar os dados relacionados ao tempo de reinício do processo - T_{PRS} . Com isso, foi possível elaborar a sua respectiva curva de probabilidade mostrada na Figura 19, com média de 5,49 horas e desvio padrão de 5,8718 horas. Este resultado apresenta um desvio padrão elevado por conta de dois fatores, sendo o primeiro devido à baixa quantidade de resultados coletados, o que faz com que a distribuição normal não apresente uma grande concentração de pontos em torno do valor médio calculado. O segundo fator diz a respeito da avaliação conjunta de empresas de diferentes portes, sendo que empresas de maior porte podem apresentar tempos de retomada de processos

elevados devido à complexidade de suas instalações. Este último fator pode ser considerado como consequência do primeiro, ou seja, tal agrupamento só foi realizado por conta de uma quantidade reduzida de dados coletados.

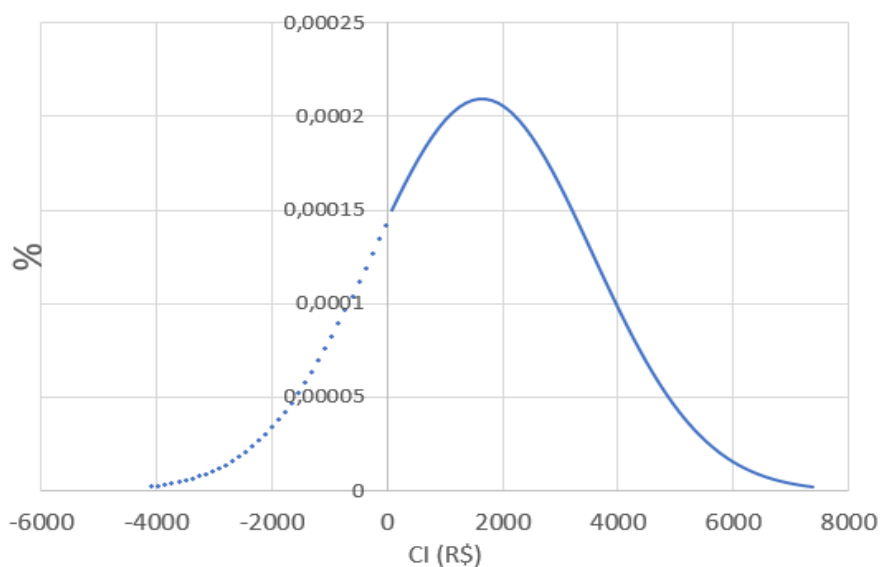
Figura 19 – Distribuição normal do Tempo de Reinício do Processo



Fonte: Autoria Própria (2025)

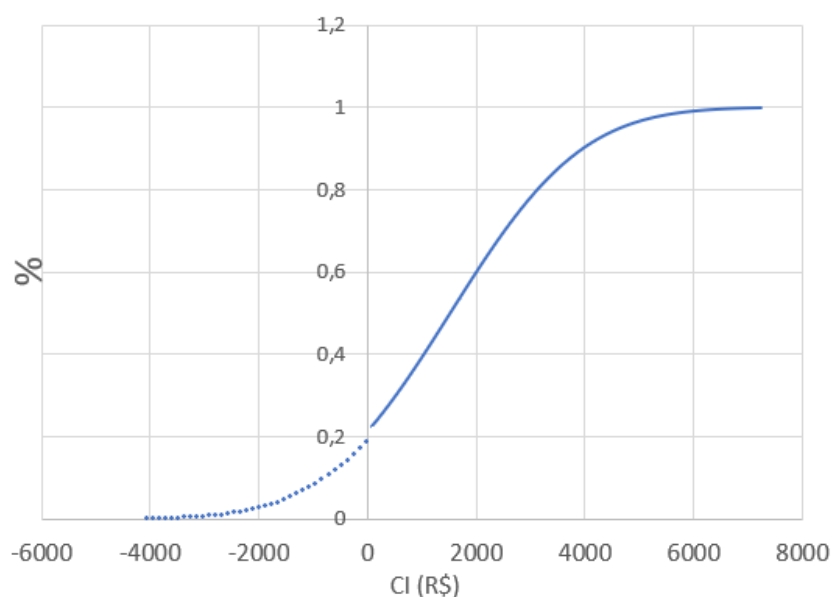
Em relação ao Custo de Interrupção por evento, nenhuma das empresas aderiu a tabela de descrição de custos segmentada, o que apresenta uma ausência de investigação quanto aos prejuízos econômicos avaliados. Os dados de custos coletados foram apenas pelo período de interrupção. Com isso obtiveram-se um valor médio de R\$1645,43 e desvio padrão de R\$1909,21, eles podem ser vistos nas Figura 20 e Figura 21. O desvio padrão elevado também possui a influência dos fatores citados a respeito dos resultados do tempo de reinício de processo, considerando que o agrupamento dos resultados em um valor médio foi afetado pela pouca quantidade de dados coletados.

Figura 20 – Distribuição normal do Custo de Interrupção



Fonte: Autoria Própria (2025)

Figura 21 – Probabilidade acumulada do Custo de Interrupção por evento



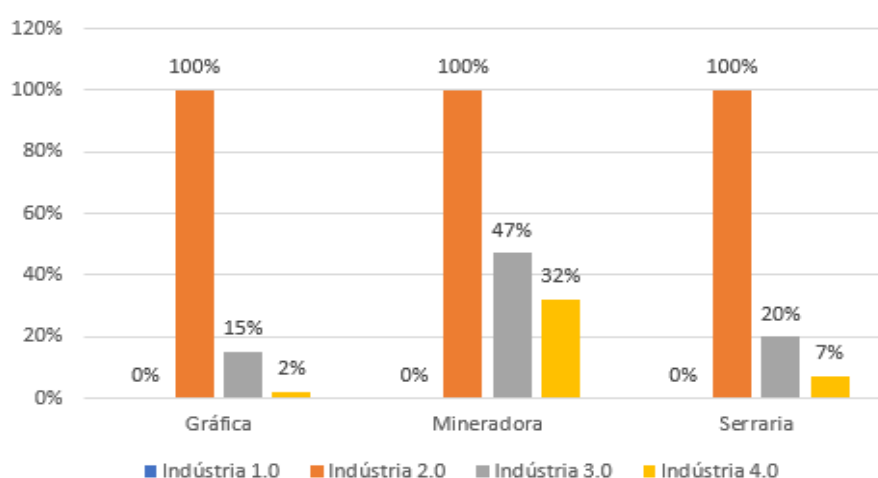
Fonte: Autoria Própria (2025)

Pode-se interpretar da Figura 21 que 60% das interrupções de energia ocasionam um prejuízo financeiro às empresas avaliadas de até R\$2000 por evento.

Em relação aos demais tipos de distúrbios, que não a interrupção de energia, apenas a empresa Gráfica informou possuir paradas produtivas por conta destes distúrbios, ressaltando que a frequência mensal média é de duas ocorrências, com paradas de produção com duração de 3 horas em média.

Por fim, mostram-se aqui as avaliações referentes às classificações do estado tecnológico industrial das empresas participantes, tendo que os valores calculados para $I_{1.0}$, $I_{2.0}$ e $I_{3.0}$ são níveis percentuais de semelhança das empresa avaliadas com as características das respectivas eras industriais, enquanto o parâmetro $I_{4.0}$ avalia o nível de maturidade para a Indústria 4.0. Apresenta-se, tendo isto em vista, as avaliações vistas na Figura 22.

Figura 22 – Classificação do nível tecnológico das empresas participantes



Fonte: Autoria Própria (2025)

As avaliações verificadas permitem atingir nas seguintes conclusões:

- Nenhuma das empresas avaliadas possuem um processo produtivo que se assemelhe com as características do período da primeira revolução industrial (0% na avaliação de Indústria 1.0), ou seja, uma produção mais próxima a um processo artesanal e auxiliado por máquinas que utilizam a queima de combustíveis fósseis para criar força mecânica;
- Todas as empresas apresentaram características compatíveis com a Indústria 2.0, tendo utilizado a energia elétrica para o funcionamento de seu maquinário, sistemas de produção em massa e linhas de montagem bem definidas.
- O nível de automação dos maquinários e a presença de sistemas computacionais para auxílio de produção pode ser observado como

uma etapa que está em desenvolvimento para as três empresas. Entretanto, o porte das empresas entrevistadas pode ser relacionado com o nível de similaridade de características com a Indústria 3.0, sendo que a avaliação da Gráfica, empresa de menor porte, possui a nota mais baixa (15%), enquanto a empresa Mineradora, de maior porte, demonstrou uma nota de 47% nesta avaliação. Esta relação demonstra a dificuldade que indústrias de menor porte possuem de realizarem investimentos em tecnologia como forma de melhorar seus processos produtivos.

- Quanto ao nível de maturidade para a Indústria 4.0, é possível notar que as avaliações mantiveram a ordem de classificação obtida no parâmetro da Indústria 3.0. A presença de um sistema ciberfísico industrial necessita de instalações que possuam o maior nível de automação possível, assim como uma mentalidade voltada para o melhoramento contínuo de seus processos e desenvolvimento pessoal, de um ponto de vista tecnológico. Sendo assim, foi observado que a Gráfica apresentou uma preparação para Indústria 4.0 de apenas 2%, enquanto a Serraria possui resultado pouco superior, de 7%, e, por fim, a Mineradora apresentou uma avaliação de 32% quanto a sua maturidade para a Indústria 4.0.

É correto afirmar, portanto, que as empresas avaliadas apresentam distanciamento dos conceitos abordados pela Indústria 4.0 e, ainda mais, que empresas de menor porte tendem a ter avaliações ainda mais baixas nesse quesito.

5.3 SOLUÇÕES E ALTERNATIVAS PARA MELHORIA DA RESILIÊNCIA

Neste capítulo serão apontados pontos de melhoria considerados relevantes e de aplicação tangível considerando as realidades observadas das empresas participantes tendo em vista que, essas empresas possuem necessidades particulares que antecedem ao contexto da Indústria 4.0.

Sendo assim, são abordadas três frentes de sugestões para a melhoria da resiliência produtiva: aquelas ações oriundas do órgão regulador responsável (ANEEL); as de responsabilidade da concessionária que fornece energia para os

consumidores industriais avaliados e; aquelas provenientes dos próprios consumidores industriais. As práticas são apresentadas em uma ordem crescente de complexidade de aplicação, tendo que as primeiras sugestões de cada uma das três frentes irão representar as ações mais facilitadas, sejam estas por motivos de burocracia ou investimentos necessários.

5.3.1 Órgão regulador – ANEEL

Dentre as possíveis ações pertinentes à ANEEL para atingir uma melhoria da resiliência das indústrias, encontram-se as participações de natureza reguladora, fiscal e mediadora, tendo como objetivo principal, a criação de estratégias e procedimentos que garantam os direitos de acesso a uma energia elétrica de qualidade pelos consumidores industriais.

A primeira sugestão de melhoria para esta frente é identificar disparidades do nível de satisfação entre os consumidores, considerando que a média dos resultados de todas as entrevistas realizadas não destaca tal desigualdade da qualidade de fornecimento de energia elétrica. Em Azevedo, Romão e Menegatti (2019) é possível visualizar os resultados da avaliação IASC de 2019, incluindo os valores de desvio padrão. Além de se verificar valores de desvio padrão relativamente altos comparados com suas médias – como por exemplo, avaliação de custo-benefício com média 3,57 e desvio padrão 2,03, em uma avaliação de 1 a 5 – também é possível verificar que os locais pesquisados não demonstram a realidade de algumas cidades avaliadas.

A pesquisa realizada para determinar o IASC em 2019 em Itapeva, entrevistou apenas 16 consumidores, sendo que os bairros em que se concentraram as entrevistas foram: Centro (1 consumidor), Parque Longa Vida (7 consumidores) e Parque São Jorge (8 consumidores). Tais bairros avaliados são locais em que o tipo de consumidor é majoritariamente residencial e comercial, praticamente sendo excluído a avaliação do consumidor industrial itapevense nesta pesquisa.

A segunda sugestão para o órgão responsável pela fiscalização do sistema elétrico nacional é a criação de indicadores de qualidade de produto e avanços tecnológicos para consumidores industriais. O questionário aplicado mostrou uma presença forte de indústrias concentradas com características da segunda revolução industrial, com indícios leves da presença de sistemas

automatizados. Sendo assim, uma parcela importante de consumidores está sujeita a impactos rigorosos quando desprovidas de dispositivos de proteção e com valores inadequados de PIT .

Os indicadores PIT , T_{PRS} e CI possibilitaram a identificação de necessidade particulares que os consumidores industriais possam requerer para garantir a continuidade dos seus processos produtivos. Sendo assim, eles permitem, por um lado, orientar ao sistema elétrico em relação às necessidades dos consumidores industriais e assim fortalecer o sistema de fornecimento elétrico para que a energia seja fornecida com qualidade e confiabilidade adequada para os consumidores industriais; por outro lado, esses indicadores também permitem destacar os impactos negativos nos consumidores causados por problemas no fornecimento de energia e seus respectivos direitos de compensação em perdas produtivas.

Em ANEEL (2020) é destacada a importância de reavaliar o sistema de compensação reproduzido atualmente no cenário brasileiro, tendo em vista que a falta de conhecimento das perdas financeiras pelo próprio consumidor incentiva a manutenção de um sistema que não retorna os devidos recursos para os agentes prejudicados, corroborando assim a ausência de investimentos nas redes elétricas para reduzir tais impactos. A confecção de novos indicadores mais específicos quanto ao desempenho industrial possibilitará uma aproximação entre a realidade observada atualmente e os conceitos desejados para a Indústria 4.0.

Por fim, a terceira sugestão elencada para ações provenientes da ANEEL é a revisão regulamentária dos sistemas de Microgeração Distribuída, procurando fomentar investimentos e incentivos para que os consumidores industriais adotem fontes alternativas de energia para complementar ou suprir o fornecimento por parte da concessionária em casos de interrupções prolongadas advindas de anomalias no normal fornecimento de energia. Para isso, assim como destacado por Hassin (2003), uma das etapas mais importantes é a determinação de marcos tarifários que incentive os investimentos na microgeração pelos consumidores industriais, tendo em vista que a ocorrência destes investimentos deve seguir o critério do tempo de retorno do investimento (payback) (Silva; Silva, 2015). Tais investimentos em microgeração distribuída podem contribuir para criar um sistema de distribuição de energia mais adequado, tendo em vista que a parcela da energia não utilizada pelos

consumidores irá retornar para a rede, sendo possível aplicar soluções mais rápidas diante de distúrbios elétricos presentes na rede. As vantagens aos agentes envolvidos neste processo são ressaltadas por Sousa *et al.* (2018), sendo que tal proposta é “...atraente para ambos os envolvidos na microgeração distribuída de energia (gerador e distribuidora), pois, ambos ganham com a implantação de uma política um pouco mais severa de incentivos à difusão de algo tão importante para a segurança energética do país.”

5.3.2 Concessionária

Quanto às sugestões propostas para as concessionárias responsáveis pela distribuição de energia elétrica para os consumidores industriais, estão mais destacadas ações que lidam diretamente com o incentivo à participação mais ativa e à transparência com o consumidor, assim como o planejamento de investimentos nas áreas de concessão para garantir uma distribuição mais igualitária da energia elétrica.

Durante a aplicação do questionário, foi notada a ausência de conhecimento dos consumidores industriais quanto à influência dos distúrbios elétricos e impactos associados em seus processos produtivos industriais. Tal fato se tornou evidente ao serem coletadas apenas estimativas dos Custos de Interrupção nos processos produtivos, no lugar de valores claros em relação a eventos registrados pela própria empresa. Muitas vezes, os responsáveis pelas indústrias, principalmente microempresas e empresas de pequeno porte, não estão cientes de que suas atividades industriais apresentam custos que possam ser reduzidos ou mitigados por meio de investimentos na infraestrutura elétrica de suas instalações. Tal lacuna pode ser preenchida através de uma nova proposta de tema de investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) relacionado ao mapeamento dos impactos produtivos e econômicos em indústrias por interrupções de energia e demais distúrbios. Desta forma, seria possível incentivar a participação do consumidor ao coletar informações inerentes aos distúrbios, identificar quais pontos apresentam menor resiliência produtiva e maiores impactos econômicos, assim como planejar de forma mais embasada os investimentos aplicados na rede elétrica com a finalidade de obter um maior número de consumidores beneficiados. Tendo em vista que o saldo da conta de P&D da empresa Elektro foi de R\$60

milhões ao final de 2019 e vem apresentando um aumento de aproximadamente 17% nos últimos dois anos (Santos, 2018), as concessionárias possuem a disponibilidade de melhorar a destinação de tais recursos financeiros. A importância desta solução se dá devido ao aumento do nível de conscientização e prevenção dos impactos mencionados para os consumidores.

A outra solução sugerida que se dirige às concessionárias é a ampliação das tecnologias de controle e monitoramento das redes em tempo real, trazendo informações tanto de fornecimento quanto de demanda dos consumidores industriais conectados às linhas de transmissão, sendo necessário que as concessionárias invistam em tecnologias de coleta de informações e comunicação avançadas, como sensores e controladores (Elektro, 2020). Entretanto, para que se obtenha um sistema de gestão eficiente e confiável, é de extrema importância que se invista fortemente em segurança cibernética, protegendo o sistema de gestão destas redes de possíveis falhas ou ataques. Vineetha e Babu (2014) destacam a utilização de tecnologias ligadas às redes elétricas inteligentes – REIs (dispositivos de proteção, chaveamento automático, sensores e outros) em uma rede elétrica de média tensão com o objetivo de reduzir os Custos de Interrupção da rede através de respostas rápidas a faltas de energia e mitigação de falhas, demonstrando a importância do tema para a evolução dos consumidores industriais.

Outro aspecto de grande importância dentro da gestão de cargas em tempo real diz respeito ao uso de ferramentas de simulação virtual para diferentes aspectos da rede (presença de diferentes cargas, sistemas de comunicação e estratégias de controle), sendo que a integração destas ferramentas com o sistema de gestão da concessionária pode auxiliar no planejamento de operação e expansão das redes elétricas (Kjølle *et al.*, 2013; Bettiol *et al.*, 2014).

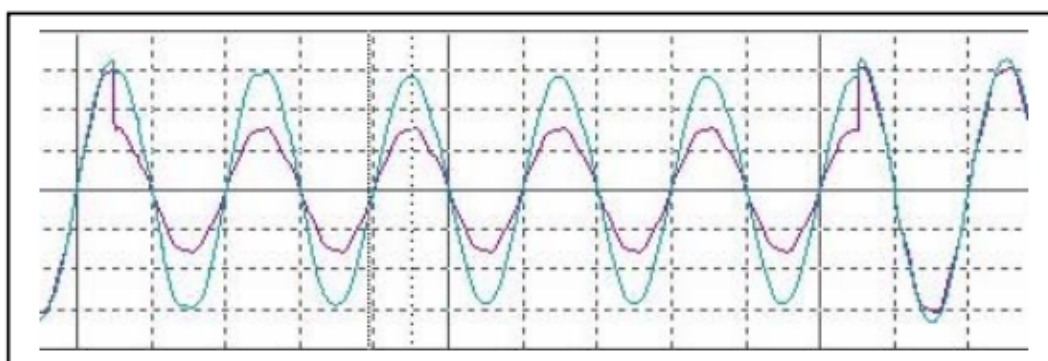
5.3.3 Empresas

De acordo com Neoenergia (2020), um dos maiores desafios enfrentados para a implementação de tecnologias correlatas às redes elétricas inteligentes e Indústria 4.0 é a falta de conscientização por parte dos consumidores quanto aos problemas causados pelo setor elétrico. Essa observação foi corroborada na realização desta pesquisa com as três empresas participantes. Com isso, a primeira solução sugerida é de que os consumidores industriais da região destinem parte de

suas atividades de gestão na identificação dos problemas enfrentados dentro de suas instalações devido aos distúrbios elétricos presentes, assim como aumentar seus conhecimentos em relação ao tema, inclusive a respeito dos direitos de compensação ao consumidor determinados por lei. A conscientização por parte dos consumidores industriais a respeito da relevância do tema de QEE dentro de seus processos produtivos deixa mais evidente a importância de investimentos nesta área ou até mesmo verificações da normalidade do serviço prestado pela concessionária ao constatar padrões de anormalidades no comportamento de seus equipamentos.

A segunda solução proposta, principalmente para sistemas produtivos que apresentam falhas ou paradas de seus processos devido a distúrbios elétricos é de que sejam instalados dispositivos de proteção elétrica. Em quaisquer situações, deve-se avaliar quais são as cargas consideradas como mais críticas dentro do processo para que se possam priorizar quais equipamentos necessitam dessa proteção (Dufour; Araújo; Bélanger, 2013). Dentre tais dispositivos, o uso de equipamentos de compensação de energia que não realizam armazenamento de energia, denominado por Clement *et al.* (2017) como Set-Dvr, possibilita uma saída de voltagem estável e de resposta rápida em cenários que apresentem diversos tipos de distúrbios, além de representar um investimento mais econômico do que dispositivos com armazenamento de energia. Na Figura 23 pode ser observado o comportamento da onda de energia elétrica em uma queda de 40% da tensão nominal e a ação reparadora do dispositivo Set-Dvr após cinco ciclos, o que em um sistema de frequência de 60Hz representaria um tempo de resposta em 83 milissegundos.

Figura 23 – Amostra de compensação de queda de tensão de 40% do valor nominal pelo SET-DVR



Fonte: Clement *et al.* (2017).

Outra solução proposta vai na direção de investimentos por parte dos consumidores em equipamentos e/ou sistemas que possibilitem a coleta de dados inteligente da sua energia consumida — *Smart Metering* (Barona *et al.*, 2007). Esta abordagem permite a identificação de padrões de queda de produção ou paradas produtivas que possam estar associados à presença de distúrbios elétricos na rede. Desta forma, é possível aplicar medidas corretivas de proteção elétrica a partir do histórico de dados armazenado por tal sistema, assim como possuir um desenvolvimento econômico e sustentável da planta de produção quanto à utilização da eletricidade (Livgard, 2010). Sistemas de *Smart Metering* permitem também verificar quais adaptações podem ser realizadas dentro do mapeamento de processos da empresa para adaptar seu consumo energético para períodos relativamente mais baratos e com menor demanda de rede. Tal solução pode ser aplicada dentro das três empresas participantes, entretanto, deve-se levar em conta que tal investimento possui um peso econômico maior e, portanto, representa um retorno de investimento apenas em longo prazo.

Quanto à melhoria dos valores observados de PIT, uma opção de grande destaque é o investimento em uma fonte alternativa de energia para fornecimento parcial ou total do uso de energia desses consumidores industriais (Microgeração Distribuída). Apesar dos entraves existentes quanto à regulamentação brasileira destacados por Hassin (2003), a atratividade de possuir uma fonte de energia própria que garante certo nível de qualidade e apresenta uma redução parcial ou total de tal custo foi destacada pela empresa Serraria, ainda que o retorno do investimento seja considerado como a longo prazo.

6 CONCLUSÃO

Com a crescente complexidade dos processos industriais e a forte presença de tecnologias eletrônicas nos sistemas produtivos, a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica passou a exercer influência direta no desempenho operacional das empresas. Embora os efeitos de distúrbios elétricos nem sempre sejam imediatamente perceptíveis, suas consequências podem se acumular ao longo do tempo, resultando em interrupções, prejuízos operacionais e desgaste prematuro de equipamentos. Nesse contexto, a discussão sobre a qualidade da energia elétrica deixou de ser restrita a aspectos técnicos da concessionária e passou a fazer parte das preocupações internas de empresas que possuam processos produtivos, sobretudo aquelas que buscam competitividade aliada à estabilidade.

Tendo isso em vista, este trabalho foi desenvolvido com o intuito de analisar de forma objetiva como os distúrbios na rede afetam a resiliência dos processos industriais, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. Para isso, foram coletados dados reais a partir de um questionário direcionado a empresas do setor, permitindo a identificação de indicadores específicos como o Tempo de Imunidade do Processo (PIT) e o Custo de Interrupção (CI). A análise estatística dessas informações possibilitou observar padrões relevantes e propor soluções adaptadas à realidade das organizações envolvidas.

Vale destacar que os resultados indicam não apenas a vulnerabilidade dos processos frente a distúrbios, mas também o papel decisivo que a tecnologia, especialmente os conceitos da Indústria 4.0, pode desempenhar na construção de sistemas produtivos mais robustos. A partir disso, foram apresentadas sugestões viáveis, como o uso de medidores inteligentes, a instalação de dispositivos de proteção elétrica e, em determinados contextos, o investimento em fontes alternativas de energia. Além disso, foi possível perceber que a conscientização interna sobre o tema ainda é limitada, o que reforça a importância de se ampliar o diálogo entre empresas e concessionárias.

Considerando que a aplicação desta pesquisa ocorreu entre os anos de 2018 e 2020, tornou-se imprescindível realizar uma atualização das referências bibliográficas, com o objetivo de incorporar fontes mais recentes que refletissem a evolução dos temas investigados. Durante essa revalidação, constatou-se uma

lacuna significativa na produção acadêmica e científica no que diz respeito ao estudo e mapeamento do indicador Custo de Interrupção (CI) em processos industriais. A ausência de novas publicações que tratem especificamente desse indicador reforça a importância de incentivar pesquisas nessa área, tanto no meio acadêmico quanto entre instituições governamentais, concessionárias de energia e empresas do setor produtivo. Avançar nesse campo é fundamental para aprimorar a gestão da qualidade de energia nas indústrias, contribuindo diretamente para a eficiência operacional e para a redução de perdas financeiras associadas a distúrbios elétricos.

Por outro lado, foram localizadas quatro pesquisas que tratam da maturidade tecnológica de organizações no contexto da Indústria 4.0. O estudo conduzido por Machado *et al.* (2021) concentrou-se no mapeamento do nível de maturidade tecnológica de uma empresa distribuidora de medicamentos, adotando uma abordagem que contempla diferentes níveis hierárquicos da organização. Em outra vertente, Souza (2021) analisou o grau de maturidade tecnológica de uma instituição federal de ensino superior, evidenciando uma baixa incorporação das tecnologias associadas à Indústria 4.0. As demais pesquisas, desenvolvidas por Chuang (2024) e Rodrigues (2021), ampliaram o escopo de análise ao englobar um número maior de empresas, permitindo a realização de comparações entre os níveis de maturidade. Esses trabalhos destacaram fatores como investimentos realizados, capacitação de colaboradores, grau de digitalização, acesso à informação e outras dimensões que se relacionam diretamente com o grau de preparo das organizações para a adoção de tecnologias avançadas em seus processos produtivos.

A seguir serão ponderadas as experiências obtidas no projeto para apontar as principais dificuldades verificadas, assim como ressaltar ações que facilitam a abordagem deste tema específico, para referência e auxílio de trabalhos futuros.

6.1 DIFICULDADES ENCONTRADAS E PONTOS DE MELHORIA

Dentre da etapa de revisão bibliográfica, observa-se que o tema de pesquisa da QEE em consumidores industriais é pouco abordado em âmbito nacional no sentido de indicadores econômicos associados a paradas de produção

causados por distúrbios elétricos, sendo necessário uma busca por referências internacionais do assunto tratado.

Em relação à etapa de definição de questionário final e seleção de empresas, foi constatada uma duração maior do planejamento inicial. O motivo para tal prolongamento é, principalmente, que as informações referentes às empresas da região analisada são de difícil acesso e, muitas vezes, incompletas ou incorretas, o que torna esta etapa mais desacelerada. Este problema poderia ser solucionado pela expansão da área de aplicação da pesquisa, aumentando a área de observação e, como consequência, o número de empresas participantes.

Por outro lado, a definição do questionário necessitou de diversas etapas de verificação e validação com os consumidores industriais, tendo que o sucesso desta etapa se dá pela maior compreensão dos entrevistados das questões levantadas. O ponto que poderia melhorar esta etapa é que sejam procurados profissionais que lidem diretamente com os consumidores industriais de diferentes especialidades, podendo orientar quais perguntas precisam ser modificadas ou retiradas.

O envio do questionário apresentou certa dificuldade quanto ao retorno do contato realizado com as indústrias para que participassem do projeto. Muitas vezes os primeiros contatos eram realizados com pessoas responsáveis pelo atendimento comercial da empresa, algo que prolongava o tempo para que as informações do projeto chegassem ao colaborador responsável por confirmar a participação da indústria. Contudo, a chegada da pandemia do coronavírus no final do mês de fevereiro deste ano e com as políticas de isolamento social agravou ainda mais a dificuldade de realizar esses contatos e, por conta disso, somente foi possível utilizar as respostas de 3 empresas.

Quanto à análise de resultados, a literatura apresenta poucos documentos que possuam a aplicação de suas metodologias propostas e, consequentemente, poucas informações quanto ao tratamento dos dados e análise de resultados obtidos.

6.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Percebe-se atualmente que a principal falha das indústrias analisadas é o desconhecimento de informações relacionadas a possíveis distúrbios elétricos

presentes em suas instalações, assim como dados referentes aos impactos em seus processos mais críticos e os prejuízos econômicos inerentes a paradas produtivas associadas.

O despreparo por parte das indústrias e concessionárias de energia frente a estas anomalias irão apenas aumentar as lacunas que existem entre o estado do sistema elétrico avaliado e conceito de Indústria 4.0. Portanto, devem-se aplicar os devidos investimentos para que se alcance soluções que reduzam ou anulem os problemas enfrentados por conta dos distúrbios elétricos.

Nota-se também que o nível tecnológico avaliado (maturidade frente à Indústria 4.0) das empresas demonstra valores considerados como baixos (média de 14%), e que se faz necessário avaliar individualmente a realidade econômica para a aplicação de investimentos que aumentem a resiliência produtiva destas indústrias.

A melhora da resiliência dos processos produtivos frente aos distúrbios elétricos é um avanço gradual em que devem ser analisadas individualmente as condições de cada consumidor industrial. Entretanto, a identificação de características semelhantes entre estes consumidores pode apontar necessidades de melhorias similares, algo que deve ser observado por entidades como as concessionárias, órgão regulador e governo, tendo o intuito de fomentar incentivos e investimentos para garantir um nível superior de fornecimento da energia elétrica.

A metodologia proposta busca obter uma simplificação do tema abordado a fim de captar mais empresas participantes, porém mantendo a confiabilidade dos resultados e propondo aprimorar as soluções plausíveis para padrões de comportamentos dos processos produtivos, visando guiar as empresas participantes para um patamar tecnológico mais aprimorado.

6.3 TRABALHOS CIENTÍFICOS APRESENTADOS

Este projeto foi apresentado no 31º e 32º Congresso de Iniciação Científica da Unesp (XXXI CIC e XXXII CIC) ocorrido no Câmpus Experimental de Itapeva. Foram apresentadas as etapas desenvolvidas até a data dos eventos, assim como as perspectivas futuras do projeto naquele momento. O registro das apresentações podem ser verificados nos anais dos eventos disponibilizados em meio eletrônico (Gaeski, 2019; Gaeski 2020).

Este trabalho foi adaptado para o formato de artigo para compor como capítulo do livro “Coletânea Especial de Engenharia de Produção” da Editora Kreatik (Gaeski; Amasifen, 2021).

Por fim, também foi apresentado em formato de artigo no 40º Encontro Nacional de Engenharia de Produção (XL Enegep) que ocorreu virtualmente, entre os dias 20 e 23 de outubro de 2020, e teve como tema “Contribuições da Engenharia de Produção para a Gestão de Operações Energéticas Sustentáveis”.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **IASC 2019**. 2019a. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiMzFhY2JjYjktNmY4My00NjhlLWJhZmUtYzhkZTE5ZWVmMWM4liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 01 mar. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Índice ANEEL de satisfação do consumidor**. Brasília: ANEEL, 2015. 22 p. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/ELEKTRO_IASC_2015.pdf. Acesso em: 01 ago. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Indicadores individuais de continuidade por município**. 2018. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/limites-dos-indicadores-de-continuidade-por-municipio>. Acesso em: 01 ago. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Indicadores coletivos de continuidade**. 2025. Disponível em: <https://portalrelatorios.aneel.gov.br/hubDistribuicao/reportIndicadoresContinuidade#!>. Acesso em: 01 mar. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Pesquisa de satisfação do consumidor residencial**. Brasília: ANEEL, 2018. 9 p. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/documents/655804/17259898/Sorteio+lasc+2018_vf_27072018_1009.pdf/fe092e87-4be1-3b7c-7b48-6aea301d6ef1. Acesso em: 01 ago. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Pesquisa de satisfação do consumidor residencial**. Brasília: ANEEL, 2019b. 14 p. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/documents/655804/0/Sorteio_lasc_2019_public_vf.pdf/ab59a9e6-012d-2924-fbf0-2ebdaffe0d76. Acesso em: 01 ago. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Resolução Normativa nº 794, de 28 de novembro de 2017**: Altera a Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010, e aprova a revisão dos Módulos 1 e 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST e dá outras providências. Brasília, DF: ANEEL, 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Resultados IASC 2019 - Elektro**. Brasília: Aneel, 2020. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/documents/655804/18861329/Simuladores_lasc-2019_Elektro.xlsm/16d5c23e-109d-3887-447a-59fcaef63c58. Acesso em: 15 abr. 2020.
- AMIN, S. M.; WOLLENBERG, B. F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. **IEEE Power & Energy Magazine**, v. 3, n. 5, p. 34-41, set./out. 2005.
- ARDITO, A.; MALGAROTTI, S.; PRUDENZI, A. A survey of power quality aspects at industrial customers in Italy. *In*: 17th INTERNATIONAL CONFERENCE ON

ELECTRICITY DISTRIBUTION (CIRED), 2003, Barcelona, Espanha. **Anais [...]** Barcelona: CIRED, 2003.

ARRUDA, E. F. **Análise de distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica utilizando a transformada wavelet**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003. 114p

ASSUMPÇÃO, A.r; MATOS, C. A. F. **Uma contribuição para análise de variações momentâneas de tensão**. Projeto Final de Graduação em Engenharia Elétrica, Publicação ENE-0/07, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 90 p. 2007.

AZEVEDO, G. T.; ROMAO, E. C.; MENEGATTI, C. R. **Correção de distorções harmônicas em sistemas elétricos através de interferência destrutiva**. Rev. Bras. Ensino Fís., São Paulo, v. 41, n. 3, e20180278, 2019.

BARONA, A. *et al.* New power quality solutions especially designed for industrial applications. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL POWER QUALITY AND UTILISATION, 9., 2007, Barcelona. **Proceedings [...]**. Barcelona: IEEE, 2007. p. 1-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/EPQU.2007.4424076>. Acesso em: 16 out. 2019.

BETTIOL, A. L. *et al.* Design and development of an integrated computational simulator for analysis and validation of the implementation of smart grids in Brazilian utilities. *In*: INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE, 49., 2014, Cluj-Napoca. **Proceedings [...]**. Cluj-Napoca: IEEE, 2014. p. 1-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/UPEC.2014.6934593>. Acesso em: 24 maio 2019.

BOLLEN, M. *et al.* **Imunidade a afundamentos de tensão em equipamentos e instalações**. Relatório Técnico do Grupo de Trabalho Conjunto CIGRE/CIRED/UIE, 2010.

BOLLEN, M. H. J. **Understanding power quality problems: Voltage sags and interruptions**. New York: IEEE Press, 2000.

BOLLEN, Math H. J. **What is power quality?** Electric Power Systems Research, [Gotemburgo, Suécia], v. 66, n. 1, p. 5-14, 2003.

BONEBERG, B. S. *et al.* Qualidade de energia: estudo de caso de uma indústria metalmecânica no sul do Brasil. **Revista Eletrônica Científica da UERGS**, [s.l.], v. 3, n. 2, p.315-339, 25 ago. 2017.

BRONZEADO, H. *et al.* Uma proposta de nomenclatura nacional de termos e definições associados à qualidade de energia elétrica. *In*: SEMINÁRIO BRASILEIRO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 2., 1997, Itajubá. **Anais [...]**. Itajubá:, 1997. p. xx-xx.

CARVALHO, J. M. **Uma contribuição à avaliação do atendimento a consumidores com cargas sensíveis**: Proposta de novos indicadores. Tese de Doutorado – Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 2000.

CEBRIAN, J. C.; KAGAN, N.; MILANOVIC, J. V. Applying process immunity time to assess annual industrial process trips. *In*: IEEE PRESS GENERAL MEETING | CONFERENCE & EXPOSITION, 2014, National Harbor, MD. **Anais [...]**. New York: IEEE, 2014. p. 1–5.

CEBRIAN, J. C.; KAGAN, N.; MILANOVIC, J. V. Probabilistic assessment of financial losses in distribution network due to fault-induced process interruptions considering process immunity time. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 30, n. 3, p. 1478-1486, 2015. Acesso em: 19 set. 2019.

CHOI, N. *et al.* Evaluation of interruption costs for general public customer in Korea. *In*: IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXHIBITION, 2006, Dallas. **Proceedings [...]**. Dallas: IEEE, 2006. p. 760-765. Acesso em: 16 out. 2019.

CHUANG, F. J. T. **Pesquisa na gestão e adoção de práticas da Indústria 4.0 para pequenas e médias empresas brasileiras do setor atacadista**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2024.

CLEMENT, G. J. *et al.* Critical process loads: defining and incorporating them into a reliable power system. *In*: PETROLEUM AND CHEMICAL INDUSTRY TECHNICAL CONFERENCE (PCIC), 2017, Calgary. **Proceedings [...]**. Calgary: IEEE, 2017. p. 301-310.

COELHO, J.; CRUZ, M. P.; CISLAGHI, R.; e GRAF, O. **Metodologia para avaliação dos custos associados a problemas de qualidade de energia em consumidores de grande porte**. SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas de Energia, Campina Grande, Set. 2006.

COELHO, J. e CABRERA, F. C. **Módulo 4: O aspecto econômico dos custos da energia elétrica no planejamento da distribuição: metodologia e valores**. Relatório Interno Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica - LabPlan/EEL/UFSC, Florianópolis, 2000.

CRUZ, Matheus Palma *et al.* Metodologia para avaliação dos impactos econômicos associados a problemas de qualidade de energia. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUALIDADE DE ENERGIA, 2007, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo: CBQE, 2007.

DIALYNAS, E. N.; MEGALOCONOMOS, S. M.; DALI, V. C. Interruption cost analysis for the electrical power customers in Greece. *In*: International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), 16., 2001, Amsterdam. **Anais**, Part 1: Contributions. [S.l.]: IEE, 2001. p. 5.

DUFOUR, C.; ARAÚJO, S.; BÉLANGER, J. A survey of smart grid research and development involving real-time simulation technology. *In: IEEE PES CONFERENCE ON INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES (ISGT LATIN AMERICA)*, 2013, São Paulo. **Proceedings** [...]. São Paulo: IEEE, 2013. p. 1-8. Acesso em: 17 nov. 2019.

DUGAN, R.; MCGRANAGHAN, M.; SANTOSO, S.; WAYNE, H. **Electrical power systems quality**. 3. ed. Nova York: McGraw-Hill Education, 2012. ISBN 978-0-07-176155-0.

ELPHICK, S.; CIUFO, P.; SMITH, V.; PERERA, S. Summary of the economic impacts of power quality on customers. *In: AUSTRALASIAN UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE (AUPEC)*, 2015, Wollongong. **Anais** [...]. Wollongong: IEEE, 2015. p. 1–6.

FERREIRA, D. D. *et al.* **Sistema automático de detecção e classificação de distúrbios elétricos em qualidade da energia elétrica**. Sba Controle & Automação, Natal, v. 20, n. 1, p. 53-62, mar. 2009.

FILHO, J. A. M. *et al.* Novo método estatístico para análise da reprodutibilidade. **Revista Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial**, v. 10, n. 5, p. 122-129, 2005.

GAESKI, E.; AMASIFEN, J. C. C. **Metodologia para a avaliação do desempenho de consumidores industriais frente a distúrbios elétricos no contexto de indústria 4.0**. Coletânea Especial de Engenharia de Produção, editado por Thaise Ribeiro Luz, Itajubá - Brasil, Editora Kreatik, 15 Fev. 2021, pp. 228–239, dspace.unisa.br/handle/123456789/696. Acesso em 23 de junho de 2025.

GAESKI, E. Avaliação da resiliência de processos industriais frente a distúrbios elétricos no contexto de Indústria 4.0. *In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNESP*, 31., 2019, Itapeva. **Anais** [...]. Itapeva: UNESP, 2019. Disponível em: https://prope.unesp.br/cic_isbn/fase_1.php?slcg=41&mn=3. Acesso em: 04 jul. 2025.

GAESKI, E. Avaliação da resiliência de processos industriais frente a distúrbios elétricos no contexto de Indústria 4.0. *In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNESP*, 32., 2020, Itapeva. **Anais** [...]. Itapeva: UNESP, 2020. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/xxxiicicunesp/282588-avaliacao-da-resiliencia-de-processos-industriais-frente-a-disturbios-eletricos-no-contexto-de-industria-40/>. Acesso em: 04 jul. 2025.

GEISSBAUER, R.; VEDSO, J.; SCHRAUF, S. **Industry 4.0: building the digital enterprise**. 2016 Global Industry 4.0 Survey. [S.l.]: PwC, 2016. Disponível em: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2019.

GOENNEMANN, J. **Building resilience in Australian manufacturing**. Sydney: Advanced Manufacturing Growth Centre, abr. 2018. Disponível em: https://accesspartnership.com/wp-content/uploads/2023/03/AMGC_Building-Resilience-in-Australian-Manufacturing_Apr-2018.pdf. Acesso em: 4 jul. 2019.

GONÇALVES, F. D. **Resposta de sistemas ininterruptos de energia frente a fenômenos de qualidade da energia**. 2008. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

GUEDES, M. V. **Motor síncrono trifásico**: modelização, análise do funcionamento, utilização. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1992.

HASSIN, E. S. **Continuidade dos serviços de distribuição de energia elétrica**: análise regulatória, correlação dos indicadores e metodologia de compensação ao consumidor. Itajubá, MG: UNIFEI, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, 2003.

HIDEKI, Edson *et al.* Determinação do custo de interrupção de energia elétrica de clientes industriais AT/MT. *In*: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA – CITENEL, 2., 2003, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: Universidade Salvador; ANEEL, 2003.

HOLMES, D. G.; LIPO, T. A. **Pulse width modulation for power converters**: principles and practice. Piscataway, NJ: Wiley-IEEE Press, out. 2003. 744 p. ISBN 978-0471208143.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **Recommended practice for monitoring electric power quality**. IEEE Std 1159, 1995.

JAVIED, T. *et al.* Strategic energy management in industry 4.0 environment. *In*: ANNUAL IEEE INTERNATIONAL SYSTEMS CONFERENCE (SYSCON), 2018, Vancouver. **Proceedings [...]**. Vancouver: IEEE, 2018. p. 1-4. Acesso em: 18 nov. 2019.

JIANG, J. R. An improved cyber-physical systems architecture for industry 4.0 smart factories. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SYSTEM INNOVATION (ICASI), 2017, Sapporo. **Proceedings [...]**. Sapporo: IEEE, 2017. p. 918-920.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W. **Securing the future of German manufacturing industry**: recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. Working Group, Acatech National Academy of Science and Engineering, Alemanha, 2013. Final Report.

KJØLLE, G. H. *et al.* Customer costs related to interruptions and voltage problems: methodology and results. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 23, n. 3, p. 1030-1038, ago. 2008.

KJØLLE, G. H.; VADLAMUDI, V. V.; KVISTAD, S.; TUTVEDT, K. A. Potential for improved reliability and reduced interruption costs utilizing smart grid technologies. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON ELECTRICITY DISTRIBUTION (CIRED), 22., 2013, Estocolmo. **Proceedings [...]**. Estocolmo: IEEE, 2013. p. 1-4.

KÜFEOĞLU, S.; LEHTONEN, M. **Customer interruption costs estimations for service sectors via customer survey method: a case study.** International Review of Electrical Engineering, v. 8, n. 5, p. 1532–1538, out. 2013.

KUMAR, P., A review of power quality problems, standards and solutions. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, 2017.

LEBORGNE, R. C. **Uma contribuição à caracterização da sensibilidade de processos industriais frente a afundamentos de tensão.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Federal Itajubá, MG. 2003

LIVGARD, E. F. Smart metering – opportunity or threat to the power industry? *In*: International Conference on Power System Technology (POWERCON), 2010, Hangzhou. **Anais [...]**. Hangzhou: IEEE, 2010. p. 1-4

MACÊDO, R. J. D. A.; SÁ, A. S.; FREITAS, A. E.; VERÍSSIMO, P. E.; GORENDER, S.; SÁ, M. O. Confiabilidade e segurança nos sistemas distribuídos físico-digitais. **Jornada de Atualização em Informática 2023**. 43 ed.: SBC, 2023, v. , p. 60-108.

MACHADO, J. L. *et al.* Modelo de avaliação de maturidade da indústria 4.0: estudo de caso em um centro de distribuição de medicamentos na baixada fluminense/RJ. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar**-ISSN 2675-6218, v. 2, n. 2, p. 222-254, 2021.

MAGALHÃES, C. H. N. **Recursos operativos no planejamento de expansão de sistemas de potência.** 2008. 151 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MARQUES, F. A corrida da indústria 4.0. **Revista Pesquisa FAPESP**, São Paulo, n. 259, p. 24–27, set. 2017a. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/a-corrida-da-industria-4-0/>. Acesso em: 04 jul. 2019.

MARQUES, F. O Brasil da internet das coisas. **Revista Pesquisa FAPESP**, São Paulo, n. 259, p. 24–27, set. 2017b. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/o-brasil-da-internet-das-coisas/>. Acesso em: 04 jul. 2019.

MATH, H. J. B.; GU, I. Y.H. **Origin of power quality events.** *In*: BOLLEN, M. H. J.; GU, I. Y.-H. Signal processing of power quality disturbances. Piscataway: IEEE Press, 2006. p. 415–517.

MCGRANAGHAN, M. Effect of voltage sags in industrial processes. *In*: STOCKHOLM POWER TECH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRIC POWER ENGINEERING, Stockholm, Suécia, 1995. **Proceedings [...]**. Stockholm: IEEE, 1995.

MEHL, E. L. M. **Qualidade da energia elétrica.** Curitiba: Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, 2012.

MELO, M. O.; CAVALCANTI, G. A. **Avaliação do impacto da qualidade de energia elétrica no mercado e na produção industrial** - análise e metodologia. *In*: SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA – SBQEE, 5., 2003, Aracaju. **Anais** [...]. Aracaju: SBQEE, 2003.

MILANOVIĆ, Jovica Vukadin *et al.* **CIGRE/CIREN JWG C4.107: Economic framework for power quality**. Paris: CIGRE, 2011. Relatório técnico. ISBN 978-2-85873-157-2.

MONTES, J. O. Impacts of 3D printing on the development of new business models. *In*: EUROPEAN TECHNOLOGY AND ENGINEERING MANAGEMENT SUMMIT (E-TEMS), 2016, Frankfurt. **Proceedings** [...]. Frankfurt: IEEE, 2016. p. 1-9. Acesso em: 21 nov. 2019.

NASCIMENTO, O. F. **Alocação de religadores automáticos em uma subestação de energia elétrica**. Orientador: Bruno Marques Viegas. 2021. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

NEOENERGIA. **Pesquisa, desenvolvimento e inovação**. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/pesquisa-desenvolvimento-inovacao>. Acesso em: 13 jun. 2020.

ORTMEYER, T. H.; FISK, B. M. Characterization of distribution system interruption duration. *In*: IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 2012, San Diego. **Proceedings** [...]. San Diego: IEEE, 2012. p. 1-5.

PELEGRINI, M. A. *et al.* Survey and applications of interruption costs in large customers. *In*: 15TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 2012, Sydney. **Proceedings** [...]. Sydney: IEEE, 2012. p. 860-864.

REUSEL, K. V.; STOCKMAN, K.; DRIESSENS, W. **Process immunity time assessment of its practicability in industry**. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER (ICHQP), 14., 2010, Bérgamo. **Proceedings** [...]. Bérgamo: IEEE, 2010. p. 1-4.

RIVERA, R.; ESPOSITO, A. S.; TEIXEIRA, I. **Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local**. 2013.

ROCHA, B. A. B.; LIMA, F. R. S.; WALDMAN, R. L. Mudanças no papel do indivíduo pós-revolução industrial e o mercado de trabalho na sociedade da informação. **Revista Pensamento Jurídico**, v. 14, n. 1, 2020.

RODRIGUES, T. V. **Proposição de um modelo para mensurar o nível de prontidão de uma indústria para a implementação da indústria 4.0**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

ROLLE, R. P. **Arquitetura para construção de gêmeos digitais com foco na Indústria 4.0**. Disponível em:

<https://repositorio.unesp.br/entities/publication/3a0c8df5-853e-4783-9b64-f5d1ce4cb e3f>. Acesso em: 24 jun. 2025.

SALLAM, A. A.; MALIK, O. P. **Power factor improvement**. *In*: Electric distribution systems. IEEE, 2011. p. 361-379.

SCHUERGER, R.; ARNO, R.; DOWLING, N. Why existing utility metrics do not work for industrial reliability analysis. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 52, n. 4, p. 2801-2806, jul.-ago. 2016.

SILVA, A. M. L. D. *et al.* Analytical and Monte Carlo approaches to evaluate probability distributions of interruption duration. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 20, n. 3, p. 1341-1348, ago. 2005. Acesso em: 19 set. 2019.

SAKURAI, R.; ZUCHI, J. D. Revoluções industriais até a indústria 4.0. **Revista Interface Tecnológica**, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 480-491, 30 dez. 2018. Interface Tecnológica. <http://dx.doi.org/10.31510/infa.v15i2.386>

SANKARAN, C. **Power quality**. Boca Raton: CRC Press, 2002. 215 p.

SANTOS, A. B. **Aspectos regulatórios da microgeração distribuída de energia: implicações nas projeções de cenários financeiros - Caso Coelba**. 2018.

SCHWAB, K. **A quarta revolução industrial**. Trad. Daniel Moreira. São Paulo: Edipro, 2016.

SCHUH, Günther *et al.* (Ed.). **Industrie 4.0 Maturity Index: Managing the Digital Transformation of Companies**. Utz, Herbert, 2017.

SILVA, H.; SILVA, V. Brazilian regulation on distributed generation. *In*: CHILEAN CONFERENCE ON ELECTRICAL, ELECTRONICS ENGINEERING, INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES (CHILECON), 2015, Santiago. **Anais [...]**. Santiago: IEEE, 2015. p. 635-639.

SILVA, T. M. **Proposta de roadmap para implementação das tecnologias da indústria 4.0**. 2018. 108 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

SOUSA, Gustavo Henrique Andrade *et al.* Indicadores de viabilidade econômica do mercado de microgeração fotovoltaica conectada à rede elétrica do município de Estreito/MA. **Revista Produção Industrial e Serviços**, v. 5, n. 1, p. 159-172, 2018.

SOUZA, S. S. **Avaliação do grau de maturidade da indústria 4.0 em um Instituto Federal de Ensino Superior do Brasil**. 2021. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2021.

STOROLLI, Wilson Gasparotto *et al.* Avaliação do grau de maturidade da indústria 4.0 no setor de autopeças brasileiro com auxílio do diagnóstico do prometee. **Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, v. 10, n. 3, p. 179-202, 2018.

TEIXEIRA, E. B. A análise de dados na pesquisa científica: importância e desafios em estudos organizacionais. **Desenvolvimento em questão**, v. 1, n. 2, p. 177-201, 2003.

TEIXEIRA, M. D. *et al.* **Impactos econômicos associados a fenômenos de qualidade de energia**: visão do consumidor. Florianópolis: CIGRE-Brasil, 2011. 9 p.

VEGUNTA, S. C.; MILANOVIC, J. V. Estimation of cost of downtime of industrial process due to voltage sags. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 26, n. 2, p. 576–587, abr. 2011

VINEETHA, C. P.; BABU, C. A. Smart grid challenges, issues and solutions. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT GREEN BUILDING AND SMART GRID (IGBSG), 2014, Taipei. **Proceedings** [...]. Taipei: IEEE, 2014. p. 1-4. Acesso em: 23 nov. 2019.

WANG, X.; LI, C.; LI, H. Economic losses risk assessment of industrial users due to voltage sags based on uncertainty of process immunity. *In*: IEEE PES ASIA-PACIFIC POWER AND ENERGY ENGINEERING CONFERENCE (APPEEC), 2016, Xi'an. **Proceedings** [...]. Xi'an: IEEE, 2016. p. 1139-1142.

WELDEMARIAM, L. E.; CUK, V.; COBBEN, J. F. G. Cost estimation of voltage dips in small industries based on equipment sensitivity analysis. **Smart Grid and Renewable Energy**, v. 7, p. 271-292, 2016.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO

Avaliação de Qualidade de Energia Elétrica e Maturidade para Indústria 4.0

Bem-vindo!



Muito obrigado pela sua visita!

O presente questionário servirá como base de coleta de dados da pesquisa “Avaliação da Resiliência de Processos Industriais Frente a Distúrbios Elétricos no Contexto de Indústria 4.0” com bolsa FAPESP (Processo nº 2018/20573-9) do graduando Erick Gaeski no curso de Engenharia de Produção na instituição Unesp Itapeva.

Todas as informações aqui coletadas serão tratadas com a devida confidencialidade, para quaisquer dúvidas entrar em contato através dos seguintes meios: erick.gaeski@unesp.br ou (13)99617-8707.

Informações Gerais

1. Informações Gerais da Empresa

Qual é o nome da sua empresa?

Qual o endereço que a empresa se localiza?

Informe um telefone para contato da empresa:

2. Informações do(s) Entrevistado(s)

Caso seja necessário mais de um funcionário para preencher o questionário, incluir as informações de todos os participantes.

Informe o(s) nome(s) do(s) entrevistado(s):

Qual o setor ou área que o(s) entrevistado(s) atua(m)?

Qual o(s) cargo(s) que o(s) entrevistado(s) exercem na empresa?

3. Quais são os principais produtos da empresa?

4. Quantos funcionários a empresa possui atualmente?

☐ Menos de 10

☐ De 11 a 30

☐ De 51 a 100

☐ De 101 a 300

☐ De 301 a 500

☐ De 501 a 1000

☐ Mais de 1000

5. Qual é o período de funcionamento da empresa?

Clique nas caixas correspondentes ao período desejado.

	Manhã (6h-12h)	Tarde (12h-18h)	Noite (18h-0h)	Madrugada (0h-8h)
Segunda a Sexta				
Sábado				
Domingo				
Feriados				

Utilização de Energia Elétrica (i)

6. Quanto cada atividade da tabela abaixo representa no consumo de energia elétrica da empresa?

Assinale apenas uma opção para cada linha. Caso existam gastos de origem não citados, preencher o campo "Outro" e selecionar conforme orientado.

	Não sei	Nenhum	Muito Baixo	Baixo	Razoável	Alto	Muito Alto
Iluminação							
Climatização para os Funcionários							
Climatização dos Produtos							
Aquecimento de Água ou Produção de Vapor							
Tratamento Térmico							
Fornos							
Força Mecânica para Produção							
Computação para Produção							
Transporte de Material							
Escritório							
Outro (Qual?):							

Informações de Consumo de Energia Elétrica

Nota Fiscal/Conta de Energia Elétrica		Controle N°		Conta do Mês		Vencim.			
2476323		FAT-01-20173764226621.69		Setembro/2017		28/10			
Tensão Contratada (kV)		Limites Adequados de Tensão (kV)		Registrador		Demanda Cor			
13.8		12.834 a 14.49		RM0495374					
CCI*	Descrição do Produto	Leitura Anterior	Leitura Atual	Constante Multiplic.	Quant. Registrado	Quant. Residual	Quant. Faturado	Tarifa Fornec.	V. Fo
0601	CONSUMO PONTA TE kWh	905261	32661	0,030	3917,00	2533,00	6450,00	0,390046	2,51
0601	CONSUMO FORA PONTA TE kWh	43449	55612	3,000	37401,00	18090,00	55491,00	0,967210	6,22
0602	CONSUMO FORA PONTA TUSD kW	43449	55612	3,000	37401,00	18090,00	55491,00	0,257365	14,22
0601	CONSUMO REAT FORA PONTA TE kWh	3048,16	3050	3,000	5,00	0,00	5,00	0,035291	1,92
0601	DEMANDA TUSD kW	64687	65891	0,120	148,09	0,00	148,09	15,988000	2,36
0602	DEMANDA ULTRAP. TUSD kW				0,00		18,09	31,976000	5,71
0601	AD. B. AMAR. kWh						61941,00	0,013341	8,26
0601	AD. B. VERM. kWh						61941,00	0,009988	6,18
	CONSUMO kWh	52501	65939	3,000	41321,00	20620,00			
	DEMANDA PONTA kW	13380	14567	0,120	146,00	0,00			
	ENERGIA REAT EXC kWh	3097	3099	3,000	6,00	0,00			
	ENERGIA REAT EXC P kWh	4871	4871	0,030	0,00	0,00			
	DEMANDA REAT.EXED. kW	42398	46937	0,030	139,57	0,00			
	DEMANDA REAT.EXED. kW	241760	246470	0,030	144,83	0,00			
0699	COFINS								
0699	PIS								

A seguir serão solicitadas algumas informações a respeito do consumo de energia elétrica. As informações necessárias se localizam nas áreas destacadas em vermelho.

Obs.: A fatura aqui visualizada foi disponibilizada pela concessionária Elektro como exemplo. Quaisquer informações coletadas neste questionário não serão divulgadas.

7. Qual a potência contratada pela empresa nos últimos 3 meses de acordo com a tabela abaixo?

Se referenciar através da imagem anterior para completar a tabela.

	Mês Passado	2 Meses Atrás	3 Meses Atrás
Consumo Ponta TE (kWh)			
Consumo Fora Ponta TE (kWh)			
Demanda TUSD (kW)			

Qualidade da Energia Elétrica e Custos Associados (i)

8. Qual é a sua avaliação para a qualidade de fornecimento da energia elétrica pela distribuidora responsável?

Muito Ruim Muito Boa

9. A empresa possui fontes alternativas de energia em caso de falta de energia elétrica?

☐ Não » pular para Página « Qualidade da Energia Elétrica e Custos Associados (ii) »

☐ Sim. Quais?

Qualidade da Energia Elétrica e Custos Associados (i-a)

10. Para quais finalidades essas fontes são utilizadas em caso de interrupções da energia elétrica?

É possível selecionar mais de uma opção.

- ☐ Segurança (Iluminação, alarmes e outros dispositivos semelhantes)
- ☐ Manutenção da produção (Parcial ou Total)
- ☐ Redução de riscos aos funcionários e/ou equipamentos
- ☐ Redução de prejuízos a estoque (matéria-prima ou produtos acabados)
- ☐ Outro. Qual?

11. Quantas vezes estas fontes foram utilizadas nos últimos 12 meses?

_____ vezes.

12. A energia elétrica sobressalente gerada por estas fontes é armazenada de alguma forma?

- ☐ Não
- ☐ Sim. Como?

Qualidade da Energia Elétrica e Custos Associados (ii)

13. Qual o período mais crítico em casos de falta de energia elétrica dentro da empresa?

Selecione apenas a opção mais crítica. Caso existam períodos que sejam igualmente críticos, selecione ambas opções.

- ☐ Manhã (6h-12h).
- ☐ Tarde (12h-18h).
- ☐ Noite (18h-0h).
- ☐ Madrugada (0h-6h).

14. Qual o dia da semana mais crítico em casos de falta de energia elétrica dentro da empresa?

Selecione apenas a opção mais crítica. Caso existam dias da semana que sejam igualmente críticos, selecione ambas opções.

- | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| ☐ Segunda | ☐ Quinta | ☐ Domingo |
| ☐ Terça | ☐ Sexta | |
| ☐ Quarta | ☐ Sábado | |

15. Qual o trimestre mais crítico em casos de falta de energia elétrica dentro da empresa?

Selecione apenas a opção mais crítica. Caso existam trimestres que sejam igualmente críticos, selecione ambas opções.

- ☐ Janeiro a Março (Verão)
- ☐ Abril a Junho (Outono)
- ☐ Julho a Setembro (Inverno)
- ☐ Outubro a Dezembro (Primavera)

16. Caso a empresa fosse avisada pela concessionária de energia elétrica com antecedência de determinado tempo (linhas) a respeito de interrupções, qual seria a intensidade de redução dos impactos (colunas) que a empresa obteria?

Selecione uma opção para cada linha. Exemplo: Caso a empresa seja avisada com "1 hora" de antecedência o impacto na redução de perdas seria "Muita".

	Nenhuma	Pouca	Alguma	Muita	Total
1 hora					
6 horas					
12 horas					
24 horas					
48 horas					

Avaliação de Processo Mais Crítico (i)

PARA RESPONDER AS QUESTÕES DAS PÁGINAS DE "AVALIAÇÃO DE PROCESSO MAIS CRÍTICO" DEVE-SE ESCOLHER APENAS UM DOS PROCESSOS DA EMPRESA, SENDO ESTE O QUE MAIS IMPACTA A EMPRESA EM QUESTÃO FINANCEIRA

17. A empresa registra de alguma forma interrupções no fornecimento da energia elétrica?

- ☐ Não » pular para Página « Avaliação de Processo Mais Crítico (ii) »
- ☐ Sim. Quais?

Avaliação de Processo Mais Crítico (i-a)

18. Cite quantas vezes ocorreram eventos de interrupções no fornecimento de energia nos últimos 3 meses, de acordo com a classificação abaixo.

Cada linha representa a duração da falta de energia.

	Antepenúltimo mês	Penúltimo mês	Último mês
Menos de 1 minuto			

De 1 a 5 minutos			
De 5 a 30 minutos			
Mais de 30 minutos			
Paradas Programadas			

Avaliação de Processo Mais Crítico (ii)

19. Após a ocorrência de uma interrupção da energia elétrica, quanto tempo demora até que o processo apresente uma falha ou parada?

☐ Não sei informar

☐ Em minutos:

20. Após o retorno do fornecimento de energia elétrica, quanto tempo demora até que o processo retome sua condição normal de operação?

☐ Não sei informar

☐ Em minutos:

21. A empresa possui outros dispositivos de proteção para mitigar ou reduzir os impactos de possíveis distúrbios elétricos neste processo?

☐ Não.

☐ Sim. Quais?

22. A empresa possui informações a respeito dos diferentes tipos de custos ocasionados por interrupções de energia elétrica?

☐ Sim

☐ Não » pular para Página « Custos do Processo Mais Crítico (B) »

Custos do Processo Mais Crítico (A)

23. Estime o prejuízo (EM REAIS) que a empresa possui para um determinado tipo de custo (linhas) durante um período de interrupção do fornecimento de energia elétrica.

Exemplo: Devido a uma interrupção de fornecimento de eletricidade de "até 30 minutos" a empresa possui um prejuízo em média de R\$3000,00 relacionado a "gastos com horas-extras".

Caso a resposta seja "Não sei ou Nenhum", inserir o valor "0" na caixa correspondente.

	Não sei ou Nenhum	Imediatamente	Até 5 minutos depois	Até 30 minutos depois	Até 1 hora depois	Até 8 horas depois	Até 12 horas depois	Até 24 horas depois
Retomada ou Reinício de Produção								
Perda de matéria-prima ou produto primário								
Perda de produto em processo								
Perda de produto acabado								
Gastos com horas-extras								
Reparo ou compra de equipamentos								
Perda de dados ou informações								
Gastos com geração de energia								
Outros. Quais?								

A menos que outros fluxos de trabalho lógico tenham sido especificados, o participante será redirecionado para **Página « Avaliação de Processo Mais Crítico (iii) »**.

Custos do Processo Mais Crítico (B)

24. Estime o prejuízo EM REAIS após a falha ou parada do processo dentro dos intervalos de tempo da tabela abaixo.

	R\$
Imediatamente	
Menos de 1 minuto	
De 1 a 5 minutos	
De 5 a 30 minutos	
De 30 minutos a 1 hora	
De 1 a 4 horas	
De 4 a 8 horas	
De 8 a 24 horas	
Mais de 24 horas	

Avaliação de Processo Mais Crítico (iii)

25. Além das interrupções de energia elétrica, as flutuações e variações de tensão, desequilíbrio de tensão, variações na frequência e outros problemas similares podem ser classificados como distúrbios elétricos. A empresa já sofreu algum destes distúrbios?

☐ Sim

☐ Não » pular para Página « Maturidade para Indústria 4.0 »

☐ Não sei » pular para Página « Maturidade para Indústria 4.0 »

Avaliação de Processo Mais Crítico (iii-a)

26. Aproximadamente quantas vezes estes distúrbios deste tipo ocorrem dentro da empresa em um período de 1 mês?

Aproximadamente _____ vezes.

27. As atividades de produção da empresa diminuem ou param devido a esses distúrbios?

☐ Não

☐ Sim. Em minutos:

Maturidade para Indústria 4.0

28. Assinale a seguinte tabela de acordo com as características das linhas de produção da empresa?

	Não	Parcialmente	Sim
Funcionários aplicam força física para realizar operações?			
Utiliza máquinas alimentadas por energia a vapor?			
Utiliza equipamentos alimentados por energia elétrica?			
Os equipamentos possuem sensores que disponibilizam e armazenam dados ou informações inerentes à produção?			
Os processos estão conectados a algum controlador programável que dispensam a intervenção humana para continuidade da produção?			

29. A empresa possui acesso à intranet e internet?

☐ Todos os equipamentos e dispositivos da empresa estão conectados em rede.

☐ A maioria dos computadores da empresa estão conectados à rede.

☐ Poucos computadores da empresa estão conectados à rede.

☐ Nenhum computador da empresa está conectado à rede.

30.A qualidade da internet contratada pela empresa é:

☐ Ótima

☐ Boa

☐ Razoável

☐ Ruim

☐ Péssima

31.A empresa possui algum sistema estatístico de qualidade e/ou indicadores ou então algum método de capacidade preditiva?

☐ Não

☐ Sim. Qual?

32.Investimentos necessários para implementações de novas tecnologias são planejados e realizados?

☐ Não são planejados e não existem investimentos em novas tecnologias.

☐ São planejados, porém nem sempre são executados conforme planejamento.

☐ São realizados investimentos sem planejamento prévio.

☐ Existe planejamento e execução destes investimentos.

33.A empresa consegue acessar informações de demanda de seus clientes de forma ágil e digital?

☐ Nunca

☐ Pouco

☐ Razoavelmente

☐ Bastante

☐ Sempre

34.A utilização de tecnologia dentro da empresa agrega valor ao produto ou serviço oferecido ao cliente?

☐ Nunca

☐ Pouco

☐ Razoavelmente

☐ Bastante

☐ Sempre

35.A empresa fornece informações de forma ágil e digital para que seus fornecedores atendam sua demanda da melhor forma?

☐ Nunca

☐ Pouco

☐ Razoavelmente

☐ Bastante

☐ Sempre

36.A empresa possui uma linha de produção adaptável com as diferentes demandas que possam existir advindas de seus clientes?

☐ Não

☐ Pouco

☐ Parcialmente

☐ Bastante

☐ Totalmente

37.Realiza as capacitações necessárias para implementar novas tecnologias?

☐ Nunca

☐ Muito
Pouco

☐ Às
vezes

☐ Quase
Sempre

☐ Sempre

38. Possui pessoas com habilidades técnicas e gerenciais necessárias para a total implementação de novas tecnologias?

☐ Nenhuma ☐ Poucas ☐ Razoavelmente ☐ Muitas ☐ Todas

39. Possui mecanismos de comunicação que facilitam com que seus funcionários informem as dificuldades transpassadas durante os processos industriais, assim como incentivos para que seus colaboradores participem ativamente das melhorias implementadas?

☐ Não ☐ Pouco ☐ Razoavelmente ☐ Bastante ☐ Totalmente

40. Os equipamentos utilizados são automatizados com sistemas computacionais de controle?

☐ Não ☐ Pouco ☐ Alguns ☐ Quase todos ☐ Todos

41. Os equipamentos e instalações da empresa possuem simulação virtual que reproduzem as atividades elaboradas no mundo físico?

☐ Nenhum ☐ Poucos ☐ Alguns ☐ Muitos ☐ Todos

42. Existem sensores que consigam realizar coleta de dados de forma automática e em sincronia ao processo?

☐ Nenhum ☐ Poucos ☐ Alguns ☐ Muitos ☐ Em todos os processos

43. Os equipamentos possuem tecnologia de inteligência artificial para interpretar informações e realizar mudanças necessárias de forma autônoma em busca de uma melhoria contínua?

☐ Nenhum ☐ Poucos ☐ Alguns ☐ Muitos ☐ Todos

44. Possui armazenamento e processamento de informações e dados em nuvem para todos os processos da empresa?

☐ Nenhum ☐ Poucos ☐ Parcialmente ☐ Bastante ☐ Totalmente

45. Possui tecnologia de segurança digital na proteção de dados para evitar roubos, perdas e danos?

☐ Nenhuma ☐ Pouca ☐ Parcialmente ☐ Muita ☐ Totalmente

APÊNDICE B – CARTA-CONVITE PARA EMPRESAS



Universidade Estadual Paulista - UNESP
Câmpus de Itapeva

Itapeva, 4 de agosto de 2019.

A NUTRICELER – SOLUÇÕES NUTRICIONAIS

Prezados senhores, estamos desenvolvendo um projeto de pesquisa que tem como um de seus objetivos quantificar as perdas financeiras nas indústrias ocasionadas por distúrbios elétricos em seus processos produtivos. Nesta pesquisa, será necessária a participação de empresas de diversos setores e portes, as quais auxiliarão na coleta de dados pertinentes e na compreensão dos processos a serem caracterizados. Para isso, serão necessárias algumas visitas técnicas nas suas instalações. A participação é voluntária, gratuita e, é importante destacar, que todas as informações serão tratadas com a devida confidencialidade.

Neste sentido, convidamos a *NUTRICELER* e demais indústrias parceiras a participar da pesquisa “Avaliação da Resiliência de Processos Industriais Frente a Distúrbios Elétricos no Contexto de Indústria 4.0”.

Contamos com a participação de vocês.

Atenciosamente,

Prof. Dr. Juan Carlos Cebrian
Coordenador do Laboratório de Indústria 4.0 e Redes Elétricas Inteligentes

Rua Geraldo Aldamin, 519, Vila N. Srª. de Fátima, Itapeva - SP
CEP: 18409-010 / Tel: 15 3524 9100 - ramal 9172