



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba

Campus de São João da Boa Vista

LUCAS RODRIGUES ILÁRIO

**CONTRIBUIÇÕES PARA INTEGRAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 NAS REDES
ELÉTRICAS INTELIGENTES**

Sorocaba

2020

LUCAS RODRIGUES ILÁRIO

**CONTRIBUIÇÕES PARA INTEGRAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 NAS REDES
ELÉTRICAS INTELIGENTES**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Interunidades, entre o Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba e o Campus de São João da Boa Vista da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Orientador: Prof. Dr. Helmo Kelis Morales Paredes
Coorientador: Prof. Dr. Juan Carlos Cebrian Amasifen

Sorocaba

2020

I27c

Ilário, Lucas Rodrigues

Contribuições para integração da Indústria 4.0 nas Redes Elétricas Inteligentes / Lucas Rodrigues Ilário. -- Sorocaba, 2020

103 p. : il., tabs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientador: Helmo Kelis Morales Paredes

Coorientador: Juan Carlos Cebrian Amasifen

1. Redes inteligentes de energia. 2. Indústria. 3. Internet das coisas. 4. Automação industrial Protocolos. 5. Sistemas de transmissão de dados. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Contribuições para Integração da Indústria 4.0 nas Redes Elétricas Inteligentes

AUTOR: LUCAS RODRIGUES ILÁRIO

ORIENTADOR: HELMO KELIS MORALES PAREDES

COORIENTADOR: JUAN CARLOS CEBRIAN AMASIFEN

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Sistemas Eletrônicos pela Comissão Examinadora:

A blue ink signature of Prof. Dr. Helmo Kelis Morales Paredes, written in a cursive style.

Prof. Dr. HELMO KELIS MORALES PAREDES (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba

A blue ink signature of Prof. Dr. Jakson Paulo Bonaldo, written in a cursive style.

Prof. Dr. JAKSON PAULO BONALDO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal do Mato Grosso - UFMT

A blue ink signature of Prof. Dr. Flavio Alessandro Serrão Gonçalves, written in a cursive style.

Prof. Dr. FLAVIO ALESSANDRO SERRÃO GONÇALVES (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba

Sorocaba, 21 de dezembro de 2020

Dedico este trabalho aos meus pais, irmãos, namorada, familiares e amigos que sempre me incentivaram e deram apoio, e a todos que de alguma forma lutam por um desenvolvimento científico e tecnológico transformador em prol do bem estar social, pela universalização do ensino e pelas universidades públicas de qualidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, irmãos, namorada, familiares e todas as pessoas que eu amo, que sempre me incentivaram apesar dos momentos de dificuldade.

A todos os meus professores que em algum momento me ajudaram a trilhar este caminho, e principalmente aos docentes da UNESP pela competência e seriedade com que conduzem o Programa Interunidades de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UNESP.

Aos professores Helmo Kelis Morales Paredes e Juan Carlos Cebrian Amasifen, por acreditarem no potencial deste projeto, pelas sugestões e incentivos durante todo o seu desenvolvimento.

E a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Atualmente, conceitos modernos como Redes Elétricas Inteligentes (REI) e Indústria 4.0 (I4.0) estão sendo estudados e implementados pelas empresas concessionárias de energia e pelos consumidores finais (principalmente industriais). Se por um lado, o conceito de REI é usado com o intuito de alcançar uma rede elétrica mais eficiente e que permita a continuidade do fornecimento de energia com mais confiabilidade e resiliência, por outro lado, o conceito de I4.0 visa a modernidade do setor industrial de forma a oferecer novos produtos e serviços customizados em massa, permitindo assim um aumento de competitividade e a inserção em novos mercados. Embora REI e I4.0 tenham chamado a atenção da comunidade científica e técnica, ambos os conceitos são tratados de forma separada, isto causa limitações nas metodologias e soluções propostas na literatura, principalmente porque suas aplicações ficam confinadas no setor elétrico ou no setor industrial. A integração entre as REI e os fundamentos da Indústrias 4.0 se tornou objeto de estudo deste trabalho principalmente devido ao grande potencial que as redes de Internet das Coisas têm a oferecer durante a análise, processamento e realimentação das informações vindas dos dispositivos conectados, ou seja, possibilitando que concessionárias e consumidores de energia passem a dispor de tecnologias para monitorar diversos tipos de dados e informações em tempo real, além de executar ações com mais rapidez e precisão por meio da inteligência computacional como parte dos sistemas REI. Nesse sentido, são explanados e analisados, ainda, o papel dessas tecnologias nas transformações das redes de energia elétrica convencionais para as REI, ou seja, o papel dos dispositivos inteligentes na comunicação e no levantamento de dados e informações, assim como os protocolos que permitem a implementação desses dispositivos, a exemplo dos protocolos de aplicações sem fio ZigBee, Z-Wave, LoRaWAN e NB-IoT, e dos protocolos de aplicações cabeadas como PROFINET, EtherCAT e os padronizados pela Norma IEC 61850. Por fim, os direcionamentos obtidos neste trabalho servirão como base para a elaboração de trabalhos futuros na área de REI e I4.0.

Palavras-chave: Redes Elétricas Inteligentes; Indústria 4.0; Internet das Coisas; ZigBee; LoRaWAN; PROFINET; IEC 61850.

ABSTRACT

Currently, modern concepts such as Smart Grids (SG) and Industry 4.0 (I4.0) are being studied and implemented by utilities and end-users (mainly industrial). If, on the one hand, the concept of SG is used in order to achieve a more efficient electrical network that allows the continuity of energy supply with more reliability, on the other hand, the concept of I4.0 aims at the modernity of the industrial sector in order to offer new customized products and services in large scale, thus allowing an increase in competitiveness and insertion in new markets. Although SG and I4.0 have drawn the attention of the scientific and technical community, both concepts are treated separately, this causes limitations in the methodologies and solutions proposed in the literature, mainly because their applications are confined to the electrical sector or the industrial sector. The integration between SG and the fundamentals of Industries 4.0 become the object of study of this work mainly due to the great potential that the Internet of Things networks have to offer during the analysis, processing and feedback of information coming from connected devices, that is, enabling that energy utilities and consumers to have technologies to monitor different types of data and information in real time, in addition to executing actions more quickly and accurately through computational intelligence as part of SG systems. In this sense, the role of these technologies in the transformation of conventional electric power grids for SGs is explained and analyzed, that is, the role of intelligent devices in communication and in the collection of data and information, as well as the protocols that allow the implementation of these devices, such as the wireless application protocols ZigBee, Z-Wave, LoRaWAN and NB-IoT, and the wired application protocols such as PROFINET, EtherCAT and those standardized by IEC 61850. Finally, the directions obtained in this work will serve as a basis for the preparation of future works in the area of SG and I4.0.

Keywords: Smart Grids; Industry 4.0; Internet of Things; ZigBee; LoRaWAN; PROFINET; IEC 61850.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Comparativo da composição da matriz elétrica brasileira entre 2000, 2010 e 2019	15
Figura 2.2 – Estrutura de uma rede elétrica convencional (REC)	19
Figura 2.3 – Estrutura de uma rede elétrica inteligente (REI).....	21
Figura 3.1 – Tecnologias que integram a Indústria 4.0	22
Figura 4.1 – A Internet Industrial das Coisas provendo uma Indústria 4.0	30
Figura 5.1 – Rede CoAP	42
Figura 5.2 – Arquitetura de uma rede MQTT-SN	43
Figura 5.3 – Aplicação do ETSI utilizando comunicação M2M para redes elétricas inteligentes usando um gateway CoAP.....	45
Figura 5.4 – Tipos de endereços IPv6.....	49
Figura 5.5 – Topologia do padrão IEEE 802.15.4	53
Figura 5.6 – Rede Z-Wave	56
Figura 5.7 – Topologia Rede LoRaWAN	57
Figura 5.8 – Arquitetura e níveis do SAS segundo a norma IEC 61850.....	61
Figura 5.9 – Principais tipos de componentes do protocolo PROFINET	67
Figura 5.10 – Diferentes tempos de processamento do PROFINET para automação industrial	67
Figura 5.11 – Camadas de Comunicação PROFINET	68
Figura 6.1 – Procedimento para análise da REI e implementação do Caso de Negócio	74
Figura 6.2 – Integração entre automação industrial e elétrica por meio do PROFINET e da norma IEC 61850	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Modelo de redes TCP/IP e Protocolos IoT	40
Tabela 5.2 – Alguns exemplos de redes IoT	41
Tabela 5.3 – Classes de tempo de transferências e exemplos de aplicação da IEC 61850	62
Tabela 5.4 – Tipos de mensagens e os protocolos da IEC 61850	62
Tabela 5.5 – Modelo TCP/IP e os protocolos da IEC 61850	62
Tabela 5.6 – Classes de protocolos RTE	64
Tabela 6.1 – Comparativo de especificações entre os protocolos Z-Wave e Zigbee.	82
Tabela 6.2 – Comparativo de especificações entre os protocolos LoRaWAN e NB-IoT	82
Tabela 6.3 – Comparativo de especificações entre os protocolos RTE de automação industrial.....	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

6LowPAN	IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CN	Caso de Negócio
CO	Centro de Operação
CoAP	Constrained Application Protocol
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIC	Duração de Interrupção Individual por unidade
DICRI	Duração de Interrupção Individual em dia crítico por unidade
DMIC	Duração máxima de Interrupção Contínua por Unidade
DTLS	Datagram Transport Layer Security
ETG	EtherCAT Technology Group
ETSI	European Telecommunications Standard Institute
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FFD	Full Function Device
FIC	Frequência de Interrupção Individual por unidade consumidora
GD	Geração Distribuída
GTI 4.0	Grupo de Trabalho para a Indústria 4.0
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
I4.0	Indústria 4.0
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IIC	Internet Industrial Consortium
IIoT	Industrial Internet of Things
IoE	Internet of Energy
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IPSec	Internet Protocol Security
IPv4	Internet Protocol Version 4
IPv6	Internet Protocol Version 6
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LLN	Low-Power and Lossy Networks

LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LR-WPAN	Low Rate Wireless Personal Area Network
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine to Machine
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MDIC	Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços
MEB	Matriz Elétrica Brasileira
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NB-IoT	Narrowband Internet of Things
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PIT	Process Immunity Time
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RDI	Redes de Distribuição Inteligentes
REC	Redes Elétricas Convencionais
REI	Redes Elétricas Inteligentes
RFD	Reduced Function Device
RFID	Radio-Frequency IDentification
RTE	Real Time Ethernet
SCF	Sistema Ciber Físico
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SED	Sistema Elétrica de Distribuição
SGAM	Smart Grid Architecture Model
SIN	Sistema Interligado Nacional
TCP	Transmission Control Protocol
TIC	Tecnologias da Informação e Comunicação
TLS	Transport Layer Security
TSN	Time Sensitive Networking
UDP	User Datagram Protocol
VE	Veículos Elétricos
VTCD	Variações de Tensão de Curta Duração
WSN	Wireless Sensor Network

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1.	OBJETIVOS	15
2.	O SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO E O PROCESSO DE MODERNIZAÇÃO	16
2.1.	MATRIZ ELÉTRICA	16
2.2.	ESTRUTURA DO SISTEMA ELÉTRICO	17
2.3.	TRANSIÇÃO PARA AS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES	20
3.	INDÚSTRIA 4.0	24
4.	INTERNET DAS COISAS	29
4.1.	INTERNET INDUSTRIAL DAS COISAS	31
4.2.	INTERNET DA ENERGIA	32
4.3.	DISCUSSÃO	36
5.	ARQUITETURA DE REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES	38
5.1.	CAMADA DE COMUNICAÇÃO	40
5.1.1.	Arquitetura de Redes de Comunicação	41
5.1.2.	Protocolos IoT - Camada de Aplicação	43
5.1.3.	Protocolos IoT - Camada de Transporte	48
5.1.4.	Protocolos IoT - Camada de Rede	51
5.1.5.	Protocolos IoT - Camada de Enlace e Física	54
5.1.6.	Protocolos IoT - Aplicações Completas para Redes Sem Fio	57
5.1.7.	A Norma IEC 61850 e os seus Protocolos	62
5.1.8.	Protocolos de Automação Industrial no Contexto da Indústria 4.0	65
6.	ANÁLISE DE INTEGRAÇÃO DE REI E I4.0	75
6.1.	CAMADA DE INFORMAÇÃO	78
6.2.	CAMADA DE COMUNICAÇÃO	82
7.	CONCLUSÃO	89
7.1.	PROPOSTAS DE CONTINUIDADE DE TRABALHOS E MELHORIAS	90
	REFERÊNCIAS	91
	ANEXO A	100
	ANEXO B	101
	ANEXO C	103

1. INTRODUÇÃO

A melhora de serviços e as transformações na sociedade têm sido impulsionadas, em grande parte, pela inovação, expansão e difusão de novas tecnologias da informação e comunicação que desempenham um papel central nas sociedades modernas, principalmente porque aumentam o bem-estar social e definem novas maneiras de os seres humanos interagirem com o ambiente. Nos últimos anos, por exemplo, as pessoas passaram a dispor de ferramentas inteligentes para gerenciar e otimizar os recursos energéticos domésticos por meio de Casas Inteligentes (*Smart Homes*) (LIU *et al.*, 2015; KIM *et al.*, 2015) e de Medidores Inteligentes (*Smart Meters*) (BENZI *et al.*, 2011).

Essas tecnologias dotadas de “inteligência” estão inseridas dentro do conceito de Internet das Coisas (*Internet of Things – IoT*) que descreve a interconexão de objetos físicos ou “coisas” por meio de sensores, softwares e outras tecnologias. Essa interconexão tem como objetivo a transmissão de dados entre eles usando a internet como um facilitador para esse enlace e troca de informações (DA XU, 2014).

Como exemplos de derivados do conceito de IoT, tem-se a Internet da Energia (*Internet of Energy - IoE*), que transforma os Recursos Energéticos Distribuídos (RED) em “coisas” da internet para possibilitar o gerenciamento e controle da energia elétrica (LIN *et al.*, 2017), e a Internet Industrial das Coisas (*Industrial Internet of Things – IIoT*), que transforma os componentes industriais em “coisas” da internet para possibilitar o gerenciamento e controle da planta industrial (XU *et al.*, 2018).

Dentre essas novas tecnologias, o desenvolvimento e aperfeiçoamento da IoT junto à expansão do uso dos RED afluíram o conceito de Rede Elétrica Inteligente (REI). Este conceito moldou-se com a necessidade de tornar a operação da rede elétrica mais interativa, interconectada, confiável, segura, estável e flexível (RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013). De modo semelhante, segundo a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, a quarta revolução industrial, denominada também de Indústria 4.0 (I4.0), desencadeou o avanço tecnológico das indústrias com a utilização das tecnologias de IoT para possibilitar a integração entre o mundo físico, digital e biológico existentes na cadeia de produção; contudo, a I4.0 também tem um papel coadjuvante com o conceito de REI (ABDi, 2019).

De forma geral, o que caracteriza uma rede elétrica como “inteligente” é a capacidade de integrar as ações de todos os agentes conectados à rede, sejam geradores de energia, sejam consumidores de energia ou *prosumers* (agentes que ora se comportam como geradores de energia, ora como carga). Sendo assim, as REIs junto com a I4.0 estão surgindo e crescendo no mundo todo, levando a questionamentos como:

- Quais as vantagens da integração entre REIs e I4.0?
- Quais os protocolos de comunicação utilizados em REIs e I4.0?
- Como fornecer informações para atender as necessidades e desafios da I4.0 e tornar as fábricas inteligentes?
- Como fornecer informações (obtidas em “tempo real”) para aumentar a gestão, operação, planejamento e eficiência energética das REIs?

As respostas podem ser encontradas identificando as características de cada tecnologia associada com REI e I4.0, em uma visão de integração para elaborar um conjunto de lacunas a serem preenchidas e identificar ações que orientem novos desenvolvimentos tecnológicos.

Sendo assim, dada a importância estratégica das REIs e I4.0, em 2020, o governo brasileiro (por meio do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – MCTIC) definiu áreas tecnológicas prioritárias, como IoT, energias renováveis, cibernética, inteligência artificial, entre outras (MCTIC, 2020), principalmente com base na crescente atratividade dos RED e, obviamente, visando o crescimento econômico do país. No entanto, embora regulamentações específicas tenham sido definidas para: o plano de IoT (BRASIL, 2019), o plano de expansão de energia (MME, 2020) e a criação da Câmara Brasileira da I4.0 (ME, 2019), padrões, normas e protocolos de interconexão locais entre dispositivos e sistemas ainda precisam ser discutidos, aprimorados e desenvolvidos. Desta forma, será possível atender, por exemplo, as demandas de leitura automatizada, a medição avançada, os requisitos de continuidade, a qualidade da energia elétrica e outros assuntos, tudo com o intuito de oferecer condições mais consistentes para o setor industrial e para as empresas concessionárias de energia (FAHEEM *et al.*, 2018).

Nesse sentido, com base no que caracteriza uma REI e no avanço das tecnologias e inovações da Indústria 4.0, este trabalho tem por objetivo geral discutir a arquitetura de camadas de interoperabilidade de uma REI e os principais protocolos de comunicação IoT aplicados nas REIs e na I4.0, para que uma operação integrada e otimizada possa ser idealizada e realizada com o intuito de obter um fornecimento de energia mais confiável e eficiente. Uma atenção especial é dada ao processo de integração da I4.0 nas REIs, examinando também as novas tendências nas políticas de energia local, destacando seus prováveis benefícios para as indústrias e para as empresas concessionárias de energia.

1.1. OBJETIVOS

- Identificar as funções das camadas de interoperabilidade de uma arquitetura de Redes Elétricas Inteligentes, principalmente com a possibilidade de integração com o conceito de Indústria 4.0.
- Identificar as principais tecnologias e protocolos da IoT (IoE e IIoT) que integram a Camada de Comunicação da arquitetura de Redes Elétricas Inteligentes.
- Discorrer sobre a adaptabilidade do Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) à arquitetura de Redes Elétricas Inteligentes, citando as etapas de transição e as análises de integração com o conceito de Indústria 4.0.

2. O SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO E O PROCESSO DE MODERNIZAÇÃO

O Sistema Elétrico Brasileiro teve grandes mudanças ao longo dos anos, principalmente a partir da década de 1990, quando houve a privatização e a desverticalização das companhias energéticas (CPFL ENERGIA, 2014). Posterior a isso e como consequência da crise de racionamento de energia de 2001, o setor elétrico brasileiro mudou novamente com a criação do Novo Modelo do Setor Elétrico (NMSE) em 2004, com a promulgação de Lei por parte do Governo Federal, que trouxe maior robustez ao setor, permitindo a expansão da oferta energética (CPFL ENERGIA, 2014; ENERGISA, 2019).

Em 2013, a universalização do serviço de eletricidade alcançava 72,1 milhões de unidades consumidores no Brasil, o que representava 99,3% dos domicílios do país, sendo que o Sistema Interligado Nacional (SIN) atendia mais de 98% do consumo de eletricidade do país e cobria dois terços do território nacional (CPFL ENERGIA, 2014). Os sistemas isolados, que representam menos de 2% da energia consumida, encontram-se principalmente na região amazônica, conforme pode ser visto no mapa contido no Anexo A.

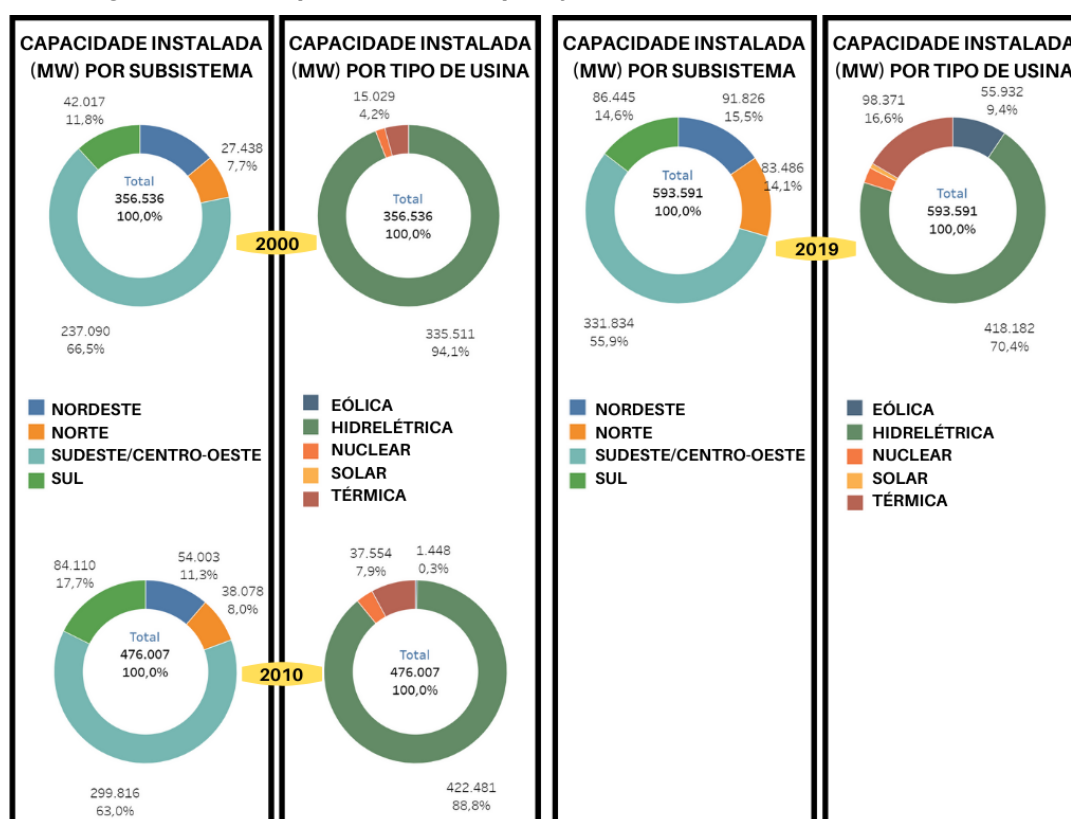
2.1. MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

A Matriz Elétrica Brasileira (MEB) é predominantemente hídrica, tendo os reservatórios de hidrelétricas como peças chaves para garantir a regularização da oferta de energia (CPFL ENERGIA, 2014). Até o final do século XX, o Brasil construiu grandes usinas com reservatórios de água. Entretanto, devido às restrições ambientais e topológicas, a expansão da geração hídrica tem sido feita preponderantemente por meio de hidrelétricas a fio d'água no norte do Brasil, fazendo com que a MEB esteja deixando de ser um sistema essencialmente hídrico, ou seja, durante o período de seca, o parque gerador nacional precisará contar com outras fontes de geração de energia para suprir a demanda (CPFL ENERGIA, 2014).

A Figura 2.1 mostra o comparativo da composição da MEB entre os anos de 2000, 2010 e 2019, considerando a capacidade instalada por subsistema e a

capacidade instalada por tipo de usina de geração. De 2000 a 2019, percebeu-se que as Usinas Hidrelétricas diminuíram percentualmente a sua contribuição para a MEB, de 94,1% para 70,4%, mas continuam como a principal forma de geração da energia elétrica brasileira. As Usinas Termoeletricas apresentaram um aumento percentual de 4,2% para 16,6% no mesmo período, enquanto que as Usinas Eólicas apresentaram um crescimento considerável de aproximadamente 0,0% em 2000 e 0,3% em 2010 para 9,4% em 2019, o que mostra que a MEB está caminhando para aumentar a participação das fontes alternativas de energia e da Geração Distribuída (GD).

Figura 2.1 – Comparativo da composição da MEB entre 2000, 2010 e 2019.



Fonte: ONS.

2.2. ESTRUTURA DO SISTEMA ELÉTRICO

Com a desverticalização da indústria elétrica a partir de 1990, nos segmentos de geração, transmissão, distribuição e comercialização, permitiu-se a introdução da concorrência nos segmentos considerados competitivos, como geração e comercialização, e monopólios naturais nos segmentos de transmissão e distribuição

(CPFL ENERGIA, 2014). Com a privatização de várias empresas públicas, criou-se, em 1996, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), para realizar a fiscalização e regulação das diferentes etapas da indústria elétrica, e, em 1998, foi criado o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para executar a administração e controle do despacho (CPFL ENERGIA, 2014).

Para a operação da rede, tem-se os Centros de Operação (CO), geralmente administrados pela própria concessionária do serviço de distribuição, os quais são essenciais para o processo de modernização da rede elétrica, por serem os principais agentes de controle dos recursos energéticos distribuídos (RED) da rede. Segundo a definição da ANEEL, os COs são:

Conjunto centralizado de pessoal, informações, equipamentos e processamento de dados, de cada distribuidora, destinado a exercer as ações de coordenação, supervisão, controle, comando e execução da operação das instalações de baixa tensão, de média tensão e de alta tensão de distribuição. Para as instalações do agente incluídas na rede de operação do SIN, este centro é o responsável por ações de supervisão, controle, comando e execução da operação (ANEEL, 2018, p. 12).

Em relação aos sistemas elétricos de distribuição (SED), a ANEEL elaborou os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica Nacional (PRODIST), compostos de onze módulos, para, por um lado, englobar todas as áreas e ações técnicas dos agentes de distribuição e, por outro lado, disciplinar o relacionamento entre os agentes setoriais do SED (ANEEL, 2018). Os principais objetivos da PRODIST são:

a) garantir que os sistemas de distribuição operem com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade; b) propiciar o acesso aos sistemas de distribuição, assegurando tratamento não discriminatório entre agentes; c) disciplinar os procedimentos técnicos para as atividades relacionadas ao planejamento da expansão, à operação dos sistemas de distribuição, à medição e à qualidade da energia elétrica; d) estabelecer requisitos para os intercâmbios de informações entre os agentes setoriais e entre eles e os consumidores; e) assegurar o fluxo de informações adequadas à ANEEL; f) disciplinar os requisitos técnicos na interface com a Rede Básica, complementando de forma harmônica os Procedimentos de Rede (ANEEL, 2018).

Para atingir todos os objetivos do PRODIST, os procedimentos foram divididos em módulos, tal como segue:

- **MÓDULO 1 – Introdução**; trata dos objetivos gerais, responsabilidades e termos técnicos do PRODIST (ANEEL, 2018a).
- **MÓDULO 2 - Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição**; trata dos procedimentos para a elaboração dos estudos sobre previsão de demanda, sobre as perdas e eficiência energética, caracterização das cargas do SEB e critérios e planos de desenvolvimento da Distribuição (PDD) (ANEEL, 2016a).
- **MÓDULO 3 - Acesso ao sistema de distribuição**; trata dos procedimentos de acesso, critérios técnicos e operacionais, requisitos de projetos, implantação de novas conexões, requisitos para operação, manutenção e segurança da conexão, contratos e acesso de micro e minigeração distribuída (ANEEL, 2017a).
- **MÓDULO 4 - Procedimentos operativos do sistema de distribuição**; trata dos dados de carga e de despacho da geração, programação de intervenções em instalações, controle da carga, testes das instalações, coordenação operacional e recursos de comunicação de voz e dados (ANEEL, 2010).
- **MÓDULO 5 - Sistemas de medição**; trata dos agentes aos quais se aplica esse módulo, especificação dos sistemas de medição, implantação, manutenção e inspeção do sistema de medição e da leitura, registro compartilhamento e disponibilização das informações de medição (ANEEL, 2017b).
- **MÓDULO 6 – Informações requeridas e obrigações**; trata da aplicabilidade aos agentes envolvidos e de requisitos das informações por etapas (ANEEL, 2018b).
- **MÓDULO 7 - Cálculo de perdas na distribuição**; trata das disposições gerais para os cálculos de perdas na Distribuição, metodologias para o cálculos das perdas técnicas, procedimento de cálculo, indicadores de perdas, premissas para o cálculo de perdas na distribuição das permissionárias e metodologias de cálculo das perdas técnicas em ramais de ligação no caso de medições externas e procedimentos de desconto dessas perdas na fatura do consumidor (ANEEL, 2018c).

- **MÓDULO 8 - Qualidade da energia elétrica;** trata da qualidade do produto (indicadores e limites ou valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão), qualidade de serviço (definições, limites e os procedimentos relativos aos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento) e a qualidade do tratamento de reclamações (ANEEL, 2020).
- **MÓDULO 9 - Ressarcimento de danos elétricos;** trata de como a solicitação deve ser analisada, procedimentos para verificação nas instalações da unidade consumidora ou equipamento da solicitação, procedimentos para resposta e ressarcimento do consumidor e de processos específicos (ANEEL, 2012).
- **MÓDULO 10 - Sistema de informação geográfica regulatório;** trata da base de dados geográficos da distribuidora, dicionário de dados da ANEEL do SIG-R (Sistema de Informação Geográfica Regulatório) e de disposições operacionais e de uso (ANEEL, 2016b).
- **MÓDULO 11 - Fatura de Energia Elétrica e Informações Suplementares;** trata sobre informações obrigatórias na figura, informações suplementares, exemplos de formas de apresentações possíveis, fatura eletrônica e resumo de fatura (ANEEL, 2017c).

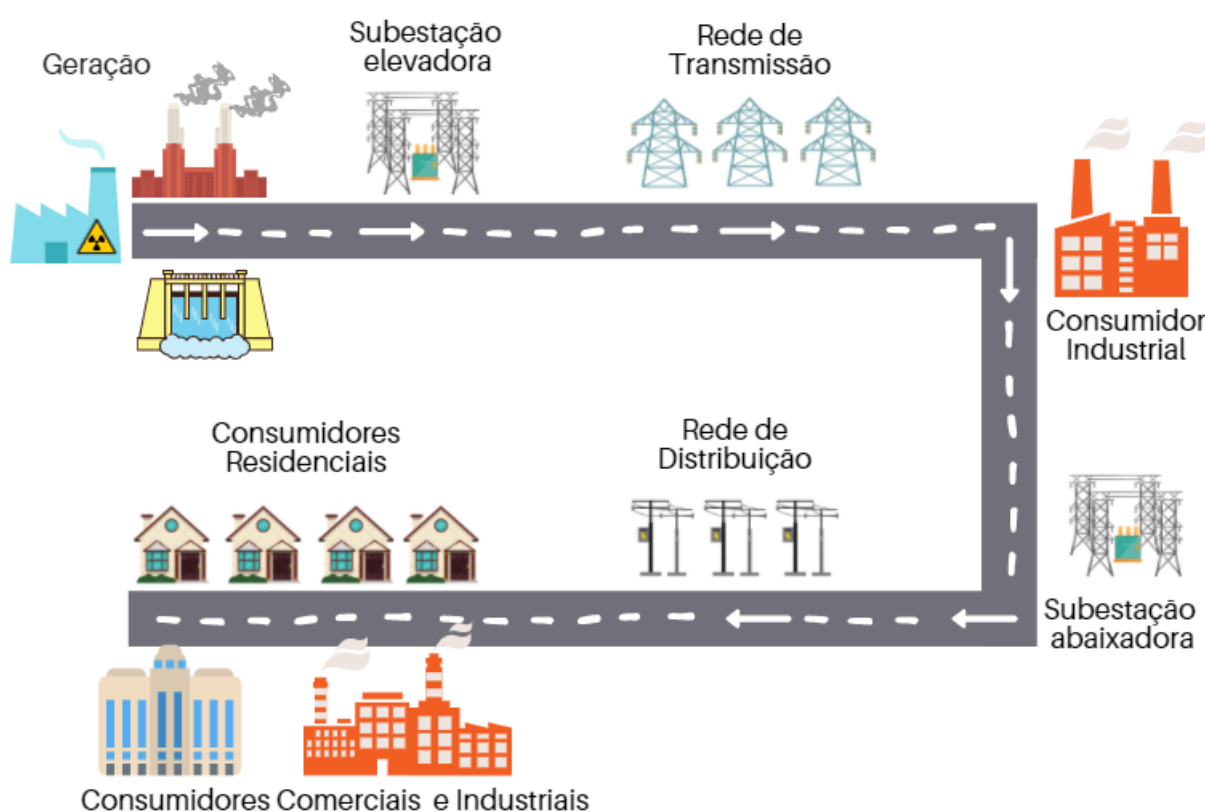
Cada módulo trata de uma especificidade da distribuição de energia elétrica, e, neste trabalho, abordaremos algumas informações referentes aos módulos 2, 3, 4, 5, 6, e 8.

2.3. TRANSIÇÃO PARA AS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Desde o início da transição das Redes Elétricas Convencionais (RECs) para as REIs, tanto as empresas de serviços públicos quanto as privadas têm ciência das dificuldades envolvidas nas mudanças de infraestrutura, organizações e processos atuais para viabilizar a efetiva implantação das REIs (FARHANGI, 2010). Esta

transição ocorre em concomitância ao desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias de comunicação entre redes e equipamentos de informação, possibilitando a mudança da estrutura tradicional (ver Figura 2.2), ou seja, de comunicação unidirecional, para uma estrutura com tecnologias de sensoriamento, medição, controle e comunicação bidirecional (SONG *et al.*, 2015). Afinal, uma REI é caracterizada pela capacidade de integrar as ações de todos os agentes conectados à rede, sejam geradores de energia, sejam consumidores ou agentes que, ora se comportam como carga (consumem energia do sistema), ora como geradores de energia. Como objetivo das REI, busca-se a produção, o transporte, a distribuição e o uso final de energia elétrica de modo eficiente, ambientalmente sustentável, economicamente viável, e de forma confiável, segura e resiliente (VIJAPRIYA; KOTHARI, 2011).

Figura 2.2 – Estrutura de uma rede elétrica convencional (REC).



Fonte: Autor.

Farhangi (2010) relata, ainda, que dentro das RECs, as redes de distribuição convencionais devem ser as primeiras a receber investimentos de mudança para as

Redes de Distribuição Inteligentes (RDIs), tendo em vista que a maioria dos distúrbios e interrupções ocorrem no sistema de distribuição. Em Kim *et al.* (2015), os autores ratificam que a rede de distribuição é a mais importante para o estudo e desenvolvimento da integração entre IoT e REI, devido à grande quantidade de dados que os dispositivos geram diariamente. Com a aplicação dos conceitos de REI, é possível agregar tecnologias de sensoriamento, métodos de controle e comunicações integradas à rede elétrica atual que auxiliem no aumento da eficiência, confiabilidade, segurança e otimização de processos (SHU-WEN, 2011; TAUQIR; HABIB, 2019).

De maneira sucinta, segundo Vijayapriya e Kothari (2011), uma REI tem como principais requisitos:

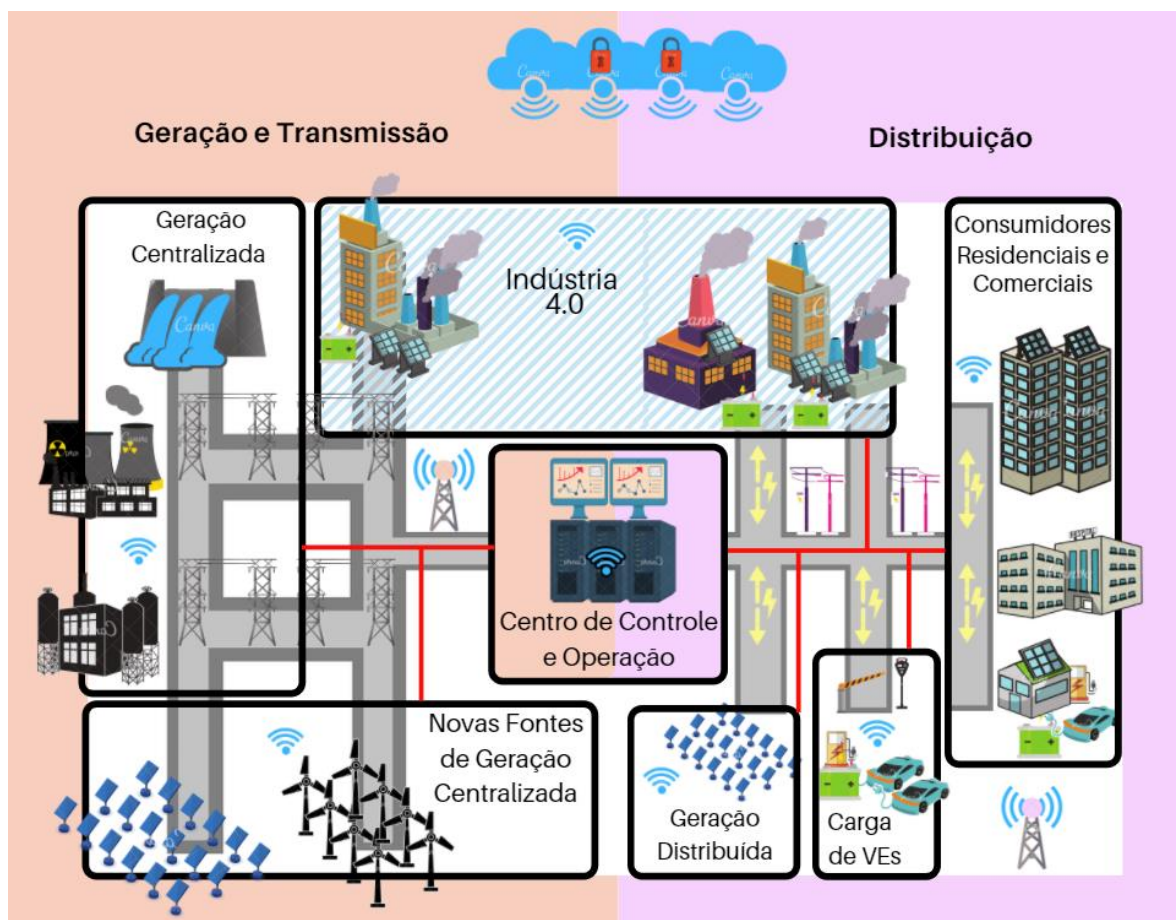
- Fornecer uma abordagem centrada no usuário e permitir que novos serviços entrem no mercado;
- Estabelecer a inovação como um fator econômico para a transformação das redes elétricas;
- Manter a segurança do fornecimento de energia elétrica, além de garantir a integração e interoperabilidade;
- Possibilitar a Geração Distribuída e a utilização de fontes de energias renováveis, como a eólica e a solar;
- Garantir o melhor uso da geração centralizada que, no caso da MEB, geralmente é a hidrelétrica;
- Considerar adequadamente o impacto das limitações ambientais;
- Ativar participação do lado da demanda;
- Informar os aspectos políticos e regulatórios; e
- Considerar os aspectos sociais.

Já na expectativa dessa transformação, a literatura propõe aliar as RECs com componentes de controle inteligente e sistemas distribuídos para evitar problemas estruturais na operação das redes elétricas, utilizando uma metodologia de comunicação bidirecional por meio de dispositivos inteligentes (medidores inteligentes, inversores e chaves inteligentes, monitores de qualidade de energia, sensores, atuadores, roteadores de energia, etc.). Estes dispositivos podem contribuir

no fornecimento da energia de acordo com a demanda por meio de uma integração entre IoT e REI (MAIOR; RAO, 2014; SPANÒ *et al.*, 2014).

Nesse contexto, a integração entre REI e I4.0 pode resultar também em benefícios mútuos por meio de políticas de cooperação, as quais podem criar os meios necessários para que os consumidores industriais tornem-se participantes ativos (que tanto enviam como recebem informações do centro de controle e operação da rede, ou que atuam como cargas flexíveis, que ora consomem e ora fornecem energia) da rede elétrica, para, principalmente, assegurar o fornecimento ininterrupto de energia elétrica, além de outros benefícios em função das características particulares de cada setor produtivo. Com base nessas informações, a Indústria 4.0 é um conceito que deve integrar uma REI, conforme o modelo da Figura 2.3, onde a Indústria está inserida dentro da REI, com integração e intercâmbio de informações por meio de tecnologias da comunicação e informação (IoT) entre todos os agentes da rede.

Figura 2.3 – Estrutura de uma rede elétrica inteligente (REI).

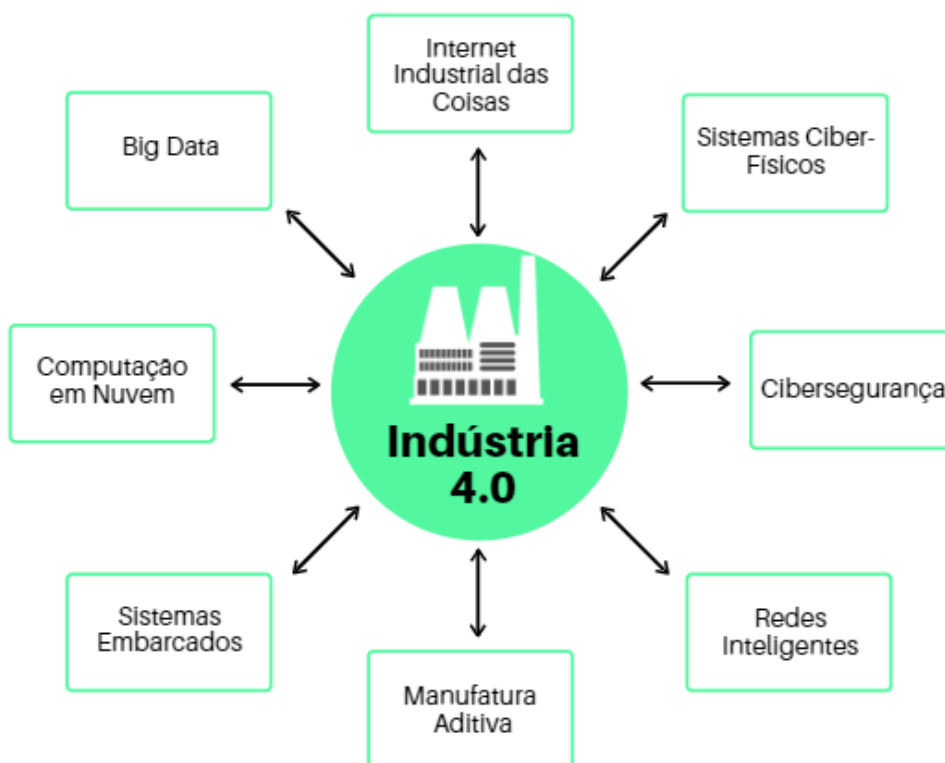


Fonte: Autor.

3. A INDÚSTRIA 4.0

Dentro do contexto do desenvolvimento tecnológico proporcionado, principalmente, pela integração de tecnologias emergentes, como Redes (Elétricas) Inteligentes, Internet das Coisas, Internet Móvel, Big Data, Computação em Nuvem, Sistemas Embarcados e outras (Figura 3.1), o setor industrial entrou na sua quarta revolução, denominada de “Indústria 4.0”. As empresas imersas no conceito de Indústria 4.0 fazem uso de investimentos em desenvolvimento tecnológico e modernização, os quais são cruciais para manter a competitividade das empresas, minimizando custos desnecessários e aumentando ao máximo a eficiência do processo produtivo, tudo com o intuito de oferecer produtos e serviços customizados em massa com preços competitivos (ABDi, 2019). É importante destacar que o conceito de Indústria 4.0 pode existir independentemente do setor industrial estar ou não inserido em uma REI, embora a coexistência delas potencialize os benefícios e vantagens para ambas.

Figura 3.1 – Tecnologias que integram a Indústria 4.0.



Fonte: Autor.

Segundo Wollschlaeger, Sauter e Jasperneite (2017), a introdução dos conceitos de IoT e Sistemas Ciber-Físicos (SCF) na indústria mudou drasticamente a automação industrial devido aos avanços tecnológicos que permitiram interconexões mais complexas e amplas. Por exemplo, na Indústria 4.0, o *recall* de um carro pode ser feito por meio de atualizações do *software*, tal como acontece com os atuais *smartphones*. No meio das diferentes possibilidades tecnológicas atreladas à Indústria 4.0, neste item são abordados de forma sucinta algumas delas:

- **Sistemas Ciber-Físicos:** os SCF realizam a combinação entre elementos dos espaços virtuais e físicos por meio de recursos computacionais com o intuito de controlar aplicações físicas, dando suporte a processos da vida real e fornecendo o controle operacional de objetos da IoT (ZANNI, 2015). As utilidades de um SCF são variadas e sempre muito vantajosas, exceto, talvez, pelo custo. A Indústria 4.0 faz uso de um SCF para, por exemplo, simular falhas ou coletar dados para possibilitar planejamentos mais precisos da produção. Em Xu *et al.* (2018), o autor comenta que as tecnologias de comunicação podem ser aproveitadas para melhorar o monitoramento e o controle de sistemas físicos. Isto pode ser feito utilizando um grande número de sensores e atuadores inteligentes interconectados aos sistemas industriais usando as tecnologias da IoT e dos SCF. Os dispositivos IoT geralmente coletam e transmitem dados de comunicação do tipo máquina para máquina (do inglês “*Machine to Machine - M2M*”), utilizando dispositivos sem a intervenção humana. A ideia é que os protocolos de comunicação e automação industrial também possibilitem a maximização da eficiência energética da indústria por meio de automações elétricas inteligentes. No contexto de integração com a REI, falhas causadas por distúrbios elétricos oriundos das redes elétricas como variações de tensão de curta duração (VTCDs), harmônicos e desequilíbrios podem ser simulados e refletidos aos processos produtivos por meio dos SCF, com a finalidade de identificar as “limitações” da produção e estimar os tempos de imunidade dos processos (PIT) frente a esses distúrbios, sem a necessidade do evento real (distúrbio elétrico) afetar a instalação do consumidor industrial.

- **Big Data:** trata-se de um grande volume de dados incapazes de serem analisados/processados por sistemas empresariais tradicionais, mas que são utilizados na análise de informações para realização de movimentos estratégicos e tomadas de decisão de negócios. Para obter vantagens estratégicas devido ao crescimento exponencial do volume de dados proporcionado por dispositivos inteligentes, a indústria faz uso efetivo de novas ferramentas de processamento distribuído para lidar com esse conceito de *Big Data*, tendo em vista que a integração dos resultados da análise dos dados é essencial para os processos de negócios das empresas, ou seja, os dados são tratados para proverem tomadas de decisões mais eficientes (GOKALP *et al.*, 2016). Neste caso, em uma integração entre REIs e I4.0, a grande quantidade de dados relativos à operação e utilização da energia elétrica entre redes elétricas e consumidores industriais será de grande relevância para os Centros de Controle e Operação da Distribuição. Por exemplo, a partir da coleta de dados feita por medidores inteligentes, tarifas dinâmicas podem ser oferecidas aos consumidores de forma a contribuir com a estabilidade do sistema, ou identificar tendências para aumento da taxa harmônica, desequilíbrios ou redução do fator de potência nas instalações dos consumidores, com isso a concessionária e os próprios usuários podem planejar medidas preventivas mais assertivas.
- **Manufatura Aditiva:** com a I4.0, diversas tecnologias passaram a ser mais comuns no cotidiano. O uso da impressão 3D, uma das técnicas da manufatura aditiva, é considerada a chave para uma produção mais flexível, que se adapte às necessidades momentâneas de produção e evite gastos desnecessários durante o processo de prototipagem (BASSI, 2017). No contexto de integração com a REI, sabe-se que o processo contínuo de impressão pode ser afetado por flutuações no fornecimento de energia, sendo assim, dados fornecidos pelos consumidores durante o processo de impressão (horários de início e fim) para às empresas concessionárias para definir pesos e prioridades durante a execução de medidas operacionais para aumentar a confiabilidade do sistema ou para aumentar a resiliência em casos de faltas de energia nesses períodos. Essas medidas podem ser desde a transferência automática de blocos de

carga para outros alimentadores ou a utilização de Microrredes isoladas em regiões específicas que contemple o consumidor industrial interessado.

Em sintonia com o que essas tecnologias proporcionam, Bassi (2017) diz que alguns dos princípios fundamentais da Indústria 4.0 são: uso da internet, flexibilidade de produção, e virtualização de processos. Obviamente, espera-se que a Indústria 4.0 aumente a eficiência do processo produtivo de uma empresa, mas não somente isso, ou seja, espera-se também a maximização do uso dos recursos disponíveis na empresa para que ao mesmo tempo possa potencializar a operação da REI.

Para incentivar o desenvolvimento da I4.0 no país, e seguindo o sucesso dos Estados Unidos com o IIC (*Internet Industrial Consortium*), a Pollux, FIESC/CIESC e Embraco se uniram para fundar a Associação Brasileira de Internet Industrial (ABII) em 2016 (ABII, 2019). Pouco tempo depois, em 2017, o Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC) instituiu o Grupo de Trabalho para a indústria 4.0 (GTI 4.0), formado por mais de 50 instituições entre empresas, governos, sociedades civis organizadas, e outros (ABDi, 2019). Segundo a ABDi (2019), o GTI 4.0 tem como objetivos aumentar a competitividade das empresas brasileiras, reestruturar as cadeias produtivas, tratar sobre um novo mercado e fábricas do futuro, e prover a massificação do uso de tecnologias digitais.

Como se trata de um tema recente, o Brasil ainda vem disciplinando e incentivando assuntos relacionados a Indústria 4.0, a exemplo da Resolução n. 40, de 10 de maio de 2018, do Conselho de Administração da Suframa:

Disciplina a elaboração de projetos e a execução do cumprimento da obrigação de Investimento em atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação na Amazônia Ocidental ou no estado do Amapá para a Indústria 4.0, para as empresas que produzem bens de informática beneficiados no âmbito da Zona Franca de Manaus, bem como aquelas que tem aplicação em pesquisa, desenvolvimento e inovação por meio da dispensa de etapa do processo produtivo básico prevista em Portarias Interministeriais específicas (SUFRAMA, 2018, p. 1).

E da Portaria n. 2.091, de 17 de dezembro de 2018, do Gabinete do Ministro da Indústria, Comércio Exterior e Serviços:

Esta Portaria prevê a metodologia a ser adotada nos investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação voltados para a indústria 4.0 na Zona Franca de Manaus e cria o Selo da Indústria 4.0 (MDIC, 2018, p. 1).

Ainda, segundo a ABDi (2019), a partir do momento de migração da indústria atual para o conceito de Indústria 4.0, a redução de custos industriais, no Brasil, será de no mínimo R\$ 73 bilhões por ano. A explicação é que o aumento da eficiência nos processos produtivos reduz os custos de manutenções e consumo de energia. Além disso, segundo Cardillo e Caddemi (2019), a migração para a Indústria 4.0 é requisito essencial para todas as empresas no futuro. Entretanto, segundo Rizzo (2016), o Brasil ainda está na transição do que seria a Indústria 2.0 (utilização de energia elétrica e linhas de montagem) para a 3.0 (automação por meio de eletrônica, robótica e programação), embora etapas devam ser rapidamente superadas para adaptar as necessidades da Indústria 4.0 e preservar a competitividade da indústria no país.

Percebe-se, com isso, que governos e demais organizações públicas e privadas interessadas estão se movimentando para auxiliar no desenvolvimento da Indústria 4.0, vislumbrando todo o potencial que esse novo cenário apresenta, tendo em vista que o retorno esperado não é somente financeiro, mas também na melhoria da qualidade dos produtos e serviços, e, conseqüentemente, da qualidade de vida de todos. No entanto, chama a atenção o fato de pouco se falar no desenvolvimento da I4.0 para melhorar a interação entre as redes elétricas do sistema elétrico nacional e o setor industrial.

4. INTERNET DAS COISAS

O conceito de Internet das Coisas - IoT carece de uma definição padronizada, mas, de forma geral, pode ser tratado como uma rede que permite a conexão de qualquer objeto físico à internet, possibilitando que as informações dos dispositivos conectados sejam trocadas e processadas, por meio das etapas de **percepção**, de **rede** e de **aplicação** (MAIOR; RAO, 2014; SONG *et al.*, 2015). Em concomitância a isso, Shu-wen (2011) afirma que a IoT se popularizou por acentuar a ideia de uma estrutura de rede global interconectada com objetos físicos integrados por meio de tecnologias como sensores, atuadores, etiquetas RFID, smartphones, entre outros. Essas tecnologias, que são utilizadas nos mais variados campos de atuação, integram a IoT, e criam o conceito de *Coisas para Coisas*, do inglês “*Things to Things*”. A troca de dados em tempo real, a comunicação sem fio, a internet e as técnicas inteligentes de Aprendizado de Máquina, do inglês “*Machine Learning*” também são tecnologias que integram as funcionalidades de uma rede IoT (SONG *et al.*, 2015).

Segundo Song *et al.* (2015), a IoT é utilizada na Indústria 4.0 no processo de fabricação para melhorar a produtividade, eficiência, segurança e inteligência de fábricas e plantas industriais. Para tanto, o uso da IoT na fabricação industrial foi denominado de Internet Industrial das Coisas (este conceito será melhor abordado no item 4.1). Entretanto, para as áreas que necessitam de cuidados extras, como I4.0 e REIs, os especialistas reconhecem que atualmente existem desafios para a difusão do uso da IoT, incluindo padronização (arquiteturas, *frameworks*, e protocolos independentemente do fornecedor) e segurança, pois informações roubadas ou processos parados demandam um grande impacto econômico (MINOLI; SOHRABY; OCCHIOGROSSO, 2017).

Na integração com as REIs, segundo Minoli, Sohraby e Occhiogrosso (2017), as redes IoT devem proporcionar vantagens em serviços de sistemas inteligentes de gerenciamento e controle de energia elétrica (tal como de iluminação pública, RED), segurança de fornecimento e até mobilidade (carregamento de Veículos Elétricos - VEs, controle de tráfego e automação e gestão de semáforos), o que melhoraria a eficiência da REI, assim como a qualidade de vida das pessoas de grandes cidades

que passam horas presas no trânsito em horários de pico. Nesse contexto, são listados alguns benefícios da aplicação da IoT nas REIs:

- **Microrredes Inteligentes:** segundo Minoli, Sohraby e Occhiogrosso (2017), o próximo passo das Redes Elétricas Inteligentes é a aplicação dos conceitos em um espaço físico mais confinado, como os ambientes comerciais prediais. Em concomitância com essa tendência temos o conceito de Microrredes Inteligentes, do inglês “*Smart Microgrids*”, que são redes que funcionam independentemente de estarem ou não conectadas à rede elétrica (FARHANGI, 2010), ou seja, começa-se a pensar em novas maneiras de monitoramento e gerenciamento dos recursos energéticos em locais mais “confinados”, com o auxílio dos dados e informações disponibilizados em tempo real pelas redes de Internet das Coisas. Este é um conceito que também pode ser aplicado em indústrias para prover segurança no fornecimento de energia elétrica em caso de interrupção da rede “principal”. Como uma microrrede inteligente, a indústria também se tornaria uma participante ativa da rede.
- **Geração e armazenamento de energia distribuída:** Shu-Wen (2011) explana que o desenvolvimento de fontes de geração e de armazenamento de energia mais eficientes e compactas, que aliam a função de distribuição e captação de energia por meio da Internet da Energia (este conceito será melhor abordado no item 4.2), do inglês “*Internet of Energy (IoE)*”, também serão fundamentais para a consolidação das REIs. Além disso, o desenvolvimento da segurança e inteligência de protocolos para possibilitar uma comunicação bidirecional entre os dispositivos e a rede é considerada de alta prioridade para o contexto da IoT e REIs.
- **Veículos Elétricos (VE):** um outro exemplo da importância das REIs e dos protocolos de comunicação das redes IoT está diretamente ligado ao aumento da comercialização de VEs, pois existe uma preocupação com a escassez de energia nos horários de pico devido à grande quantidade de cargas que podem ser conectadas com o aumento de VEs. Todavia, uma REI pode mitigar esse problema por meio de comunicação bidirecional entre a bateria de carros

"estacionados" e a rede de energia elétrica, como explanam Li *et al.* (2017), por exemplo. A IoT também é aplicada nos VEs para receber informações como localização de possíveis pontos de recarga e estado da bateria.

A literatura mostra que um modelo padrão para arquitetura de redes IoT é buscado por organizações de padrões internacionais (ITU-T, 3GPP, ETSI, ISO, IETF, IEEE, W3C, oneM2M, OASIS, entre outros), academias, empresas e demais interessados (GARDAŠEVIĆ, 2017). Em dezembro de 2018, por exemplo, foi publicado um padrão de projeto preliminar do IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) para uma estrutura arquitetônica de Internet das Coisas (IEEE, 2018), e em março de 2020 o padrão aprovado foi publicado (IEEE, 2020). Para este trabalho, duas subdivisões da IoT são abordadas: a Internet Industrial das Coisas (IIoT) e a Internet da Energia (IoE).

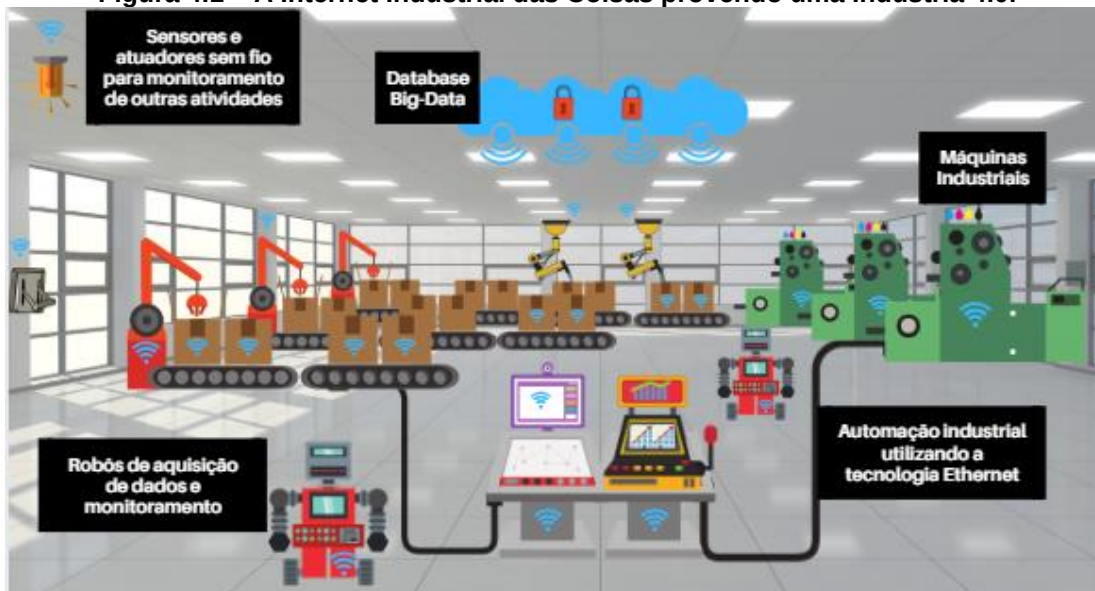
4.1. INTERNET INDUSTRIAL DAS COISAS

A IIoT é considerada uma versão da IoT voltada para a Indústria 4.0, logo se organiza de maneira semelhante (XU *et al.*, 2018). Sendo assim, envolve a interconexão de dispositivos industriais inteligentes com plataformas de controle e gerenciamento, que melhoram a eficiência operacional e produtividade industrial, embora necessitem atender mais requisitos que uma rede IoT comum. Na Figura 4.1, por exemplo, podemos ver um ambiente industrial provido por máquinas e dispositivos de uma rede IIoT. A figura mostra alguns dispositivos cabeados (protocolos de comunicação Ethernet Industrial, geralmente utilizados para a automação industrial, mas que podem efetuar a automação elétrica em um sistema integrado) e sem fio (protocolos de comunicação geralmente utilizados como subsistemas da automação e/ou para a percepção de outras informações por meio de sensores e atuadores).

Na perspectiva da comunicação das redes da Indústria 4.0, as tecnologias da IIoT levam em consideração características como latência, confiabilidade e custo, por exemplo. Obedecidas essas características, pode-se criar um sistema IIoT, como um SCF, que é composto, principalmente, por sistemas físicos e cibernéticos. Os sistemas físicos são, de fato, os sistemas de fabricação e automação que utilizam as

máquinas industriais para o procedimento de produção. Os cibernéticos são onde encontramos os sistemas de controle, redes, computação, operação, interconexão, e a inteligência dos sistemas industriais (XU *et al.*, 2018).

Figura 4.1 – A Internet Industrial das Coisas provendo uma Indústria 4.0.



Fonte: Autor.

Nestas situações o comportamento não determinístico das tecnologias sem fio gera desafios para o gerenciamento da planta industrial, principalmente em ambientes onde o número de aplicativos e dispositivos sem fio está aumentando. Sendo assim, a escolha para o desenvolvimento das redes de automação industrial é feita atualmente por meio de tecnologias cabeadas (utilizando o protocolo Ethernet Industrial), devido a sua confiabilidade e baixa latência. Alguns dispositivos de sensoriamento e monitoramento podem ser conectados por meio de redes sem fio, dependendo dos requisitos da aplicação. A existência de diferentes meios e protocolos de comunicação deixa em aberto questões de como gerenciar a interoperabilidade entre os sistemas de comunicação da I4.0 e da REI.

4.2. INTERNET DA ENERGIA

Outra versão da IoT, a IoE desenvolveu-se em consequência dos avanços recentes em fontes de geração de energias renováveis e da necessidade de um gerenciamento de energia mais eficiente (LIN *et al.*, 2017). A IoE pode gerenciar um

grande número de instalações de geração de energia distribuída, instalações de armazenamento de energia distribuída e tecnologias da IoT para implementar o compartilhamento de energia, promover a utilização de redes elétricas e manter a segurança das redes elétricas por meio de centros virtuais (SCF, VLAN, etc) de operação da distribuição administrados pelos COs (LIN *et al.*, 2017).

Segundo Hannan *et al.* (2018), a IoE possui nós de controle e um roteador que coordena a rede, semelhante à IoT, que permite um fluxo de informações de ponta a ponta entre dois nós, com informações constantemente criadas, replicadas e armazenadas pela rede. Entretanto, diferentemente da IoT, que pode replicar informações, a IoE não pode replicar a energia, logo a energia fornecida necessita estar em equilíbrio com a demanda por meio de um gerenciamento inteligente. Esse gerenciamento inteligente pode ser benéfico tanto para REIs quanto para o setor industrial, pois permitirá que a indústria e a REI gerenciem e troquem informações para aumentar a eficiência energética e a continuidade do fornecimento de energia da indústria.

Hannan *et al.* (2018) caracterizam as tecnologias chaves da IoE como:

- **Roteadores de energia:** formados por transformadores de estado sólido, um sistema de controle inteligente de recursos elétricos distribuídos (REDs) e uma unidade de comunicação. O roteador pode perceber, processar e transmitir informações da rede, aumentando a confiabilidade, segurança e eficiência. O roteador permite um equilíbrio entre o fornecimento e a demanda, fornecendo a energia excedente para a rede elétrica em caso de demanda inferior ao fornecimento. Portanto, os roteadores de energia são fundamentais para a integração entre REIs e I4.0 pois permitem que o CO gerencie de maneira eficiente os REDs.
- **Sistemas de armazenamento de energia:** melhoram significativamente a eficiência da rede, armazenando energia (tanto em instalações de grandes usinas como de usuários finais) para uso posterior e garantindo o fornecimento regular de energia elétrica, por exemplo, em horários de pico. Os COs são responsáveis por gerenciar as informações e avisar aos usuários finais os procedimentos de carregamento e descarregamento de energia. Contam como

desvantagem o alto custo necessário para implantação. Todavia, dentro da ideia de IoE, são peças chaves para a integração entre I4.0 e REIs, principalmente como solução para manter o funcionamento da rede (e das indústrias) nos horários de pico da demanda.

- **Fontes Renováveis:** as tecnologias renováveis com sistemas de armazenamento de energia são amplamente aceitas para fornecer estabilidade e confiabilidade em redes IoE, como na integração entre REIs e I4.0. No entanto, topologias de conversores de energia e técnicas de controle são necessárias por conta das diversas características das fontes de energia. Dependendo da tecnologia e/ou topologia, os conversores eletrônicos de potência podem injetar componentes harmônicos de alta ordem e/ou desequilíbrios no ponto de acoplamento comum. Portanto, para melhorar a eficiência e a qualidade de energia no sistema, são necessárias pesquisas para monitorar e controlar desses distúrbios.
- **Interface Plug-and-Play:** facilita a conexão de fontes renováveis e dispositivos de armazenamento. É fundamental considerar a integração de eletrodomésticos ou qualquer outra carga também, pois a demanda e o fornecimento precisam ser equilibrados para a operação eficiente da IoE.

Também é necessário citar tecnologias importantes e que fazem parte da IoE como os medidores inteligentes, monitores de qualidade de energia elétrica, inversores inteligentes, entre outros, por exemplo:

- **Medidores Inteligentes:** desempenham um papel fundamental na mudança das RECs para as REIs devido a interconectividade, ao tratamento de dados e a otimização de processos que eles proporcionam, sendo considerados, portanto, uma aplicação da IoT para a IoE, onde a energia é tratada como uma “coisa”. Essa aplicação é utilizada na geração, transmissão, e distribuição para realizar o monitoramento de diversos processos e operações, além de permitir o gerenciamento do fornecimento de energia bidirecional (SHU-WEN, 2011). AL-Ali *et al.* (2018) desenvolveram um protótipo de Medidor Inteligente, o qual

é gerenciado e monitorado pelos usuários através da internet, e que afere os valores de eletricidade, gás e água de uma residência simultaneamente. O sistema desenvolvido ainda permite que as concessionárias autorizadas tenham acesso ao faturamento completo e às estatísticas de cada consumidor cadastrado, além de possibilitar a variação da tarifa de energia por horário, o que facilita, por exemplo, o uso da “tarifa branca” no Brasil. Ademais, se o cliente não pagar a conta, a concessionária pode desconectar o fornecimento de energia elétrica por meio do gerenciamento do fluxo do medidor inteligente, o que reduziria os gastos com a mão de obra em cortes e religação de energia elétrica. Considerando um dos protocolos de comunicação que serão abordados no próximo capítulo, Spanò *et al.* (2014) desenvolveram um Medidor Inteligente capaz de coletar dados em tempo real das cargas conectadas, utilizando uma comunicação com o padrão do protocolo Zigbee. O medidor coleta informações como energia ativa, aparente, reativa, e fator de potência, além de ser totalmente configurável por meio da plataforma de interface com o usuário. Portanto, se as informações obtidas pelo Medidor Inteligente desenvolvido por Spanò *et al.* (2014) fossem expandidas a um bairro, por exemplo, o controle da eficiência (ou de faltas, com a identificação do ponto exato de interrupção) daquela rede (ou alimentadores) poderia ser operacionalizado de maneira mais rápida e com maior precisão. Ainda, os Medidores Inteligentes podem ser instalados em subestações de energia para capacitar o controle do consumo de energia elétrica mais eficiente, além de evitar, através da implantação de planos de contingência, a sobrecarga do sistema, causa comum dos cortes de fornecimento de energia (FUNDO VERDE UFRJ, 2020).

- **Monitores de Qualidade de Energia Elétrica:** o constante monitoramento da Qualidade de Energia Elétrica (QEE) e a análise do sistema como um todo, de forma automatizada e em tempo real, pode ajudar a alcançar índices de satisfação e a garantir o fornecimento contínuo da energia. Dentre todos os problemas relacionados a QEE, destacam-se as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs) devido à frequência de ocorrência na rede, podendo resultar em grandes perdas para os consumidores. Na indústria, as VTCDs podem

resultar em interrupção da produção, devido ao reinício ou desligamento de equipamentos de controle eletrônico, resultando frequentemente na perda de grandes quantidades de matéria-prima com perdas financeiras significativas (BERTHO *et al.*, 2016). Para consumidores residenciais e comerciais, os danos associados à ocorrência de VTCDs estão relacionados à perda de dados por desligamento de computadores e mau funcionamento ou danos permanentes a equipamentos conectados diretamente à rede (BERTHO *et al.*, 2016), enquanto que para a indústria, segundo Cebrian, Kagan e Milanovic (2016), por exemplo, os afundamentos de tensão, interrupções de curta duração, e interrupções de longa duração são os contribuidores mais importantes para perdas econômicas significativas para usuários finais, principalmente industriais. Por isso, os Monitores de Qualidade de Energia (*PQ Monitors*) realizam uma parte essencial dos futuros estudos de QEE, realizando a coleta de dados em larga escala por meio de sistemas de monitoramento locais e globais, incluindo sua integração com os estimadores de estado da rede (BOLLEN *et al.*, 2016). Espera-se que a estimativa do estado da rede tenha um papel crítico nas futuras RDIs. A coleta de dados de QEE também deve ser parte integrante de todos os projetos em RDIs.

4.3. DISCUSSÃO

Partindo desse cenário de REI, a rede elétrica passa a ter, além da grande extensão espacial, um alto número de nós de comunicação, os quais englobam os Consumidores/Clientes, Medidores Inteligentes de Energia, Subestações Inteligentes de Energia, Roteadores de Energia, Inversores Inteligentes de Energia, Dispositivos SCADA, Dispositivos IoT (como IoE e IIoT), entre outros (HIRSCHLER; SAUTER, 2016).

O desenvolvimento das tecnologias de IoT (principalmente a IoE) em concomitância ao aumento do uso de REDs colocou em evidência o conceito de REIs, onde os clientes passaram a ser parceiros da REI na medida que são produtores, consumidores ou *prosumers* (consumidores que podem consumir e gerar energia). Na REC, entretanto, a empresa concessionária proprietária da rede fornece energia

elétrica a um conjunto fechado de consumidores por meio de várias grandes usinas de energia. Agora, no Brasil, as redes elétricas consistem e estão sendo frequentemente atualizadas com fontes de energias renováveis de pequena e grande escala, como sistemas fotovoltaicos no telhado de residências/empreendimentos ou parques eólicos offshore, em concomitância com as grandes usinas de energia, como as hidrelétricas e termoeletricas, mas ainda não dispõem de controle e dispositivos inteligentes da IoE suficientes para serem chamada de REIs.

Nesses novos mercados de energia, portanto, a rede elétrica é compartilhada entre vários participantes, incluindo aqueles imersos na Indústria 4.0, que contam com diversas tecnologias de IIoT. As indústrias da quarta revolução industrial também podem contar com tecnologias da IoE, mas geralmente sem integração com as tecnologias da IIoT. Todavia, espera-se que a integração entre essas tecnologias possa maximizar os ganhos de eficiência para ambos os setores industrial e energético.

A grande desvantagem desse desenvolvimento é a exposição da infraestrutura da rede elétrica ao público em geral, pois os invasores que encontrarem uma vulnerabilidade podem explorá-la para alcançar muitos usuários/clientes, inclusive as Indústrias 4.0, que podem ter informações cruciais de estratégias de mercado e processos de produção. Portanto, a segurança é um tópico de crescente importância em todos os componentes e protocolos de comunicação usados nessas redes, contudo não será o foco deste trabalho (HIRSCHLER; SAUTER, 2016).

5. ARQUITETURA DE REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Dentro de uma REI, as tecnologias IoT podem ser empregadas e dispostas de diversas formas. Por exemplo, junto com dispositivos (componentes) que realizam a percepção das informações da rede (por meio de sensores, atuadores, medidores, inversores, chaves e outros) e trocam dados entre si ou com servidores utilizando uma arquitetura que propicie a organização de cada etapa de uma REI.

Para facilitar o entendimento de cada etapa de uma REI, existem modelos e estruturas de arquiteturas encontradas na literatura que auxiliam o desenvolvimento e a organização dessas tecnologias dentro de novas REIs. Entre as principais organizações, temos: o GWAC (GridWise Architecture Council), o NIST (National Institute of Standards and Technology), e o SG-CG/RA (Smart Grid Coordination Group – Reference Architecture).

O SG-CG/RA elaborou o SGAM (Smart Grid Architecture Model), um modelo arquitetônico de referência, baseado na estrutura de arquitetura do GWAC e no modelo conceitual do NIST adaptado para o contexto europeu (GWAC, 2008; WIDERGREN *et al.*, 2010; FITZPATRICK; WOLLMAN, 2010; SC-CG/RA, 2012; NIST, 2014; GOTTSCHALK; USLAR; DELFS, 2017). O SGAM oferece suporte para projetos de REI, incluindo diferentes perspectivas e metodologias para implementação. Sendo assim, o SGAM é estruturado em cinco camadas derivadas da pilha de camadas do GWAC (GWAC, 2008; WIDERGREN *et al.*, 2010; SC-CG/RA, 2012; GOTTSCHALK; USLAR; DELFS, 2017).

Considerando-se a arquitetura do SGAM neste trabalho, foram estruturadas cinco camadas para a análise das REIs, sendo: Camada de Negócios; Camada de Função; Camada de Informação; Camada de Comunicação; e Camada de Componente.

A Camada de Negócios descreve a visão de negócios entre os atores da REI por meio de: estruturas regulatórias econômicas e políticas; modelos de negócios e; objetivos de negócio (SANTODOMINGO *et al.*, 2014; USLAR; ROSINGER; SCHLEGEL, 2014; GOTTSCHALK; USLAR; DELFS, 2017). Essas visões necessitam ser desenvolvidas individualmente para cada projeto, como Casos de Negócio, com

objetivos corporativos específicos como reduzir o consumo de energia elétrica por parte dos consumidores ou melhorar a eficiência operacional da rede elétrica.

Na Camada de Função, é possível descrever funções e serviços lógicos (e as relações entre eles de uma perspectiva técnica) derivados da visão da Camada de Negócio. Deste modo, essas funções são independentes dos atores envolvidos e da implementação física em aplicações, sistemas e componentes (SANTODOMINGO *et al.*, 2014; USLAR; ROSINGER; SCHLEGEL, 2014; GOTTSCHALK; USLAR; DELFS, 2017). As camadas de Componente, Comunicação e Informação são utilizadas para cumprir os objetivos da Camada de Negócios por meio da Camada de Função. Exemplos de aplicação da Camada de Função são os sistemas que realizam o controle e a operação dos nós de uma REI.

Por sua vez, a Camada de Informação descreve as informações que estão sendo usadas e trocadas entre funções, serviços e componentes, ou seja, define os tipos e modelos padronizados de dados trocados entre os subsistemas da rede. Esses objetos de informação e modelos de dados representam a semântica comum para funções e serviços a fim de permitir uma troca de informações interoperáveis em meios de comunicação com o objetivo de solucionar o Caso de Negócio (SANTODOMINGO *et al.*, 2014; USLAR; ROSINGER; SCHLEGEL, 2014; GOTTSCHALK; USLAR; DELFS, 2017). Um exemplo prático da aplicação da Camada de Informação são: os tipos de informações requeridas para o relacionamento entre os agentes da distribuição, definidos no Módulo 6 do PRODIST; e o modelo de dados de informação padronizado pela norma IEC 61850 para comunicação entre IEDs (Dispositivo Eletrônico Inteligente - *Intelligent Electronic Device*) da subestação e sistemas supervisórios da (ver item 5.1.7).

A ênfase da Camada de Comunicação é descrever protocolos e mecanismos para a troca interoperável de dados entre componentes, função e objetos de informação ou modelos de dados relacionados, por exemplo, via padrões TCP/IP e PLC (SANTODOMINGO *et al.*, 2014; USLAR; ROSINGER; SCHLEGEL, 2014; GOTTSCHALK; USLAR; DELFS, 2017).

É importante destacar que a Camada de Componentes é a camada mais baixa da arquitetura de uma REI. Esta camada descreve a distribuição física de todos os componentes ao longo da rede. Isso inclui sistemas/componentes, aplicativos, equipamentos do sistema de energia, medidores inteligentes, roteadores de energia,

sistemas de armazenamento, unidades terminais remotas (*Remote Terminal Unit - RTU*), sensores, dispositivos de proteção e tele-controle, infraestrutura de rede e qualquer tipo de dispositivo inteligente (IoT, IIoT, IoE, etc), por exemplo, os IEDs (SANTODOMINGO *et al.*, 2014; USLAR; ROSINGER; SCHLEGEL, 2014; GOTTSCHALK; USLAR; DELFS, 2017). Os IEDs podem ser definidos como qualquer dispositivo eletrônico com alguma inteligência, mas, em ambientes de proteção e controle de subestações de energia elétrica, referem-se aos dispositivos de medição, controle, monitoramento e proteção que contam com inteligência e capacidade de comunicação com os sistemas de supervisão, controle, operação e aquisição de dados da rede elétrica (PETENEL, 2014).

A seguir, será dada ênfase à camada de comunicação que representa um ponto importante neste projeto no processo de integração das REI e da I4.0.

5.1. CAMADA DE COMUNICAÇÃO

É nesta camada que são estruturadas as arquiteturas e protocolos que atendem os requisitos operacionais para compor a rede de comunicação das REIs e efetuar a integração com os protocolos da I4.0. Para isso, é necessário o entendimento do funcionamento das arquiteturas de redes de comunicação e dos protocolos, normas e padrões que podem ser utilizados, pois essa é a camada de maior abrangência e complexidade de operação, devido, principalmente, à interoperabilidade entre a grande variedade de protocolos existentes.

Por exemplo, em Sistemas de Automação de Subestação (*Substation Automation Systems – SAS*), assim como nos sistemas industriais, a existência de diversos equipamentos e protocolos de comunicação de fabricantes e de gerações diferentes pode impossibilitar a interoperabilidade entre os dispositivos da subestação e entre os dispositivos do processo industrial, dificultando ainda mais a integração entre os sistemas elétrico e industrial. Dessa forma, a norma IEC 61850 foi criada como solução para a padronização da comunicação entre os IEDs, os sistemas supervisórios e os dispositivos de aquisição de dados das subestações de energia (PETENEL, 2014).

A seguir, serão abordadas a arquitetura de redes de comunicação (com o entendimento do funcionamento de cada camada da arquitetura) e os protocolos passíveis de utilização em redes sem fio, em automações industriais e em Sistemas de Automação de Subestações.

5.1.1. **Arquitetura de Redes de Comunicação**

Segundo SONG *et al.* (2015), uma arquitetura de redes de comunicação IoT pode ser dividida em três etapas: percepção, rede e aplicação. Na etapa de percepção, ficam os dispositivos como os sensores e atuadores. Na etapa de rede, onde os dados e informações obtidos na etapa de percepção são transmitidos por todo o sistema. Por sua vez, na etapa de aplicação é onde os dados obtidos nas etapas anteriores são processados e tratados por algoritmos de inteligência computacional. Este é um ponto importante, já que as etapas baseadas no conceito de IoT também podem ser aplicadas às REI e à I4.0, tendo em vista que as etapas de obtenção e comunicação de dados são realizadas de maneira similar, como pode ser melhor compreendido nos exemplos a seguir:

- **Em uma Rede de Distribuição Inteligente:** a empresa concessionária de energia pode instalar um Medidor Inteligente em uma subestação de distribuição para realizar a percepção das informações sobre a energia elétrica consumida naquele ponto de conexão e mandar pela rede de comunicação conectada para que sejam realizados operações e controles mais eficientes.
- **Em uma Casa/Indústria Inteligente:** o consumidor pode instalar um Medidor Inteligente para realizar a percepção de informações sobre o seu consumo (em tempo real, diário, mensal, horários de pico, ambientes e dispositivos diferentes, etc.) e enviar as informações pela rede de comunicação conectada para aplicar métodos de eficiência energética por meio de inteligência computacional e sistemas de controle e automação, ou enviar para a própria RDI e disponibilizar essas informações para a concessionária, tornando-se parte da RDI como um componente ativo, ou seja, que passa a se comunicar diretamente com a REI.

Portanto, uma rede comum no contexto da IoT pode ser estabelecida para o atendimento de objetivos específicos e comuns entre a concessionária e a indústria para torná-la um sistema integrado, automatizado, mais flexível e dinâmico.

As etapas de percepção, de rede e de aplicação dessas redes IoT podem ser divididas em camadas de funções. Essa segregação é também utilizada pelo modelo TCP/IP que, por sua vez, é um conjunto de protocolos de comunicação muito utilizado em tecnologias IoT. A Tabela 5.1 mostra os principais protocolos utilizados nas cinco camadas do modelo TCP/IP para redes IoT (DO ESPÍRITO SANTO; ORDOÑEZ; RIBEIRO, 2018).

Tabela 5.1 – Modelos de redes TCP/IP e Protocolos IoT.

CAMADAS	PROTOCOLOS
Aplicação	CoAP e MQTT
Transporte	TCP e UDP
Rede	IPv6 e 6LowPAN
Física e Enlace	IEEE 802.15.4, IEEE 802.11 e IEEE 802.15.1
Todas as Camadas	Z-Wave, Zigbee, LoRaWAN, NB-IoT

Fonte: Autor.

No caso das Camadas Física e Enlace (vide Tabela 5.1), elas contam com uma heterogeneidade de possibilidades para engendrar uma rede, com tecnologias como *Wireless Sensor Network* (WSN), Ethernet, *Power Line Communications* (PLC), *Radio-Frequency IDentification* (RFID), *Digital Enhanced Cordless Telecommunications* (DECT), *Ultra-Wide Bandwidth* (UBW), e *Near Field Communication* (NFC), entre outras (WEYRICH; EBERT, 2015). Entretanto, neste trabalho, abordaremos as possibilidades para a integração da I4.0 e REI por meio de tecnologias sem fio e de Ethernet.

De maneira geral, as redes IoT costumam gerar um ponto central para captura e distribuição de dados e segurança da rede. Dentro dessa generalização, as redes IoT podem ser divididas em redes com restrições (sistemas projetados para dispositivos com recursos limitados) e sem restrições (sistemas projetados para dispositivos de domínio típico de internet), que podem ser engendradas com

diferentes protocolos, conforme o exemplo da Tabela 5.2 (VAN DER WESTHUIZEN; HANCKE, 2018).

Tabela 5.2 – Alguns exemplos de redes IoT.

Tipo de Rede	Protocolo (Camada de Aplicação)	Protocolo (Camada de Transporte)
Sem restrições	HTTP	TCP
Com restrições	CoAP	UDP
Com restrições	MQTT	TCP/UDP

Fonte: Van Der Westhuizen e Hancke (2018).

Na sequência, as camadas do modelo de TCP/IP e os respectivos (e principais) protocolos de comunicação para redes com restrições são abordados e discutidos, assim como os protocolos sem restrições que normalmente são utilizados para a automação na I4.0.

5.1.2. Protocolos IoT - Camada de Aplicação

A Camada de Aplicação tem a função de fornecer uma interface para comunicação fim-a-fim entre as aplicações, ou seja, servir como uma interface entre o dispositivo e o usuário. O CoAP e o MQTT são exemplos de protocolos desta camada para aplicações em redes IoT (ver Tabela 5.1).

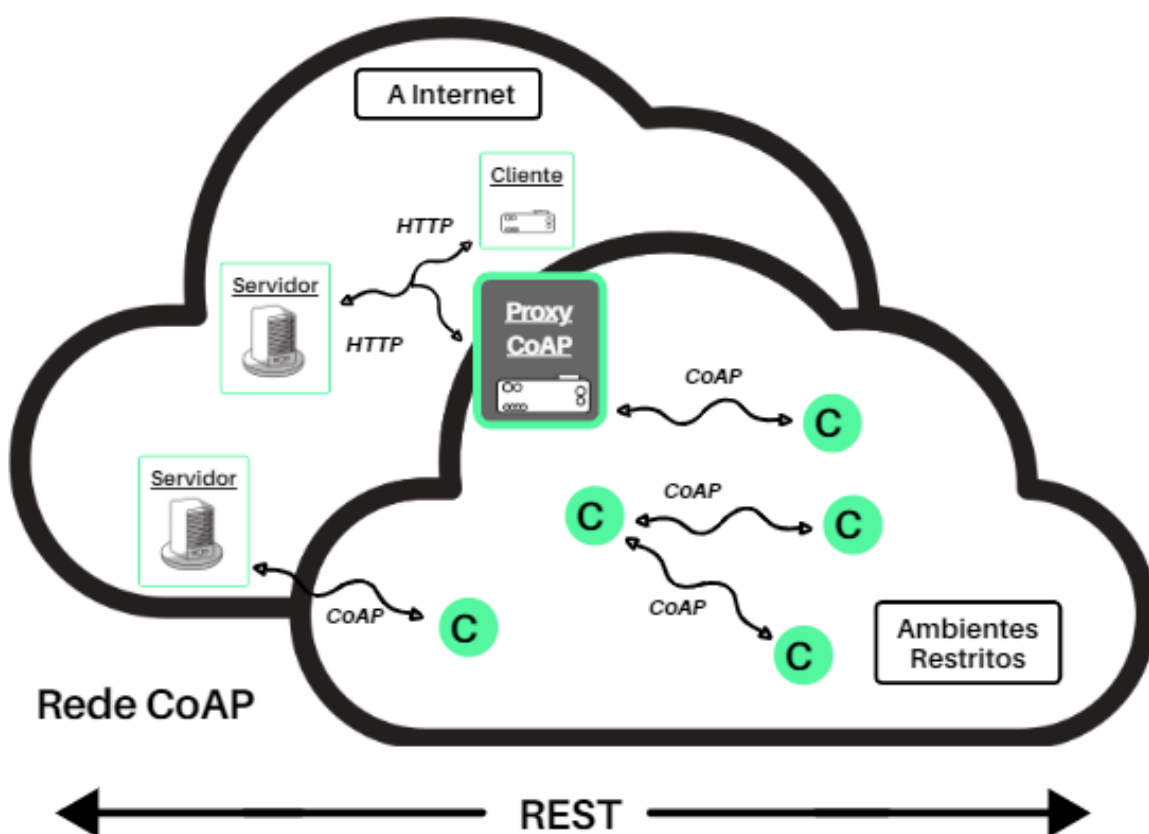
A. *Constrained Application Protocol (CoAP)*

O CoAP, segundo Shelby *et al.* (2014), é um protocolo de transferência para nós e para redes restritas. O CoAP foi desenvolvido para uso em dispositivos IoT e M2M (*Machine to Machine*), com suporte aos métodos de comunicação HTTP – *Hypertext Transfer Protocol* (PUT, GET e outros), URI (*Universal Resource Identifier*), baseado na arquitetura *request-response*, com troca de mensagens assíncronas. No contexto das REI, por exemplo, é utilizado em sistemas de automação de subestações e sistemas de automação da distribuição de energia já que permite a coleta e troca de informações por meio de sensores e atuadores espalhados na rede elétrica com o

intuito de melhorar a coordenação da proteção e a qualidade da energia fornecida (SHIN; SONG; EOM, 2017).

A Figura 5.1 mostra a estrutura de uma rede CoAP, onde os dispositivos “C” (CoAP) se comunicam entre si e com um *proxy* CoAP que retransmite essas informações para o servidor de internet, assim como é possível que dispositivos CoAP se conectem diretamente aos servidores de internet. O protocolo CoAP foi projetado para aplicações M2M que permitem a comunicação em sistemas de energia e a coleta de informações por meio de sensores e protocolos de comunicação para melhorar a qualidade da energia e a coordenação da proteção (SHIN; SONG; EOM, 2017).

Figura 5.1 – Rede CoAP.



Fonte: Autor. Adaptado de Shelby (2014).

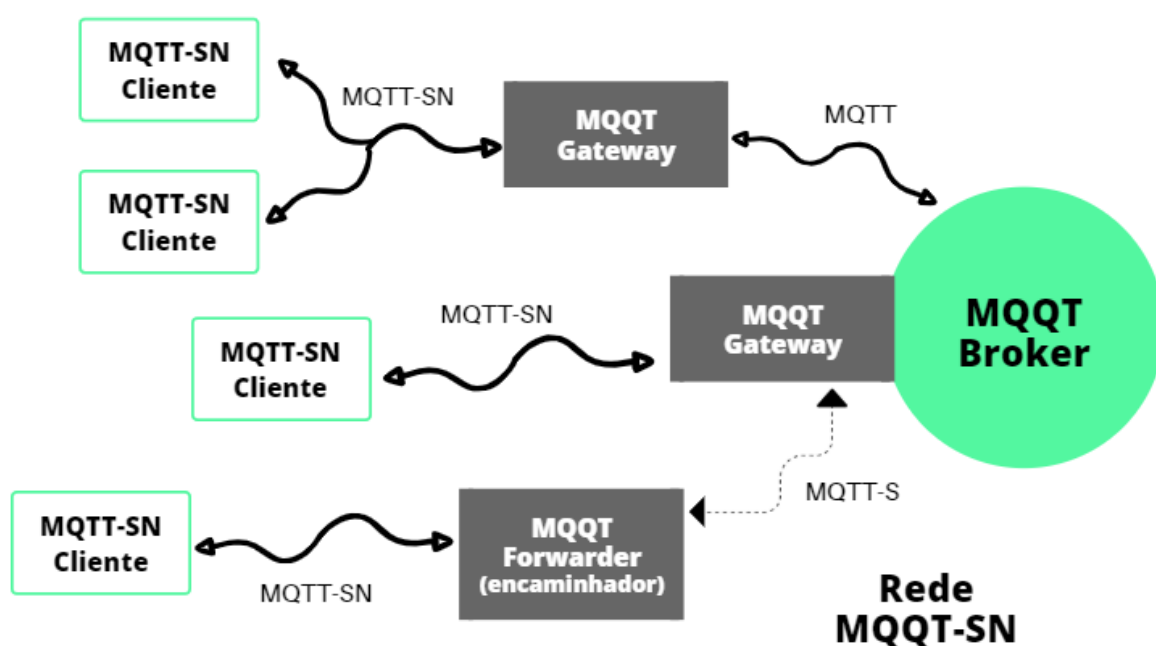
Para a segurança do protocolo, é necessário um protocolo criptografado adicional, que neste caso é aplicado na Camada de Transporte. O protocolo de criptografia comumente utilizado é o protocolo DTLS, que às vezes é implementado em conjunto com IPsec (RAHMAN; SHAH, 2016).

B. *Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)*

O MQTT é baseado na arquitetura *publish-subscribe* (onde cada publicador possui um ou mais inscritos, em um sistema para troca de mensagens de forma assíncrona) que foi projetado para conectar dispositivos e redes com *middlewares* e aplicativos utilizados no desenvolvimento da TI, Web e IoT (GARDAŠEVIĆ, 2017).

Além disso, o MQTT possui outras versões do seu protocolo, como o MQTT-SN, destinado para redes de sensores e dispositivos não baseados em comunicação TCP/IP, como os dispositivos e redes ZigBee (detalhado no item 5.1.6). A arquitetura do MQTT-SN é descrita por Stanford-Clark e Truong (2013), e é composta por MQTT-SN Clientes, MQTT-SN Gateways e MQTT-SN Forwarder, como podemos ver na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Arquitetura de uma rede MQTT-SN.



Fonte: Autor.

Na figura 5.2, os MQTT-SN Clientes se conectam a MQTT-SN Gateways por meio de protocolos MQTT-SN. Se os MQTT-SN Gateways forem independentes ao *Broker*, é usado o protocolo MQTT entre eles. Caso um MQTT-SN Cliente não esteja conectado à rede de um MQTT-SN, é utilizado um MQTT-SN Forwarder, que é um encaminhador que encapsula os dados do MQTT-SN Cliente e encaminha inalterado

para o MQTT-SN Gateway. Desta forma, o MQTT-SN objetiva estender o protocolo MQTT além do alcance da infraestrutura TCP/IP para soluções de sensores e atuadores, oferecendo baixo custo e consumo, mas processamento limitado (MQTT-ORG, 2020; STANFORD-CLARK; TRUONG, 2013).

Existe, ainda, uma extensão do MQTT para melhorar a segurança do protocolo, o SMQTT (Secure MQTT). O SMQTT faz uso de criptografia leve baseada em atributos. Dessa forma, a transmissão da mensagem é criptografada e entregue a vários nós da rede, o que é bastante comum em aplicações de IoT.

C. Discussões

O CoAP apresenta uma solução de implementação leve e de baixo uso de rede devido ao protocolo UDP (*User Datagram Protocol*) (melhor detalhado no item 5.1.3) em sua base. Sendo assim, o CoAP pode ser empregado como solução em aplicações mais leves em sistemas antigos projetados para o protocolo HTTP que não precisam de uma quantidade significativa de recursos para o uso de seus códigos e de rede (RAHMAN; SHAH, 2016; VAN DER WESTHUIZEN; HANCKE, 2018).

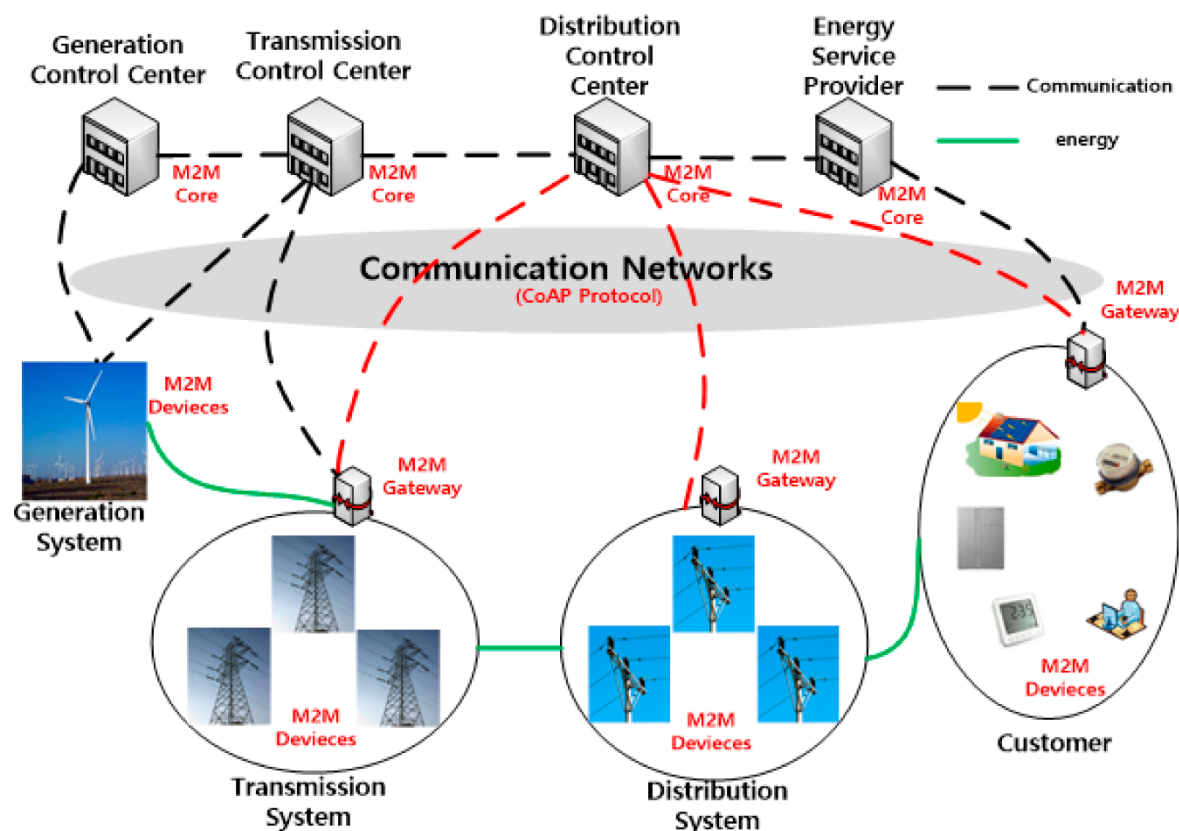
O CoAP é um dos principais protocolos da Camada de Aplicação para redes IoT, sendo melhor empregado, segundo Van Der Westhuizen e Hancke (2018), em redes não sensíveis a latência, baixo consumo e baixa taxa de transferência, porém, segundo Rahman e Shah (2016), mesmo com a vinculação do DTLS junto ao CoAP, ainda há áreas em que o DTLS está ausente, fazendo com que o CoAP possa ficar vulnerável e com a segurança comprometida. Vale ressaltar, ainda, que o protocolo é relativamente “novo” e está em constante desenvolvimento.

Shin, Song e Eom (2017) fizeram a análise da implementação do protocolo CoAP em REIs com o objetivo principal de demonstrar como o CoAP pode funcionar em conjunto com informações de dados de uma IEC 61850, com o objetivo de contribuir com os esforços para identificar as tecnologias em potencial capazes de satisfazer os requisitos de comunicação de futuros sistemas de energia. Nessa análise o CoAP foi utilizado para criar uma arquitetura de comunicação para o ETSI (*European Telecommunications Standard Institute*) baseada em M2M, que foi aplicado dentro de um sistema com padrão de comunicação IEC 61850, que é um padrão de comunicação para sistemas de automação de subestações elétricas, sendo o

protocolo padrão usado em sistemas de subestações digitais e sistemas de distribuição inteligente (SHIN; SONG; EOM, 2017).

A Figura 5.3 mostra o sistema proposto por Shin, Song e Eom (2017), onde os Centros de Controle (*Control Center*) podem ser vistos como domínios de núcleos M2M (*M2M Core*). Os Sistemas de Geração (*Generation System*), Transmissão (*Transmission System*) e Distribuição (*Distribution System*) de energia podem ser vistos como domínios de dispositivo M2M (*M2M Devices*). A linha vermelha pontilhada representa o fluxo de comunicação do sistema de automação da distribuição. O gateway CoAP (*M2M Gateway*) é usado para comunicação entre os Centros de Controle e os Sistemas de Transmissão, os Sistemas de Distribuição e os Clientes (*Customers*).

Figura 5.3 – Aplicação do ETSI utilizando comunicação M2M para Redes Elétricas Inteligentes usando um Gateway CoAP.



Fonte: Shin, Song e Eom (2017).

Segundo Shin, Song e Eom (2017), o *M2M Gateway* baseado em CoAP para a IEC 61850 requer melhorias para uso no sistema de subestação, mas é uma solução

baseada em um padrão muito promissora que pode ser aplicada para integrar objetos M2M heterogêneos.

O MQTT, por sua vez, pode ser executado sobre o protocolo de comunicação TCP (melhor detalhado no item 5.1.3), assim como o HTTP. Porém, é mais adequado para dispositivos de redes IoT (ou com as mesmas restrições) que necessitem de economia de energia, ou para dispositivos de redes de malhas não confiáveis que não são suportados ou adequados para o CoAP (VAN DER WESTHUIZEN; HANCKE, 2018).

Bellido-Outeirino *et al.* (2017) desenvolveram um sistema de gerenciamento de energia residencial, usando a disponibilidade de energia de curto prazo, juntamente com técnicas de resposta à demanda, o sistema controla e programa as principais cargas domésticas, como sistemas de aquecimento, ar condicionado e ventilação, produtos de iluminação, entre outros. O sistema de controle foi projetado de acordo com as últimas tendências e padrões de comunicação M2M, utilizando os protocolos de comunicação MQTT.

O MQTT é um dos principais protocolos da Camada de Aplicação para redes IoT, oferecendo recursos de confiabilidade que podem ser usados para engendrar redes de atuação crítica, como as REI e I4.0.

5.1.3. Protocolos IoT - Camada de Transporte

A Camada de Transporte tem a função de gerenciar e transmitir os pacotes entre as portas de origem e destino, habilitando e protegendo a comunicação dos dados enquanto trafegam entre as camadas. O TCP e o UDP são exemplos de protocolos desta camada para aplicações em redes IoT (ver Tabela 5.1).

A. *Transmission Control Protocol (TCP)*

O TCP é um protocolo de comunicação que realiza o controle de fluxo e congestionamento de dados, por meio da adição de cabeçalhos à mensagem original, e que é mais focado em serviços de conexão, ou seja, serviços que incluem um mecanismo para reconhecer a recepção de dados e verificar a necessidade de uma

retransmissão em caso de perda de dados, mas que gera uma sobrecarga considerada muito alta para as LLN (*Low-Power and Lossy Networks*) de redes sem fio com baixa transferência, não confiáveis, suscetíveis a erros e com tamanhos de quadros restritos, embora muitas tecnologias IoT atuais consigam suportar a sobrecarga de dados requerida pelo protocolo (GARDAŠEVIĆ, 2017; SHAHID *et al.*, 2017).

O TCP dispõe de segurança por meio do protocolo TLS (*Transport Layer Security*), que foi desenvolvido para atuar em conjunto com o protocolo de comunicação TCP. Utiliza-se o TLS para garantir segurança na internet, desde aplicações bancárias até trocas de mensagens instantâneas, porém tem um alto custo computacional para ser implementado, além de uma configuração cuidadosa para fornecer propriedades adicionais relacionadas à privacidade.

B. User Datagram Protocol (UDP)

O UDP é um protocolo de comunicação que é preferencialmente utilizado em conjunto com o protocolo 6LoWPAN (detalhado no item 5.1.4) devido a sua implementação mais leve que outros protocolos. O protocolo foi desenvolvido para transmitir dados pouco sensíveis, tais como fluxos de áudio e vídeo, ou para comunicações “sem conexão”, e possui o cabeçalho mais simples que outros protocolos (SHAHID *et al.*, 2017).

Para a segurança do UDP, o protocolo de segurança DTLS (*Datagram Transport Layer Security*) é o mais adequado. Diferente do TLS, o protocolo de segurança DTLS foi projetado para lidar com datagramas, porém ele foi claramente construído para ser o mais próximo possível ao TLS, tanto para minimizar os esforços com a nova invenção de segurança quanto para maximizar a quantidade de código e reutilização de infraestrutura. A filosofia básica de projeto do DTLS é que ele fosse construído sobre o que já existia no TLS.

C. Discussões

O TCP é muito utilizado para entregar uma grande quantidade de dados por meio de uma conexão de vida longa de ponta-a-ponta, sem latências longas. Apesar

de apresentar alta confiabilidade na entrega dos dados, a eficiência desse protocolo nem sempre é justificável, devido às restrições de energia, a velocidade de transmissão e a latência exigida em algumas redes. Sendo assim, o protocolo TCP pode ser empregado em várias aplicações, mas principalmente em redes que necessitem de conexões de atuação crítica.

Em Shahid *et al.* (2017) foi feita a análise de protocolos da Camada de Transporte em REI, por meio de uma métrica de qualidade chamada de “Probabilidade de Incompatibilidade”, que leva em consideração a ocorrência de eventos nos ativos da REI, e concluíram que para aplicações de tempo crítico, ou seja, aplicações que requerem maior velocidade na transmissão de dados, o TCP pode não ser o mais adequado, pois gera atrasos pela necessidade de retransmissão de dados quando há perda de pacotes na transmissão. Entretanto, são adequados para aplicações que necessitam de confiabilidade na entrega dos dados e não atuem sobre aplicações de tempo crítico.

O protocolo TLS, que fornece segurança ao protocolo TCP, não foi desenvolvido para aplicações de tempo crítico, o que torna, em geral, o seu uso inviável em determinadas aplicações. O TLS também não pode ser usado em ambientes com datagramas por não possuir uma lógica interna que o possibilite lidar com pacotes de dados perdidos ou reordenados, trazendo instabilidade para a rede.

O UDP, por sua vez, envia os datagramas (pacotes de dados de serviços de transporte não confiáveis) de ponta-a-ponta com menor complexidade, menor confiabilidade (não oferece garantia de entrega) e com velocidade de transmissão de dados maior que o TCP. Dependendo do tipo de aplicação, especialmente em casos de conexões não-críticas, o protocolo UDP pode oferecer atrasos mínimos para transmissões de mensagens de tempo crítico em REI, ao custo de um serviço de transporte não totalmente confiável (SHAHID *et al.*, 2017).

O DTLS, que fornece segurança ao UDP, se apresenta como um protocolo para trazer a segurança na comunicação de datagramas pela rede através do protocolo de comunicação UDP, que é menos confiável para a entrega de pacotes, porém permite um fluxo de dados mais rápido, para superar o problema de tempo crítico.

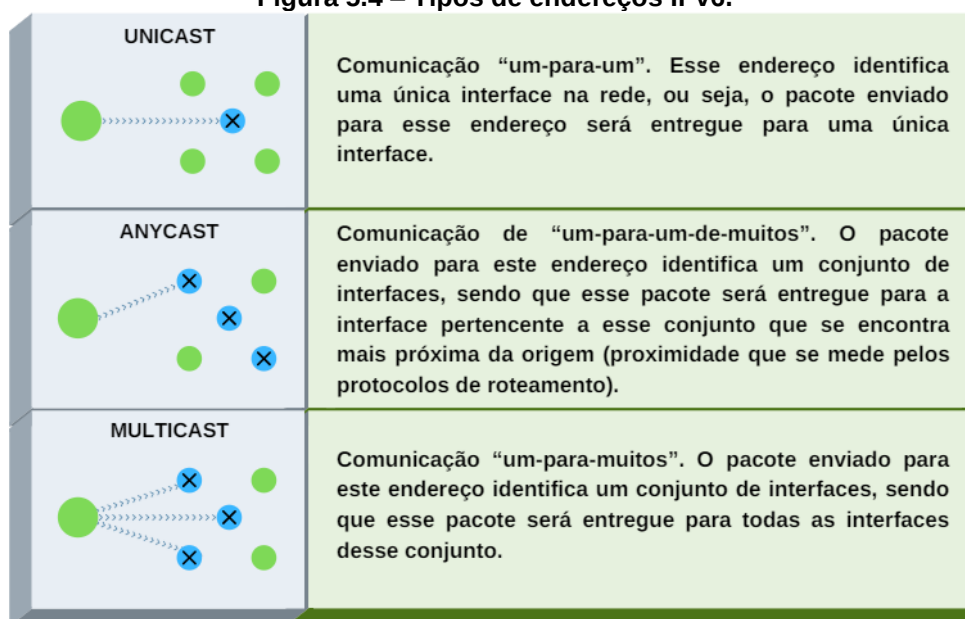
5.1.4. Protocolos IoT - Camada de Rede

A Camada de Rede tem como função rotear os pacotes da rede, definindo as informações de endereçamento, como IP de origem e destino, qualidade de serviço (QoS) e uso de rede, ou seja, ajuda os dispositivos individuais a se comunicarem com o roteador. O IPv6 e o 6LowPAN são exemplos de protocolos desta camada para aplicações em redes IoT (ver Tabela 5.1).

A. Internet Protocol Version 6 (IPv6)

O IPv6 foi projetado pela IETF para fornecer vantagens sobre o IPv4 (*Internet Protocol Version 4*), que disponibiliza aproximadamente $4,3 \times 10^9$ de endereços IP, os quais foram totalmente utilizados ainda em 2015 (FACCIONI FILHO, 2016). Os endereços IPv4 possuem 32 bits divididos em 4 grupos de 8 bits, escritos em dígitos decimais (0-9)¹⁰ (exemplo: 192.168.0.10), enquanto que os endereços IPv6 tem 128 bits divididos em 8 grupos de 16 bits, escritos em dígitos hexadecimais (0-F)¹⁰ (exemplo: 2001:0DB8:AD1F:25E2:CADE:CAFE:F0CA:84C1), o que permite um total de $3,4 \times 10^{38}$ novos endereços IP. Os endereços IPv6 podem ser descritos, ainda, como Unicast, Anycast ou Multicast, assim como pode ser visto na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Tipos de endereços IPv6.



Fonte: Autor.

O IPv6 ainda conta com protocolos que auxiliam na sua segurança e adaptabilidade de operação, como o IPSec (*Internet Protocol Security*) e o 6LowPAN (*IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks*).

B. *Internet Protocol Security (IPSec)*

O IPSec é utilizado como protocolo de segurança para o protocolo IPv6, fornecendo uma solução de encapsulamento seguro para garantir o fluxo de dados autenticados e criptografados. De maneira sucinta, os modos de operação do IPSec são: (i) modo de transporte e (ii) modo de túnel (ELKEELANY, 2002). No modo de transporte é fornecida proteção da camada superior (camada de transporte) e o tráfego vai diretamente para o destino. No modo túnel é fornecida uma proteção IP em túnel (via *gateways*), na qual o tráfego precisa passar por um *gateway* para acessar o destino. O IPSec ainda permite que os protocolos de segurança necessários sejam selecionados e os algoritmos de criptografia determinados pelo sistema. O IPSec tem, ainda, dois protocolos de segurança que podem atuar separadamente ou em conjunto, o (i) Cabeçalho de Autenticação IP (*IP Authentication Header - IPSec AH*) e o (ii) Encapsulamento de Segurança de Carga Útil IP (*IP Encapsulating Security Payload - IPSec ESP*). O IPSec também dispõe de dois tipos de algoritmos de segurança, os algoritmos de criptografia simétrica (por exemplo, *Data Encryption Standard - DES*) e funções unidirecionais de *hash* (por exemplo, *Message Digest MD5* e *Secure Hash Algorithm 1 SHA-1*) (ELKEELANY, 2002).

C. *IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks (6LowPAN)*

O 6LoWPAN é definido pela IETF como uma técnica para aplicar o protocolo IPv6 em Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), do inglês “*Wireless Sensor Network (WSN)*”. É formado por dispositivos que são compatíveis com o padrão IEEE 802.15.4, ou seja, aplicações de curto alcance com baixa taxa de bits, baixo consumo de energia, baixo uso de memória e baixo custo (SHANTHINI; VIJAYAKUMAR, 2012).

Além disso, o 6LoWPAN fornece um nó WSN com recursos de comunicação IP, colocando uma “Camada de Adaptação” acima da Camada de Enlace do protocolo IEEE 802.15.4 para a finalidade de fragmentação e remontagem de pacotes, sendo necessário para que pacotes IPv6 sejam transmitidos em redes de baixo consumo energético (SHANTHINI; VIJAYAKUMAR, 2012).

D. Discussões

O desenvolvimento de dispositivos e aplicações baseadas em comunicação IP aumentou significativamente a quantidade de dispositivos que podem ser integrados às REIs. O IPv6 ainda conta com segurança integrada, mecanismos de qualidade de serviço, suporte para autoconfiguração, e mobilidade (LEE, 2011; WANG; YAN, 2011). O IPv6 utiliza o IPSec e o 6LowPAN para a segurança e adaptabilidade de operação para redes restritas, respectivamente.

O IPSec existe há muitos anos, mas foi desenvolvido para redes de TI nas quais os recursos computacionais e comunicação são abundantes (HIRSCHLER; SAUTER, 2016). Entretanto, depois que o IPv6 se consolidou como camada de rede comum, o IPSec assumiu um certo protagonismo na proteção da comunicação em Redes Inteligentes. Para tanto, Hirschler e Sauter (2016) mediram o tempo de execução de comunicação ponta a ponta do IPSec em todos os modos diferentes de operação, quais sejam:

- IPv6 transmissão simples;
- IPv6/IPSec AH modo de transporte;
- IPv6/IPSec AH modo túnel;
- IPv6/IPSec ESP modo de transporte;
- IPv6/IPSec ESP modo túnel;
- IPv6/IPSec AH/ESP modo de transporte;
- IPv6/IPSec AH/ESP modo túnel;

Concluiu-se que embora o benefício potencial do IPSec e a necessidade de segurança em geral não sejam questionados na discussão recente sobre REIs, cada

recurso de segurança adicional eleva o número de operações criptográficas e consequentemente atrasos na comunicação. Entretanto, além dos atrasos no tempo de execução dos algoritmos de segurança, notou-se uma sobrecarga de pacotes que resulta em aumento da transmissão e também no tempo de processamento dos pacotes. Um pacote IPv6 simples possui um cabeçalho com 40 bytes e, para cada adição de um recurso de segurança, a sobrecarga completa do pacote é aumentada: 72 bytes para IPv6-AH no modo de transporte e até 142 bytes para IPv6 com ESP e AH no modo de túnel (HIRSCHLER; SAUTER, 2016).

O 6LowPAN combina os protocolos IEEE 802.15.4 e IPv6 para torná-los adequados para uma variedade de aplicações de curto alcance com: conectividade contínua com a internet; baixa taxa de bits; baixo consumo de energia; baixo uso de memória; e baixo custo (SHANTHINI; VIJAYAKUMAR, 2012). Tem como principal tarefa comprimir o cabeçalho e a mensagem enviada, diminuindo o custo de transmissão e provendo uma base para que outros protocolos possam ser adicionados nas camadas superiores (de rede, transporte e aplicação) (SHANTHINI; VIJAYAKUMAR, 2012). Cabeçalhos TCP/IP, por exemplo, possuem 128 bytes enquanto IPv6 apenas 40 bytes.

5.1.5. Protocolos IoT - Camada Física e de Enlace para Redes Sem Fio

A Camada Física tem como função tratar os dados (bits) e as funcionalidades de hardware relativas à transmissão em meio físico, ou seja, estabelece um canal de comunicação para que os dispositivos se comunicam entre si.

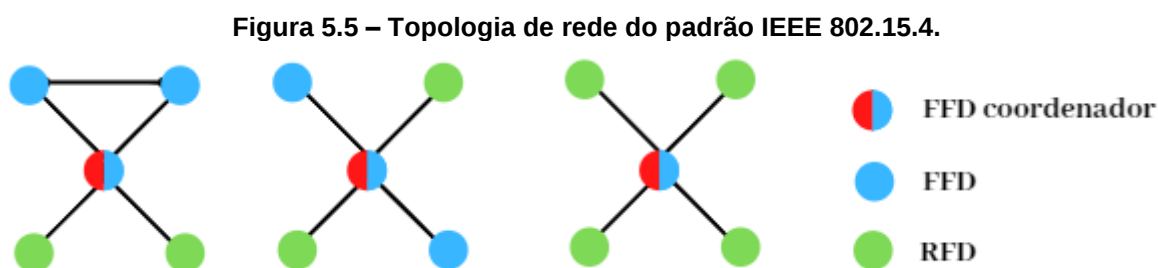
A Camada de Enlace tem como função administrar a transmissão de dados entre os nós da rede (especificando quando os dispositivos podem acessar o canal de comunicação para controlar o sincronismo da rede) e realizar o controle de erros ocorridos na camada Física.

Os padrões IEEE 802.15.4, IEEE 802.11 e IEEE 802.15.1 são exemplos de padrões que os protocolos destas camadas utilizam para aplicações em redes IoT (ver Tabela 5.1).

A. IEEE 802.15.4

O IEEE 802.15.4 é o padrão mais usado nas camadas de enlace e física em aplicações LR-WPAN (*Low Rate Wireless Personal Area Network*) para redes mesh (redes em malha) (SALMAN, 2015). Ele usa sincronização de tempo e salto de canal para permitir alta confiabilidade, baixo custo e atender aos requisitos de comunicação da IoT (SALMAN, 2015). Opera em três bandas de frequência diferentes com taxas de transmissão de 250 kb/s, 40 kb/s e 20 kb/s (operando em 2,4 GHz, 915 MHz e 868 MHz, respectivamente), com alcance de 10-20 metros (LIMA, 2014; KURUNATHAN, 2018). Existem algumas extensões deste protocolo, como o IEEE 802.15.4e, que oferece aprimoramentos na camada de enlace, para melhorar a comunicação de baixa potência (KURUNATHAN, 2018).

A versão original do IEEE 802.15.4 descreve dois tipos distintos de dispositivos, os de função completa (FFD) e de reduzida (RFD). Os FFD são mais complexos e capazes de coordenar uma rede local, eles podem funcionar como repetidor de sinal para os demais. Os RFD possuem aplicações mais simples e com menos recursos computacionais e memória (geralmente sensores, atuadores e demais dispositivos periféricos). A Figura 5.5 mostra as topologias de uma rede do padrão IEEE 802.15.4 composta pelos dispositivos FFD e RFD.



Fonte: Autor.

B. IEEE 802.11

O padrão IEEE 802.11 (protocolo Wi-Fi) também foi desenvolvido para aplicações WPAN possibilitando a comunicação entre *smartphones* e outros dispositivos eletrônicos que operam em frequências de 2,4 a 5 GHz (DAIDONE; DINI;

ANASTASI, 2014). O IEEE 802.11 possui extensões, como o IEEE 802.11 ah e o IEEE 802.11 ax. O primeiro oferece um consumo menor e maior alcance e conectividade, com velocidade de comunicação reduzida (347 Mb/s). Isto permite que se adeque melhor a dispositivos (sensores, motores, etc.) e redes IoT do que sua versão padrão. O IEEE 802.11 ax é utilizado quando há necessidade de grandes taxas de troca de dados (600 a 9608 Mb/s), porém possui consumo maior que outras versões.

C. IEEE 802.15.1

Outro padrão para aplicações WPAN, o IEEE 802.15.1 (protocolo *Bluetooth*) é um padrão de conexão seguro e barato para transferência de dados de forma direta entre dispositivos compatíveis (*smartphones*, *tablets*, *notebooks*, eletrodomésticos, entre outros) com bandas de rádio de frequência de 2,4 GHz (SAMUEL, 2016).

D. Discussões

O IEEE 802.15.4 pode ser integrado às REI em aplicações sem fio com integrações de curtas distâncias. Adicionalmente, melhorias para a camada de enlace com o IEEE 802.15.4e e na camada física com o IEEE 802.15.4g fornecem um suporte mais adequado com uma compensação entre latência e eficiência energética (KURUNATHAN, 2018)

Tanto o padrão IEEE 802.11 quanto o IEEE 802.15.1 têm empregabilidade menor que o IEEE 802.15.4 para implementações de REI em redes WPAN devido principalmente às vantagens do IEEE 802.15.4 em relação a eficiência energética e escalabilidade de rede. Por exemplo, o Wi-Fi possui maior capacidade de trocas de dados em comparação com outras tecnologias sem fio, mas necessita consumir mais energia do que outros protocolos aplicáveis para redes de Internet das Coisas. O *Bluetooth*, por outro lado, é capaz de reduzir significativamente o consumo de energia de dispositivos. Entretanto, o protocolo é limitado no alcance do sinal e no número de dispositivos conectados em sua rede, o que impacta drasticamente sua implementação em REIs.

5.1.6. Protocolos IoT - Aplicações Completas para Redes Sem Fio

Existem também outros protocolos que podem ser implementados em REIs, baseados em implementações completas das camadas de comunicação. O Z-Wave e o ZigBee são exemplos desses protocolos para aplicações em redes IoT de curto alcance, enquanto o LoRaWAN e o NB-IoT são exemplos desses protocolos para aplicações em redes IoT de longo alcance (ver Tabela 5.1).

A. Z-Wave

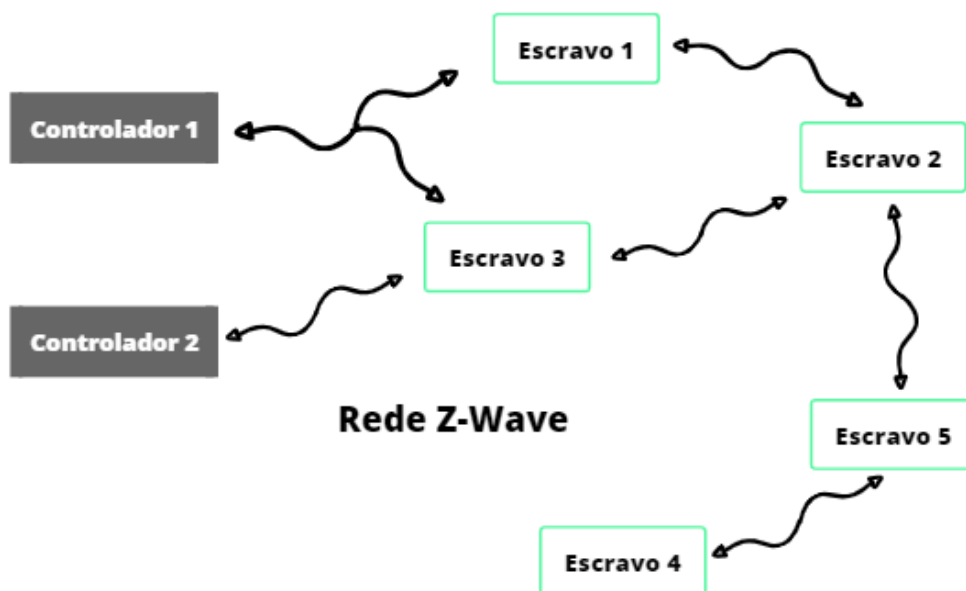
A tecnologia Z-Wave é uma solução de IoT desenvolvida pela empresa Zensys (e posteriormente adquirido pela Sigma Designs) para redes HAN (*Home Area Network*) (LI *et al.*, 2017). As Camadas Física e de Enlace do protocolo Z-Wave seguem o padrão ITU-T G.9959 e permitem formar redes de malha (ITU, 2015). Depois de desenvolvido, algumas empresas adotaram o protocolo e criaram a Z-Wave Alliance, permitindo a interoperabilidade de sensores, atuadores, controladores, roteadores e *gateways* entre os produtos das empresas da aliança, que contam com padrões de segurança internos lançados pela própria Z-Wave Alliance. Os dispositivos que utilizam este protocolo são capazes de fornecer serviços de automação como monitoramento de segurança, gerenciamento de energia inteligente e controle climático (HITO *et al.*, 2019). Em 2016 foi lançado uma versão pública da camada de interoperabilidade do Z-Wave, o que aumentou a quantidade de dispositivos para utilização na rede. As redes Z-Wave podem manipular até 232 dispositivos em redes *mesh*, com alcance de até 100 metros entre os nós da rede em ambientes abertos.

A Figura 5.6 mostra a estrutura de uma rede Z-Wave, onde os controladores enviam os comandos que podem efetuar até quatro “saltos” entre os dispositivos Z-Wave para chegar ao dispositivo de destino.

As redes Z-Wave são compostas de nós de dispositivos controladores (mestres), que iniciam os comandos de controle e também enviam os comandos para outros nós, e de dispositivos escravos, que são os nós que respondem com base no comando recebido e também executam os comandos. Os nós escravos também

encaminham os comandos para outros nós na rede. Isso possibilita que os comandos do controlador “saltem” pelos nós e estabeleçam uma comunicação com os nós que não estão na região de alcance do sinal RF (Radiofrequência).

Figura 5.6 – Rede Z-Wave.



Fonte: Autor. Adaptado de IOT POINT (2020).

B. ZigBee 802.15.4

O ZigBee é uma tecnologia sem fio de baixa potência para redes LR-WPAN (*Low Rate Wireless Personal Area Networking*), que utiliza o IEEE 802.15.4 nas Camadas Física e de Enlace com foco em monitoramento e aplicações de sensores. Além disso, possui compatibilidade com o protocolo IP na sua versão ZigBee IP (ZIGBEE ALLIANCE, 2020). As redes ZigBee podem manipular até 65.000 dispositivos (aproximadamente) e sua comunicação também é feita em redes em malhas, podendo chegar a uma distância de 10 a 100 metros, com um alcance de 1500 metros (aproximadamente) na transmissão sub-GHz.

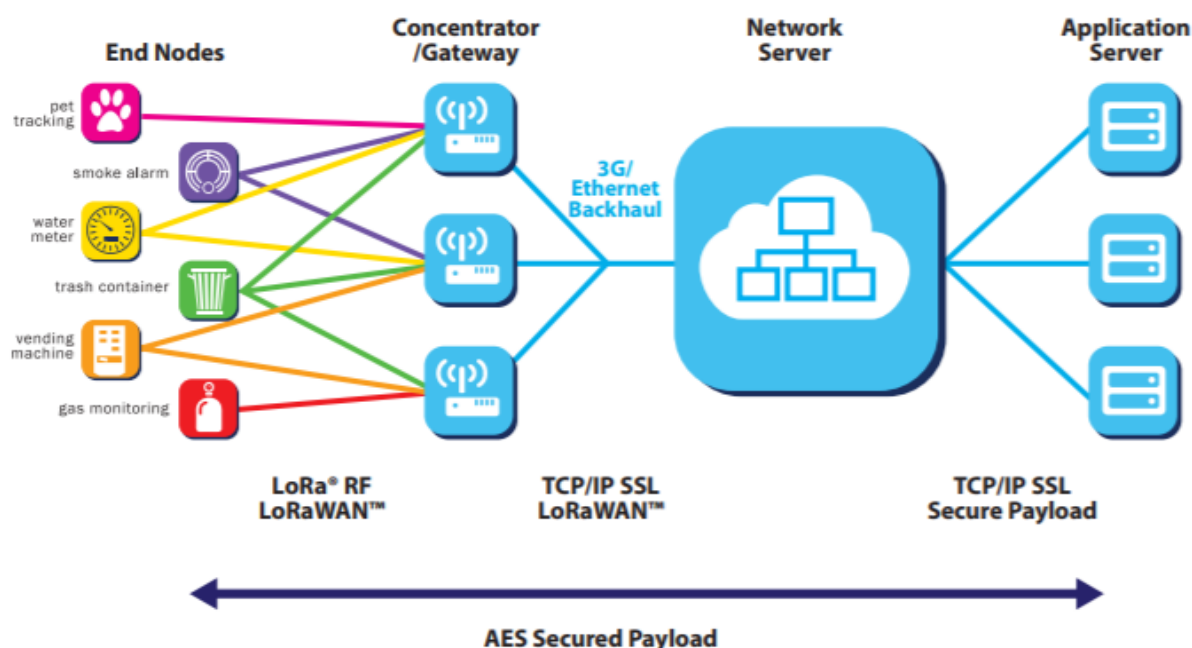
O ZigBee foi desenvolvido como um padrão para ambientes domésticos e de automação industrial, bastante difundido em diversas implementações através de outras versões do protocolo, como o ZigBee 3.0, o ZigBee Green Power, e o ZigBee Smart Energy, entre outros (MARKSTEINER *et al.*, 2017; SAMUEL, 2016;

GARDAŠEVIĆ, 2017; ZIGBEE ALLIANCE, 2020). Tem interoperabilidade menor que o Z-Wave por possuir sua camada de interoperabilidade fechada.

C. *Long Range Wide Area Network (LoRaWAN)*

A arquitetura LoRaWAN, desenvolvida pela LoRa Alliance, utiliza a tecnologia LoRa na camada física para comunicar os dispositivos via gateway LoRaWAN (LORA ALLIANCE, 2015; ZYRIANOFF, 2019). O LoRa é um protocolo de comunicação para redes LPWAN (*Low Power Wide Area Network*), com baixo custo, segurança, e comunicação bidirecional (ZYRIANOFF, 2019). Tem alcance de comunicação de até 20 km em áreas rurais e 4 km em áreas urbanas e suporte para tecnologias redundantes de operação, localização livre, baixo consumo de energia e coleta de energia para suportar as necessidades futuras da rede, permitindo recursos de mobilidade e facilidade de uso (SALMAN, 2015). Uma rede LoRaWAN utiliza bandas não-licenciadas e protocolos abertos e gratuitos, facilitando a sua implementação (BARRO; ZENNARO; PIETROSEMOLI, 2019). O LoRaWAN tem sido usado em aplicações de REI principalmente para infraestruturas de medição remota. A Figura 5.7 mostra a estrutura de uma rede LoRaWAN.

Figura 5.7 – Topologia Rede LoRa.



Fonte: LoRa Alliance (2015).

Na Figura 5.7, os Dispositivos Finais (*End Nodes*) se comunicam em longas distâncias por meio do protocolo LoRa com os Gateways LoRaWAN, que por sua vez concentram as informações e as encaminham para os servidores, caso disponham ou quando dispuserem de conectividade com a internet. Os servidores recebem essas informações e encaminham para as suas respectivas aplicações.

D. **Narrowband Internet of Things (NB-IoT)**

Introduzido pelo 3GPP (*Third Generation Partnership Project*), o NB-IoT, assim como o LoRaWAN, é utilizado para aplicações LPWAN. Porém, o NB-IoT utiliza a infraestrutura de telecomunicação de dispositivos móveis LTE (*Long Term Evolution*) existente em uma banda de frequência licenciada (SUN *et al.*, 2019).

Existem três alternativas para a implantação do NB-IoT: (i) Modo Autônomo, com largura de banda independente alocada para que o NB-IoT não interfira na operação da LTE; (ii) Modo Banda de Proteção, com banda de proteção LTE, que permite ao operador suportar NB-IoT sem exigir novo espectro e com impacto mínimo no LTE; e (iii) Modo Dentro da Banda, que ocupa diretamente uma largura de banda LTE para coexistir com a operação LTE (LIN *et al.*, 2018).

Para obter uma melhor penetração de rádio, recomenda-se operar o NB-IoT em espectros sub-GHz (como 700, 800 ou 900 MHz) (LIN *et al.*, 2018). Ainda, Sun *et al.* (2019) expõe que após analisarem a Camada de Enlace dos protocolos NB-IoT, LoRa, e Sigfox, concluíram que ela é a mais robusta das três.

E. **Discussões**

O Z-Wave possui alta interoperabilidade. Contudo, dispositivos da rede são restritos aos dispositivos com linguagem de programação Z-Wave. Além disso, a instalação de dispositivos Z-Wave próximos evita a necessidade de repetidores de sinais, embora o limite de “saltos” entre os dispositivos seja quatro (SANTOS, 2019). O Z-Wave é ideal para sensores que transmitem pequenas quantidades de informações, e por curtos períodos, como os residenciais, ficando atrás de outros protocolos para aplicações industriais.

O ZigBee perde no quesito interoperabilidade para o Z-Wave, mas compensa com taxas de troca de dados maiores, suporte para mais dispositivos em sua rede, e um alcance de comunicação maior. O protocolo ZigBee tem como base o protocolo IEEE 802.15.4, ou seja, é composto com as mesmas características dos dispositivos FFD e RFD. A instalação dos dispositivos ZigBee próximos evita a necessidade de repetidores de sinal, assim como no Z-Wave. No contexto de REIs, o Zigbee oferece melhor suporte às aplicações.

No LoRaWAN, os dispositivos finais se comunicam em longas distâncias por meio do protocolo LoRa com os Gateways LoRaWAN, que por sua vez concentram as informações e as encaminham para servidores, caso disponham ou quando dispuserem de conectividade com a internet. Os servidores recebem essas informações e encaminham para as suas respectivas aplicações. Para exemplificar, Barro, Zennaro e Pietrosemoli (2019) apresentaram uma solução, de baixo custo e baixo consumo de energia, para interligar locais sem acesso à internet em redes IoT, utilizando uma rede LoRaWAN. Os dados e informações coletados pelos dispositivos finais (nós finais da rede IoT; sem acesso à internet) se comunicam por meio do protocolo LoRa com *gateways* LoRaWAN (neste caso, um Raspberry Pi), que por sua vez mandam as informações para um servidor de rede com algum link baseado em protocolos IP, criando o que os autores chamaram de “Intranet das Coisas”. Caso o *gateway* não disponha de conectividade momentânea ou permanente, os usuários locais ainda podem acessar as informações armazenadas por meio de roteadores WiFi. Ainda, utilizaram na Camada de Aplicação o protocolo MQTT, na Camada de Transporte o protocolo UDP e na Camada de Rede o protocolo IP (IPv4 e IPv6). Portanto, trata-se de uma solução interessante para áreas com difícil acesso à internet ou que necessitem de comunicações entre longas distâncias.

O NB-IoT é uma opção para comunicações a longas distâncias e de baixo consumo que podem operar milhares de dispositivos, embora haja a necessidade da infraestrutura LTE (nem sempre existente) e de uma banda licenciada disponível. Entretanto, devido à escassez de frequências disponíveis no espectro licenciado, a NB-IoT pode não atender a demanda crescente de dispositivos IoT de REI e I4.0, e muitos pesquisadores sugerem que o sistema funcione apenas no espectro não licenciado, assim como o LoRaWAN (SUN *et al.*, 2019). Portanto, considerando as

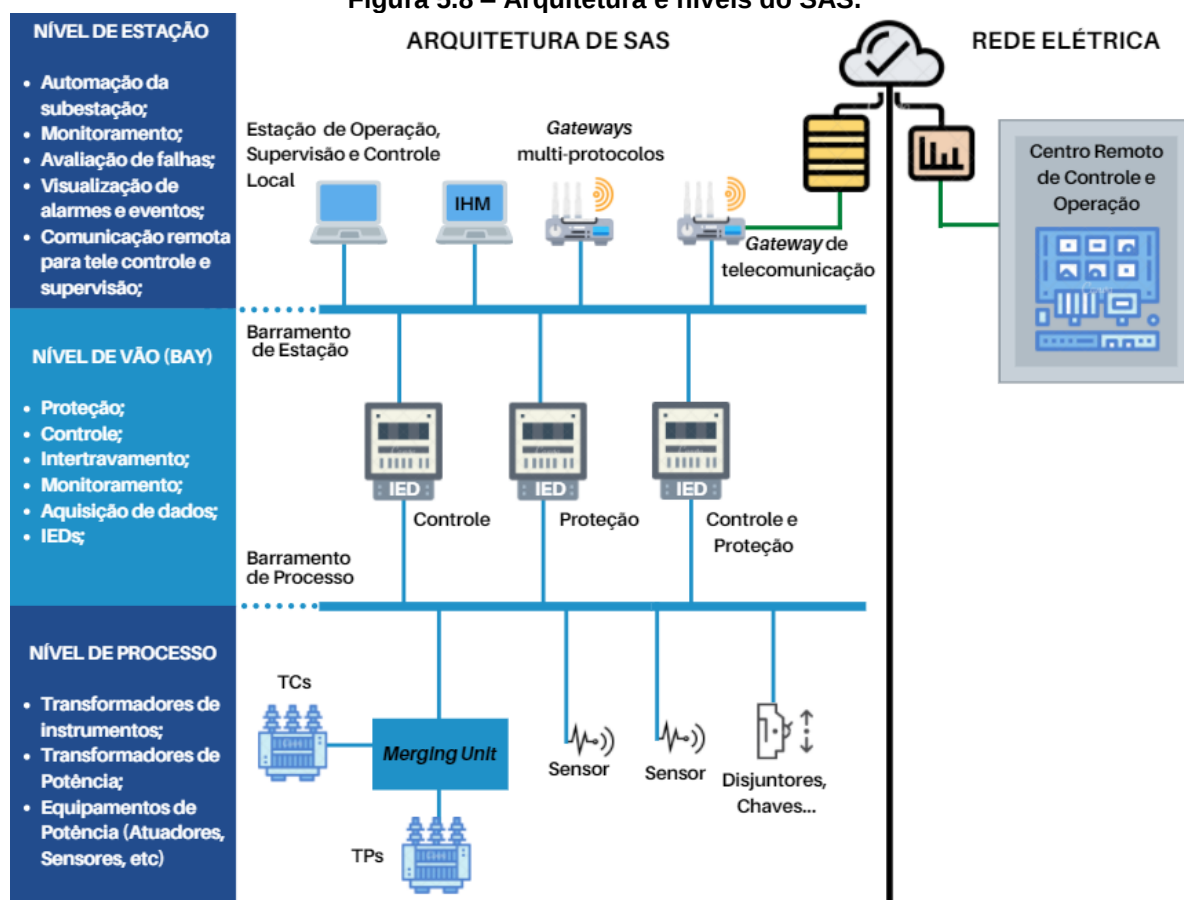
limitações de espectros licenciados, é prevista a extensão da NB-IoT para o espectro não licenciado (NB-IoT-U) (SUN *et al.*, 2019).

5.1.7. A Norma IEC 61850 e os seus Protocolos

A IEC 61850 é a principal norma para comunicações em subestações de energia, criada para padronizar a comunicação entre IEDs, supervisão e dispositivos de aquisição de dados em SAS, por meio de comunicações *full duplex*, ou seja, os dispositivos que estão trocando dados podem transmitir e receber dados simultaneamente. Além disso, a norma também pode monitorar e controlar sistemas de RED. A IEC 61850 possui compatibilidade com alguns protocolos (como os de automação industrial, *e.g.* o PROFINET) que podem ser executados em redes TCP/IP ou redes LAN (Ethernet – IEEE 802.3), definindo um padrão para o desenvolvimento de dispositivos e comunicação entre eles (MACKIEWICZ, 2006).

Para exemplificar como ocorre a comunicação da subestação, a norma definiu três níveis de interface para o SAS: estação, bay e processo (conforme Figura 5.8). O nível de estação é onde ficam os computadores de supervisão local, interfaces homem-máquina (IHM), e equipamentos (*Gateways*) de telecomunicação e multiprotocolos. Os *Gateways* de telecomunicação são os equipamentos usados para a comunicação entre a subestação e o Centro Remoto de Controle e Operação da rede elétrica. Os *Gateways* multiprotocolos, por sua vez, atuam no barramento de estação transformando dados obtidos por meio de outros protocolos em dados IEC 61850. No nível de bay, ficam os equipamentos de proteção e controle (IEDs como relés, reguladores de tap, reguladores de tensão, religadores, etc) da rede. Já no nível de processo, ficam os equipamentos de potência da rede ou do “pátio da subestação” (sensores, atuadores, disjuntores, seccionadores, transformadores de corrente - TCs ou de potencial - TP, etc), responsáveis pelo monitoramento e operação do sistema (MACKIEWICZ, 2006). No nível de processo, nem todos os sensores e atuadores (TCs, TP, disjuntores, chaves etc.) possuem processamento digital e interfaces óticas para comunicação direta com os níveis superiores, por isso a norma padroniza a utilização de *Merging Units*, que são módulos concentradores de entradas/saídas analógico/digital para comunicação com os IEDs da rede (MACKIEWICZ, 2006).

Figura 5.8 – Arquitetura e níveis do SAS.



Fonte: Autor. Adaptado de Petenel (2014) e Pereira Junior et al. (2011).

O SAS e os dispositivos integrantes da IEC 61850 são descritos por meio da linguagem de configuração de subestações (SCL – *Substation Configuration Language*), que é baseada na linguagem XML (*eXtensible Markup Language*) (PETENEL, 2014). A norma padronizou e separou os tipos de mensagens para três protocolos principais: SV (*Sampled Values*), GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*) e MMS (*Manufacturing Message Specification*) (MACKIEWICZ, 2006).

Como em uma subestação nem todos os tipos de enlaces de comunicação devem suportar os mesmos requisitos de desempenho, a norma define as diferentes classes para os tempos de transferências de mensagens para uso em funções de proteção e controle, conforme pode ser visto na Tabela 5.3. De forma complementar, na Tabela 5.4 podem ser vistos os tipos de mensagens e os protocolos padronizados pela norma. Cada tipo de mensagem ainda é dividido em classes de performance e cada uma delas obedece a uma classe de tempo de transferência específica.

Tabela 5.3 – Classes de tempo de transferências e exemplos de aplicação.

Classe de tempo de transferência	Tempo de transferência [ms]	Exemplos de Aplicação: Transferência de
TT ⁰	>1000	Arquivos, logs
TT1	1000	Eventos, alarmes
TT2	500	Comandos de operador
TT3	100	Interações automáticas lentas
TT4	20	Interações automáticas rápidas
TT5	10	Liberações, alterações de estado
TT6	3	Disparos (<i>trips</i>), bloqueios, <i>raw data</i>

Fonte: Autor. Adaptado de Petenel (2014).

Tabela 5.4 – Tipos de mensagens e seus protocolos segundo a norma IEC 61850.

Tipos de Mensagens		Protocolos
1A	Mensagem rápida 1A: <i>Trip</i>	GOOSE
1B	Mensagem rápida 1B: Outras	GOOSE
2	Velocidade Média	MMS
3	Velocidade Baixa	MMS
4	Dados em rajada (<i>raw data</i>)	SV
5	Transferência de arquivos	MMS
6	Sincronização de tempo	SNTP

Fonte: Autor.

Para a pilha de comunicações e serviços, a norma pode adaptar-se ao modelo de redes TCP/IP, dividido em cinco camadas: aplicação, transporte, rede, física e enlace, como mostrado na Tabela 5.5 juntamente com os protocolos da norma IEC 61850.

Tabela 5.5 - Modelo TCP/IP e os protocolos da IEC 61850.

Camadas	Protocolos		
Aplicação	SV	GOOSE	MMS
Transporte	-	-	TCP/UPD
Rede	-	-	IP
Física e Enlace	IEEE 802.3 (Ethernet)	IEEE 802.3 (Ethernet)	IEEE 802.3 (Ethernet)

Fonte: Autor.

Percebe-se pela Tabela 5.5 que os protocolos GOOSE e SV não possuem protocolos em suas camadas de rede e de transporte, pois eles precisam atingir os desempenhos dos tipos de mensagem 1 e 4 que requerem tempos de transferência da classe TT6 (3 ms), enquanto que os tipos de mensagens 2, 3 e 5 possuem requisitos de tempo menos exigentes, possibilitando o uso da camada de transporte e trazendo mais confiabilidade para a entrega das mensagens por meio do protocolo MMS (PETENEL, 2014).

De maneira sucinta, as funcionalidades práticas de cada protocolo da norma e o nível onde ocorre a utilização deles na arquitetura de um SAS podem ser vistas a seguir, conforme ocorre na Figura 5.8.

- **SV:** para tráfego de valores analógicos da subestação, como valores de tensão e corrente. Ocorre entre os níveis de processo e *bay*.
- **GOOSE:** para transferência de dados do tipo *multicast* de alta prioridade como disparos (*trips*) de maneira rápida e confiável entre IEDs. Ocorre no nível de *bay*.
- **MMS:** para serviços de requisição do tipo cliente-servidor, com informações para a estação supervisora. Ocorre entre os níveis de *bay* e estação.

Segundo Araújo (2014), a norma já é aplicada no Brasil por empresas que estão utilizando as trocas de mensagens GOOSE em substituição ao cabeamento convencional entre IEDs de um SAS. Espera-se que, com a aplicação do IEC 61850, seja possível usar o padrão Ethernet em todo o sistema elétrico para melhorar a supervisão do sistema e equipamentos, medições, operação, análise e relatórios da rede, além de possibilitar a integração com o processo industrial em uma única rede de Ethernet.

5.1.8. Protocolos de Automação Industrial no Contexto da Indústria 4.0

A comunicação padrão na automação industrial é, atualmente, baseada em tecnologias RTE (*Real-Time Ethernet*), divididas em 3 classes (A, B e C), conforme

mostrado na Tabela 5.6 (WOLLSCHLAEGER; SAUTER; JASPERNEITE, 2017). As aplicações RTE também fazem parte da Camada de Comunicação da arquitetura de uma REI, evidenciando a importância da Camada de Comunicação para as camadas que envolvem os aspectos informativos e organizacionais de uma REI, quando a gestão corporativa exige que as engenharias de fábrica se conectem às soluções de negócios.

Tabela 5.6 – Classes de protocolos RTE.

CLASSE	A	B	C
Tempo de ciclo	100 ms	10 ms	< 1 ms
Exemplos de implementações Ethernet	Modbus-IDA, Ethernet IP e Foundation Fieldbus (FF);	PROFINET Real Time;	PROFINET IRT, EtherCAT e Ethernet Powerlink;
Padrão	IEEE 802	IEEE 802	IEEE 802 / 802.1 TSN
Modelo de serviço	Best-Effort bridging	Best-Effort bridging with priorities	Best-Effort bridging with scheduling

Fonte: Wollschlaeger, Sauter e Jasperneite (2017) e Soury (2015).

A comunicação das indústrias I4.0, assim como das REIs, pode ser feita por meio de tecnologias cabeadas (geralmente usando a tecnologia Ethernet) e sem fio (por meio de tecnologias que atendam aos requisitos mínimos da Indústria 4.0). O trabalho do *IEEE TSN Working Group* sobre Ethernet TSN (*Time-Sensitive Networking*) promete melhorar os recursos em tempo real no contexto da automação industrial.

No começo da comunicação industrial, os *Fieldbus Systems* foram desenvolvidos para superar as limitações causadas pelo cabeamento paralelo entre sensores, atuadores e controladores. Com o desenvolvimento dos recursos de tecnologias da informação, a comunicação industrial passou a ser feita por meio de abordagens de comunicações Ethernet dedicadas, como PROFINET ou EtherCAT (ver Tabela 5.6), que atendem a requisitos de baixa latência, diferentemente da comunicação Ethernet padrão. Além do mais, a maior parte dos dispositivos adotados são da família de protocolos do IEEE 802 (ver Tabela 5.6) (WOLLSCHLAEGER; SAUTER; JASPERNEITE, 2017).

Para exemplificar as soluções RTE, podemos dividi-las em abordagens baseadas em (ETHERNET POWERLINK, 2016):

- **TCP/IP**: contém mecanismos em tempo real incorporados na camada superior. Essas soluções geralmente têm um desempenho limitado.
- **Ethernet Padrão (*Standard Ethernet*)**: os protocolos são implementados sobre as camadas Ethernet padrão. Essas soluções se beneficiam da evolução da Ethernet sem maiores investimentos.
- **Ethernet Modificada (*Modified Ethernet*)**: a camada Ethernet padrão, o mecanismo Ethernet e a infraestrutura são modificados. Essas soluções colocam o desempenho melhores que a conformidade padrão.

Na Tabela 5.6, podemos ver que as primeiras implementações da Ethernet industrial ocorreram na classe A, onde os serviços em tempo real são realizados na Camada de Transporte, com ciclos aproximados de 100 ms, utilizando *Best-Effort Bridging*. Na classe B, os serviços em tempo real são realizados na Camada de Enlace, com ciclos aproximados de 10 ms, usando abordagens como priorização e marcação de VLAN (*Virtual Local Area Network*) para separar dados em tempo real, usando *Best-Effort Bridging With Priorities*, mesmas tecnologias usadas nos protocolos SV e GOOSE da norma IEC 61850. Na classe C, os serviços em tempo real são realizados modificando também a Camada Física, com ciclos abaixo de 1 ms, utilizando *Best-Effort Bridging with Scheduling*; a clássica Ethernet padrão não é mais utilizada.

Entretanto, para lidar com a crescente diversidade de sistemas IoT sem fio, há a necessidade de novos recursos e investimentos para garantir o mesmo nível de confiabilidade oferecido nas topologias com fio (RTE). Em concomitância a isso, o setor de telecomunicações tem direcionado a sua atenção na automação industrial por ser um campo de aplicação promissor de seus produtos e parece determinado a considerar as necessidades da indústria no desenvolvimento de redes 5G, o que pode levar à unificação, utilizando padrões Web da estrutura das redes industriais para a implementação da IoT e dos SCF (WOLLSCHLAEGE; SAUTER; JASPERNEITE, 2017).

Como solução para as aplicações de Internet das Coisas para redes sem fio, Xu *et al.* (2018) explanam que o 5G foi projetado para atender dispositivos e aplicativos com alta capacidade de rede e taxa de transferência, além de baixa latência, o que encaixa perfeitamente às necessidades da IoT e da Indústria 4.0. Navarro-Ortiz *et al.* (2018), por sua vez, propuseram a integração das redes LoRaWAN e 4G/5G (muito aplicadas em Redes Inteligentes) para aproveitar os benefícios da comunicação LoRaWAN e da infraestrutura de rede fornecida pelo 4G/5G para atender aos requisitos de comunicações massivas do tipo máquina (por exemplo, baixa energia, longo alcance, e baixa largura de banda). Wollschlaeger, Sauter e Jasperneite (2017) afirmam que o 5G é mais do que uma internet móvel, pois integrará diferentes tecnologias facilitadoras (por exemplo, móvel, com fio, satélite e óptico), estruturas regulatórias (por exemplo, licenciadas e não licenciadas) e recursos de capacitação (por exemplo, IoT e SCF).

Para tanto, as aplicações de redes IoT sem fio para automações industriais/elétricas ainda parecem estar em estágio inicial, e, portanto, os protocolos abordados para a automação industrial serão os já consolidados protocolos IIoT RTE.

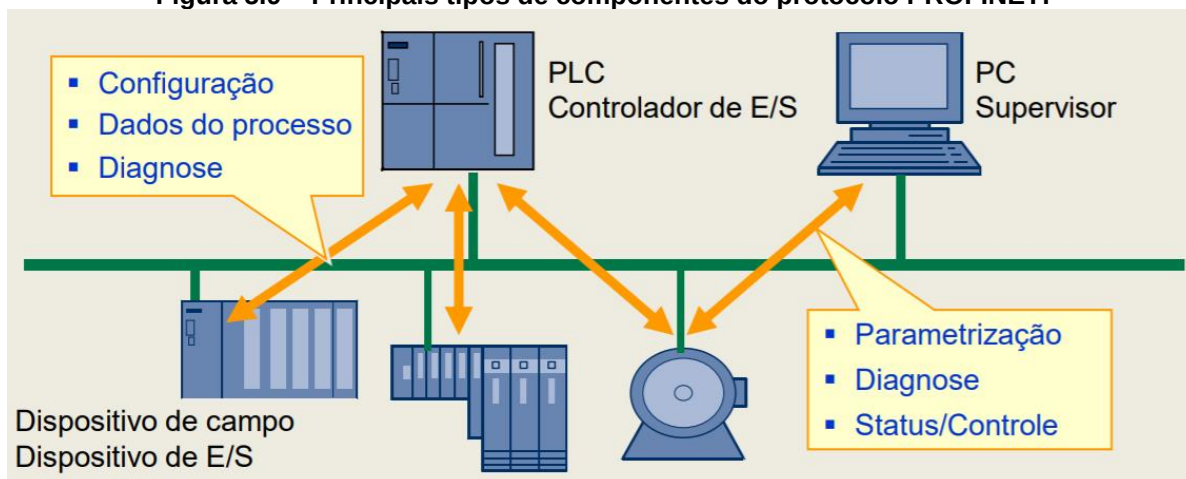
A. PROFINET

O protocolo PROFINET é um padrão aberto de Ethernet Industrial para automação definido pela norma IEC 61784 (PEGAIA, 2010). Segundo Felser, Felser e Kaghazchi (2012) e Fontanelli *et al.* (2013), o protocolo tem dois tipos principais de componentes, os Controladores E/S (Controladores Lógicos Programáveis – CLP, do inglês “*Programmable Logic Controller*” - PLC), que executam programas de controle de automação, e os Dispositivos E/S (dispositivos de campo), que são os sensores, atuadores e módulos de entrada e saída, além do Supervisor E/S (PC Supervisor), que é software normalmente instalado em um PC para definir parâmetros e diagnóstico individuais das unidades E/S, conforme pode ser visto na Figura 5.9.

As comunicações dos dispositivos PROFINET são divididos em serviços de TI e em tempo real efetuados simultaneamente em um só cabo, permitindo também a integração de outras redes industriais de campo por meio de *gateways* (que efetuam a “conversão” de dados de um determinado protocolo em outro). Os serviços podem se adaptar desde aplicações pouco críticas em relação ao tempo a aplicações de alto

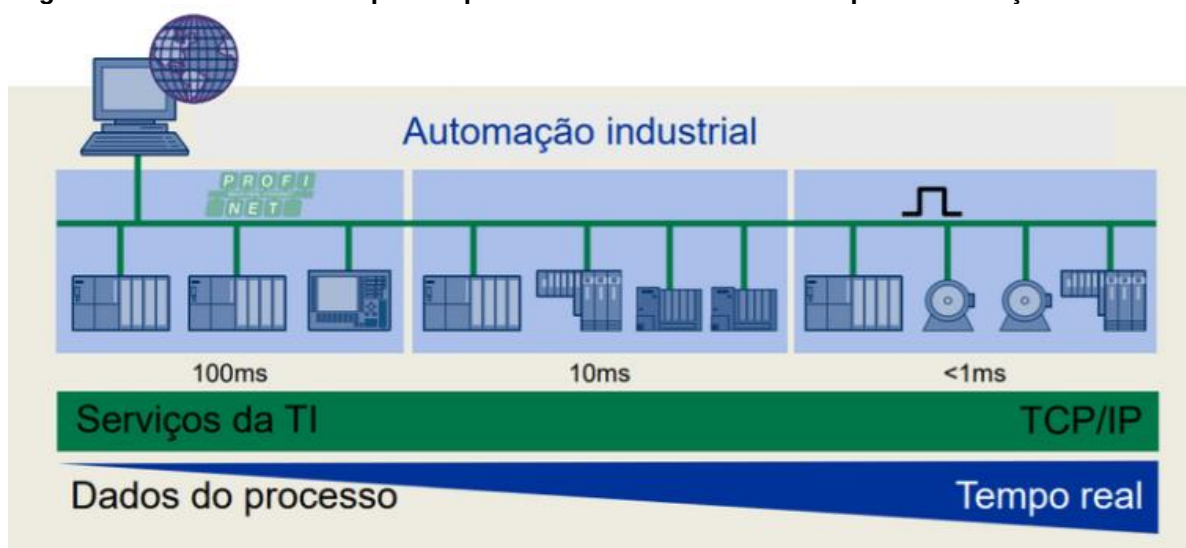
desempenho e tempo crítico, como pode ser visto na Figura 5.10. Para isso, possui comunicação do tipo TCP/IP, RT (*Real Time*) e IRT (*Isochronous Real Time*) com velocidades de até 100 Mbps em um único barramento.

Figura 5.9 – Principais tipos de componentes do protocolo PROFINET.



Fonte: Pegaia (2010).

Figura 5.10 – Diferentes tempos de processamento do PROFINET para automação industrial.

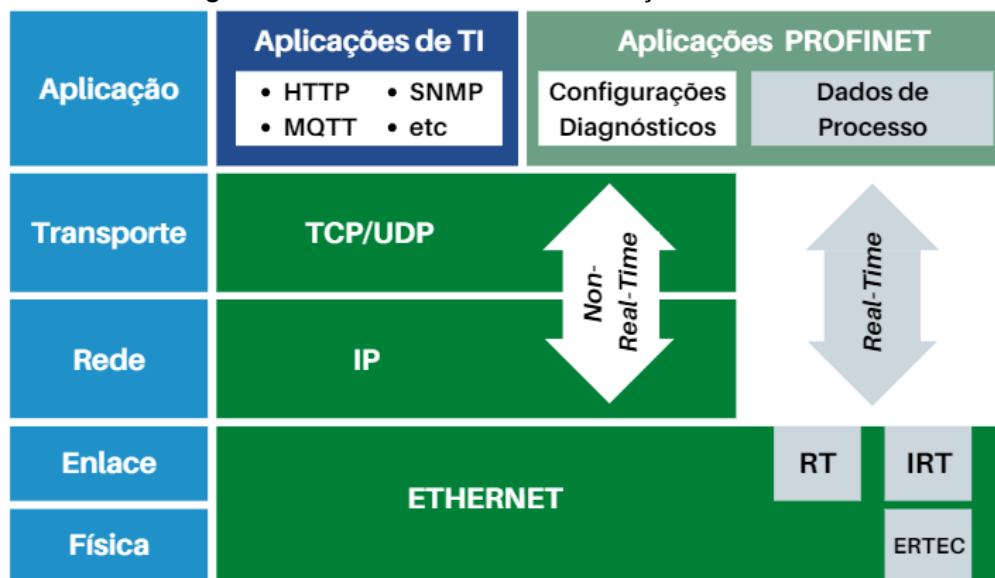


Fonte: Pegaia (2010).

A comunicação do PROFINET baseada em TCP/IP tem tempo de processamento aproximado de 100 ms. A implementação desse tipo de comunicação geralmente é na configuração da rede, diagnósticos ou na comunicação com o *gateway*. Por sua vez, O PROFINET RT possui um tempo de processamento aproximado de 10 ms. A implementação deste protocolo geralmente é na sinalização

de alarmes e eventos, por meio de uma transmissão cíclica de dados de processo (com priorização), realizando a comunicação entre CLPs, dispositivos de campo e PCs supervisores (estações de engenharia e diagnóstico). Tem a característica de interligar a Camada de Aplicação diretamente por meio da Camada de Enlace da Ethernet Modificada, eliminando vários níveis de protocolos, reduzindo o tamanho da mensagem e consequentemente aumentando a velocidade de transmissão das informações na rede (ver Figura 5.11). Já o PROFINET IRT possui tempo de processamento abaixo de 1 ms. A implementação desse tipo de comunicação é geralmente para controle de movimentos (*motion control*) de braços mecânicos de robôs, sincronismo de redes e sincronismo preciso da troca de dados, onde o tempo de atualização das informações deve ser pequeno, por meio de uma transmissão cíclica e sincronizada de dados de processo (com agendamento). Também interliga a Camada de Aplicação diretamente com a Camada de Enlace de Ethernet Modificada, mas conta também com uma Camada Física com suporte por hardware ERTEC (ver Figura 5.11).

Figura 5.11 – Camadas de comunicação PROFINET.



Fonte: Autor.

O protocolo possui vários tipos de topologias que podem ser empregados (anel, árvore, estrela, linhas, etc) para fornecer opções de redundância a rede. Os *switches* do protocolo geralmente estão integrados nos dispositivos, interpretando os telegramas para deixar passar somente aqueles válidos para o sistema e organizando

o tráfego da rede com ordenamento de filas. O alcance do protocolo é de 100 m para equipamentos conectados por cabos de cobre e 26 km para equipamentos conectados por cabos de fibra óptica. Outra característica do PROFINET é a adaptabilidade do protocolo junto a norma IEC 61850.

B. EtherCAT

O *EtherCAT* é um protocolo de automação industrial definido pelas normas IEC 61158-2 e 61784-2, ISO 17545-4 e SEMI E54.20, com o padrão IEEE 803.2 com modificações nas Camadas Físicas e de Enlace, e também oferecendo suporte para comunicações Ethernet TCP/IP tradicional (ROSTAN; STUBBS; DZILNO, 2010; ETHERCAT TECHNOLOGY GROUP, 2020). O protocolo usa comunicações do tipo “mestre-escravo”, mas também há suporte para outros tipos como “produtor-consumidor” e “cliente-servidor”, composto por dispositivos EtherCAT Mestres e EtherCAT Escravos, com segmentos que suportam até 65.535 dispositivos conectados em várias topologias diferentes, gerando uma expansão de rede virtualmente ilimitada (ETHERCAT TECHNOLOGY GROUP, 2020).

A troca de dados/quadro segue o clock do EtherCAT Mestre, sendo o único com permissão para enviar ativamente um quadro EtherCAT. Diferente dos demais protocolos, o EtherCAT tem o seu pacote de dados/quadro processado em tempo real. Os ESC (Controladores EtherCAT Escravos) leem os dados endereçados a eles enquanto o telegrama passa pelo dispositivo, antes mesmo de serem totalmente recebidos.

O EtherCAT ainda possui outras versões, como o EtherCAT P, uma adição ao protocolo original que permite a transmissão de dados de comunicação em concomitância com a tensão periférica por meio de um único cabo Ethernet padrão de quatro fios (ETHERCAT TECHNOLOGY GROUP, 2020). Os protocolos são praticamente idênticos, em termos de tecnologias de protocolo, não sendo necessários novos controladores ESC, pois a adição ocorre diretamente na Camada Física (ETHERCAT TECHNOLOGY GROUP, 2020).

Por fim, O EtherCAT usa o protocolo de segurança *Functional Safety-over-EtherCAT protocol (FSoE)*, divulgado dentro do ETG (EtherCAT Technology Group), com o objetivo realizar uma comunicação segura de dados através do EtherCAT,

sendo usado como um sistema de comunicação de canal único para transferir informações seguras e não seguras.

O protocolo EtherCAT não possui adaptabilidade à norma IEC 61850 por meio do seu *Fieldbus*. A integração das informações entre a norma e o protocolo EtherCAT pode ser feita com a utilização de dispositivos como o RTAC SEL-2240 Axion (Controlador de Automação em Tempo Real Modular) da empresa SEL (*Schweitzer Engineering Laboratories*), por exemplo, que possibilita a integração da comunicação do protocolo GOOSE em *fieldbus* EtherCAT.

C. Discussão

A adaptabilidade à norma IEC 61850 é uma característica importante do protocolo PROFINET pelo fato de possibilitar a integração entre automações de subestações elétricas e automações industriais em um único barramento. Utilizar todos os tipos de comunicação do PROFINET (TCP/IP, RT e IRT) para integrar os processos industriais aos SAS (que utilizam a norma 81850) pode melhorar o tempo de resposta do sistema, aumentar o número de redundâncias no sistema, e minimizar os custos operacionais e de equipamentos da rede, utilizando um único barramento. Há certa “similaridade” nos aspectos constitutivo das camadas de arquitetura e na velocidade da transmissão entre o PROFINET utilizando o canal de comunicação TCP/IP e o protocolo MMS (da norma IEC 61850) e entre o PROFINET RT e o protocolo GOOSE da norma IEC. O PROFINET IRT não possui “similaridade” com nenhum protocolo da norma IEC 61850, ou seja, aparentemente a norma não adota comunicações do tipo com sincronismo e tempo de transmissão abaixo de 1 ms (ver Tabela 5.1), mas isso não deixa de ser uma possível melhoria de implementação para a norma.

As soluções RTE são baseadas na Ethernet Modificada (*Modified Ethernet*), com Camadas de Enlace especiais. Os protocolos da classe C contam também com hardwares especiais na Camada Física, como no caso dos protocolos PROFINET IRT e EtherCAT, capazes de agendar a transmissão de pacotes e gerenciar o tráfego de dados de acordo com diferentes requisitos de prioridade no nível do aplicativo, usando PTCP (*Precision Transparent Clock Protocol*) e HPCS (*High Precision Clock*

Synchronization), por exemplo, para propagar o tempo de referência do mestre de sincronização para todos os nós da rede (FONTANELLI *et al.*, 2013).

O PROFINET IRT, por exemplo, usa *switches* sincronizados para controlar a comunicação, fornecendo tempos de ciclos sincronizados com *clocks* abaixo de 1 ms, conforme necessário para aplicações de controle de movimento, implementando um modo multiplexado por tempo com base em *switches* sincronizados por *hardware* especialmente gerenciados.

O PROFINET ainda dispõe da tecnologia PROFIENERGY que, sem precisar de *hardware* adicional, analisa os dispositivos conectados por PROFINET e verifica se há consumo no dispositivo. Se não houver consumo, ele reduz a energia até um nível onde o dispositivo permanece ativo, mas com consumo mínimo de energia, ajudando a reduzir o consumo médio da instalação. Adaptar essas funcionalidades aos dispositivos do processo industrial e aos dispositivos do SAS com certeza seriam um excelente benefício dessa integração.

Por outro lado, o protocolo EtherCAT não dispõe de suporte padrão para utilização da norma IEC 61850, o que dificulta a integração de redes industriais EtherCAT com redes elétricas de SAS. Em caso de necessidade da rede industrial implementar soluções com protocolos EtherCAT, uma das soluções poderia ser a utilização de *gateways* instalados na rede industrial principal (e.g. PROFINET com suporte padrão a norma IEC 61850).

Segundo o ETG (*EtherCAT Technology Group*), a interface para um dispositivo EtherCAT Mestre possui um único requisito de hardware: uma plataforma com uma porta Ethernet disponível. O EtherCAT Mestre usa um controlador Ethernet integrado ou uma placa de rede padrão, sem nenhuma placa de interface especial necessária (ETHERCAT TECHNOLOGY GROUP, 2020). Isso significa que com apenas uma porta Ethernet padrão, um dispositivo mestre pode implementar uma solução de rede em tempo real, independente de qual sistema operacional ou software aplicativo é usado (ETHERCAT TECHNOLOGY GROUP, 2020). Por outro lado, os dispositivos EtherCAT Escravos usam controladores (ESC) na forma de um ASIC, FPGA ou integrados em um microcontrolador padrão (ETHERCAT TECHNOLOGY GROUP, 2020). Dispositivos escravos simples nem precisam de um microcontrolador adicional, porque entradas e saídas podem ser conectadas diretamente ao ESC. Para dispositivos escravos mais complexos, o desempenho da comunicação depende

apenas minimamente do desempenho do microcontrolador e, na maioria dos casos, um microcontrolador de 8 bits é suficiente.

Os dispositivos EtherCAT possuem velocidade de interpretação melhor que os dispositivos Ethernet padrão, pois ao contrário de interpretar pacote a pacote, ela interpreta os frames Ethernet sem parar. Por fim, o EtherCAT é uma tecnologia adequada para requisitos de tempo crítico em automações, medições e algumas outras aplicações (ETHERCAT TECHNOLOGY GROUP, 2020).

O EtherCAT P, por sua vez, pode usar a mesma rede do EtherCAT padrão, sendo interessante para partes de máquinas independentes (fornecendo dados e energia em um mesmo cabo stub) e sensores de todos os tipos (conectando-os à tensão de alimentação e à rede de alta velocidade por meio de cabos M8) (ETHERCAT TECHNOLOGY GROUP, 2020).

6. ANÁLISE DE INTEGRAÇÃO DE REI E I4.0

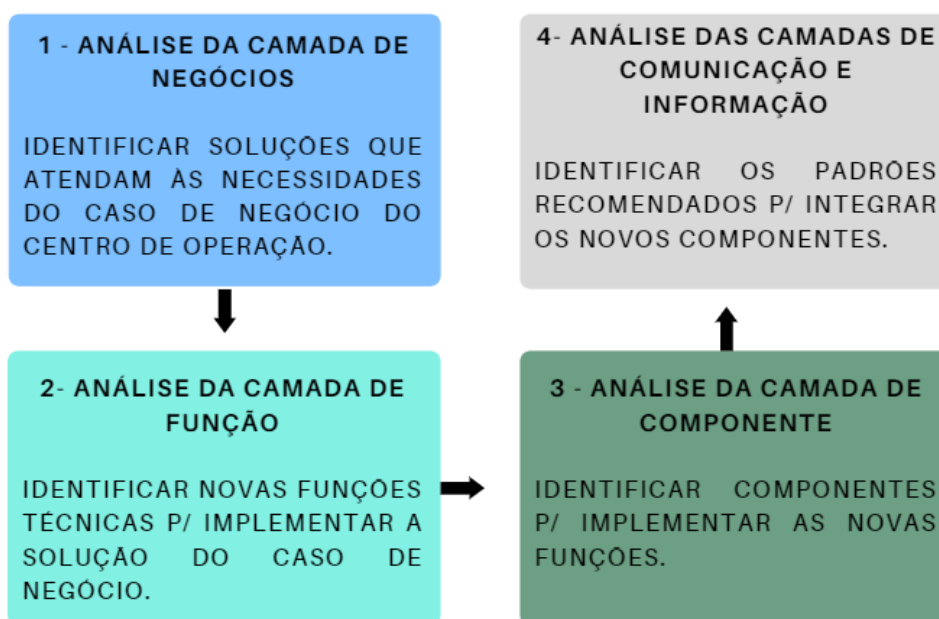
As informações adquiridas sobre as redes IoT podem ajudar a obter não somente uma rede elétrica mais eficiente e resiliente, como também criar as condições necessárias para a implantação e execução da Indústria 4.0 no setor industrial. A continuidade dos processos produtivos e a qualidade dos produtos e serviços oferecidos, por exemplo, pelos consumidores industriais, têm ligação direta com o fornecimento de energia elétrica, cujo papel é desempenhado principalmente pelas empresas concessionárias de energia. Sendo assim, a falta de energia elétrica ou quando fornecida com baixa qualidade (fora dos limites estabelecidos pelos órgãos reguladores) resulta em perdas monetárias em diferentes setores, ou seja, para todo o setor industrial, para as empresas concessionárias de energia e, conseqüentemente, para toda a sociedade (por exemplo, pelo aumento da tarifa de energia).

Segundo Santodomingo *et al.* (2014), a utilização e análise da arquitetura de uma REI ajuda o Centro de Operação (CO) da rede elétrica a identificar as soluções que devem ser implementadas no sistema. Essa análise também permite definir os requisitos dos novos componentes que devem ser instalados para implementar uma nova solução ou funcionalidade. Cada nova solução buscada pode ser chamada de um novo “Caso de Negócio”.

Desse modo, neste trabalho, é proposto um modelo de processo para análise da arquitetura da REI e para a implementação de um Caso de Negócio, que pode ser visto na Figura 6.1. Seguindo o passo a passo da Figura 6.1, para implementar uma nova solução na REI (o Caso de Negócio - CN), o CO atua na Camada de Negócios por meio da identificação das necessidades da rede elétrica. Por exemplo, caso o CO esteja interessado em soluções cujo objetivo é “melhorar a flexibilidade da rede elétrica”, em outras palavras, fazer com que os consumidores ora atuem como carga ora atuem como fornecedores de energia elétrica distribuída (para caso de *prosumers*), o CO escolhe um modelo que inclua esse objetivo na Camada de Negócios. Com isso, os Casos de Negócio são situações com modelos e projetos específicos de negócios que podem ser inseridos no contexto da rede elétrica.

No exemplo do CN sobre “melhorar a flexibilidade da rede”, ocorre a integração entre as RDI, os RED e os consumidores, para que o CO possa utilizar “cargas flexíveis” no balanço de seus interesses e do consumidor individual por meio de tecnologias da IoE. O sistema de armazenamento de energia é um exemplo dessas tecnologias (LIN *et al.*, 2017). Ao utilizar “cargas flexíveis”, que são cargas que atuam como *prosumers*, o operador da rede pode atrasar investimentos na infraestrutura da rede elétrica e reduzir o impacto ambiental ao mesmo tempo em que o consumidor pode se beneficiar ao obter incentivos (e.g. sendo recompensado pelo fornecimento de “flexibilidade” à rede). Na micro e minigeração distribuídas, acontece algo parecido desde que entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, na qual o consumidor brasileiro passou a poder gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada, inclusive fornecendo o excedente à rede de distribuição local, e criando créditos em energia com a concessionária para serem usados posteriormente na mesma unidade ou em outras de mesma titularidade.

Figura 6.1 – Procedimento para análise da REI e implementação do Caso de Negócio.



Fonte: Autor.

Portanto, com a constante modernização do SEB e a entrada de novos serviços na rede elétrica (por exemplo, o carregamento de VEs), o consumidor industrial teria as condições necessárias para a modernização do seu setor com tecnologias da IoT (especialmente IoE e IIoT) que o permitiriam assegurar a continuidade e a resiliência

dos seus processos produtivos, assim como melhorar os serviços da REI. Nesse sentido, a norma IEC 61850 facilita o processo de padronização para efetivar essa modernização do setor elétrico.

A segunda etapa apresentada na Figura 6.1 acontece depois de identificar o CN. Com isso, o CO encontra na Camada de Funções quais funções técnicas devem ser adicionadas em seus sistemas para a implementação da nova solução. Se um CN analisado pelo CO, por exemplo, incluir a função “Desequilíbrios” e a rede atual não possuir nenhum componente com capacidade de detectar desequilíbrios na rede, o CO deve identificar quais novos componentes (dispositivos ou aplicativos de software) são necessários para a implementação desse CN por meio da Camada de Função, ou seja, por meio do sistema que realiza a gestão e o controle dos recursos energéticos distribuídos.

No caso de um CN “Desequilíbrios”, um dispositivo eletrônico inteligente colocado na zona de atuação da rede pode realizar a averiguação dos desequilíbrios depois que o CO, por meio da Camada de Função, identifica quais são os requisitos dos novos componentes que devem ser adicionados aos seus sistemas, a fim de implementar uma nova funcionalidade que ajudará o CO a atender às suas necessidades de negócios.

Como caso de exemplo, no dia 03 de novembro de 2020, o estado do Amapá sofreu um apagão em 13 dos seus 16 municípios (G1, 2020). No dia 08 de novembro de 2020, após 5 dias, a distribuição de energia elétrica foi restabelecida parcialmente com racionamento de energia entre as localidades do estado, incluindo os bairros da capital Macapá (G1, 2020), e somente em 24 de novembro o fornecimento foi regularizado (G1, 2020). Para um CN com objetivo de “Retomar ou priorizar o fornecimento de energia elétrica para os consumidores industriais”, sem contar com tecnologias IoE de REI em sua rede, o CO não pôde programar o sistema para que o racionamento fosse efetuado de forma automatizada e eficiente, priorizando cargas especiais como hospitais, serviços públicos, ou consumidores industriais (se fosse o caso). Logo, todas as indústrias dependentes exclusivamente do fornecimento de energia da rede elétrica de distribuição tiveram os seus processos produtivos interrompidos.

No exemplo de racionamento ocorrido no estado do Amapá, todas as indústrias locais que não contavam com componentes de geração própria tiveram os seus

processos produtivos completamente interrompidos por pelo menos 5 dias, e de forma parcial até a resolução do problema por mais de 22 dias. Percebe-se, neste caso, que os componentes identificados pela Camada de Função que deveriam entrar na rede para cumprir os objetivos do CN “Retomar ou priorizar o fornecimento de energia elétrica para os consumidores industriais” seriam componentes que possibilitariam a geração própria (GDs, microrredes, etc) juntamente com sistemas de armazenamento de energia elétrica próprios (ou distribuída). Sem estes elementos da Camada de Componente, terceiro passo da Figura 6.1, o sistema de gestão e controle que está sendo operado pelo CO na Camada de Função não pode atuar para resolver o CN “Retomada do fornecimento para as unidades industriais” da Camada de Negócios.

Destarte, percebe-se a importância dos consumidores que ofertam flexibilidade de carga à rede, atuando como prosumidores (*prosumers*) de energia, pois o CO, sem maiores investimentos na rede, poderia utilizar a geração desses prosumidores (quando excedente) para tentar minimizar os efeitos do apagão para áreas prioritárias de fornecimento, como hospitais e até mesmo indústrias. Este é um caso prático das vantagens das agências reguladoras (no caso brasileiro, a ANEEL) incentivarem os consumidores industriais a modernizarem suas instalações com tecnologias IoT (IoE e IIoT), e assim melhorar a robustez e funcionamento do setor industrial e da rede elétrica de forma conjunta e mancomunada.

Este é um exemplo interessante porque sempre que se fala em modernização da infraestrutura das REC para as REI surge o questionamento de quem arcará com os custos. Percebe-se que existem soluções funcionais com benefícios tanto para consumidores como para a concessionária.

6.1. CAMADA DE INFORMAÇÃO

Neste trabalho, é dada ênfase na etapa quatro do procedimento apresentado na Figura 6.1. Para cada novo componente, o CO analisa na Camada de Informação quais informações esses componentes devem intercambiar (requisitos funcionais). Além disso, o CO pode encontrar no CN quais são os requisitos não funcionais associados a esses novos componentes. Exemplificando: os dispositivos de campo instalados na rede devem receber medições de tensão e corrente da rede e enviar

informações sobre harmônicos e desequilíbrios para um concentrador de dados (*Merging Unit*) ou IED. Porém, existe a hipótese de que o padrão recomendado para permitir essas trocas de informações seja o IEC 61850 e que o dispositivo deva atender a alguns requisitos adicionais em termos de qualidade de serviço, como “tempo de resposta decorrido de 1–4 milissegundos, utilizando o protocolo SV”. Logo, esses são os requisitos não funcionais associados aos novos componentes.

Nesse sentido, o Módulo 4 do PRODIST, na seção 4.1, trata sobre os procedimentos e requisitos para o fornecimento de informações de carga e de despacho de geração por parte dos acessantes para as distribuidoras. Esse documento fornece os procedimentos de operação dos sistemas de distribuição para que as distribuidoras e demais agentes formulem os planos e programas operacionais, incluindo previsão de carga (ANEEL, 2009).

Para o caso da integração das informações entre o consumidor industrial e a concessionária, o Módulo 6 do PRODIST, na sua Seção 6.2, define as informações que devem ser trocadas entre os agentes e entidades setoriais da rede com o intuito de criar as condições favoráveis para análise dos demais módulos do PRODIST, como o Módulo 2 do PRODIST - Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição, que define os requisitos mínimos e critérios básicos para a troca de informações entre os agentes envolvidos para estudos de planejamento do sistema de distribuição. Para isso, na seção 6.2 do Módulo 6 do PRODIST, fica estabelecido que os dados que o consumidor deve fornecer à distribuidora para o planejamento da expansão do sistema de distribuição são referentes às previsões de demanda, ou seja:

- Posicionamento das cargas no sistema de distribuição;
- Cargas existentes;
- Curva de carga típica;
- Previsões de crescimento da demanda; e
- Antecipação de novas cargas.

Caso uma indústria conte com uma Central de Geração Distribuída (CGD), ou seja, que detém instalações de geração de interesse restrito ou não. Para as CGDs, fica estabelecido que as informações disponibilizadas para a distribuidora são

referentes aos Sistemas de Distribuição de Alta Tensão (SDAT), Média Tensão (SDMT), Baixa Tensão (SDBT) e Subestação de Distribuição, sendo:

- Capacidade (MVA);
- Capacidade de suprimento de potência reativa (Mvar);
- Geração de energia e demanda;
- Capacidade de operação sem interrupção;
- Variações de tempo e frequência;
- Desbalanceamento de fases;
- Equipamentos de proteção;
- Sistemas de controle;
- Equipamentos de comunicação
- Respostas a perturbações;
- Níveis de distorção harmônica; e
- Compatibilidade com as normas pertinentes;

Já para as Distribuidoras, fica definido que as informações disponibilizadas para os Acessantes são sobre os estudos dos casos de referência (critérios, dados e resultados) do planejamento do SDAT quando solicitado, em outras palavras, versa sobre o planejamento do conjunto de linhas e subestações que conectam as barras da rede básica ou de centrais geradoras às subestações de distribuição em tensões típicas iguais ou superiores a 69 kV e inferiores a 230 kV, ou instalações em tensão igual ou superior a 230 kV quando especificamente definidas pela ANEEL (ANEEL, 2018a).

O Módulo 6 do PRODIST, na Seção 6.2 também define as informações que devem ser trocadas entre os agentes conforme definidas no Módulo 3 do PRODIST - Acesso ao Sistema de Distribuição. Nesse diapasão, todo Acessante deve informar à Distribuidora informações preliminares para a Consulta de Acesso quando necessário. O detalhamento das demais informações depende do tipo, porte e nível de tensão das instalações do Acessante. As informações fornecidas por centrais de geração distribuída e Unidades Consumidoras às Distribuidoras podem ser vistas no Anexo B

deste trabalho. Outras informações mais específicas podem ser encontradas na Seção 6.2 do Módulo 6 do PRODIST.

Sobre as informações que devem ser trocadas entre os agentes da rede para a realização dos procedimentos operativos, definidos no Módulo 4 do PRODIST – Procedimentos Operativos, o Módulo 6 do PRODIST, na Seção 6.2 também define as informações necessárias à coordenação do planejamento das operações de curto, médio e longo prazo, incluindo a previsão operacional da demanda, planejamento das interrupções programadas, planejamento de contingências e informações a serem trocadas em tempo real. As informações estabelecidas que o consumidor deve fornecer à distribuidora quanto ao seu cadastro podem ser vistas no Anexo C, assim como as informações em tempo real que devem ser fornecidas por todos os acessantes da distribuição. Percebe-se que as informações variam de acordo com o tipo de consumidor (AT, MT ou BT). As informações que o operador local da subestação do Acessante deve fornecer (quando aplicável) à Distribuidora, também descritas no Módulo 6, são:

- Tipo e período de ocorrência;
- Carga e potência interrompida;
- Localidades interrompidas;
- Consequências relevantes; e
- Providências adotadas e em andamento;

As informações referentes às medições de energia (Módulo 5 – Sistemas de Medição) também podem ser encontradas na seção 6.2 do Módulo 6 do PRODIST. Fica estabelecido que a Distribuidora deve fornecer informações de medição sobre consumo de energia elétrica ativa e reativa e demanda de potência ativa mensalmente (as informações variam de acordo com o grupo do consumidor). A Distribuidora também fica responsável por fornecer informações operacionais quando for aplicável, tais como informações referentes às leituras do medidor retirado e do medidor instalado e laudo de calibração dos medidores.

As informações definidas no Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica também são descritas no Módulo 6, seção 6.2. Fica estabelecido que as informações sobre a

qualidade da energia elétrica repassadas da Distribuidora para o consumidor são referentes:

- Dados sobre ocorrência emergencial;
- Aviso de interrupção programada;
- Indicadores de interrupção; e
- Dados de conformidade de tensão.

Logo, a modernização das plantas industriais tem como objetivo facilitar o intercâmbio de informações do SAS da indústria com os COs da REI, incluindo as informações dos processos industriais. As informações referentes aos módulos 2, 3, 5 e 8, segundo o Módulo 6 do PRODIST, devem ser fornecidas somente quando solicitadas ou sem requisitos de tempo real, enquanto que algumas informações do módulo 4 devem ser trocadas em tempo real. A burocracia por trás desse procedimento de solicitação pode ser demorado e ineficiente. Assim, caso a indústria e a REI consigam trocar todas as informações em tempo real, a operação da REI pode se tornar cada vez mais eficiente e resiliente, trazendo benefícios para todos os seus usuários. Algumas informações das indústrias são tratadas como altamente sigilosas, por se tratarem de ações estratégicas de mercado e de planos futuros da empresa, mas mesmo essas informações cuidadosamente compartilhadas podem melhorar o funcionamento do sistema.

Desta forma, a seguir, é apresentada a Camada de Comunicação, na qual são mostradas os protocolos e requisitos para que as informações possam ou não ser trocadas com a rede elétrica.

6.2. CAMADA DE COMUNICAÇÃO

A Camada de Comunicação consiste em protocolos e mecanismos para troca de informações especificadas na Camada de Informação. Neste sentido, os principais protocolos para comunicações em redes IoT sem fio e para automação industrial e elétrica foram abordados e discutidos no capítulo 5, com a conclusão de que todos os protocolos comentados apresentam vantagens e desvantagens dependendo da

finalidade da implementação. Segundo Wollschlaeger, Sauter e Jasperneite (2017), a automação industrial é um domínio bastante conservador, e é por isso que o setor industrial tem como preferência as redes cabeadas em detrimento das sem fio (as redes sem fio são geralmente usadas como subsistemas na infraestrutura de redes cabeadas). Neste capítulo 6 de análise da integração, então, buscou-se comparar qualitativamente esses protocolos integrantes da Camada de Comunicação de uma REI para implementações futuras.

As soluções completas Z-Wave e Zigbee, apresentadas no item 5.1.7, por exemplo, são padrões para redes de curto alcance. Ambos os protocolos operam em faixas de frequência sub-GHz que resultam em alcances maiores e menores interferências se comparada a “lotada” banda ISM de 2,4 GHz (HITO *et al.*, 2019). Entretanto, o Zigbee também atua na banda de 2,4 GHz, o que o possibilita a chegar em taxas de dados de 250 Kb/s. Por conta da camada de interoperabilidade aberta, o Z-Wave possui uma interoperabilidade maior que o Zigbee, enquanto que o Zigbee tem taxas de troca de dados mais rápida, suporte para mais dispositivos em sua rede, e um alcance maior (MENDES *et al.*, 2015; BADENHOP *et al.*, 2017; Z-WAVE, 2020; ZIGBEE ALLIANCE, 2020), isso pode ser visto na Tabela 6.1.

Os padrões NB-IoT e o LoRaWAN, apresentados no item 5.1.7, por outro lado, são os principais protocolos para redes de comunicação de longas distâncias que requerem baixo consumo (LPWAN) (BALLERINI *et al.*, 2020). O NB-IoT tem uma camada de enlace mais robusta, mas necessita de uma infraestrutura LTE para ser implementada, além de uma banda licenciada disponível. Por sua vez, o LoRaWAN pode operar inúmeros dispositivos sem a necessidade de uma infraestrutura LTE e em locais sem (ou com difícil) acesso à internet, isso com um alcance de até 15 km em áreas rurais e 4 km em áreas urbanas (BALLERINI *et al.*, 2020).

O LoRaWAN funciona com uma eficiência energética maior para a transmissão de dados em relação ao NB-IoT, porém o NB-IoT possui uma maior confiabilidade de entrega de dados como mostra a Tabela 6.2. Por não depender da infraestrutura LTE, a flexibilidade da rede LoRa é maior, mas é necessário um tempo para implantação da infraestrutura. O NB-IoT, por usar a infraestrutura existente de redes LTE, possui um maior custo por dado transmitido. O NB-IoT é preferível para aplicações com pouca restrição de energia, com necessidades de alta confiabilidade da comunicação.

Tabela 6.1 – Comparativo de especificações entre os protocolos Z-Wave e Zigbee.

Especificação	Z-Wave	Zigbee
Padrão das Camadas Física e Enlace	ITU-T G.9959	IEEE 802.15.4
Bandas de frequência	868,42/908,42 MHz	868/915 MHz e 2,4 GHz
Taxa de Dados	9,6 – 40 – 100 Kb/s	20 – 40 – 250 Kb/s
Topologia de rede	Malha	Estrela, Árvore, Malha
Quantidade de nós	232	65.000
Quantidade de saltos	Até 4 saltos	Múltiplos saltos
Ambiente de alcance	Interno (até 30 m), aberto (até 100 m)	Interno (até 100 m), aberto (mais de 300 m)
Suporte de Criptografia	AES128 na Camada de Rede e Aplicação	AES128 nas Camadas de Rede e Aplicação
Camada de Interoperabilidade	Aberta	Fechada

Fonte: Mendes *et al.* (2015), Badenhop *et al.* (2017), Hito *et al.* (2019), Z-Wave (2020) e Zigbee Alliance (2020).

Tabela 6.2 – Comparativo de especificações entre os protocolos LoRaWAN e NB-IoT.

Especificação	LoRaWAN	NB-IoT
Qualidade de serviço (QoS)	Depende da densidade da rede e da taxa de transferência entre nós	Entrega de dados garantida.
Bandas de frequência	Sub GHz (não-licenciada)	180 – 200 kHz (licenciada)
Taxa de Dados	0,3 – 50 Kb/s	20-200 Kb/s (up-downlink)
Comunicação	Assíncrona	Síncrona
Vida da bateria dos dispositivos	10x mais que a do NB-IoT para transmissão de pequenos pacotes	A relação energia/byte melhora em altas taxas de dados, mas permanece inferior ao LoRaWAN
Alcance da rede	A comunicação entre gateway e dispositivos chega até 20 km, mas o alcance da rede depende do investimento em números e localização dos gateways	Até 20 km entre dispositivos e estação base, mas a rede alcança escala “nacional” para áreas com infraestrutura LTE
Segurança	AES-128 na Camada de Rede e Aplicação	Provida pela infraestrutura das redes GSM/LTE
Monitoramento Industrial	Permite uma operação confiável com sensores de baixa taxa de dados	É mais eficiente para transmissões com altas taxas de dados

Fonte: Sun *et al.* (2019) e Ballerini *et al.* (2020).

É importante destacar que o LoRaWAN e o NB-IoT não satisfazem requisitos de latência (menor que um milissegundo) para a utilização das tecnologias LPWAN na implementação de soluções RTE da Classe C na automação industrial (BALLERINI *et al.*, 2020). Sendo assim, os protocolos sem fio ainda necessitam de desenvolvimento para atender as necessidades da automação industrial. Os protocolos com fio RTE (mais especificamente da classe C como o Profinet IRT, o EtherCAT e o Powerlink) suprem os requisitos de latência, robustez e confiabilidade.

Assim como discutido no item 5.1.8, os protocolos PROFINET e EtherCAT são alguns dos principais protocolos da automação industrial. Pela Tabela 6.3, percebe-se que ambos satisfazem tempos de transferência de mensagens abaixo de 1 ms, com taxa de transferência de dados de até 100 Mbps. Ambos podem implementar suas redes com diversas topologias diferentes para o melhor gerenciamento de rede, as redundâncias e as instrumentação de processos, com diagnósticos precisos e segurança integrada. Entretanto, o PROFINET possui suporte padrão para a norma IEC 61850, o que o coloca em vantagem frente ao EtherCAT para a integração da comunicação entre subestações elétricas e o processo industrial.

Tabela 6.3 – Comparativo de especificações entre os protocolos RTE de automação industrial

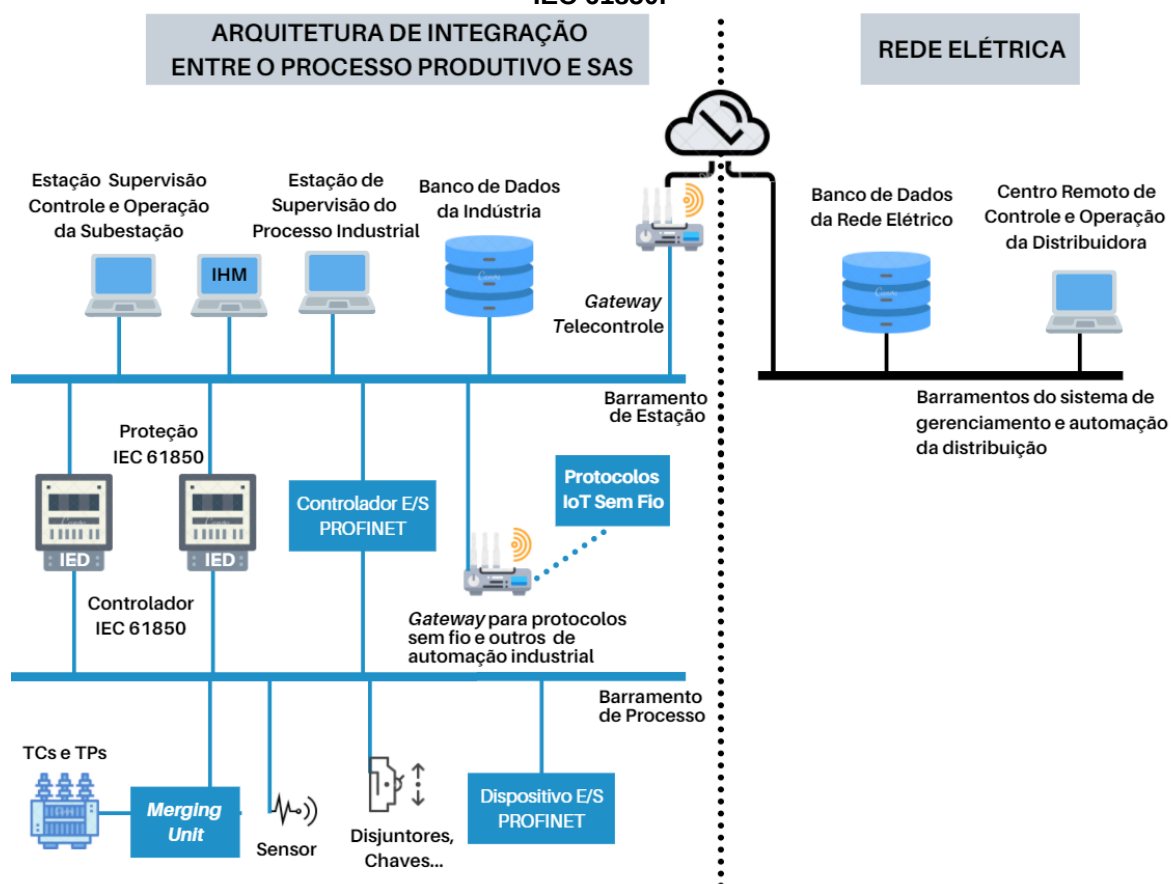
Especificação	PROFINET IRT	EtherCAT
Principal Fabricante	Siemens	Beckhoff
Topologia	Barra, Estrela, Árvore, Anel	Barra, Estrela, Árvore, Anel
Meio Físico	Par trançado, Fibra óptica	Par trançado, Fibra óptica
Taxas de transmissão	100 Mb/s, 1 Gb/s, 10 Gb/s	100 Mb/s, 1 Gb/s, 10 Gb/s
Distância máxima	100 m, 26 km (fibra óptica)	100 m, 20 km (fibra óptica)
Suporte para tipos de Comunicação	Produtor-Consumidor	Mestre-Escravo e outros
Nº máx. de dispositivos	Virtualmente Ilimitados	65.535
Tempo de Ciclo	1 ms – 250 µs	11 µs
Suporte a norma IEC 61850	Sim	Não
Segurança	PROFIsafe	Safety over EtherCAT
Facilidade de uso	Configuração difícil	Fácil

Fonte: Sridevi, Saligram e Nattarasu (2019) e Mosqueira Sáez (2020).

A Tabela 6.3 mostra um comparativo dos protocolos usados nas redes de automação industrial, dando destaque as topologias, meio físico e taxas de transmissão. O EtherCAT apresenta especificações mais interessantes em relação a tempo de ciclo e facilidade de uso, mas não possui suporte a norma IEC 61850 (SRIDEVI; SALIGRAM; NATTARASU, 2019; MOSQUEIRA SÁEZ, 2020).

Em resumo, os protocolos RTE de automação industrial abordados nesta dissertação são baseados no padrão IEEE 802.3 (Ethernet). O PROFINET, entretanto, possui suporte a norma IEC 61850 e pode efetuar toda a automação da subestação elétrica (com a supervisão, operação e proteção de circuitos elétricos de potência, o controle de demanda, a análise de falhas, distúrbios e desligamentos, entre outros) da indústria assim como a automação do processo industrial por meio de um “único” barramento de controle da operação por meio do padrão Ethernet, conforme pode ser visto na Figura 6.2.

Figura 6.2 – Integração entre automação industrial e elétrica por meio do PROFINET e norma IEC 61850.



Fonte: Autor.

Portanto, com um projeto de rede ethernet industrial adequado, pode-se criar estações de operações exclusivas para controle de processos industriais e automação elétrica, ambos integrados com informações da mesma rede para maximizar a eficiência tanto do processo industrial como do sistema elétrico, como pode ser visto na Figura 6.2. Percebe-se a integração entre os protocolos RTE e da norma IEC 61850 e os demais protocolos sem fio da IoT. As informações discutidas na Camada de Informação e outras adicionais podem ser compartilhadas com o CO por meio dos barramentos de Sistemas de Gerenciamento da Distribuição (DMS), que são os sistemas do Centro de Controle e Operação e dos barramentos de Sistemas de Automação da Distribuição (DAS), que ficam imediatamente abaixo do DMS. Os DAS incluem todos os equipamentos passíveis de telecontrole. Ao esquema da Figura 6.2 podem ser adicionados todos os RED da indústria para o controle de informações e operações das estações, contudo apenas alguns foram mostrados na Figura 6.2.

A utilização dos protocolos RTE fornece alternativas para integração de I4.0 e REI, voltados a aspectos técnicos, possibilitando que tanto consumidores industriais quanto concessionárias de energia tenham meios para fornecer informações em tempo real para o melhor funcionamento de ambos os sistemas. Como pode ser observado na Figura 6.2, os dispositivos de campo do processo industrial (Dispositivos E/S PROFINET) e do SAS (TCs, TPs, sensores, chaves) compartilham o mesmo Barramento de Processo, assim como os controladores do processo industrial (Controladores E/S PROFINET) e do SAS (IEDs) compartilham o mesmo nível de bay. Com isso, o Barramento de Estação consegue agregar as informação de todo o “chão de fábrica” da indústria, incluindo do SAS. Mesmo com a utilização de um único Barramento de Estação para o processo industrial e para a automação da subestação, é possível criar estações locais próprias e separadas para o processo industrial (Estação de Supervisão do Processo Industrial) e para o SAS (Estação de Controle e Operação da Subestação). Essa integração da estrutura, além de possibilitar a melhoria da interação das informações entre I4.0 e REI, ainda diminui os custos relativos a instalações Ethernet cabeadas separadas para os processos elétricos e industriais. O *Gateway* telecontrole, por sua, é o responsável pela comunicação dos barramentos da indústria com os barramentos do CO, enquanto que o *Gateway* multi-protocolo faz a transformação dos dados de enviados por outros protocolos para

modelos de dados da rede PROFINET para integração com os sistemas de supervisão, controle e operação da rede integrada.

Ainda podem ser alocados nessa arquitetura integrada os sistemas de armazenamento de dados exclusivos da indústria, tal como pode ser visto na Figura 6.2 com a alocação de Bancos de Dados da Indústria no Barramento de Estação para análises posteriores ou criação de soluções inteligentes com os *big datas* gerados. Percebe-se na Figura 6.2 que a própria Rede Elétrica também conta com Bancos de Dados da Rede Elétrica. A seleção de informações desses Bancos de Dados pode ser efetuada para também gerar compartilhamento de informação armazenadas e não somente em tempo real. Para aproximar ainda mais essa integração, algumas outras informações específicas (aspectos informativos e organizacionais) e inerentes de cada indústria também precisam ser adicionadas a integração, por exemplo, o impacto econômico das interrupções de energia elétrica e os valores de PIT (*Process Immunity Time* - tempo que o processo produtivo consegue manter seu funcionamento após uma falha ou queda no fornecimento de energia elétrica), com informações armazenadas no Banco de Dados da Indústria (ver Figura 6.2). Assim como informações inerentes da REI, como os indicadores coletivos de continuidade (DEC e FEC), os indicadores individuais de continuidade (DIC, FIC, DICRI) e o indicador de duração máxima da interrupção (DMIC) que fazem partes dos indicadores do Módulo 8 do PRODIST podem ser disponibilizados para a indústria por meio do Banco de Dados da Rede Elétrica.

Olhando pelo viés da arquitetura da REI para os dados obtidos por meio dos componentes da rede elétrica e transmitidos pelas redes de comunicação da Camada de Comunicação da REI, percebe-se que a análise do tráfego de informações é crucial para que os COs tomem as ações corretas e evitem, por um lado, gerar informações desatualizadas e, por outro lado, propor soluções equivocadas para determinados momentos de falhas.

7. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram abordados temas modernos de grande relevância para os setores elétrico e industrial, tendo como objetivo fazer um panorama do funcionamento das Redes Elétricas Inteligentes - REIs e das possibilidades de integração com os conceitos da Indústrias 4.0 no Brasil. Além disso, com o intuito de compreender a importância e a interoperabilidade entre as camadas da arquitetura de REIs, analisaram-se as funcionalidades de cada camada para entender os procedimentos de implementação de um novo Caso de Negócio entre a REI e o consumidor industrial, ou seja, os procedimentos para a integração de novas funcionalidades ao sistema de gestão e operação da rede elétrica que atenda os interesses tanto da REI como do consumidor industrial.

Com o entendimento do funcionamento da arquitetura apresentada, focou-se na identificação das principais tecnologias, padrões e protocolos da IoT (IoE e IIoT) que integram a Camada de Comunicação da arquitetura da REI e as indústrias. Percebeu-se na gama de protocolos apresentados, o protocolo Zigbee com especificações mais adequadas para atender os requisitos das comunicações sem fio de dispositivos da IoT (IoE e IIoT) em curtas distâncias (até 300 m), enquanto que para longas distâncias (até 20 km) o protocolo LoRaWAN se mostrou com especificações mais promissoras. Para sistemas isolados de Ethernet Industrial, o EtherCAT apresenta melhores especificações que o PROFINET, além de possuir fácil implementação em qualquer rede Ethernet pré-existente na indústria. Porém, para prover a integração do processo industrial com a automação da rede elétrica, o PROFINET é a melhor solução por possuir suporte padrão à norma IEC 61850.

Pela arquitetura de integração mostrada na Figura 6.2, percebe-se que a criação de um SCF para ensaios e testes em uma única rede de processos elétricos e industriais proverá muito mais do que a eficiência da rede, pois também permitirá que o operador local da rede saiba seus “pontos fracos” na planta industrial antes que falhas causadas por distúrbios elétricos possam ser refletidos no processo produtivo.

Por exemplo, alguns desses “pontos fracos” podem ter origem no fornecimento ineficiente de energia elétrica por parte da distribuidora. Caso sejam eventos recorrentes, o consumidor industrial pode começar a trabalhar em estratégias a longo

prazo, com a transformação da sua planta elétrica para uma microrrede e assim suprir o seu fornecimento sem depender da Distribuidora, e como suporte à rede elétrica da Distribuidora em momentos de anormalidades do fornecimento.

Além disso, a possibilidade de armazenar dados (*big datas*) que antes não se tinha acesso, principalmente aqueles que necessitam de um trâmite burocrático para serem solicitados ou que são enviados entre períodos muito longos, permitirá a criação de novas soluções tanto para o setor industrial como para o setor elétrico.

Portanto, a integração da I4.0 nas REIs deverá contribuir de maneira significativa para a estabilidade e flexibilidade da rede elétrica, com alto grau de precisão e confiabilidade em suas ações, tornando não apenas os processos industriais, mas também as redes elétricas mais adaptáveis e resilientes. A intenção é utilizar estes modelos em trabalhos futuros para testes da operação da rede elétrica e dos processos industriais de forma mais integrada e otimizada para proporcionar à concessionária e aos consumidores industriais uma visão mais abrangente do fornecimento de energia elétrica e evitar problemas de continuidade dos processos produtivos.

7.1. PROPOSTAS DE CONTINUIDADE DE TRABALHOS E MELHORIAS

- Virtualização dos processos e implementação da metodologia em uma bancada de testes para sistemas industriais e elétricos, com a integração do protocolo PROFINET com os protocolos da IEC 61850.
- Levantamento de dados junto aos Centros de Operação para entendimento das informações não funcionais prioritárias para melhorar a interação com o setor industrial;
- Análise comparativa com metodologias implementadas com outros protocolos que não forneçam suporte a IEC 61850.
- Expansão da metodologia de troca de dados entre REI e I4.0 para outros setores;

REFERÊNCIAS

ABDI. Agenda brasileira para a Indústria 4.0: O Brasil preparado para os desafios do futuro. **Indústria 4.0**. 2019. Disponível em: <http://www.industria40.gov.br/>. Acesso em: 30 Ago. 2019.

ABII. **A nova era da Internet Industrial**. 2019. Disponível em: <https://www.abii.com.br/faq>. Acesso em: 13 de Out. 2019.

AL-ALI, AR *et al.* An IoT-Based Smart Utility Meter. **2018 2ª Conferência Internacional sobre Rede Inteligente e Cidades Inteligentes (ICSGSC)**. IEEE. Kuala Lumpur, Malásia, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8541314>. Acesso em: 30 Ago. 2019.

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 1. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. 2018a. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-1>. Acesso em: 03 Nov. 2020.

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 2. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. 2016a. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-2>. Acesso em: 03 Nov. 2020.

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 3. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. 2017a. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-3>. Acesso em: 03 Nov. 2020.

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 4. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. 2009. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-4>. Acesso em: 03 Nov. 2020.

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 5. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. 2017b. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-5>. Acesso em: 03 Nov. 2020.

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 6. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. 2018b. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-6>. Acesso em: 03 Nov. 2020.

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 7. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. 2018c. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-7>. Acesso em: 03 Nov. 2020.

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-8>. Acesso em: 03 Nov. 2020.

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 9. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. 2012. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-9>. Acesso em: 03 Nov. 2020.

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 10. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. 2016b. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-10>. Acesso em: 03 Nov. 2020.

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 11. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. 2017c. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-11>. Acesso em: 03 Nov. 2020.

BADENHOP, C. W. *et al.* The Z-Wave routing protocol and its security implications. **Computers and Security**, v. 68, p. 112–129, 2017.

BALLERINI, Massimo *et al.* NB-IoT Versus LoRaWAN: Uma avaliação experimental para aplicações industriais. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 16, n. 12, pág. 7802-7811, 2020.

BARRO, Pape Abdoulaye; ZENNARO, Marco; PIETROSEMOLI, Ermanno. TLTN–The local things network: on the design of a LoRaWAN gateway with autonomous servers for disconnected communities. **2019 Wireless Days (WD)**. IEEE, 2019. p. 1-4. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8734239>. Acesso em: 03 Jan. 2020.

BASSI, Lorenzo. Industry 4.0: Hope, hype or revolution? **2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI)**. IEEE, 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8065927>. Acesso em: 30 Ago. 2019.

BELLIDO-OUTEIRINO, F. J. *et al.* M2M home data interoperable management system based on MQTT. In: **2017 IEEE 7th International Conference on Consumer Electronics-Berlin (ICCE-Berlin)**. IEEE, 2017. p. 200-202.

BENZI, Francesco *et al.* Electricity smart meters interfacing the households. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 58, n. 10, p. 4487-4494, 2011. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5699358>. Acesso em: 30 Ago. 2019.

BERTHO, R. *et al.* Optimized power quality monitor placement based on a particle swarm optimization algorithm. In: **2016 17th international conference on harmonics and quality of power (ICHQP)**. IEEE, 2016. p. 115-119.

BOLLEN, Math HJ *et al.* Power quality concerns in implementing smart distribution-grid applications. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 8, n. 1, p. 391-399, 2016.

BR AUTOMATION. Powerlink. **BR Automation**. Disponível em: <https://www.br-automation.com/pt-br/tecnologias/powerlink/>. Acesso em: 03 Mar. 2020.

BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 9.854, de 25 de junho de 2019**. Institui o Plano Nacional de Internet das Coisas e dispõe sobre a Câmara de Gestão e Acompanhamento do Desenvolvimento de Sistemas de Comunicação Máquina a Máquina e Internet das Coisas. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2019/Decreto/D9854.htm.

CARDILLO, Emanuele; CADDEMI, Alina. Feasibility Study to Preserve the Health of an Industry 4.0 Worker: a Radar System for Monitoring the Sitting-Time. **2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4.0&IoT)**. IEEE. Naples, Italy, Italy, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8792905>. Acesso em: 30 Ago. 2019.

CEBRIAN, Juan Carlos; KAGAN, Nelson; MILANOVIĆ, Jovica V. Probabilistic estimation of distribution network performance with respect to voltage sags and interruptions considering network protection setting—Part I: The methodology. **IEEE transactions on Power delivery**, v. 33, n. 1, p. 42-51, 2016.

CPFL ENERGIA. Características dos Sistemas Elétricos e do Setor Elétrico de países e/ou estados selecionados: Panorama e análise comparativa da tarifa de energia elétrica do Brasil com tarifas praticadas em países selecionados, considerando a influência do modelo institucional vigente. **CPFL**. 2014. Disponível em: <https://www.cpfl.com.br/energias-sustentaveis/inovacao/projetos/Documents/PB3002/caracteristicas-de-sistemas-eletricos-de-paises-selecionados.pdf>. Acesso em: 27 Mar. 2020.

DA XU, Li; HE, Wu; LI, Shancang. Internet of things in industries: A survey. **IEEE Transactions on industrial informatics**, v. 10, n. 4, p. 2233-2243, 2014.

DAIDONE, R.; DINI, G.; ANASTASI, G. On evaluating the performance impact of the IEEE 802.15.4 security sub-layer. **Computer Communications**, v. 47, p. 65–76, 2014.

DO ESPÍRITO SANTO, Walter; ORDOÑEZ, Edward; RIBEIRO, Admilson. Uma revisão sistemática sobre a Segurança nos Protocolos de Comunicação para Internet das Coisas. **Journal on Advances in Theoretical and Applied Informatics**, v. 4, n. 1, p. 1-9, 2018.

ELETROBRAS. Mapas do Sistema Elétrico Brasileiro. **Eletrobras**. 2020. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Sistema-Eletrico-Brasileiro.aspx>. Acesso em: 25 Mar. 2020.

ELKEELANY, Omar *et al.* Performance analysis of IPSec protocol: encryption and authentication. In: **2002 IEEE International Conference on Communications. Conference Proceedings. ICC 2002 (Cat. No. 02CH37333)**. IEEE, 2002. p. 1164-1168.

ENERGISA. Setor Elétrico Brasileiro. **Energisa**. 2019. Disponível em: <https://ri.energisa.com.br/a-energisa/setor-eletrico-brasileiro>. Acesso em: 27 Mar. 2020.

EPSC. Why POWERLINK?. **Ethernet Powerlink**. Disponível em: <https://www.ethernet-powerlink.org/powerlink/technology/why-powerlink>. Acesso em: 22 Set. 2020.

ETHERCAT TECHNOLOGY GROUP. EtherCAT - o Ethernet Fieldbus. **EtherCAT.org**. Disponível em: <https://www.ethercat.org/en/technology.html>. Acesso em: 22 Set. 2020.

ETHERNET POWERLINK. System comparison: The 5 major technologies. **Industrial Ethernet Facts**. Ed. 3. 2016. Disponível em: https://www.ethernet-powerlink.org/fileadmin/user_upload/Dokumente/Industrial_Ethernet_Facts/EPSC_IEF3rdEdition_en.pdf. Acesso em: 27 Fev. 2020.

FACCIONI FILHO, Mauro. Internet das coisas. **Unisul Virtual**, 2016.

FAHEEM, Muhammad *et al.* Smart grid communication and information technologies in the perspective of Industry 4.0: Opportunities and challenges. **Computer Science Review**, v. 30, p. 1-30, 2018.

FARHANGI, Hassan. The path of the Smart Grid. **IEEE Power and Energy**, v. 8, n. 1, p. 18-28, jan-fev. 2010. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5357331>. Acesso em: 30 Ago. 2019.

FELSER, Christoph; FELSER, Max; KAGHAZCHI, Hassan. Improved architecture for Profinet IRT devices. In: **Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012)**. IEEE, 2012. p. 1-8.

FITZPATRICK, Gerald J.; WOLLMAN, David A. NIST interoperability framework and action plans. In: **IEEE PES General Meeting**. IEEE, 2010. p. 1-4.

FONTANELLI, D. *et al.* Performance analysis of a clock state estimator for PROFINET IO IRT synchronization. In: **2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)**. IEEE, 2013. p. 1828-1833.

FUNDO VERDE UFRJ. Instalação de medidores inteligentes nas subestações de energia nos blocos do Centro de Tecnologia. **Fundo Verde UFRJ**. Disponível em: <http://fundoverde.ufrj.br/index.php/pt/projetos/projetos-futuros/27-projetos/projetos-fundo-verde/energia/152-instalacao-de-medidores-inteligentes-nas-subestacoes-de-energia-nos-blocos-do-ct>. Acesso em: 26 de Fev. 2020.

G1. Apagão no Amapá: veja a cronologia da crise de energia elétrica. **G1**. Disponível em: <https://g1.globo.com/ap/amapa/noticia/2020/11/18/apagao-no-amapa-veja-a-cronologia-da-crise-de-energia-eletrica.ghtml>. Acesso em: 18 Nov. 2020.

GARDAŠEVIĆ, Gordana *et al.* The IoT architectural framework, design issues and application domains. **Wireless personal communications**, v. 92, n. 1, p. 127-148, 2017.

GOKALP, Mert Onuralp *et al.* Big Data for Industry 4.0: A Conceptual Framework. **2016 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)**. IEEE. Las Vegas, NV, USA, 2016. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7881381>. Acesso em: 30 Ago. 2019.

GOTTSCHALK, Marion; USLAR, Mathias; DELFS, Christina. O modelo de arquitetura de smart grid - SGAM. In: **The Use Case and Smart Grid Architecture Model Approach**. Springer, Cham, 2017. p. 41-61.

GWAC. Gridwise interoperability context-setting framework. **GridWise Architecture Council and Battelle Memorial Institute**, 2008. Disponível em: www.gridwiseac.org.

HANNAN, Mahammad A. *et al.* Uma revisão da Internet de sistemas de gerenciamento de energia de edifícios baseados em energia: questões e recomendações. **IEEE Access**, v. 6, p. 38997-39014, 2018.

HIRSCHLER, Bernd; SAUTER, Thilo. Performance impact of IPsec in resource-limited smart grid communication. In: **2016 IEEE World Conference on Factory Communication Systems (WFCS)**. IEEE, 2016. p. 1-8.

HITO, Maria *et al.* Development of a Portable Z-Wave Signal Detector for Home Security Installations. In: **2019 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)**. IEEE, 2019. p. 1-6.

IEEE. P2413/D0.4.5, Dec 2018 - IEEE Draft Standard for an Architectural Framework for the Internet of Things (IoT). **IEEE**, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8591947>.

IEEE. 2413-2019 - IEEE Standard for an Architectural Framework for the Internet of Things (IoT). **IEEE**, 2020. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9032420/versions#versions>.

IOT POINT. Z-Wave Tutorial. **IoT Point**. Disponível em: <https://iotpoint.wordpress.com/z-wave-tutorial/>. Acesso em: 02 de fev. de 2020.

ITU, T. REC-G. 9959: Short Range Narrow-Band Digital Radiocommunication Transceivers—PHY, MAC, SAR and LLC Layer Specifications. 2015.

KIM, Jeu Young *et al.* Smart home web of objects-based IoT management model and methods for home data mining. **2015 17th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)**. IEEE. Busan, South Korea, 2015. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7275448>. Acesso em: 30 Ago. 2019.

KURUNATHAN, Harrison *et al.* IEEE 802.15. 4e in a nutshell: Survey and performance evaluation. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 20, n. 3, p. 1989-2010, 2018.

LEE, L. S. The New Internet Protocol. **Internet Auditor**, v. 68, n. 11, p. 21–23, 2011.

LI, Yuke *et al.* Smart Choice for the Smart Grid: Narrowband Internet of Things (NB-IoT). **IEEE Internet of Things Journal**, IEEE, v. 5, n. 2, p. 1505 - 1515, dez 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8170296>. Acesso em: 30 Ago. 2019.

LIMA, Alan Tomás. **Aplicação de Internet of Things em casas inteligentes-Serviço Aplicacional**. 2014. Tese de Doutorado. Instituto Politécnico do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto.

LIN, Chun-Cheng *et al.* Peak load shifting in the internet of energy with energy trading among end-users. **IEEE Access**, v. 5, p. 1967-1976, 2017.

LIN, Yi-Bing *et al.* NB-IoTtalk: a service platform for fast development of NB-IoT applications. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 6, n. 1, p. 928-939, 2018.

LIU, Lin *et al.* Economical and Balanced Energy Usage in the Smart Home Infrastructure: A Tutorial and New Results. **IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing**, IEEE, v. 3, n. 4, p. 556-570, dez 2015. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7293642>. Acesso em: 30 Ago. 2019.

LORA ALLIANCE. **LoRaWAN What is it: A Technical overview of LoRa and LoRaWAN**. 2015. Disponível em: <https://loro-alliance.org/resource-hub/what-lorawanr>. Acesso em: 27 Fev. 2020.

MACKIEWICZ, Ralph E. Visão geral da IEC 61850 e benefícios. Em: **2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting** . IEEE, 2006. p. 8 pp

MAIOR, Hario A; RAO, S. A self-governing, decentralized, extensible Internet of Things to share electrical power efficiently. **2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering**. IEEE. Taipei, Taiwan, 2014. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6899301>. Acesso em: 4 Jun. 2019.

MARKSTEINER, S. *et al.* An Overview of Wireless IoT Protocol Security in the Smart Home Domain. p. 1–8, 2017.

MCTIC. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Portaria nº 1.122, de 19 de março de 2020. Define as prioridades, no âmbito do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), no que se refere a projetos de pesquisa, de desenvolvimento de tecnologias e inovações, para o período 2020 a 2023. **Diário Oficial da União**: ed. 57, seção 1, Brasília, DF, p. 19, 24 de março de 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-1.122-de-19-de-marco-de-2020-249437397>.

MDIC. Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. Gabinete do Ministro. Portaria nº 2.091, de 17 de dezembro de 2018. Aprova metodologia a ser adotada nos investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação voltados para a indústria 4.0 na Zona Franca de Manaus e cria o Selo da Indústria 4.0. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 244, p. 144, 20 dezembro 2018.

ME. Ministério da Economia. Governo lança Câmara Brasileira da Indústria 4.0. **MDIC**. 2019. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/index.php/ultimas-noticias/3853-governo-lanca-camara-brasileira-da-industria-4-0>. Acesso em: 13 Out. 2020.

MENDES, T. *et al.* Smart Home Communication Technologies and Applications: Wireless Protocol Assessment for Home Area Network Resources. **Energies**, v. 8, n. 7, p. 7279–7311, 2015.

MINOLI, Daniel; SOHRABY, Kazem; OCCHIOGROSSO, Benedict. IoT Considerations, Requirements, and Architectures for Smart Buildings: Energy Optimization and Next-Generation Building Management Systems. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 4, n. 1, p. 269-283, 04 jan. 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7805265>. Acesso em: 30 Ago. 2019.

MME. Ministério de Minas e Energia. Plano Decenal de Expansão de Energia 2029. **Empresa de Pesquisa Energética (EPE)**, Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202029.pdf>.

MOSQUEIRA SÁEZ, Francisco José. Tecnologías de comunicación en tiempo real en entornos de automatización industrial. Análisis de la problemática y alternativas. 2020.

MQTT-ORG. Documentation: Protocol Specifications. Disponível em: <http://mqtt.org/documentation/>. Acesso em: 27 Fev. 2020.

NAVARRO-ORTIZ, Jorge *et al.* Integration of LoRaWAN and 4G/5G for the Industrial Internet of Things. **IEEE Communications Magazine**, v. 56, n. 2, p. 60-67, 2018.

NETO *et al.* Estudo de Rede Industrial Ethernet Powerlink. **Congresso Brasileiro de Instrumentação, Sistemas e Automação (COBISA 2019)**. Mai. 2019.

NIST. NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards: Release 3.0. **National Institute of Standards and Technology**. 2014.

ONS. Capacidade Instalada de Geração. **ONS**. Disponível em: http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/capacidade_instalada.aspx. Acesso em: 30 Mar. 2020.

PEGAIA, Denilson. Tecnologia PROFINET. **Profibus Org**. 2010 Disponível em: <http://www.profibus.org.br/downloads/pdfs/Profinet%20set%202010.pdf>. Acesso em: 22 de Fev. 2020.

PEREIRA JUNIOR, Paulo Sergio *et al.* IEC 61850-9-2 Avaliação e testes de um barramento de processos. **O Setor Elétrico**. 2011, ed. 63. Disponível em: <https://www.osestoreletrico.com.br/iec-61850-9-2-avaliacao-e-testes-de-um-barramento-de-processos/>. Acesso em: 27 de Nov. 2020.

RAHMAN, Reem Abdul; SHAH, Babar. Security analysis of IoT protocols: A focus in CoAP. In: **2016 3rd MEC international conference on big data and smart city (ICBDSC)**. IEEE, 2016. p. 1-7.

RIVERA, Ricardo; ESPOSITO, Alexandre Siciliano; TEIXEIRA, Ingrid. Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local. **Revista do BNDES**. Rio de Janeiro, 2013, p. 43-88. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2927>. Acesso em: 30 Ago. 2019.

RIZZO, José. **Saiba o que é a Indústria 4.0 e descubra as oportunidades que ela gera**. 2016. Disponível em: <http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/saiba-o-que-e-a-industria-40-e-descubra-as-oportunidades-que-ela-gera,11e01bc9c86f8510VgnVCM1000004c00210aRCRD>. Acesso em: 13 Out. 2019.

ROSTAN, Martin; STUBBS, Joseph E.; DZILNO, Dmitry. EtherCAT enabled advanced control architecture. In: **2010 IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC)**. IEEE, 2010. p. 39-44.

SALMAN, Tara. Internet of things protocols and standards. **Affairs, M. Of END**, 2015.

SAMUEL, S. S. I. A review of connectivity challenges in IoT-smart home. **2016 3rd MEC International Conference on Big Data and Smart City, ICBDS 2016**, p. 364–367, 2016.

SANTODOMINGO, R. *et al.* SGAM-based methodology to analyse Smart Grid solutions in DISCERN European research project. In: **2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)**. IEEE, 2014. p. 751-758.

SANTOS, Manuel Luís Meneses Montenegro Viseu. **Controlador de Domótica Z-Wave**. 2019. Dissertação de Mestrado.

SC-CG/RA. CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group Smart Grid Reference Architecture. 2012. Disponível em: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/xpert_group1_reference_architecture.pdf.

SHAHID, Kamal *et al.* Impact of transport layer protocols on reliable information access in smart grids. In: **2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)**. IEEE, 2017. p. 1-6.

SHANTHINI, J.; VIJAYAKUMAR, S. Modified simple network management protocol for 6Lowpan. **Procedia engineering**, v. 38, p. 1024-1029, 2012.

SHELBY, Zach *et al.* RFC 7252: The constrained application protocol (CoAP). **Internet Engineering Task Force**, 2014.

SHIN, In-Jae; SONG, Byung-Kwen; EOM, Doo-Seop. International Electrotechnical Committee (IEC) 61850 mapping with constrained application protocol (CoAP) in smart grids based European telecommunications standard institute Machine-to-Machine (M2M) environment. **Energies**, v. 10, n. 3, p. 393, 2017.

SHU-WEN, Wu. Research on the key technologies of IoT applied on Smart Grid. **2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)**. IEEE. Ningbo, China, 2011. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6066418>. Acesso em: 30 Ago. 2019.

SONG, Yu E *et al.* Research on Applications of the Internet of Things in the Smart Grid. **2015 7th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics**. IEEE. Hangzhou, China, 2015. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7334945>. Acesso em: 2 Ago. 2019.

SOURY, Ayoub *et al.* Performance analysis of Ethernet Powerlink protocol: Application to a new lift system generation. In: **2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)**. IEEE, 2015. p. 1-6.

SPANÒ, Elisa *et al.* Last-meter smart grid embedded in an Internet-of-Things platform. **IEEE Transactions on smart grid**, v. 6, n. 1, p. 468-476, 2014. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6884855/>. Acesso em: 30 Ago. 2019.

SRIDEVI, G.; SALIGRAM, Ananth; NATTARASU, V. Effective Protocols for Industrial Communication. In: **Emerging Research in Electronics, Computer Science and Technology**. Springer, Singapore, 2019. p. 1093-1105.

STANFORD-CLARK, Andy; TRUONG, Hong Linh. Mqtt for sensor networks (mqtt-sn) protocol specification. **International business machines (IBM) Corporation version**, v. 1, p. 2, 2013.

SUFRAMA. Conselho de Administração. Resolução nº 40, de 10 de maio de 2018. Disciplina a elaboração de projetos e a execução do cumprimento da obrigação de Investimento em atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação na Amazônia Ocidental ou no estado do Amapá para a Indústria 4.0. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 96, p. 54, 21 maio 2018.

SUN, Rongrong *et al.* Projeto e desempenho de NB-IoT não licenciada. In: **2019 16th Symposium International on Wireless Communication Systems (ISWCS)**. IEEE, 2019. p. 469-473.

TAUQIR, Hafiza Palwasha; HABIB, Aamir. Integration of IoT and Smart Grid to reduce line losses. **2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)**. IEEE. Sukkur, Pakistan, Pakistan, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8673433>. Acesso em: 5 Jun. 2019.

USLAR, Mathias; ROSINGER, Christine; SCHLEGEL, Stefanie. Security by Design for the Smart Grid: Combining the SGAM and NISTIR 7628. In: **2014 IEEE 38th International Computer Software and Applications Conference Workshops**. IEEE, 2014. p. 110-115.

VAN DER WESTHUIZEN, Henri W.; HANCKE, Gerhard P. Practical Comparison between COAP and MQTT-Sensor to Server level. In: **2018 Wireless Advanced (WiAd)**. IEEE, 2018. p. 1-6.

VIJAYAPRIYA, Tamilmaran; KOTHARI, Dwarkadas Pralhadas. Smart grid: an overview. **Smart Grid and Renewable Energy**, v. 2, n. 4, p. 305-311, 2011.

XU, Hansong *et al.* A survey on industrial Internet of Things: A cyber-physical systems perspective. **IEEE Access**, v. 6, p. 78238-78259, 2018.

WANG, Z.; YAN, M. The Research and Application of Internet Protocol Version 6 (IPv6). **Intelligent Computation Technology and Automation, International Conference on**, v. 1, p. 275–278, 2011.

WEYRICH, Michael; EBERT, Christof. Reference architectures for the internet of things. **IEEE Software**, v. 33, n. 1, p. 112-116, 2015.

WIDERGREN, S. *et al.* Smart grid interoperability maturity model. In: **IEEE PES General Meeting**. IEEE, 2010. p. 1-6.

WLAS, Miroslaw; GACKOWSKI, Marek; KOLBUSZ, Wojciech. The Ethernet POWERLINK Protocol for smart grids elements integration. In: **2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics**. IEEE, 2011. p. 2070-2075.

WOLLSCHLAEGER, Martin; SAUTER, Thilo; JASPERNEITE, Juergen. The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0. **IEEE industrial electronics magazine**, v. 11, n. 1, p. 17-27, 2017.

ZANNI, Alessandro. Sistemas Cyber-físicos e cidades inteligentes. **IBM developerWorks**. 2015. Disponível em: <https://www.ibm.com/developerworks/br/library/ba-cyber-physical-systems-and-smart-cities-iot/ba-cyber-physical-systems-and-smart-cities-iot-pdf.pdf>. Acesso em: 30 Mar. 2020.

ZIGBEE ALLIANCE. ZigBee Specification: ZigBee Document - 05-3474-21. 2015. Disponível em: <https://zigbeealliance.org/wp-content/uploads/2019/11/docs-05-3474-21-0csg-zigbee-specification.pdf>. Acesso em: 01 Out. 2020.

ZYRIANOFF, Ivan *et al.* Impacto de LoRaWAN no Desempenho de Plataformas de IoT baseadas em Nuvem e Névoa Computacional. In: **Anais do XVII Workshop em Clouds e Aplicações**. SBC, 2019. p. 43-56.

Z-WAVE. How Z-Wave Works. **Z-Wave**. Disponível em: <https://www.z-wave.com/learn/>. Acesso em: 27 de fev. de 2020.

ANEXO A – MAPA SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO: CONFIGURAÇÃO ATÉ 2027

Imagem – Mapa do Sistema Elétrico Brasileiro: Configuração até 2027



ANEXO B – INFORMAÇÕES PRELIMINARES E TÉCNICAS DOS FORNECIDAS PELOS ACESSANTES ÀS DISTRIBUIDORAS PARA ACESSO AO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO.

**Imagem – Informações Preliminares fornecidas pelos Acessantes às Distribuidoras
para Acesso ao Sistema de Distribuição.**

INFORMAÇÕES PRELIMINARES				
Informação	Especificação	Unidade	Periodicidade	Observação
Identificação do acessante			Única	
Ramo de atividade	Descrição, CNPJ		Única	
Natureza	Consumidor livre, cogenerador, produtor independente, autoprodutor, distribuidora, etc		Única	
Localização	Coordenadas georeferenciadas		Única	
Endereço do empreendimento			Única	
Ponto(s) de conexão	Coordenadas georeferenciadas			Com justificativas
Características da conexão				
Estágio atual do acesso				
Cronograma de implantação				Anexar
Identificação do acessante			Única	
Ramo de atividade	Descrição, CNPJ		Única	
Cronograma de expansão				Anexar
Representante para contato	Nome, endereço, telefone, fax, e-mail			
Data da consulta				
Comprovantes legais	Número do imóvel, alvará de funcionamento, aprovação governamental e ART-CREA			
Projeto básico	Memorial descritivo, planta de localização, arranjo físico, diagramas incluindo o SMF			

Fonte: ANEEL (2018b).

Imagem – Informações Técnicas fornecidas pelas unidades consumidoras às Distribuidoras para Acesso ao Sistema de Distribuição.

UNIDADES CONSUMIDORAS DE ENERGIA – INFORMAÇÕES TÉCNICAS				
Informação	Especificação	Unidade	Periodicidade	Observação
Carga instalada		kVA		Para cada estágio previsto no cronograma
Carga máxima	Na ponta e fora de ponta	kW		
Acréscimo de carga previsto	Na ponta e fora de ponta	kW		
Fator de potência	Na ponta e fora de ponta	%		
Fator de potência previsto	Na ponta e fora de ponta	%		
Fator de potência médio horário				
Fator de carga				
Sazonalidade da carga				
Demandas máximas	Integralizadas em 15 minutos no horário de ponta, no horário normal e no horário incentivado	kW		
Características da carga	Fornos elétricos, motores de corrente alternada, cargas alimentadas em corrente contínua, cargas alimentadas por conversores, retificadores, fornos, demais cargas	kW		Descrição do equipamento, aplicação, potência associada e % da carga instalada
Equipamentos com retificação de corrente, existentes e previstos	Nome, aplicação, instalação (existente/prevista), tipo de conversor (motor síncrono/assíncrono, gerador/compensador síncrono), número de pulsos, potência nominal (kW), tensão nominal AC (kV), tensão nominal DC (kV), corrente nominal (A), fator de potência (%)			
Equipamentos especiais (fornos, máquinas de solda, compressores, etc) existentes e previstos	Nome, aplicação, instalação (existente/prevista), alimentação, potência nominal (kW), tensão nominal (kV), fator de potência (%).			
Sistemas de proteção e controle	Nível de curto circuito, tempo máximo de interrupção, níveis de confiabilidade			
Tensão e frequência	Suportabilidade dos equipamentos, variação de tensão, variação de frequência			
Transformadores de subestação	Potência nominal, impedância de curto-circuito de sequência positiva e zero, em pu (na base do transformador), tipo de ligação dos enrolamentos, impedância dos enrolamentos, relações das tensões disponíveis, derivações de tapes sob carga, derivações de tapes a vazio, tensão nominal dos enrolamentos, sobrecargas admissíveis pelo equipamento, sem perda de vida útil, em condições normais de operação e em situações de emergência			
Diagrama unifilar e dados gerais das instalações internas do consumidor	Impedâncias (% base própria) dos transformadores, bancos de capacitores de alta e média tensão, filtros de harmônicos, impedâncias das linhas e dos transformadores da subestação principal, informações sobre o sistema de medição incluindo os transformadores de instrumentos com suas características básicas, relação de transformação e classe de exatidão			Anexar diagrama
Cronograma do empreendimento				
Geração própria vinculada ao suprimento, atual e prevista	Código, instalação (existente/prevista), tipo (motor síncrono/assíncrono, gerador/compensador síncrono) quantidade, aplicação, potência (kW), tensão (kV), fator de potência (%), esquema partida, corrente partida (A)	kW		
Potência de cada unidade já existente		kW		Em caso de ampliação

Fonte: ANEEL (2018b).

ANEXO C – INFORMAÇÕES CADASTRAIS DOS CONSUMIDORES E EM TEMPO REAL DOS ACESSANTES PARA OS PROCEDIMENTOS OPERATIVOS DA REDE.

Imagem – Informações Cadastrais dos Consumidores.

INFORMAÇÕES CADASTRAIS				
Informação	Especificação	Unidade	Periodicidade	Observação
Contato	Responsável e Endereço		Quando aplicável	Consumidor AT, MT ou BT
Demanda contratada	Ponta e fora de ponta	kW	Quando aplicável	Consumidor AT ou MT
Demanda máxima		kW	Quando aplicável	
Carga de energia interruptível		MWh	Quando aplicável	Consumidores AT
Produção/Atividade	Descrição		Quando aplicável	Consumidor AT ou MT
Regime de funcionamento	Sazonalidade, períodos.	Data, hora e minuto	Quando aplicável	Consumidor AT, MT ou BT
Processo de fabricação	Descrição		Quando aplicável	Consumidor AT
Composição da carga			Quando aplicável	Consumidor AT
Carga que pode ser retirada		MW	Quando aplicável	Consumidor AT
Tempo para retirada da carga		Minuto	Quando aplicável	Consumidor AT
Conseqüências de interrupções não programadas			Quando aplicável	Consumidor AT ou MT
Conseqüências de interrupções programadas			Quando aplicável	Consumidor AT ou MT
Conseqüências resultantes de interrupções de longa duração			Quando aplicável	Consumidor AT
Geração própria	Dados gerais		Quando aplicável	Consumidor AT, MT ou BT

Fonte: ANEEL (2018b).

Imagem – Informações em tempo real dos Acessantes.

INFORMAÇÕES EM TEMPO REAL				
Informação	Especificação	Unidade	Periodicidade	Observação
Atuação de proteções e restabelecimento do sistema de distribuição	Descrição		Quando aplicável	
Existência e tipo de comutações	Descrição		Quando aplicável	
Conexão e desligamento de cargas	Descrição		Quando aplicável	
Sincronização de geração	Descrição		Quando aplicável	
Monitoramento do sistema de distribuição	Descrição		Quando aplicável	
Instalações de geração	Descrição		Quando aplicável	
Análise da segurança do sistema de distribuição	Descrição		Quando aplicável	
Programação de geração	Descrição		Quando aplicável	
Monitoramento das instruções de despacho	Descrição		Quando aplicável	
Mensagens de despacho	Descrição		Quando aplicável	
Relatórios	Descrição		Quando aplicável	

Fonte: ANEEL (2018b).