

isec

Engenharia

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica

Manutenção de Equipamentos de *Smart Grids* Suportada em Sistemas *Fuzzy*

Autor

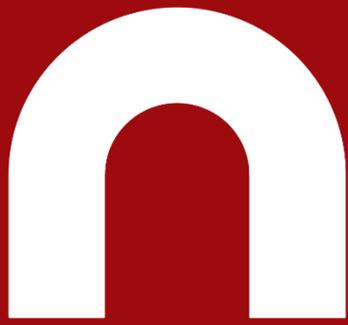
Balduíno Patrício César Mateus

Orientadores

Doutor Inácio de Sousa Adelino da Fonseca

Doutor José Manuel Torres Farinha

Coimbra, junho de 2021



isec

Engenharia

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica

Manutenção de Equipamentos de *Smart Grids* Suportada em Sistemas *Fuzzy*

Trabalho de Projeto para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica

Autor

Balduíno Patrício César Mateus

Orientadores

Doutor Inácio de Sousa Adelino da Fonseca

Doutor José Manuel Torres Farinha

INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, junho de 2021

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer a Deus, que me deu o sopro da vida e, de uma forma abstrata, sempre me ajudou no meu percurso dando-me o necessário. Em segundo lugar quero agradecer à minha mãe que desde sempre me ensinou a disciplina do trabalho; neste segundo lugar incluo ainda a minha esposa que de uma forma ativa sempre me motivou para tal realização. Quero agradecer de tudo ao Professor José Torres Farinha, por ter aceite este desafio de poder orientar-me nesta jornada e pelo ensinamento passado e pelo tempo disponível que, apesar das suas múltiplas ocupações, esteve sempre presente ao longo deste processo da elaboração do Projeto. Agradeço ao Professor Inácio Fonseca pela disponibilidade que me apresentou e a todos os Professores do Departamento de Engenharia Eletrotécnica que tiveram o prazer de passar os seus conhecimentos no decorrer do Curso.

RESUMO

O surgimento de novas tecnologias tem sido crucial no que respeita à sua contribuição e preocupação em as tornar estáveis de modo a corresponderem aos seus propósitos, designadamente no incremento da fiabilidade dos equipamentos; com isso surge a necessidade de recorrer às políticas de manutenção para que haja boas práticas e, por consequência, boas respostas, dessas mesmas tecnologias.

O presente projeto faz uma revisão da literatura sobre as *Smart Grids* e as tecnologias de comunicação *Wired* e *Wireless* com o objetivo de dar suporte ao sistema de deteção de avarias em equipamentos ligados através de *Smart Grids*.

Tendo como referência o precedente Estado da Arte, designadamente no que concerne às tecnologias IoT (*Internet of Things*), o presente projeto destaca a sua ascensão e utilidade no mundo empresarial. A Internet das Coisas é uma importante aliada para os objetivos que se pretendem alcançar na fiabilidade e, por consequência, na manutenção de equipamentos inseridos em *Smart Grids*.

Baseado na caracterização das tecnologias em apreço, nos conceitos de *Fuzzy Logic*, e utilizando o método IEC (*International Electrotechnical Commission*), é apresentada uma abordagem à deteção de avarias de um transformador, tendo como base as amostras dos gases, designadamente através dos seguintes compostos químicos: H₂; CH₄; C₂H₂; C₂H₄; C₂H₆; CO; CO₂.

Para a elaboração do projeto recorreu-se ao *Notebook Jupyter*, que permite a programação em linguagem *Python*; a biblioteca utilizada para o desenvolvimento do algoritmo *Fuzzy Logic* foi a *skfuzzy*, cujos resultados obtidos se mostraram fortemente conclusivos.

Palavras-Chave: Manutenção; *Smart Grids*; IoT; *Wired*; *Wireless*; *Fuzzy Logic*

ABSTRACT

The emergence of new technologies has been crucial in terms of their contribution and concern to make them stable in order to correspond to their purposes, namely in terms of increasing the reliability of equipment; based on this, it comes the need to implement the maintenance policies that correspond to good practices and, consequently, good responses, about those technologies.

This project reviews the literature on Smart Grids and Wired and Wireless communication technologies in order to support the fault detection system in equipment connected through Smart Grids.

With reference to the previous State of the Art, namely with regard to IoT (Internet of Things) technologies, this project highlights its rise and usefulness in the business world. The Internet of Things is an important ally for the goals that are intended to be achieved in terms of reliability and, consequently, in the maintenance of equipment inserted in Smart Grids.

Based on the characterization of the technologies in question, namely on the concepts of Fuzzy Logic, and using the IEC (International Electrotechnical Commission) method, an approach to transformer failure detection is presented, based on gas samples, namely through the following compounds chemicals: H₂; CH₄; C₂H₂; C₂H₄; C₂H₆; CO; CO₂.

For the elaboration of the project, the Jupyter Notebook was used, which allows programming in Python language; the library used for the development of the Fuzzy Logic algorithm was `skfuzzy`, whose results were strongly conclusive.

Palavras-Chave: Maintenance; Smart Grid; IoT; Wired; Wireless; Fuzzy

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	1
1.1 - Enquadramento	2
1.2 - Formulação do Problema	2
1.3 - Objetivo	2
1.4 - Metodologia Utilizada	3
1.5 - Estrutura do Projecto	3
CAPÍTULO 2	5
2.1 - <i>Smart Grids</i>	5
2.1.1 - Segurança das Smart Grids	10
2.1.2 - Arquitetura	11
2.1.3 - Tecnologia de comunicação	12
2.2 - IoT	23
2.2.1 - Conceito De IoT	24
2.2.2 - Evolução Histórica Da IoT	26
2.2.3 - Aplicações Da IoT	28
2.2.4 - IoT na indústria	30
2.3 - Sistema Fuzzy Logic	31
2.3.1 - Conceito de Fuzzy Logic	31
2.3.2 - Teoria dos Conjuntos Difusos	32
2.3.3 - Vantagens e Eventuais Desvantagens	34
2.3.4 - Aplicações de lógica difusa na engenharia eletrotécnica	35
2.4 - Manutenção de transformadores	36
CAPÍTULO 3	39
3.1 – Descrição da amostra	39
3.2 - Apresentação do software	42
3.3 - Método IEC	42

3.4 - Resultados	46
3.5 - Discussão dos Resultados.....	55
CAPÍTULO 4	57
CONCLUSÕES	57
4.1 - Conclusões	57
4.2 - Desenvolvimentos Futuros	57
REFERÊNCIAS.....	59
ANEXO A	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema proposto	3
Figura 2 - Representação da RI [Fonte: (NIST, 2009)].....	6
Figura 3 - Setup experimental [Fonte: (Majumder & Caffery, 2004)]	10
Figura 4 - Representação de uma rede elétrica [Fonte: (IN2, 2018)]	12
Figura 5 - Estrutura das redes sem fios [Adaptado de (CARCELLE, 2006)]	13
Figura 6 - Sistema de comunicação Wi-Fi [Fonte: (Miller, 2003)].....	14
Figura 7 - Sistema Zigbee [Adaptado em (RF Wireless World, 2012)].....	16
Figura 8 - Componente de um Sistema RFID [adaptado em (RF Wireless World, 2012)]	17
Figura 9 - Esquema de uma fibra ótica Fi [Fonte: (Unknown, 2013)]	21
Figura 10 - Roteamento interconectado por links de fibra ótica ponto a ponto[Fonte: (Ramasswami & Sivarajan, 1995)]	22
Figura 11 - Internet das coisas [Fonte: (Marmé, 2018)]	24
Figura 12 - Descrição a maturidade da tecnologia IoT(Panetta, 2017)	25
Figura 13 - Domínio de aplicação da IoT [Fonte: (Bassi et al., 2013)].....	27
Figura 14 - Limite definido clássico (a); Limite definido fuzzy (b)	32
Figura 15 - Tipos de funções de associação: função Γ (a); função S (b); função L(c); função λ (d); Função Gaussiana (e); função Π (f) [Fonte: (M. Cirstea et al., 2002)]	33
Figura 16 - Diagrama de bloco de um controlador Fuzzy Logic [Fonte(Cirstea, 2002)]	35
Figura 17 - Dimensão estratégica na gestão da Manutenção	36
Figura 18 - Taxas comparativas de evolução de gases de óleo em função da energia de decomposição [Fonte: (Golarz, 2015)]	40
Figura 19 - Variáveis de entrada	42
Figura 20 - Diagrama do sistema Fuzzy Logic com sete variáveis de entrada.	45
Figura 21 - Diagrama do sistema Fuzzy Logic com três variáveis de entrada	45
Figura 22 - Variável R_1	47
Figura 23 - Variável R_2	47
Figura 24 - Variável R_3	48
Figura 25 - Variáveis de saída “010”.	48
Figura 26 - Variáveis de saída “110”.	49
Figura 27 - Variáveis de saída “101”.	50
Figura 28 - Variáveis de saída “102”.	50
Figura 29 - Variáveis de saída “001”.	51
Figura 30 - Variáveis de saída “020”.	52
Figura 31 - Variáveis de saída “022”.	52
Figura 32 - Variáveis de saída de todas as amostras.	54

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Lista de domínio e respetivas descrições [adaptada de (NIST, 2010)] .	7
Tabela 2 - Amostras dos gases em $\mu\text{l}/\text{minutos}$	41
Tabela 3 - Razões de gás e valores IEC (Hongzhong Ma et al., 2005; Rogers, 1978)	43
Tabela 4 - Diagnóstico sugerido pelo método IEC (Ma et al., 2005)	44
Tabela 5 - Amostras dos gases pelo método IEC.	45
Tabela 6 - Exemplo de Variáveis linguísticas do sistema.....	46
Tabela 7- Resultados do algoritmo na calibração.	53
Tabela 8 - Resultados do algoritmo autónomo.....	54

ABREVIATURAS E SIGLAS

DBMS – *Database Management Systems*

DRM – *Doernenburg Ratio Method*

DTM – *Duval Triangle Method*

IA – *Inteligência Artificial*

IEC – *International Electrotechnical Commission*

IoP – *Internet of People*

IoT – *Internet of Things*

ISM – *Industrial, Scientific and Medical*

LRMI – *Learning Resource Metadata Initiative*

MIoT – *Medical Internet of Things*

PLC – *Power Line Communication*

RFID – *Radio Frequency Identification*

RI – *Redes inteligentes*

RRM – *Rogers Ratio Method*

SOA – *Service Oriented Architecture*

SOAP – *Simple Object Access Protocol*

UDDI – *Universal Description, Discovery and Integration*

WLAN – *Wireless Local Area Network*

WPAN – *Wireless Personal Area Networks*

WSDL – *Web Services Description Language*

WWAN – *Wireless Wide Area Network*

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento tecnológico têm surgido novas soluções que podem ser exploradas a favor do utilizador e do meio que o rodeia; é o caso da *Internet* das Coisas (IoT) que oferece muitas vantagens, quer para as pessoas quer para a indústria, uma vez que permite novas abordagens nas comunicações e na disponibilidade de informação. A IoT fornece conectividade para qualquer pessoa em qualquer lugar.

Com o avanço da tecnologia há a tendência de caminhar em direção a uma sociedade onde tudo e todos estarão conectados (Zheng *et al.*, 2011). A IoT é considerada o futuro da *Internet*, que realiza a aprendizagem de máquina para máquina (M2M, *Machine To Machine*). (Y. Huang & Li, 2010).

Existem inúmeras vantagens relacionadas com a IoT. As Indústrias têm vindo a utilizar este tipo de tecnologia na cadeia de abastecimento para fins de informação do produto ao seu cliente ou fornecedores, mas, atualmente, a sua intervenção alargou-se.

Li *et al.* (2011) *apresenta um aplicativo da Internet of Things - o Smart Community -, que se refere a uma classe de sistemas ciberfísicos, com objetos cooperativos (por exemplo, casas inteligentes em rede) e IoT. A tecnologia está incorporada nas grandes estruturas das Smart Grid, tornando possível vários fluxos de informação entre equipamentos eletrónicos; com este tipo de informação tomam-se decisões e, por consequência, são estas que o tornam inteligente, daí o conceito de Smart.*

Para cumprir os objetivos da manutenção, a empresa precisa de competências de gestão para integrar pessoas, políticas, equipamentos e práticas. Também precisa de engenharia e tecnologia adequadas (Pintelon & Gelders, 1992).

O uso de *Big Data*, da Inteligência Artificial (ML- *Machine Learning*) e da *Internet* das Coisas (IoT) permitem efetuar prognósticos em tempo real sobre os equipamentos produtivos, sendo possível prever falhas e adquirir peças de reserva a tempo de ter uma ordem de trabalho de manutenção agendada previamente com os recursos necessários disponíveis (Chen *et al.*, 2019). Isso é válido também para a indústria da energia, uma vez que, aplicando os mesmos conceitos, se podem obter vantagens competitivas relativamente aos concorrentes.

1.1- Enquadramento

Hoje em dia muitas coisas estão a ser feitas com base na Inteligência Artificial (IA), tendo como referência o fluxo de informação de um pouco de tudo: cidades inteligentes; indústrias inteligentes; carros inteligentes; eletrodomésticos inteligentes, desde os mais robustos até aos menos robustos. A IoT faz parte desta espinha dorsal, mas os intervenientes esquecem-se, muitas vezes, do mais importante, que é o de manter aqueles ativos físicos funcionais; daí surgir a palavra mágica de Manutenção - esta palavra torna o desafio difícil, uma vez que engloba várias políticas e preceitos a serem aplicados a cada tipo de equipamento.

A gestão da manutenção e o uso de *software* inteligente para rastrear os recursos nas organizações garantem que os equipamentos da empresa permanecem sempre em perfeitas condições de funcionamento, evitando intervenções inesperadas e tempo de inatividade inútil, otimizando assim o valor da manutenção no que lhe concerne aos custos da produção operacional.

1.2 - Formulação do Problema

Existem muitos fenómenos que podem ser observados nas redes elétricas, os quais podem ser convertidos em dados digitais, constituindo informação que pode ser utilizada a favor dos consumidores, designadamente as indústrias, ou mesmo os consumidores domésticos. Esta informação pode ser classificada em grupos e, com o devido tratamento, passível de uma boa aplicação para resolver problemas. É o caso da sua utilização na manutenção preventiva, designadamente na sua vertente preditiva, nas redes elétricas.

O presente projeto visa englobar e explorar a tecnologia IoT para fins de manutenção preventiva em equipamentos elétricos de uma rede inteligente, trazendo uma nova forma de evitar avarias desnecessárias e prolongar a vida útil dos ativos, bem como trazer uma nova visão na gestão dos ativos eletrónicos dos consumidores industriais.

1.3 - Objetivo

O projeto tem como principal finalidade apresentar os resultados da ferramenta *Fuzzy Logic* aplicada ao estudo do estado de um transformador de modo a demonstrar a possibilidade de criar uma política de manutenção adequada. Através do *Notebook jupyter*, o objetivo é tornar possível a conexão de equipamentos elétricos de grande porte, sendo parametrizados em tempo útil e tratadas as suas

amostras de dados, para fins de prevenção de avarias indesejadas. No presente projeto é usado como caso de estudo um transformador, tendo como variáveis de entrada os gases e a variável de saída o estado em que se encontra o mesmo.

1.4 - Metodologia Utilizada

O presente projeto tem como metodologia o tratamento de dados através da linguagem de programação *Python*, no sistema *Notebook Jupyter*, visando a deteção de avarias em tempo real nas *Smart Grids*; para o efeito é usado como caso de estudo um transformador de alta tensão, visando ainda a avaliação do desempenho da Metodologia *Fuzzy Logic* (Figura 1).

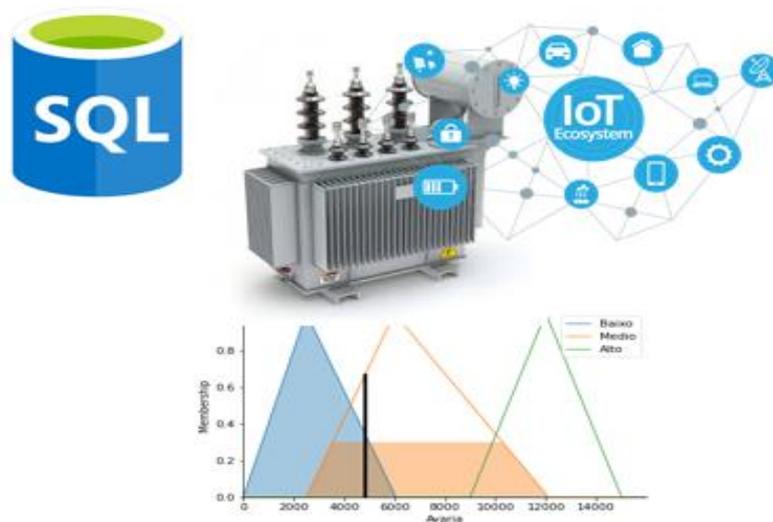


Figura 1 - Sistema proposto

1.5 - Estrutura do Projecto

O presente documento é constituído pelos seguintes capítulos:

- No segundo Capítulo é apresentado o conceito de *Smart Grid*, ilustrando a importância dos equipamentos que as compõem; é apresentado o conceito de IoT e de como esta tecnologia tem conseguido espaço no mundo tecnológico empresarial. Também são apresentados alguns conceitos sobre políticas de manutenção e, por último, a teoria da *Fuzzy Logic* e as respetivas aplicações, bem como as vantagens e desvantagens que a mesma apresenta;

- No terceiro capítulo é feita uma descrição das amostras dos gases, e apresentado o *software* utilizado para a realização do Projeto; no mesmo capítulo é ainda apresentado o método da IEC (*International Electrotechnical Commission*) e, por último, os respectivos testes;
- Os últimos capítulos estão dedicados à discussão dos resultados, conclusões e propostas para desenvolvimentos futuros, referências e anexos.

CAPÍTULO 2

ENQUADRAMENTO TEÓRICO

Neste capítulo é apresentado o conceito de *Smart Grids*, o qual tem sido uma aposta no mundo da automação das redes de distribuição de energia elétrica. Este tipo de tecnologia tem vindo a superar alguns dilemas, como a gestão dos recarregamentos dos veículos elétricos, suporte da sustentabilidade e gestão das cargas durante as horas de ponta, horas de cheias, etc.

2.1 - *Smart Grids*

As *Smart Grids*, consideradas as redes de energia da próxima geração, usam fluxos bidirecionais de eletricidade e informação para gerir uma rede de distribuição de energia automatizada e amplamente distribuída. Uma *Smart Grid*, ou seja, uma "rede inteligente", é simplesmente um sistema avançado de distribuição de energia elétrica que tem a capacidade de equilibrar cargas elétricas de diversas fontes de geração de energia alternativas, muitas vezes intermitentes.

Um componente essencial da "Rede Inteligente" (RI) é a sua capacidade de armazenar energia elétrica; isto permite que a procura dos consumidores seja sempre atendida (Zahran, 2013). Dentro das *Smart Grids*, as fontes de energia alternativas são disponibilizadas através das *Microgrids*.

As *Microgrids* são versões em menor escala do sistema elétrico centralizado. Assim, são formadas ilhas locais com fontes de energia, normalmente renováveis, partilhadas entre diversas casas. Cada casa é ligada a um único *router* de energia e as casas trocam energia entre si através desses *routers* (Zhu *et al.*, 2011).

IEA (2011) refere que o termo Rede Inteligente (RI) possui uma série de valores e características que são universais. Entre esses valores está um sistema fiável, seguro, económico, eficiente e ambientalmente correto.

Chen *et al.* (2009) realizou uma pesquisa sobre tecnologia de "redes inteligentes" apresentando os conceitos das *Smart Grids*; seguindo os mesmos exemplos, Yu & Luan (2009) e Hassan & Radma (2010) reviram brevemente os conceitos básicos de "redes inteligentes" e de algumas tecnologias que podem ser utilizadas nas "redes inteligentes". Rohjans *et al.* (2010) realizaram uma revisão sobre os padrões existentes de "Redes Inteligentes", dando recomendações concretas para futuros padrões de *Smart Grids*.

Essencialmente, o conceito de RI está relacionado com a abordagem das redes de energia elétrica dotadas de tecnologias digitais e recursos computacionais e de comunicação avançados, com o objetivo de monitorizar e gerir a eletricidade ao longo da estrutura de transporte e distribuição até aos consumidores finais, conforme é ilustrado na (Figura 2). (IEA, 2011)

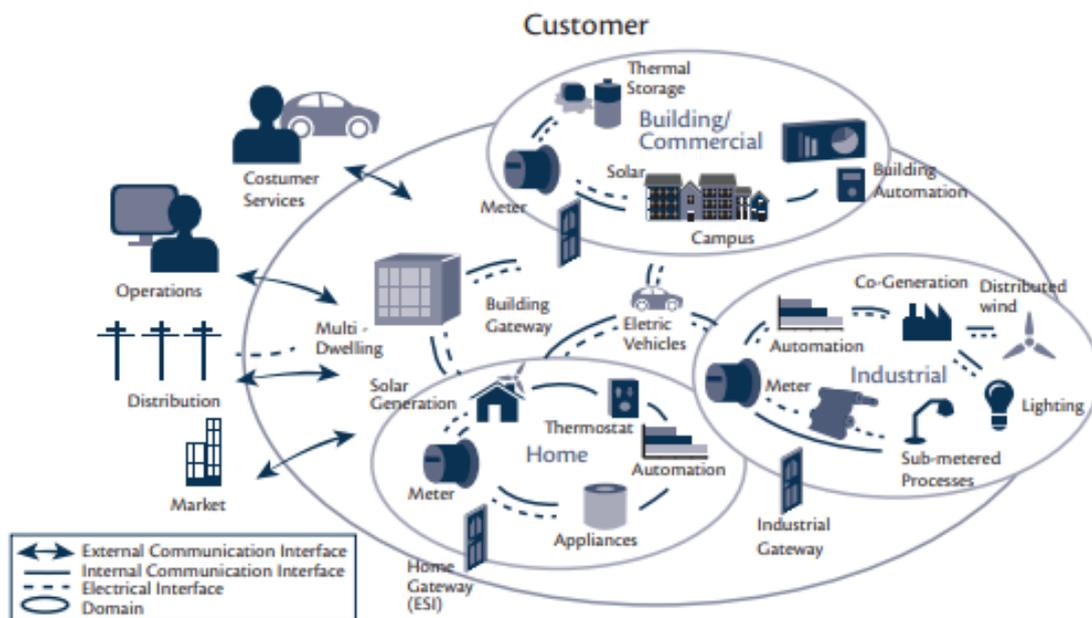


Figura 2 - Representação da RI [Fonte: (NIST, 2009)]

Vasconcelos (2008) apresenta um dos primeiros benefícios relacionados com esta tecnologia: os medidores inteligentes para consumidores, fornecedores, empresas de medição, operadores de redes de distribuição e interesse público.

A Academia de Formação, designada por ATEC em 2018, refere que diversificação e generalização das *Smart Grids* irá permitir obter dados sobre a qualidade da energia consumida e os hábitos de consumo dos clientes finais, permitindo assim aos fornecedores de serviços anteciparem as necessidades. A geração do século XXI está a assistir à mudança da rede de distribuição de energia, sendo que há uma transição de um sistema de distribuição estática para uma rede de distribuição controlável e dinâmica, onde é necessário ter em consideração os novos fornecedores de energia descentralizados, tais como instalações fotovoltaicas e parques eólicos. Na Tabela 1 são apresentados os domínios e as respetivas explicações no âmbito energético.

Tabela 1 - Lista de domínio e respetivas descrições [adaptada de (NIST, 2010)]

Domínio	Atores do domínio
Geração	Relacionada com as unidades geradoras de grandes parcelas de eletricidade.
Transmissão	Relacionada com os recursos de transporte de eletricidade a longas distâncias.
Distribuição	Relacionada com os distribuidores de eletricidade aos consumidores.
Cliente	Relacionado com os utilizadores finais da eletricidade que assumem papel de produtor e consumidor.
Mercados	Relacionado com os operadores e participantes do mercado de energia.
Operadores de Rede	Relacionado com os gestores do fluxo de eletricidade.
Fornecedores de serviços	Relacionado com os fornecedores de “utilidades” e serviços aos consumidores finais.

Algumas das características geralmente atribuídas às RI são (IEA, 2011):

- Autorrecuperação - capacidade de, automaticamente, detetar, analisar, responder e restaurar falhas na rede;
- Participação proactiva dos consumidores - capacidade de incluir os equipamentos e o comportamento dos consumidores nos processos de planeamento e operação da rede;
- Tolerância a ataques externos - capacidade de mitigar e resistir a ataques físicos e *cyber* ataques;
- Qualidade de energia - fornecer energia com a qualidade exigida pela sociedade digital;
- Capacidade para acomodar uma grande variedade de fontes e procuras - capacidade de integrar de forma transparente (*plug and play*) uma variedade de fontes de energia de várias dimensões e tecnologias;
- Menor impacto ambiental do sistema produtor de eletricidade, reduzindo perdas e utilizando fontes renováveis e de baixo impacto ambiental;

- Resposta à procura mediante a atuação remota nos dispositivos dos consumidores;
- Viabilização e benefício dos mercados competitivos de energia, favorecendo o mercado, designadamente a venda e a microgeração.

De acordo com o LEAF GROUP LTDA (2020), "Rede Inteligente" é um termo usado para descrever a rápida substituição da infraestrutura do sistema de alimentação elétrica oriundo dos Estados Unidos. Quando o sistema avançado for completamente implementado, este possuirá recursos de comunicação entre as redes elétricas, o que não é possível atualmente - daí o termo "Inteligente".

As práticas de gestão do lado da procura, tal como o uso de redes inteligentes, medidores interativos e incentivos para a redução de cargas, podem ajudar a reduzir o pico de procura, que é a parte mais cara do perfil de carga no fornecimento de serviços de eletricidade (Zahran, 2013).

Há vários benefícios quantificáveis que as "redes inteligentes" trarão hoje, pois existem muitos outros benefícios significativos que não se tornarão aparentes até que as "Redes Inteligentes" comecem a ser implementadas. Há evidências convincentes que apoiam as seguintes premissas de benefícios a longo prazo (Gov, 2019):

- Reduções significativas no consumo residencial de energia de pico de procura, fornecendo preços em tempo real, com benefícios ambientais, em conjunto com tecnologias avançadas nos consumidores finais;
- Reduções adicionais no pico de procura residencial, integrando totalmente o sistema de "utilidades" com as tecnologias de geração distribuída (escalável para penetração em massa);
- Redução, de até 30%, nas perdas de distribuição devido ao ótimo desempenho do fator de potência e do balanceamento do sistema;
- Potencial redução da pegada de carbono como resultado da menor procura residencial de pico de consumo de energia, melhoria das perdas de distribuição, e aumento das opções de conservação;
- Possíveis reduções no número de interrupções de fornecimento ao cliente, como resultado de uma gestão aprimorada na previsão e uma resposta mais eficaz às interrupções e respetiva recuperação de cada interrupção;
- Diferimento esperado dos gastos de capital em projetos de distribuição e transmissão com base em melhores estimativas de carga e de redução no pico de carga devido à gestão aprimorada da procura;
- Potencial economia de custos de serviços públicos com desconexões e reconexões remotas e automatizadas, eliminação de viagens de campo desnecessárias e redução na interrupção do fornecimento de energia ao cliente, devido à automação residencial.

Bakken (2017) apresenta um sistema de controlo de *microgrid* que consiste em duas camadas: um controlador primário rápido e automático; e um controlador mais lento subjacente. O mesmo refere que o controlador rápido e automático pode tirar o máximo proveito da comunicação e medição da rede inteligente e, portanto, encaixa-se totalmente no âmbito da rede inteligente. O controlador primário contribui significativamente para a rede inteligente, no sentido de facilitar o controlo da rede inteligente e por diminuir a carga de comunicação.

De acordo com Wang *et al.* (2011), uma rede inteligente utilizará as tecnologias de informação para monitorização extensiva das instalações e equipamentos elétricos. Essa informação pode ser usada para operar a rede com eficiência, minimizando as perdas do sistema. De acordo com o mesmo autor, os dados obtidos são cruciais no processo de monitorização e também são úteis na realização da manutenção com base nas necessidades e na melhoria do projeto dos sistemas de energia elétrica.

Os centros de controlo inteligentes devem monitorizar e interagir remotamente com os dispositivos elétricos em tempo real; as infraestruturas de transmissão inteligentes devem empregar novas tecnologias para melhorar a qualidade da energia; as subestações inteligentes devem coordenar os seus dispositivos locais (Li *et al.*, 2010).

Quando se desenvolve uma rede inteligente é fundamental aproveitar os avanços nas tecnologias de rede para permitir a gestão automatizada e inteligente do sistema. Embora as tecnologias de rede atualmente disponíveis tenham satisfeito bastante as necessidades de comunicação pessoal, a sua aplicação aos sistemas de energia para atender aos requisitos específicos de comunicação, são ainda desafiadores.

Numa rede é preciso identificar os cenários e as características de comunicação dos sistemas de energia e desenvolver possíveis soluções utilizáveis na rede, sendo que uma infraestrutura de uma rede deve atender às expectativas de prontidão, fiabilidade e segurança das comunicações do sistema de energia (Wang *et al.*, 2011). Um exemplo experimental é aquele em que a velocidade do rotor é enviada de volta ao conversor de energia através do cabo de energia usando a tecnologia *Power Line Communication* (PLC), tal como ilustrado na Figura 3.

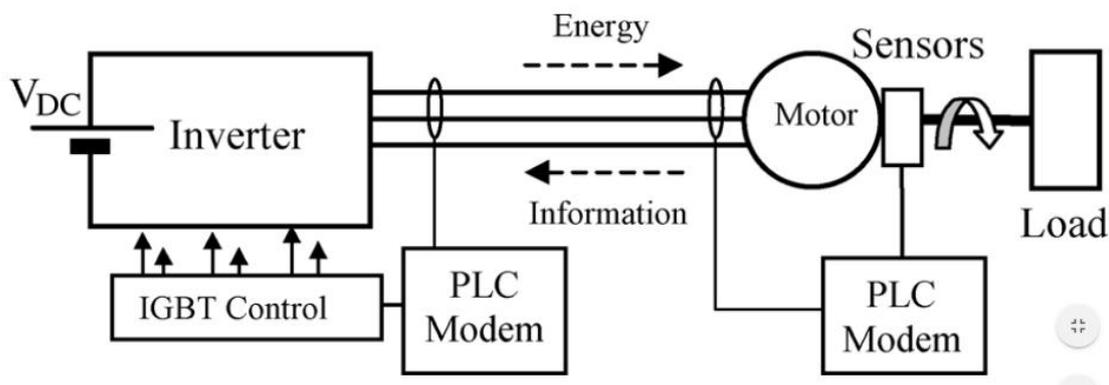


Figura 3 - Setup experimental [Fonte: (Majumder & Caffery, 2004)]

Esta tecnologia já existe em aplicações domésticas e permite a transferência de dados com alto rendimento através da rede elétrica (Majumder & Caffery, 2004).

Baseado no precedente, designadamente do mecanismo de comunicação, é possível monitorizar a condição de um motor e evitar interrupções de produção.

2.1.1 - Segurança das Smart Grids

Baumeister (2010) apresenta uma revisão referente à segurança cibernética das *Smart Grids*. De acordo com este autor, uma *Smart Grid* deve apresentar as seguintes características:

- Segurança do Sistema de Controlo de Processo;
- Segurança do *Smart Meter*;
- Segurança da Estimativa do Estado do Sistema de Potência;
- Segurança do Protocolo de Comunicação da *Smart Grid*;
- Simulação da *Smart Grid* para Análise de Segurança.

Conceptualmente, uma *Grid* é uma rede de linhas que se podem cruzar para formar uma conexão com outra conexão. Uma “rede inteligente” é uma rede elétrica moderna que utiliza tecnologias de informação e comunicação analógica ou digital. Aloul *et al.* (2012) refere três objetivos principais de segurança que devem ser incorporados no sistema de “Rede Inteligente”:

- 1) disponibilidade de uma fonte de alimentação ininterrupta de acordo com os requisitos do utilizador;
- 2) integridade da informação comunicada;
- 3) confidencialidade dos dados do utilizador.

O mesmo investigador refere que a “Rede Inteligente” é considerada uma infraestrutura crítica; para uma boa resolução do problema todas as vulnerabilidades devem ser identificadas e as soluções devem ser implementadas para reduzir os riscos a um nível de segurança aceitável.

Existe uma preocupação com a privacidade dos clientes, atendendo a que, com as *Smart Grids*, os dados recolhidos podem conter grande variedade de informação, o que permite construir o modelo dos hábitos dos clientes que fazem uso do sistema elétrico, como, por exemplo, saber a hora a que tomam banho, a hora a que dormem, e de como fazem uso dos eletrodomésticos (Kim *et al.*, 2011).

O mesmo apresenta no seu estudo técnicas que têm como objetivo solucionar este tipo de problemas, tais como as de ofuscação, as quais dificultam a engenharia inversa através de um aumento do grau de ininteligibilidade dos dados, causando um efeito semelhante ao da agregação.

A ofuscação gera modificações sintáticas que dificultam a compreensão dos dados, mantendo os conteúdos originais. Isso permite a análise dos dados sem interferir na privacidade dos clientes (Kim *et al.*, 2011). Existem outras propostas que apontam na direção da construção de sistemas de faturação e de gestão elétrica doméstica que tratem a questão da privacidade (Kalogridis *et al.*, 2010), (Molina-Markham *et al.*, 2010).

Estas técnicas são apenas suporte técnico, havendo a necessidade de uma intervenção na área jurídica e um legislação específica que precisa ser estabelecida antes da implementação das *Smart Grids* (Quinn, 2009).

2.1.2 - Arquitetura

Há uma necessidade crescente de arquiteturas de *software* que possam lidar com os requisitos de adaptabilidade e fiabilidade da futura rede elétrica. Nesse contexto, um *software* baseado em serviços *Web* forneceria:

- 1) Suporte ao desenvolvimento:
 - a) Melhora o processo de desenvolvimento de novos aplicativos usando serviços baseados em entidades;
 - b) Abre as portas para o uso de engenharia de *software* orientada a modelos;
 - c) Lida com os problemas de interoperabilidade entre vários fornecedores e entidades diferentes.
- 2) Suporte em tempo de execução:
 - a) Permite fácil atualização e implantação de soluções através da composição de serviços *Web*;

- b) Oferece suporte para adaptabilidade às mudanças das necessidades de gestão.

Quinn (2009) apresenta a passagem das redes convencionais para as *Smart Grids* trazendo uma série de benefícios, designadamente na melhoria do controlo de recursos que, por sua vez, permite oferecer um maior nível de fiabilidade do sistema, mesmo em face de uma procura crescente. A nível das distribuidoras haverá perdas reduzidas na distribuição de energia e custos de manutenção baixos, os consumidores terão maiores ganhos e maior controlo sobre as faturas, além de receber os benefícios de uma rede mais fiável e maior sustentabilidade ambiental, que trará um benefício adicional com a proliferação de fontes de energia renováveis e uma correspondente redução nas emissões de CO₂.



Figura 4 - Representação de uma rede elétrica [Fonte: (IN2, 2018)]

Uma *Smart Grid* deve ter um sistema robusto de comunicação, fornecendo da parte da potência uma continuidade dos serviços, uma vez que esta tem uma conjuntura de setores que vai desde a geração e transição das potências elétricas da produção até ao destinatário final, tal como é ilustrado na Figura 4. Naquela devem existir equipamentos que devem ser acompanhados constantemente para que seja possível evitar prováveis falhas, sendo um deles o transformador.

2.1.3 - Tecnologia de comunicação

Sistema de comunicação sem fios

As tecnologias do sistema de comunicação sem fios Evolution (Wireless) podem ser divididas em três classes principais: WPAN (Wireless Personal Area Network); WLAN (Wireless Local Area Network); e WWAN (Wireless Wide Area Network) (Carcelle et al., 2006). O sistema sem fios abrange uma variedade de tecnologias de comunicação, como mostra a Figura 5. No que concerne à IoT, focaremos as

tecnologias WLAN e WPAN, já que a tecnologia WWAN é usada pelas operadoras de telefonia móvel.

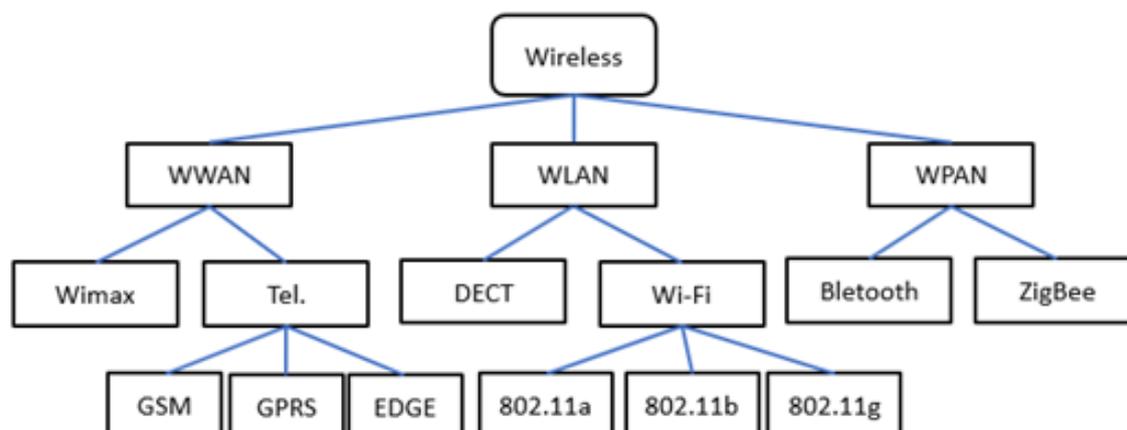


Figura 5 - Estrutura das redes sem fios [Adaptado de (CARCELLE, 2006)]

A classe WPAN foi projetada para baixas taxas de transmissão (geralmente de 100 a 200 kbps) e inclui os padrões *ZigBee* e *Bluetooth*. Embora seja amplamente aceite em ambientes corporativos, o seu uso ainda é restrito ao ambiente industrial.

Varma *et al.* (2003) referem as redes locais sem fios (WLAN) para suportar dados de velocidade mais alta, mas cobrem apenas pequenas áreas e permitem mobilidade limitada. Mohammed & Sulaiman (2012) referem que a deteção de intrusões é necessária como um nível distinto de segurança para proteger os sistemas WLAN.

As redes de sensores sem fios (Wireless Sensor Networks - WSN) podem ser usadas para acompanhar a infraestrutura ferroviária, como pontes e linhas (Hodge *et al.*, 2015); estes autores referem que o ZigBee aprimora o IEEE 802.15.4, incluindo autenticação, criptografia de dados para segurança e roteamento de dados. A telefonia móvel e o Wi-Fi são apenas ponto a ponto, enquanto o WPAN e o Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMax) podem ligar muitos dispositivos numa topologia de malha, em que qualquer nó pode comunicar com qualquer outro nó.

Tecnologia Wi-Fi

De acordo com Miller (2003), Wi-Fi é um acrónimo para fidelidade sem fio, comumente visto como IEEE 802.11b. O termo vem da Wi-Fi Alliance (WECA). Wi-Fi é sinónimo de IEEE 802.11b, da mesma maneira que Ethernet é usada no lugar de IEEE 802.3 (Figura 6). Com o decorrer do tempo o comité de padronização da IEEE aprovou outros padrões, como o IEEE 802.11g 802.11b, 802.11n e 802.11ac. O 802.11b, que funciona na gama de 2.4GHz de frequência; já o

802.11n pode operar na gama de frequência anterior ou nas gamas de 5 GHz; o 802.11ac sendo que o último só trabalha na gama de 5 GHz (Perahia & Stacey, 2013).

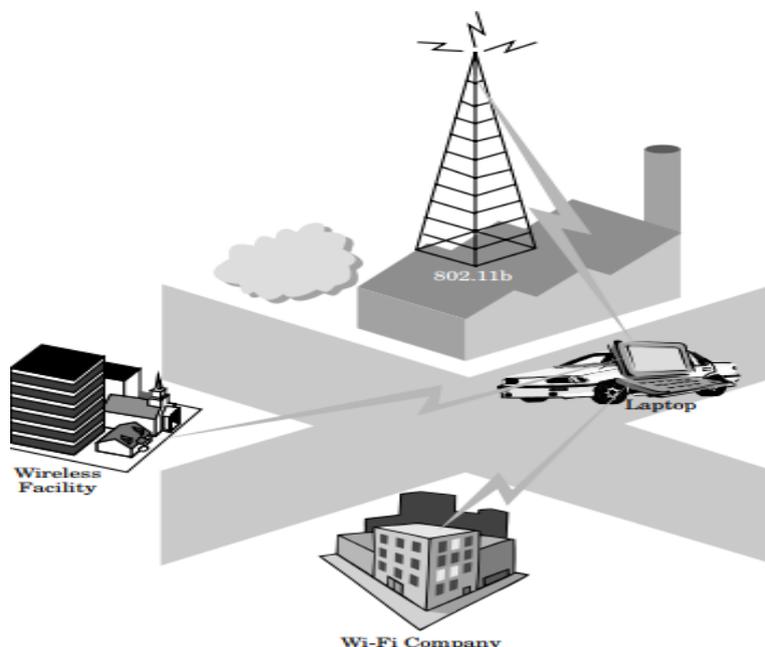


Figura 6 - Sistema de comunicação Wi-Fi [Fonte: (Miller, 2003)]

A facilidade de como a tecnologia Wi-Fi é usada hoje para o *design* de dispositivos industriais ou domésticos é a razão pela qual foi expandida para a IoT. Ao transferir arquivos para apoiar a resolução de problemas, uma das variáveis importantes para a sua otimização é a velocidade de transmissão dos arquivos e o processamento correspondente. De acordo com Leandro (2012), IEEE 802.11n, o padrão Wi-Fi oferece uma taxa de transferência de centenas de “megabits” por segundo, permitindo até quatro fluxos de dados de cada vez. Além disso, as redes IEEE 802.11 reduzem o custo da infraestrutura a um mínimo, melhorando o custo total de posse, o que a torna uma tecnologia eficaz para essa finalidade. (Tozlu *et al.*, 2012).

A tecnologia Wi-Fi possui vantagens, designadamente na sua fácil conexão, atualizações em versões que oferecem taxas de conexão de dados rápidas, na faixa de 300 Mbps, e a conexão entre várias categorias de dispositivos; porém, esta tecnologia também possui desvantagens, como uma taxa de transferência reduzida no *design* de mais dispositivos, dificuldade na segurança total, e não funciona bem quando não há boa intensidade do sinal (RF Wireless World, 2012).

Gehrmann *et al.* (2004) referem que a tecnologia sem fios Bluetooth é uma tecnologia de rádio de curto alcance projetada para atender a necessidades

específicas de interconexões sem fios entre diferentes dispositivos pessoais, hoje muito populares.

Bluetooth/IEEE 802.15.1

Segundo Gehrman *et al.* (2004), o rádio *Bluetooth* opera na faixa Industrial, Científica e Médica (ISM), livre de licença e disponível globalmente em 2,4 GHz. Como a banda ISM é gratuita, o *Bluetooth* precisa partilhar essa banda de frequência com muitos outros sistemas. A vantagem do uso do *Bluetooth* no ambiente industrial traz benefícios, tais como fácil instalação, configuração e controlo de acesso centralizado, evitando colisões. Além dessas vantagens, os dispositivos *Bluetooth* podem ser usados para atender a quatro principais aplicativos do setor industrial (Viegas *et al.*, 2007), (Gubbi *et al.*, 2013):

1. Substituição de cabos pela ligação *Bluetooth*, usando adaptadores externos ligados às portas série de alguns dispositivos industriais ou através de adaptadores incorporados nos dispositivos;
2. Combinação com as tecnologias da *Internet*, adicionando recursos de medição nas *interfaces* da Web - através das páginas Web / WAP (*Wireless Application Protocol*) é possível ler, enviar ou receber informação entre dispositivos;
3. Criação de pontos de acesso industriais para ligar vários dispositivos *Bluetooth* a redes com fios. As *interfaces* da Web podem ser acedidas através de pontos de acesso, permitindo a exibição de uma lista de todos os dispositivos *Bluetooth* ligados;
4. Ligação de sensores, atuadores e dispositivos de entrada / saída analógico-digital ao sistema supervisor usando comunicação *Bluetooth* - aplicações típicas podem ser identificadas em equipamentos que realizam movimentos, tais como sensores de vibração localizados em braços mecânicos.

Zigbee

O IEEE 802.15.4 é uma tecnologia de rede sem fios, um padrão que opera em 2.4 GHz, permitindo aplicativos que exijam trocas de dados relativamente pouco frequentes, com baixas taxas de dados numa área restrita e dentro de um raio de 100 m, como numa casa ou prédio. Na recolha de dados de dispositivos médicos e outros, o *ZigBee*, como o *Bluetooth*, possuem uma grande base de operações instaladas, embora talvez, tradicionalmente, mais em ambientes industriais (Figura 7).

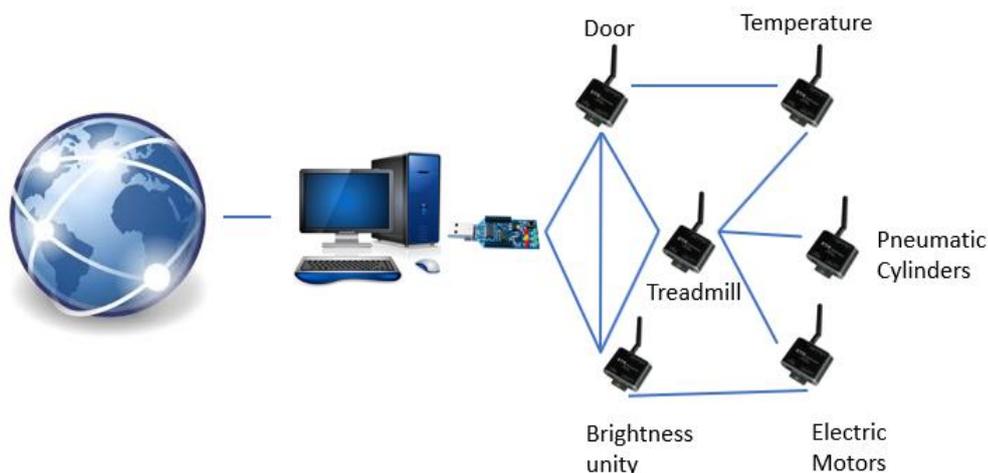


Figura 7 - Sistema Zigbee [Adaptado em (RF Wireless World, 2012)]

O *Zigbee* não possui um controlador central e as cargas são distribuídas uniformemente pela rede, proporcionando estabilidade; por exemplo, o controlo remoto de eletrodomésticos torna-se fácil.

A capacidade de armazenamento de energia própria que ele usa é baseada numa das mais recentes tecnologias (baterias de lítio); a rede é escalável e é fácil adicionar e remover os dispositivos *Zigbee* finais na rede. Esta tecnologia tem desvantagens, tais como: a necessidade de um especialista com conhecimento para operar dispositivos compatíveis com o *Zigbee* de baixa segurança em comparação com o sistema de segurança baseado em Wi-Fi; o custo de reposição será alto se ocorrer algum problema em equipamentos compatíveis com o *Zigbee*; a sua cobertura é limitada e, como tal, não pode ser usado como um sistema de comunicação sem fios externos - pode ser utilizado em aplicativos sem fios internos (RF Wireless World, 2012).

Diferentes produtos Zigbee são projetados para funcionar e sobreviver em ambientes industriais, como alto ruído de radiofrequência, temperaturas extremas e manuseio inadequado (Abinayaa & Jayan, 2014).

De acordo com Tozlu *et al.* (2012), espera-se que a maioria das aplicações relacionadas com a IoT funcione na faixa de 2,4 GHz; com base nesse facto, uma variedade de tecnologias, Bluetooth e micro-ondas, opera nesta faixa, o que gera um problema de interferência para as aplicações baseadas em sensores.

Jia *et al.* (2012) definem RFID (Radio Frequency Identification) como uma tecnologia automática que ajuda máquinas ou computadores a identificar objetos, registar metadados ou controlar alvos individuais usando ondas de rádio. Um sistema típico RFID consiste em “tags” (transmissores / respondedores) e leitores (transmissores / recetores), tal como ilustrado na Figura 8.

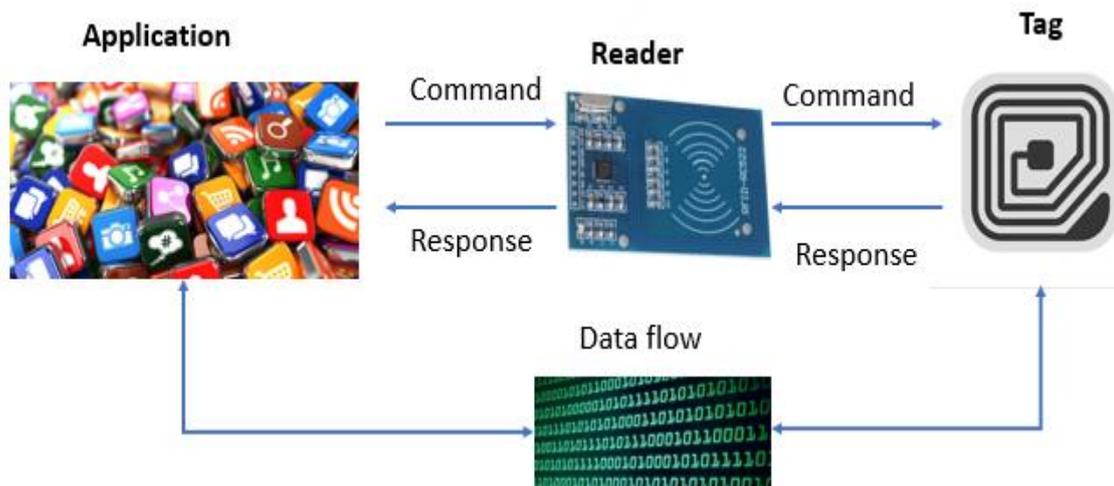


Figura 8 - Componente de um Sistema RFID [adaptado em (RF Wireless World, 2012)]

De acordo com Tobon-Mejia *et al.* (2012), o RFID apresenta uma das grandes vantagens em relação às oportunidades de informação tecnológica. O RFID faz parte do domínio da IoT, uma vez que os leitores de RFID respeitam os protocolos de comunicação apropriados e estão ligados ao terminal da *Internet*, distribuindo os leitores por vários espaços geográficos. Eles podem identificar e rastrear objetos anexados com “tags” e podem ser executados em tempo real - isso traz novas vantagens no campo da partilha de informação.

Uma das grandes vantagens desta tecnologia é a sua capacidade e as suas implicações nos processos de negócios. Porém, devido às limitações de custos e recursos, o sistema RFID não tem segurança suficiente e suporte de privacidade. Portanto, há um bom âmbito de investigação no campo do projeto de um protocolo criptográfico ultraleve e eficiente para sistemas RFID de baixo custo (Jia *et al.*, 2012).

Aghili *et al.* (2019) referem que o uso da tecnologia RFID na proteção de sistemas IoT está a aumentar rapidamente, porque fornece mecanismos de segurança simples e seguros. Mais recentemente, os autores propuseram um protocolo simples de autenticação mútua RFID e LRMI. Os autores argumentam que o LRMI atende aos requisitos de segurança necessários para sistemas RFID, e o mesmo se aplica aos aplicativos MIoT.

IrDA

A *Infrared Data Association* (IrDA) foi criada em 1993 como uma colaboração entre as principais organizações industriais, a fim de estabelecer um padrão aberto para

a comunicação de dados por Infravermelhos (IR) de curto alcance (Barker & Boucouvalas, 1998). Segundo Street *et al.* (1997), o IR é particularmente adequado para aplicações internas de curto alcance. Os fabricantes de computadores adotaram a IrDA (Boucouvalas & Ghassemlooy, 2000) e, como tal, muitos computadores portáteis e outros dispositivos Windows CE no mercado atual possuem uma porta IR de acordo com os padrões desenvolvidos pela IrDA.

O desempenho dos *links* sem fios, óticos, IrDA, pode ser medido pela taxa de transferência que pode ser obtida na camada IrLAP (Infra-Red Link Access Protocol), (Vitsas & Boucouvalas, 2003). A camada de ligação dos dados do protocolo IrDA é chamada de IrLAP (IrDA Link Access Protocol) e é baseada no protocolo HDLC (High Data Link Control) de alto nível (Barker & Boucouvalas, 1998).

Millar *et al.* (1998) referem que, com o IrDA os principais padrões necessários para habilitar qualquer plataforma de computação móvel com comunicação por IR *ad-hoc* permite ligar e comunicar de 2400 bits/s a 4 Mbits/s. O suporte para a plataforma IrDA, disponibilizado por uma ampla variedade de fabricantes, aumentou a sua relevância, pois existem inúmeras variedades de produtos que foram lançados com o IrDA.

WIMAX

O Grupo de Trabalho IEEE 802.16 criou um padrão, conhecido como WiMax, para acesso de banda larga sem fios de alta velocidade e baixo custo, fácil de implementar, fornecendo uma solução escalável para extensão de um *backbone* de fibra óptica (Wei *et al.*, 2005). Millar *et al.* (1998) referem que existe um grande interesse em aceder a redes de banda larga sem fios (Broadband Wireless Access - BWA), devido ao aumento da mobilidade do utilizador e à necessidade de aceder a dados em tempo real.

As redes WiMax baseadas na norma IEEE 802.16e prometem a melhor qualidade possível para o utilizador de serviços de dados móveis. Diferentemente das LANs sem fios, as redes WiMAX incorporam vários mecanismos de qualidade de Serviço (QoS) ao nível dos *Media Access Control* (MAC) para garantir serviços de dados, voz e vídeo (Millar *et al.*, 1998). As estações base WiMax podem oferecer maior cobertura sem fios em cerca de 8 km, com transmissão LOS (Line Of Sight) com largura de banda de, até 70 Mbps (Wei *et al.*, 2005).

(Aalamifar & Lampe, 2017) afirmam que o WiMAX é uma das tecnologias de comunicação sem fios adotadas para comunicação em redes inteligentes. Isto ocorre devido às diferenças inerentes entre aplicativos de redes inteligentes e banda larga móvel. Para este objetivo, o WiMAX está a ser modificado para apresentar um perfil de sistema de rede inteligente conhecido como WiGrid. A rede

de acesso sem fios WiMax / 802.16 é composta por estações base (BSs) e estações móveis (MSs) (Barbeau, 2005). O padrão IEEE 802.16 WiMax fornece um mecanismo para a malha de múltiplas fases, que pode ser implementada como uma rede sem fios de alta velocidade para áreas amplas (Wei *et al.*, 2005).

LTE

Iniciado em 2004, o *Long-Term Evolution* (LTE) é um padrão desenvolvido pelo *Third Generation Partnership Project* (3GPP) para comunicação sem fios de alta velocidade, alta eficiência espectral e latência muito baixa, sendo frequentemente considerada a quarta geração (4G) de comunicações sem fios (Qian Li *et al.*, 2012). A Evolução a Longo Prazo (LTE), definida pelo 3GPP, é uma *interface* de rádio altamente flexível (Dahlman *et al.*, 2010). A primeira versão do LTE fornece taxas de pico de 300 Mb/s, e um atraso na rede de rádio inferior a 5 ms (Astely *et al.*, 2009).

O *LTE-Advanced* (também conhecido como *LTE Release 10*) melhora significativamente as tecnologias LTE anteriores, tais como o *LTE Release 8*, pois suporta taxas de pico muito mais altas, maior rendimento e cobertura, e latências mais baixas, resultando numa melhor experiência para o utilizador (Ghosh *et al.*, 2010). O LTE permite que as operadoras usem um novo espectro, mais amplo, complementando redes 3G com taxas de dados mais altas, latência menor e uma arquitetura baseada em IP. Para melhorar ainda mais a experiência do utilizador de banda larga de uma maneira omnipresente e económica, o 3GPP está a melhorar vários aspetos no âmbito do *LTE Advanced* (Khandekar *et al.*, 2010).

BLE

O *Bluetooth Low Energy* (BLE) é uma tecnologia sem fios de baixa potência, desenvolvida e usada em vários aplicativos, incluindo os definidos pela *Internet das Coisas* (IoT). Há uma grande certeza na implementação da tecnologia BLE em biliões de dispositivos nos próximos anos, tendo sido a área de investigação privilegiada nos últimos anos em várias categorias de aplicações (Dian *et al.*, 2017; Lin *et al.*, 2014).

De acordo com Dian *et al.* (2018), a taxa de dados do *Bluetooth Low Energy* (BLE) é de 1 Mbps, e de 2 Mbps para o BLE 4.2 e o BLE 5, respetivamente. Existe uma desvantagem nesta tecnologia, que é a sua taxa de transferência ser relativamente baixa em comparação com outras tecnologias sem fios. A taxa máxima de transferência varia de 58 Mbps a 236 Mbps para o BLE 4.2. (Giovanelli *et al.*, 2015; Lin *et al.*, 2014).

Sistema de comunicação por fios

Desde que a comunicação com fios (*Wire*) evoluiu, no que chamamos de arquiteturas de plataforma, a esta foi adicionada a tecnologia de fibra ótica, devido à sua grande capacidade de comunicação. De acordo com Lehr & Chapin (2010), em março de 2009, a fibra para uso doméstico estava disponível na América do Norte em cerca de 15,2 milhões de residências, com 2,7 milhões de residências com o triplo serviço de acesso de voz, vídeo e *Internet*, isto apenas por uma operadora nos Estados Unidos da América, (Verizon Wireless¹).

A tecnologia *Wire* acompanhou a evolução da comunicação e pode dizer-se que é um dos suportes de comunicação mais importantes em quase todos os tipos de tecnologia que requerem fluxos de dados; o seu *design* utiliza comunicação por cabo; um exemplo é o seu uso na tecnologia automóvel, onde é capaz de alimentar sensores e, ao mesmo tempo, transmitir informação sobre os seus estados.

As redes com fio têm algumas propriedades que influenciam a transmissão do sinal, tais como: a capacitância dos fios que adiciona carga nos portos de ligação; a resistência, capacitância e indutância dos fios que aumentam o atraso do sinal; e o acoplamento indutivo e capacitivo entre os fios que acrescenta ruído ao sinal, (Ho, Mai & Horowitz, 2001). As três características elétricas mais importantes dependem da geometria dos fios e da sua posição em relação a outras estruturas circundantes.

As redes com fios têm uma grande capacidade quando comparadas com as redes sem fios; isso deve-se à faixa de frequência, significativamente alta, que pode ser transportada pela infraestrutura com fios relacionada com os seus problemas físicos. De forma sintética, por exemplo, um único cabo coaxial possui uma faixa de frequência útil de cerca de 1 GHz; esta capacidade é superada pela fibra ótica, uma vez que uma única fibra ótica possui uma faixa de frequências útil acima de 1.000 GHz. Todo o espectro de RF sem fios (30 Hz a 300 GHz) encaixa facilmente numa única fibra, a qual oferece segurança, maior largura de banda, resistência à interferência devido ao seu revestimento, fiabilidade e melhor qualidade de serviço. (Goleniewski & Jarrett, 2006)

A capacidade de transmissão em redes de comunicação ótica é expressivamente melhorada devido à utilização multiplexada por divisão de comprimento de onda (Noshad & Rostami, 2012).

No início, a fibra ótica apresentava enormes perdas, cerca de 1.000 dB/km tornando-a impraticável para usos de comunicação. Com o avanço tecnológico os cientistas concluíram que a razão da perda de sinal na fibra ótica era devido à presença de impurezas no material da fibra e, depois de vários estudos, conseguiu-

¹ <https://www.verizonwireless.com/>

se fazer uma fibra ótica multimodo com núcleo de sílica com perdas de apenas 4 dB/km (Jones, 1998).

Por definição, uma fibra ótica é um guia ou filamento de onda ótico feito de vidro ou materiais plásticos / polímeros (Hammond, 2020). É composto por três partes: o núcleo; a bainha; e o revestimento/proteção, conforme ilustrado na (Figura 9).

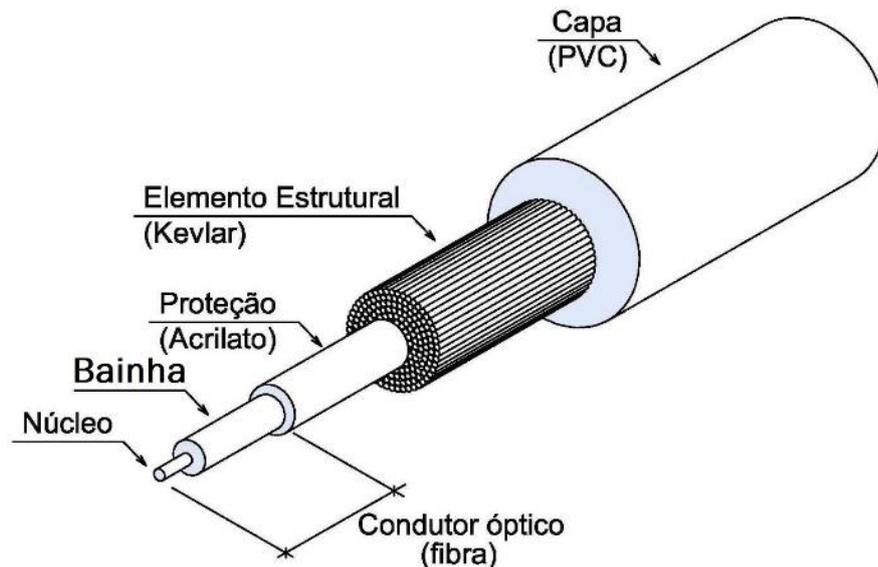


Figura 9 - Esquema de uma fibra ótica Fi [Fonte: (Unknown, 2013)]

A luz propaga-se ao longo do núcleo da fibra. A bainha é feita de um material dielétrico com um índice de refração menor que o do material do núcleo. A bainha funciona para minimizar a perda de luz do núcleo para o ar circundante, para minimizar a perda de dispersão na superfície do núcleo, para proteger a fibra da absorção de contaminantes da superfície e para fornecer resistência mecânica; as camadas de revestimento são usadas para proteger as fibras de danos físicos (Hammond, 2020).

O *routing* de caminhos de luz através de uma rede totalmente ótica tem recebido grande atenção de diversos investigadores, tal como: (Chlamtac *et al.*, 1996).

Segundo Bruno (2003), os *router* são configurados para executar protocolos de *routing* para determinar os melhores caminhos para um destino. Os *routers* trocam informação sobre redes de destino e o seu *status* de *interface*, através desses protocolos de *routing*. Os *routers* também podem ser configurados manualmente com rotas estáticas. Alguns protocolos de *routing* IP são os seguintes:

- *Routing Information Protocol* (RIP);
- Protocolo de *Routing* de *Gateway Interior* (IGRP);
- Abrir o caminho mais curto primeiro (OSPF);
- Sistema intermediário para sistema intermediário (IS-IS);

- Protocolo de *routing* de *gateway* interno aprimorado (EIGRP);
- *Border Gateway Protocol* (BGP).

Strand *et al.* (2001) afirma que existem alguns problemas associados ao *routing* numa rede totalmente ótica sem conversão de comprimento de onda, que são os seguintes:

- Uma vez que a rota selecionada deve ter o comprimento de onda escolhido disponível em todos os *links*, essa informação precisa de ser considerada no processo de *routing* (Chaudhuri *et al.*, 2000);
- A escolha de um caminho primeiro e, depois, de uma onda ao longo do caminho, é conhecida por fornecer resultados adequados em topologias simples, como anéis e árvores (Yates *et al.*, 1999). Isso não parece ser verdade em grandes redes de malha em cenários de provisionamento realistas.

Ramaswami & Sivarajan (1995), baseando-se na referencia (Green *et al.*, 1993) referem que a tecnologia *WAVELENGTH-division-multiplexing* (WDM) oferece a capacidade de construir redes de áreas amplas muito grandes, consistindo em milhares de nós com entradas por nó da ordem de um gigabit por segundo. Neste aspeto, os autores apresentam, tal como ilustrado na Figura 10, uma rede WDM totalmente ótica, empregando *routing* de comprimento de onda, consistindo de nós de *routing* ótico interligados por *links* óticos.

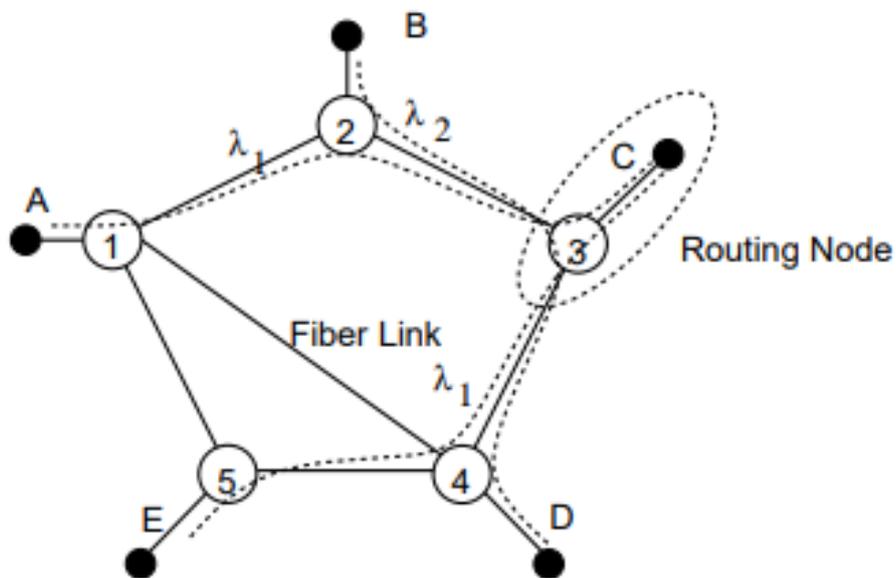


Figura 10 - Roteamento interconectado por links de fibra ótica ponto a ponto [Fonte: (Ramaswami & Sivarajan, 1995)]

Um nó de *routing* ótico tem a capacidade de rotear cada comprimento de onda num *link* de entrada para qualquer *link* de saída. No entanto, o mesmo comprimento de

onda, em dois *links* de entrada, não pode ser roteado simultaneamente num único *link* de saída (Ramaswami & Sivarajan, 1995).

Chatterjee *et al.* (2015) referem que as abordagens para resolver o subproblema de *routing* na rede elástica caem em dois grupos principais, que são:

1. *Routing* sem características elásticas

Estas abordagens de *routing* têm como objetivo principal descobrir rotas adequadas entre os pares origem-destino;

2. *Routing* com Características Elásticas

Uma rede ótica elástica tem a capacidade de dividir o espectro em *slots* com granularidade mais fina do que as redes WDM.

O problema de *routing* e a alocação de espectro (RSA - *Routing* e Alocação de Espectro) é similar ao problema de RWA, mas aparece no contexto de redes óticas elásticas. Diversos trabalhos propuseram algoritmos de RWA com eficiência energética no contexto de redes WDM, (Ramaswami & Sivarajan, 1995). O objetivo do RWSA é maximizar a eficiência espectral (Abkenar & Rahbar, 2017).

Para redes pequenas, a comunicação, geralmente, é projetada com um único *router* que pode ser usado para ligar todos os computadores. Redes maiores, geralmente, envolvem vários *routers* ou *switches* ligados. Um desses dispositivos, geralmente, liga-se a um *modem* de cabo, espalhando a rede para outras portas onde os dispositivos estão ligados, (Techterms, 2016).

Adicionalmente, as redes com fios apresentam desvantagens, tais como serviço fixo, ausência de mobilidade durante a instalação, dificuldade em detetar um defeito e alta dificuldade e solucioná-lo; em alguns casos, é necessário equipamento de amplificação para aumentar a cobertura; apresentam ainda alto risco de danificar os cabos, prestando serviços apenas onde houver uma tomada e exigindo o reposicionamento dos cabos quando é preciso alterar a localização dos equipamentos (Lehr & Chapin, 2010). No entanto, de acordo com Brevi *et al.* (2006), as redes sem fios são muito mais propensas a erros do que as redes com fios.

2.2 - IoT

Os problemas do nosso quotidiano levam sempre à necessidade de uma solução; numa sociedade há sempre desafios; com estas carências de resolução dos problemas surgem tecnologias que têm como principal objetivo resolvê-los ou atenuá-los. Esta secção aborda o conceito de IoT, bem como o estado da arte, desde a sua conceção até aos dias de hoje.

2.2.1 - Conceito De IoT

A *Internet* revolucionou definitivamente o quotidiano das pessoas, tornando e criando um fluxo de informação de acesso rápido. A *Internet das Pessoas* (IoP) pode ser uma revolução, mais a IoT veio reforçar mais esta revolução.

O conceito de "*Internet das Coisas*" (*Internet of Things*, IoT) foi criado em 1999 por Kevin Ashton, o pioneiro da tecnologia britânica que cofundou o *Auto-ID Center* no Instituto de Tecnologia de Massachusetts, (Ashton, 1999). Segundo Bassi *et al.* (2013), a IoT é uma superestrutura de rede que liga recursos físicos e pessoas através de *software* (Figura 11).

Tobon-Mejia *et al.* (2012) define a IoT como uma infraestrutura de rede global, que liga objetos físicos e virtuais através da exploração de recursos de captura e de comunicação de dados. Oferece a identificação de objetos específicos, sensores e capacidade de conexão como base para o desenvolvimento de serviços independentes, cooperativos e aplicativos. Segundo o mesmo autor, estes são caracterizados por um alto grau de captura autónoma de dados, transferência de eventos, conectividade e interoperabilidade de rede.

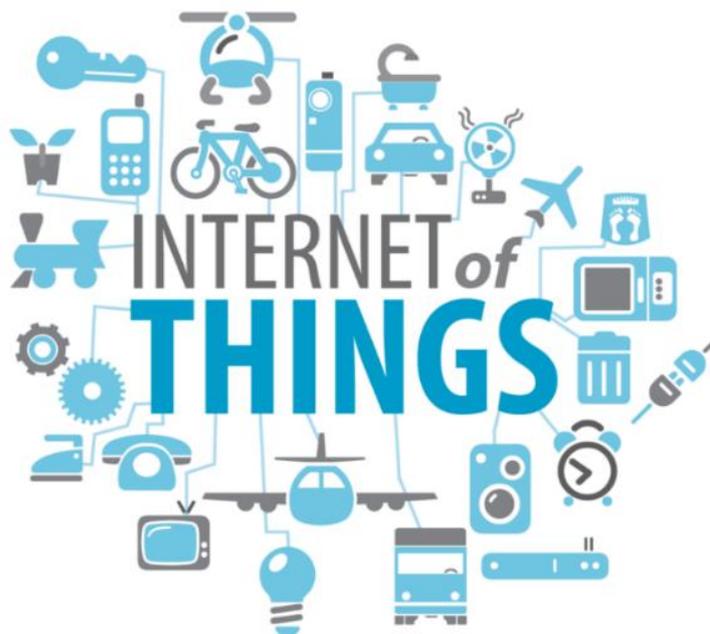


Figura 11 - Internet das coisas [Fonte: (Marmé, 2018)]

Segundo a IoT Lueth (2014), o conceito de IoT começou a ter importância no verão de 2010. Isto deveu-se ao facto de ter surgido informação de que o serviço *Street*

View da Google não só ter feito a utilização da tecnologia de fotos em 360°, mas também do armazenamento de elevadas quantidades de dados das redes *Wi-Fi* das pessoas. Com isto surgiu o debate sobre a pergunta: se esta tinha sido o início de uma nova estratégia da Google, não só para indexar a *Internet*, mas para indexar todo o mundo físico.

Ainda Lueth (2014) referencia que no mesmo período, o governo da China declarou que iria tornar a *Internet* das Coisas uma prioridade estratégica no seu plano a cinco anos. Em 2010, a empresa Gartner, no seu *Hype-cycle for emerging technologies*, apresenta a maturidade da tecnologia de uma forma gráfica, adoção e utilização de tecnologias características, onde incluiu também como tecnologia emergente a IoT (Figura 12).

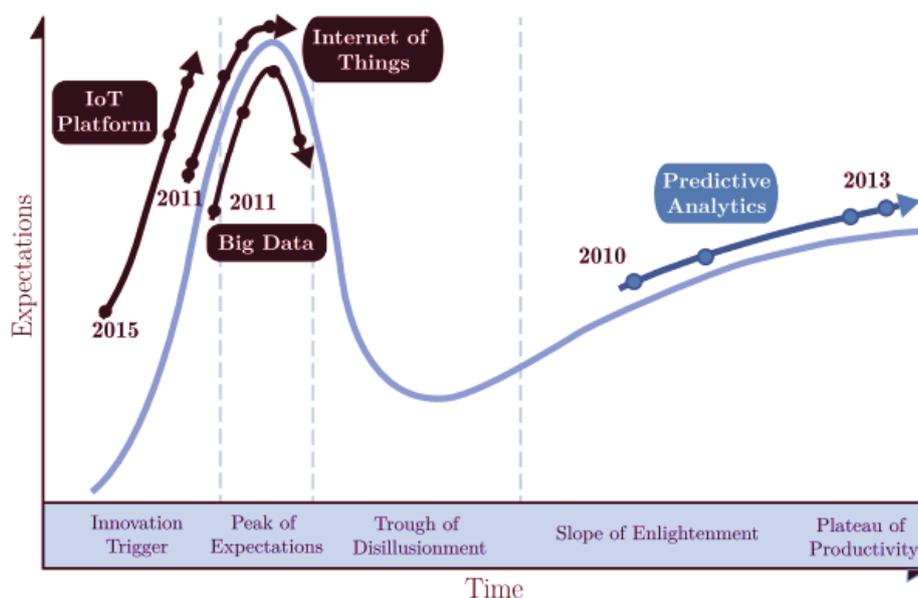


Figura 12 - Descrição a maturidade da tecnologia IoT (Panetta, 2017)

Seguidamente, em 2012, o tema da maior conferência de *Internet* da Europa, a *LeWeb*, foi a IoT. Neste período, revistas com foco em tecnologia, como a *Forbes* e a *Wired*, começaram a utilizar o termo *Internet* das Coisas para descrever o fenómeno. Segundo Lueth (2014), uma das razões da discriminação da tecnologia deu-se em janeiro de 2014, quando a Google anunciou a compra da *Nest* (empresa de produtos de automação) por 3,2 biliões de dólares. Ao mesmo tempo, a *Consumer Electronics Show* (CES), em Las Vegas, foi realizada sob o tema IoT.

De acordo com Díaz, Martín & Rubio (2016), uma das principais ideias da tecnologia IoT é recolher informação sobre o nosso ambiente de modo a compreender, controlar e agir sobre ele. A IoT pode ajudar a nossa vida diária, tal como é descrito pelo projeto realizado por Zaslavsky *et al.* (2012), onde um cenário

doméstico inteligente se adapta ao utilizador quotidiano, melhorando a sua qualidade de vida e o seu consumo doméstico, através de um conjunto de sensores residenciais.

De acordo com Ou *et al.* (2012), a *Internet* das Coisas na China ainda está em estágio de treino nas aplicações agrícolas e na gestão da cadeia de abastecimento. Segundo Lee & Lee (2016), a *Internet* das Coisas apresenta uma evolução ascendente; estes autores apresentam estudos focalizados em três domínios: cidade inteligente; casa inteligente; e saúde inteligente.

Num futuro próximo o número de utilizadores de dados da IoT aumentará significativamente à medida que o número de dispositivos conectados aumentar (Zaslavsky *et al.*, 2012).

Durante muito tempo o DBMS (Database Management Systems) foi usado para armazenar e aceder a dados num grande número de aplicativos. No entanto, com o crescimento de utilizadores e de dados significa que em muitas situações o DBMS é inadequado. Portanto, é necessária uma plataforma que atenda a essas necessidades para oferecer alta escalabilidade, armazenamento e até processamento, daí surgindo diferentes plataformas para armazenar, processar e aceder a grandes quantidades de dados heterogéneos, que se tornaram conhecidos como *Big Data* (Zaslavsky *et al.*, 2012).

De acordo com Díaz *et al.* (2016), as limitações dos dispositivos interligados pela IoT, em termos de armazenamento, rede e computação, bem como em termos de análise complexa, escalabilidade e acesso a dados, requerem tecnologias, tais como a *Cloud Computing*, atendendo a que a IoT pode gerar rapidamente grandes quantidades de dados variados, designadamente quando há milhões de coisas que alimentam os dados na *Cloud Computing*.

2.2.2 - Evolução Histórica Da IoT

O conceito inicial de IoT foi proposto pelo *Auto-ID Labs do Massachusetts Institute of Technology* (MIT), no início dos anos 90. O primeiro aplicativo do IoT denominava-se por bule de café *Trojan Room*, desenvolvido em 1999 (Tobon-Mejia *et al.*, 2012). Segundo (Mainetti *et al.*, 2011) há necessidade por parte dos países em desenvolver tecnologias e padrões internacionais de forma a criar uma nova versão da *Internet*, conhecida como *Internet* das Coisas. Essa nova geração de *Internet* poderá atender a requisitos, tais como um cenário de assistência médica. Entre estes, a rastreabilidade é, certamente, o requisito mais importante e, com isso, os problemas de logística podem ser significativamente melhorados.

De acordo com Lee & Lee (2015), a IoT tem como um dos seu objetivos a simplificação do desenvolvimento de inúmeros aplicativos orientados para a

indústria e específicos para o utilizador. Uma vez que os dispositivos e as redes fornecem conectividade física, os aplicativos de IoT possibilitam interações dispositivo-dispositivo e homem-aparelhos eletrônicos de maneira fiável e robusta.

Os aplicativos de IoT nos aparelhos eletrônicos precisam garantir que os dados ou mensagens sejam recebidos e atendidos adequadamente num tempo reduzido. De acordo com Tozlu *et al.* (2012), a tendência recente em direção à “Internet das Coisas”, combinada com a visão da “Web das Coisas”, gerou um impulso no setor de redes de sensores sem fios.

A IoT, de acordo com a sua aplicação, teve uma grande aceitação por parte da indústria, principalmente em aplicativos de transporte e logística que controlam o *status* de mercadorias a serem transportadas, tais como frutas, produtos frescos, carne e laticínios. No período do transporte, no controlo de conservação, como temperatura e humidade, são controlados periodicamente de modo a que a tomada de decisão seja automatizada; por consequência, podem-se evitar possíveis deteriorações, mesmo quando a conexão está anormal. A Europa tem tido uma atenção especial sobre esta tecnologia; esta afirmação é da vice-presidente da Comissão Europeia, Neelie Kroes (Kroes, 2012). A mesma que se comprometeu a incorporar e avançar com uma forte presença de liderança em tecnologias e aplicações de IoT na Europa, uma vez que oferece grandes oportunidades às empresas e cidadãos da União Europeia, bem como em áreas de interesse geral: previsão; monitorização e alerta de riscos naturais; automação de processos na área da saúde; uso de soluções de medição residencial para auxiliar na vida independente e apoio a pessoas com incapacidades, trazendo um conforto significativo (Figura 13). (Bassi *et al.*, 2013)

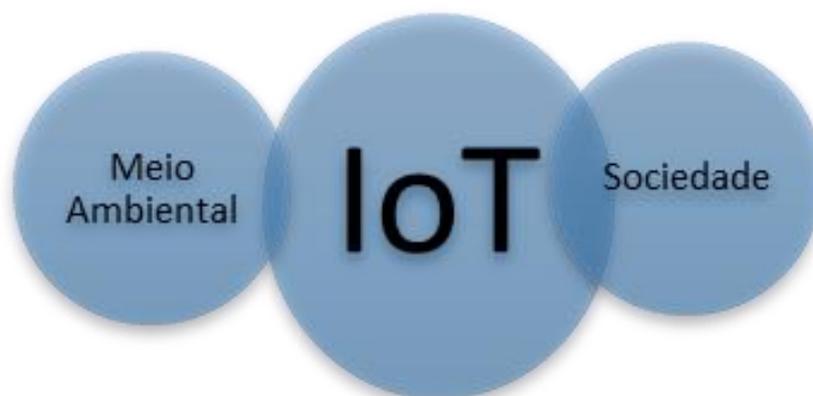


Figura 13 - Domínio de aplicação da IoT [Fonte: (Bassi *et al.*, 2013)]

Gartner (2014) apresentou uma previsão de que a IoT chegaria aos 26 bilhões de unidades até 2020, e impactaria a informação disponível para os parceiros das cadeias de abastecimento e de como estas funcionariam. A *International Data*

Corporation (IDC)² reforça que o rápido desenvolvimento de dispositivos conectados à nuvem e à *Internet* deve impulsionar o mercado da *Internet* das Coisas, o qual deverá atingir 7,1 trilhões USD até 2020 (Spencer, 2014).

2.2.3 - Aplicações Da IoT

De acordo com Panizza *et al.* (2010) não há identificação padrão de "*Internet* das Coisas". Considerando a funcionalidade e a identidade como temas centrais, é razoável definir a IoT como as coisas que têm identidade e personalidade virtual, operando em espaços inteligentes, usando *interfaces* inteligentes, para se conectarem e se comunicarem nos contextos social, ambiental e do utilizador. Uma definição alternativa tem como principal foco a integração perfeita que pode ser formulada com os objetos interconectados com um papel ativo, no que pode ser chamada de *Internet* do Futuro.

Ainda Misic & Misic (2018) apresenta o conceito de que um domínio IoT que está conectado à *Internet* através de um dispositivo de *gateway* que depende dos requisitos do aplicativo, em particular da dissimulação na resposta e da criticidade dos dados; o *gateway* IoT também pode hospedar o centro de controlo operado por utilizadores humanos - este é o caso de muitos setores industriais e da saúde.

Pirmagomedov & Koucheryavy (2019) reforçam a ideia de como a IoT também tem como objetivo emergente o aprimoramento no desenvolvimento físico motor dos seres humanos, princípios de dispositivos e de *design*, procura de conectividade e aspetos de segurança. Isto levará a uma nova geração de homens em que praticamente algumas limitações ou deficiências serão erradicadas, trazendo assim benefícios adicionais.

De acordo com Jiang (2013), a infraestrutura de tecnologia da *Internet* e das comunicações (ICT) é a espinha dorsal do futuro aprimoramento das *Smart Grids*, fornecendo serviços escaláveis e fiáveis para todos os tipos de aplicativos de IoT. Com o crescimento exponencial da IoT e das tecnologias *Smart Grid*, os desafios de infraestrutura a serem abordados durante este período resumem-se a aspetos, tais como, a quantidade cada vez maior de dados do sistema de energia que precisa ser suportada pela rede. Segundo Khan *et al.* (2012), a IoT apresenta aplicações em quase todos os aspetos de nossa vida diária; este autor cita alguns exemplos, tais como:

1. Previsão de desastres naturais - a combinação de sensores e a sua coordenação e simulação autónoma auxiliará a prever a ocorrência de

² <https://www.idc.com/>

- deslizamentos de terra ou outros desastres naturais e a tomar as ações apropriadas com antecedência;
2. Aplicativos de setor - a IoT pode encontrar aplicativos no setor, por exemplo, gestão de uma frota de carros para uma organização; a IoT ajuda a monitorizar o seu desempenho ambiental e a processar os dados para determinar e escolher o que precisa de manutenção;
 3. Monitorização da falta de água - a IoT pode ajudar a detetar a falta de água em diferentes locais; as redes de sensores ligadas às atividades de simulação relevantes podem não apenas avaliar intervenções hídricas de longo prazo, como a gestão das áreas de captação, mas também podem ser usadas para alertar os utilizadores de um rio, por exemplo, se um evento a montante, como a abertura accidental das comportas no rio, que podem ter implicações perigosas;
 4. Projeto de casas inteligentes - a IoT pode ajudar no projeto de casas inteligentes; por exemplo, na gestão de consumo de energia, na interação com aparelhos, na deteção de emergências, na segurança residencial e para encontrar objetos facilmente, entre outras;
 5. Aplicações médicas - a IoT também pode encontrar aplicações no setor médico para salvar vidas ou melhorar a qualidade de vida; por exemplo, no controlo de parâmetros de saúde, como atividade física, suporte para uma vida independente, na ingestão de medicamentos, etc.;
 6. Aplicação na agricultura - rede de diferentes sensores pode detetar dados, executar o processamento de dados e informar o agricultor através da infraestrutura de comunicação; por exemplo, mensagens de texto do telefone móvel sobre a porção de terra que precisa de atenção especial. Isso pode incluir embalagens inteligentes de sementes, mecanismos de controlo de fertilizantes e pragas que respondem a condições locais específicas e indicam ações. O sistema agrícola inteligente ajudará os engenheiros agrónomos a compreender melhor os modelos de crescimento das plantas e a ter práticas agrícolas eficientes, tendo o conhecimento das condições da terra e da variabilidade climática. Isso aumentará significativamente a produtividade agrícola, evitando as condições inadequadas de cultivo;
 7. Projeto de sistema de transporte inteligente - o sistema de transporte inteligente fornecerá controlo e gestão de transportes eficientes usando tecnologia avançada de sensores, informação e rede. O transporte inteligente pode ter muitos recursos interessantes, como portagens eletrónicas ininterruptas, comando e agendamento móvel de emergência, aplicação das leis de transporte, monitorização da violação da lei pelos veículos, redução da poluição ambiental, sistema antirroubo, evitar congestionamentos, relatar incidentes de trânsito, minimizar atrasos de chegada, etc.;

8. *Design* de cidades inteligentes - a IoT pode ajudar a projetar cidades inteligentes; por exemplo, acompanhar a qualidade do ar, descobrir rotas de emergência, iluminação eficiente das cidades, regar jardins, etc.;
9. Medição e monitorização inteligentes - o design da IoT para medição e monitorização inteligentes ajudará a obter uma leitura automatizada precisa do medidor e a emissão da fatura para os clientes; a IoT também pode ser usada para planear a manutenção de turbinas eólicas e fazer a sua gestão remotamente, bem como o gás, a água, e ainda a monitorização ambiental;
10. Segurança Inteligente - a IoT também pode encontrar aplicativos no campo da segurança e vigilância; por exemplo, na vigilância de espaços, no rastreamento de pessoas e de ativos, na manutenção de infraestruturas e equipamentos, em alarmes, etc.

Asghari *et al.* (2019) desenvolveram uma estrutura analítica composta por otimização e modelos de jogos não cooperativos aplicáveis aos cenários com fornecedores de redes IoT monopolistas e duopolistas; estes modelos propostos ajudam os fornecedores de redes de IoT a tomar decisões na inclusão de serviços complementares nos seus planos e preços de serviços. A avaliação de desempenho mostra que a estratégia de plano de serviço proposta pode melhorar o lucro dos fornecedores de redes IoT e a utilidade dos dispositivos IoT.

Um dos exemplos já vinculados à tecnologia IoT é o caso dos veículos, luzes de trânsito, eletrodomésticos, câmaras de vigilância, detetores de condições ambientais, sensores de presença, e dispositivos médicos. O objetivo de todos estes dispositivos e, sobretudo, da grande quantidade de dados resultantes da respetiva interação através da *Internet*, é que o processamento resultante seja efetuado de forma a que, por exemplo, se evitem engarrafamentos de trânsito, se detete uma doença fatal atempadamente num doente ou um incidente num edifício, se utilize de forma mais eficiente a energia, para dar apenas alguns exemplos.

2.2.4 - IoT na indústria

No âmbito da manutenção industrial tem havido um grande empenho por parte de investigadores, tais como Civerchia *et al.* (2017), que apresentam uma solução avançada de IoT Industrial (IIoT) denominada por sistema *NGS-PlantOne*; a solução desenvolvida para implementação da IIoT beneficia de todas as vantagens oferecidas pelos protocolos de IoT adotados, garantindo que cada nó seja alcançável através de técnicas simples baseadas em IP, com um atraso aceitável e apresentando uma vida média estimada de um ano.

Segundo Huang (2020), o desenvolvimento contínuo da tecnologia de comunicação na *Internet* deu origem ao desenvolvimento da tecnologia da *Internet* das Coisas

(IoT) e à integração da fabricação inteligente para acelerar a atualização das linhas de produção industrial tradicionais. Esta tecnologia tem sido transversal em várias áreas da engenharia; por exemplo, Ou *et al.* (2012) reafirma que a utilização da tecnologia da IoT na rede inteligente é uma abordagem importante, uma vez que trás benefício no que diz respeito à circulação de informação do sistema da rede elétrica, sendo benéfica para a gestão eficaz da infraestrutura da rede elétrica.

A prevenção de desastres e a redução da linha de transmissão de energia é um dos campos de aplicação mais importantes da IoT. As tecnologias avançadas de deteção e comunicação da IoT podem efetivamente evitar ou reduzir os danos de desastres naturais nas linhas de transmissão, melhorar a fiabilidade da transmissão de energia e reduzir as perdas económicas.

Dey *et al.* (2016) mostram que a *internet* das coisas apresenta vantagens devido ao baixo custo que apresenta e à facilidade de conexão com vários outros dispositivos, permitindo que equipamentos móveis e computadores controlem remotamente todas as funções e recursos de eletrodomésticos em qualquer lugar do mundo usando a ligação à *Internet*.

2.3 - Sistema Fuzzy Logic

Segundo Cirstea (2002), a IA pode ser definida como a simulação por computador do processo de pensamento humano. As técnicas de IA são geralmente classificadas como sistemas especialistas (Expert Systems - ES), baseados em lógica Fuzzy (*Fuzzy Logic* – FL, ou lógica difusa), Redes Neurais Artificiais (RNA), entre diversas outras ferramentas. Estas técnicas são usadas para processos que não possuem um modelo matemático simples, para processos altamente não lineares ou onde o processamento do conhecimento formulado linguisticamente deva ser realizado.

2.3.1- Conceito de Fuzzy Logic

De acordo com McNeill & Thro (1994), a *Fuzzy Logic* surgiu na década de 1960, tendo como protagonista *Lotfi Zadeh*, que combinou os conceitos de lógica nítida e os conjuntos de *Lukasiewicz*, definindo a associação graduada. Um dos principais objetivos de Zadeh foi que a matemática pode ser usada para vincular a linguagem e a inteligência humana. Inúmeros conceitos são mais bem definidos por palavras do que por matemática, e a *Fuzzy Logic* e a sua expressão em conjuntos difusos apresentam a vantagem de que se podem construir melhores modelos da realidade.

Os sistemas difusos podem ser usados para estimar, tomar decisões sobre sistemas de controlo mecânico, como ar condicionado, controlo de automóveis e até casas "inteligentes", bem como controladores de processos industriais, entre uma série de outras aplicações. Estes sistemas têm tido bastante sucesso no Japão, designadamente em controladores de processo; porém, os primeiros desenvolvimentos de controlo difuso ocorreram na Europa (Schwartz & Klir, 1992).

2.3.2 - Teoria dos Conjuntos Difusos

A teoria dos Conjuntos Difusos tem toda a sua base formal na Teoria Clássica dos Conjuntos. Esta teoria teve como fundamentação a lógica booleana, tal como se representa na Figura 14; este exemplo mostra as suas diferenças e de como se assemelham. A lógica booleana surgiu em 1848 por Boole, que associou à lógica dois estados de verdade; esta também é conhecida por Lógica Padrão.

Segundo Cirstea (2002), a teoria clássica dos conjuntos foi fundada pelo matemático alemão Georg Cantor (1845-1918). Nesta teoria, o universo do discurso, U , é definido como uma coleção de objetos, todos com as mesmas características.

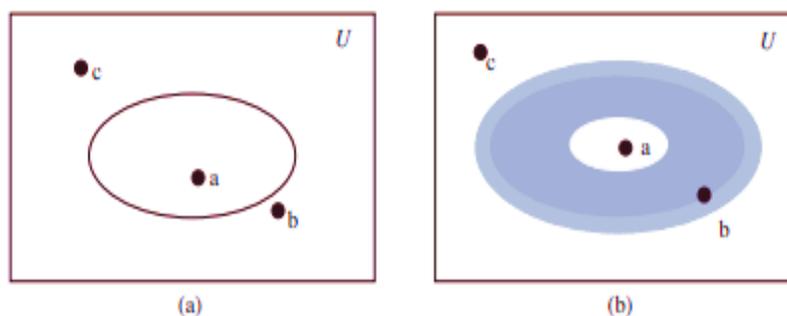


Figura 14 - Limite definido clássico (a); Limite definido fuzzy (b)
 [Fonte: (M. Cirstea *et al.*, 2002)]

Um conjunto clássico é então uma coleção de vários desses elementos. Os elementos membros de um conjunto clássico pertencem ao conjunto a 100%. Outros elementos no universo do discurso, que não são elementos do conjunto, não estão relacionados com este. Um limite definitivo pode ser desenhado para o conjunto, tal como ilustrado na Figura 15.

Segundo Camargos (2002), um conjunto é uma coleção de objetos que possuem determinada característica em comum. Na Lógica Booleana, um objeto possui apenas duas maneiras de se relacionar com um conjunto, ou seja, um dado objeto pertence ou não pertence a um determinado conjunto. A Lógica Booleana usa

apenas os valores 0 e 1 para representar o grau de pertinência μ da variável, isto é, $\mu=0$ não pertence ao conjunto e $\mu=1$ pertence ao conjunto. Diferentemente da lógica booleana, na lógica *Fuzzy*, μ pode assumir qualquer valor no intervalo de 0 a 1.

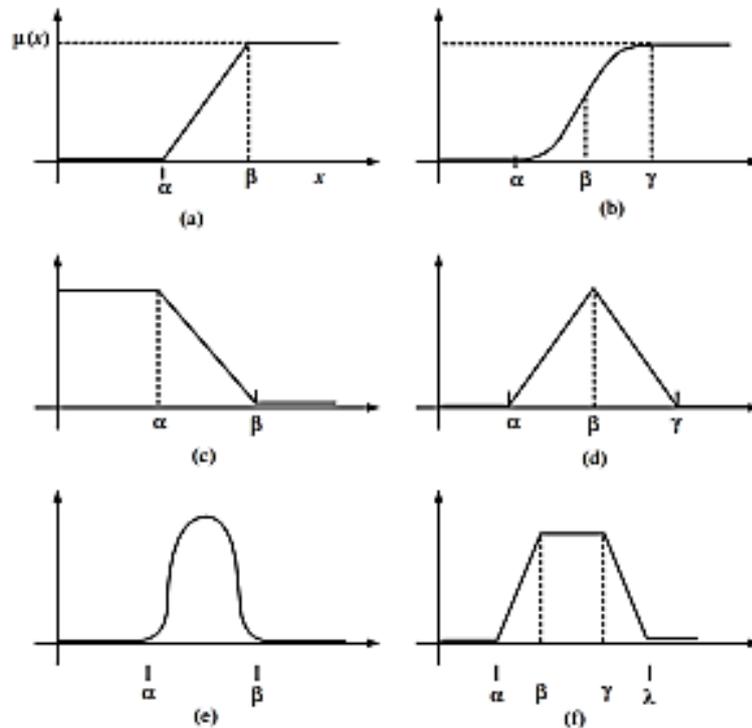


Figura 15 - Tipos de funções de associação: função Γ (a); função S (b); função L(c); função Λ (d); Função Gaussiana (e); função Π (f) [Fonte: (M. Cirstea et al., 2002)]

Em aplicações de controlo, as funções Gaussianas ou em forma de sino são funções que não são normalmente usadas, ao contrário da função L e da função Λ , que são muito mais comuns. As funções comumente usadas são definidas da seguinte forma:

Γ – função, $\Gamma: U \rightarrow [0, 1]$

$$\Gamma(x, \alpha, \beta) = \begin{cases} 0 & x < \alpha \\ \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha} & \alpha \leq x \leq \beta \\ 1 & x > \beta \end{cases}$$

$x \rightarrow$ Valores das variáveis

$(\alpha, \beta, \gamma) \rightarrow$ representação do grau de pertinência para cada valor de x

L – função, $L: U \rightarrow [0, 1]$

$$L(x; \alpha, \beta) = \begin{cases} 1 & x < \alpha \\ \frac{x - \beta}{\alpha - \beta} & \alpha \leq x \leq \beta \\ 0 & x > \beta \end{cases}$$

Λ – função, $\Lambda: U \rightarrow [0, 1]$

$$\Lambda(x; \alpha, \beta) = \begin{cases} 0 & x < \alpha \\ \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha} & \alpha \leq x \leq \beta \\ \frac{x - \gamma}{\beta - \gamma} & \beta \leq x \leq \gamma \\ 0 & x > \gamma \end{cases}$$

2.3.3 - Vantagens e Eventuais Desvantagens

McNeill & Thro (1994) referem que existe um crescimento evidente desta ferramenta e que, inclusive, o setor da *Fuzzy Logic* japonesa vale bilhões de dólares, sendo a receita total em todo o mundo projetada em cerca de 650 milhões USD em 1993. Em 1997, o Japão gastou 500 milhões de USD em Investigação e Desenvolvimento em *Fuzzy Systems*.

Esta ferramenta também tem proporcionado retornos nos sectores da Indústria nos Estados Unidos; isso deve-se à sua vantagem no controlo dos sistemas, tais como:

- São necessários menos valores, regras e decisões;
- Podem ser observadas e avaliadas mais variáveis;
- São usadas variáveis linguísticas e não numéricas, tornando-as semelhantes à maneira como os humanos pensam;
- Relaciona a saída com a entrada, sem ter que compreender todas as variáveis, permitindo o *design* de um sistema que pode ser mais preciso e estável do que um sistema de controlo convencional;
- A sua simplicidade permite a solução de problemas não resolvidos por outras abordagens;
- A criação de prototipagem rápida é possível porque o *designer* do sistema não precisa saber tudo sobre o sistema antes de iniciar o trabalho;
- São mais baratos de implementar do que os sistemas convencionais, porque são mais fáceis de projetar;
- Aumentaram a robustez dos sistemas;
- Simplificam a aquisição e a representação do conhecimento;
- Apenas algumas regras permitem abranger uma grande complexidade.

Contudo, os *Fuzzy Systems* também apresentam desvantagens, tais como:

- É difícil desenvolver um modelo a partir de um sistema difuso;
- Embora sejam mais fáceis de projetar e mais rápidos em criar protótipos do que os sistemas de controlo convencionais, os sistemas *Fuzzy* exigem mais simulação e ajuste fino antes de estarem operacionais; geralmente, a precisão do sistema *Fuzzy* é limitada pela experiência do especialista na configuração dos parâmetros.

2.3.4 - Aplicações de lógica difusa na engenharia eletrotécnica

Chang *et al.* (2012) refere que a *Fuzzy Logic* foi implementada com sucesso em muitas aplicações de engenharia, sendo que tem a capacidade de produzir uma transição mais gradual. Fwa & Shanmugam (1998), referem que a matemática difusa oferece uma ferramenta conveniente para incorporar análise subjetiva e incerteza na classificação das condições das necessidades de manutenção.

Segundo Loia *et al.* (2013), a *Fuzzy Logic* e a arquitetura baseada em agentes difusos são consideradas uma abordagem de pesquisa promissora para resolver problemas de controlo de tensão em redes inteligentes. A título de exemplo da aplicação do Fuzzy Logic, a Figura 16 apresenta o diagrama de blocos de um controlador lógico difuso (*Fuzzy Logic Controller - FLC*) típico, neste caso encontrado no trabalho de (Cirstea, 2002), na qual a sua composição é de cinco elementos principais para um controlador lógico difuso:

1. Módulo fuzificador (fuzzifier);
2. Base de conhecimento;
3. Base de regras;
4. Motor de inferência;
5. Módulo desfuzificador (defuzzifier).

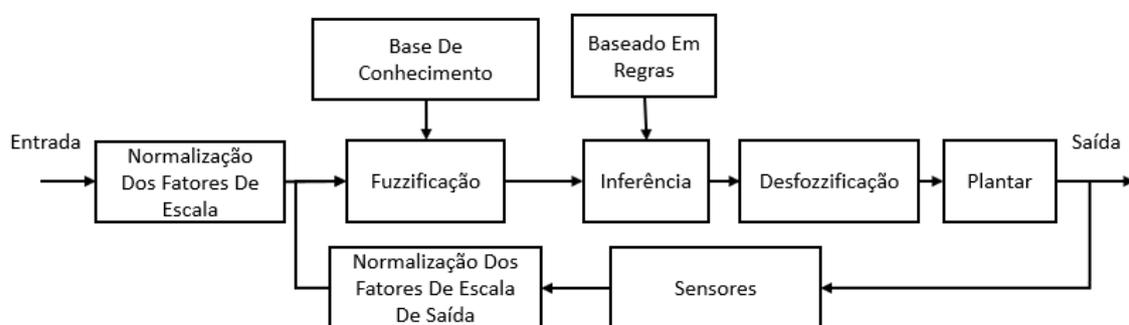


Figura 16 - Diagrama de bloco de um controlador *Fuzzy Logic* [Fonte(Cirstea, 2002)]

(Liu, 2008) demonstrou a eficiência e a robustez do sistema *Fuzzy Logic*, comparando-o com a abordagem exaustiva da computação, a qual pode diminuir tremendamente a complexidade da computação, de exponencial para linear. Keshkar *et al.* (2015), aplicando este conceito a casas inteligentes, obtiveram uma grande eficiência no controle do consumo das mesmas, não comprometendo o conforto dos utilizadores. De acordo com Masoum *et al.* (2015), também foi utilizado na gestão *plugin* de veículos elétricos numa rede de energia, tendo tido uma boa contribuição na redução do custo total (Fouad & Samhouri, 2011).

2.4- Manutenção de transformadores

Para que se cumpram os objetivos da manutenção é necessário que a empresa esteja habilitada na gestão da integração de pessoas, políticas, equipamentos e práticas. Também precisa de engenharia e tecnologia adequadas (Pintelon & Gelders, 1992).

A manutenção pode ser uma atividade que soluciona problemas que envolvem custos adicionais, e não apenas um custo de estrutura inerente ao negócio. A eficácia da manutenção tem uma influência direta nos seguintes elementos (Van Rijn, 1987):

- Capacidade no aumento do volume da produção;
- Custos fixos;
- Custo operacional;
- Segurança ambiental no ambiente de trabalho.

Segundo Tsang (2002) existem quatro dimensões estratégicas na gestão da manutenção, tal como se ilustra na Figura 17.

Opções de entrega de Serviços	Organização e estruturação do Trabalho
Metodologia da Manutenção	Sistemas de Suporte

Figura 17 - Dimensão estratégica na gestão da Manutenção

Segundo o mesmo autor, os dois fatores que premeiam essas dimensões estratégicas são os fatores humanos e o fluxo de informações (Tsang, 2002).

Alguns casos de estudo revelaram que operadores e gerentes de empresas exibiam inconsistências significativas em suas prioridades de fabricação, indicando falta de consenso estratégico (Boyer & McDermott, 1999). Estes autores realçam que o grau de adequação entre as prioridades competitivas de uma organização e as suas principais decisões em relação a investimentos estruturais e de

infraestrutura fornecem a chave para o desenvolvimento de todo o potencial das operações como uma arma competitiva.

Os transformadores de energia são ativos essenciais numa rede de transmissão de energia, pois uma falha deste ativo pode causar uma falha em cascata e um apagão catastrófico na rede elétrica (Liang & Parlikad, 2018).

Abiri-Jahromi *et al.* (2013) desenvolveram um modelo de gestão de manutenção de dois estágios que contém manutenção de médio e curto prazo para maximizar a capacidade de manutenção dos transformadores de potência. (Koksal & Ozdemir, 2016) aprimoraram a manutenção do transformador de potência usando um modelo Markoviano.

Liang & Parlikad (2018) chegou à conclusão que, através da análise do gás dissolvido pode definir-se uma política de manutenção conducente a melhorar a disponibilidade e o custo da operação, enquanto a análise da resposta em frequência pode melhorar a disponibilidade dos transformadores de potência.

De acordo com Abiri-Jahromi *et al.* (2013), a programação das interrupções para manutenção de equipamentos de transmissão pode ser classificada da seguinte forma:

1. Numa categoria que se concentra em minimizar o efeito do tempo de interrupção da manutenção do equipamento de transmissão, ao mesmo tempo em que satisfaz as restrições operacionais;
2. Numa categoria que depende de manter ou aumentar a fiabilidade do equipamento de transmissão.

No âmbito da manutenção dos transformadores existem alguns estudos que se alargam de modo a abranger todos os componentes do transformador, como, por exemplo, de García *et al.* (2005) que demonstra que as vibrações do tanque do transformador estão relacionadas com as vibrações do núcleo e do enrolamento, criando a possibilidade dum modelo para prever a relação entre estas.

Caso haja uma falha incipiente de um transformador e esta seja detetada antes que leve a um falha catastrófica, a manutenção preditiva pode ser implementada para minimizar o risco de falhas e prevenir ainda mais a perda de serviços (Tang *et al.*, 2008)

De acordo com (Farinha, 2011), de entre as várias formas de manutenção podemos destacar quatro principais tipos, que são:

- Manutenção Corretiva;
- Manutenção Preventiva;
- Manutenção Preditiva;
- Manutenção Pró-Ativa.

De acordo com (*Predictive Maintenance*, 2019) a manutenção preditiva já é utilizado ou será usada por 83% das empresas de produção nos próximos dois anos. A IoT tem sido uma aplicação principalmente no chão de fábrica. Segundo Georgievskaja (2020), os dados de entrada para um sistema preditivo dinâmico corresponde a informação sobre o tempo real de operação em cada modo de trabalho e os parâmetros de regime esperados para o próximo período. Já os dados de saída correspondem a informação sobre a vida útil real e residual.

CAPÍTULO 3

CASO DE ESTUDO

Neste capítulo são apresentadas as amostras e de como estas foram tratadas através de tabelas; também é apresentado o *software* utilizado no suporte ao Projeto; de seguida é apresentado o método escolhido para o desenvolvimento do algoritmo; por fim são apresentados os resultados obtidos.

3.1 – Descrição da amostra

A mostra estudada é referente ao óleo isolante que desempenha uma função importante nos transformadores de potência, tendo como principal função o isolamento e a refrigeração da parte ativa do transformador.

Estes óleos devem apresentar algumas propriedades, tais como, elevada rigidez dielétrica e uma adequada viscosidade, para permitir que o calor gerado no interior do transformador possa ser conduzido para o exterior. A quantidade de óleo num transformador pode representar cerca de 20 a 30% da sua massa total (Rouse, 1998).

Para garantir que um determinado óleo seja aceitável para uso em aparelhos específicos, os valores medidos, através das suas características relevantes, são comparados com os limites definidos nas especificações dos fabricantes e utilizadores de equipamentos elétricos e refinarias de óleos (Rouse, 1998).

Os transformadores e cabos de alta tensão são isolados com uma combinação de papel de celulose e um óleo mineral isolante, que devem operar de maneira fiável por, até 40 anos. O papel contém cerca de 90% de celulose, 6-7% de hemicelulose e 3-4% de lignina. A celulose é um polímero natural de glicose que se degrada lentamente à medida que as cadeias poliméricas se quebram durante o serviço, libertando produtos de degradação no óleo (Heywood *et al.*, 2000).

Quando o transformador é preenchido com óleo, o papel absorve a humidade do óleo (devido à natureza higroscópica do papel), afetando a sua propriedade isolante e, assim, reduzindo sua vida útil (Singh *et al.*, 2012). As propriedades do óleo isolante sofrem alterações químicas devido à oxidação, humidade, temperatura, instabilidade elétrica, existindo um fator relevante que é a influência do contato com os materiais utilizados na construção de transformadores, tais como papel, verniz, madeira, ar, silício, papelão, etc.

Os transformadores precisam de bons procedimentos de inspeção e manutenção para garantir a sua operação normal. Quando ocorrem fenômenos anormais num transformador, o óleo isolante e ou os materiais impregnados com óleo são decompostos sendo gerados gases combustíveis, como H_2 , CO e hidrocarbonetos, como CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , etc. Se um transformador está a operar normalmente (ou não), o tipo de falha que pode ter ocorrido, é determinado pela análise dos gases gerados (Bakar *et al.*, 2014; Fallou, 1975).

Existem modelos termodinâmicos para descrever a relação entre o *stress* de temperatura e as características dos gases que, de acordo com estes modelos, a taxa de crescimento de cada gás produzido pode ser calculada para qualquer temperatura do óleo isolante. A Figura 15 ilustra a relação entre a temperatura do óleo e os gases gerados.

Na década de 70 foram propostos modelos termodinâmicos para descrever a relação entre o *stress* da temperatura e as características dos gases; de acordo com este modelo, a taxa de crescimento de cada gás produzido pode ser calculada para qualquer temperatura do óleo isolante. A Figura 18 ilustra a relação entre a temperatura do óleo e os gases gerados.

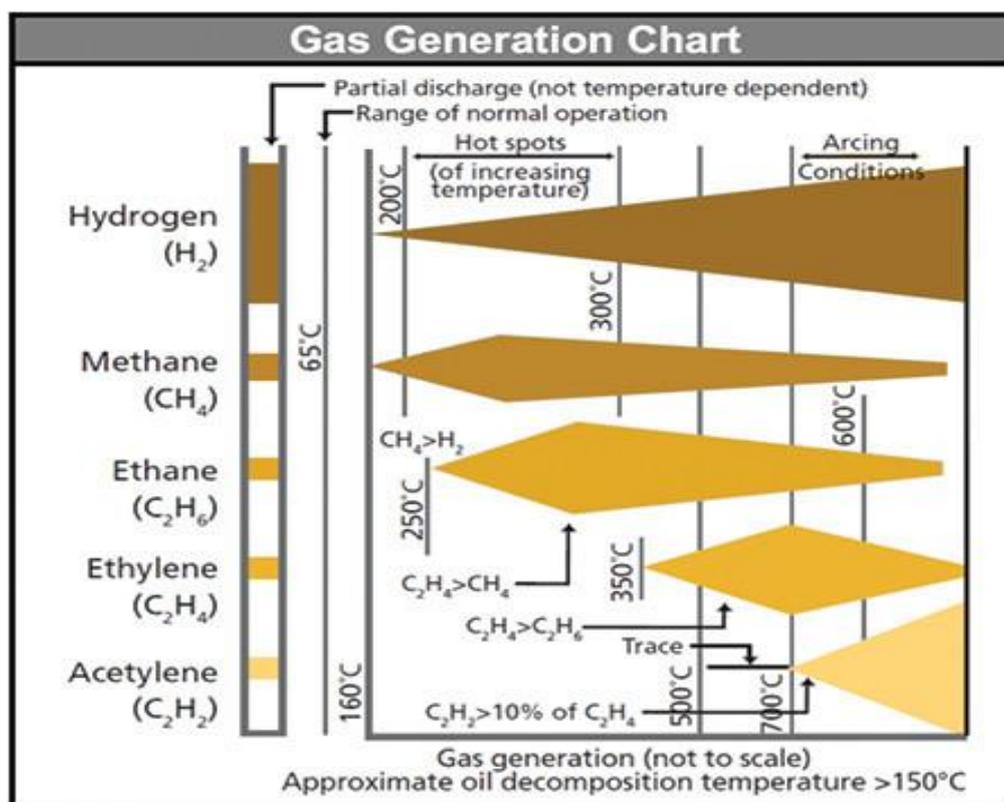


Figura 18 - Taxas comparativas de evolução de gases de óleo em função da energia de decomposição [Fonte: (Golarz, 2015)]

O hidrogénio e o metano começam a formar-se em pequenas quantidades em torno de 150°C. A produção de hidrogénio continua a aumentar à medida que a temperatura aumenta. A cerca de 250°C começa a produção de etano. A cerca de 350° C começa a produção de etileno. Após atingir os seus pontos máximos, a produção de metano, etano e etileno diminui à medida que a temperatura aumenta. A produção de acetileno começa entre 500° e 700°C. No passado, a presença de apenas pequenas quantidades de acetileno era considerada a uma temperatura de, pelo menos, 700°C; no entanto, descobertas recentes levaram à conclusão de que uma falha térmica (ponto quente) de 500°C pode produzir quantidades vestigiais (algumas ppm). Quantidades maiores de acetileno só podem ser produzidas acima de 700°C por arco interno (Golarz, 2015).

Entre 200 e 300°C, a produção de metano excede a de hidrogénio. A partir de, aproximadamente, 275°C, a produção de etano excede a de metano. A cerca de 450°C, a produção de hidrogénio excede todos os outros gases até cerca de 750° a 800°C, momento em que é produzida uma quantidade maior de acetileno. A decomposição térmica de materiais de celulose também começa a cerca de 100°C ou menos, e produzirá monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrogênio (H₂), metano (CH₄) e oxigênio (O₂). Portanto, é imperativo operar os transformadores abaixo de 90°C.

A amostra foi retirada do estudo de Barbosa, realizado no ano de 2008, com o objetivo de desenvolver o sistema de deteção de avarias; segundo esta fonte, estas amostras foram obtidas através de ensaio em laboratório, sendo a mesma constituída por 354 amostras de gases medidos em µl/minuto. No seguimento do estudo são apresentadas as primeiras 14 amostras na Tabela 2 (Golarz, 2015).

Tabela 2 - Amostras dos gases em µl/minuto

Amostra	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂
1	32	4	520	1766	0,1	0,1	0
2	24	4	766	4154	0,1	0,1	0
3	50	9	1025	3723	0,1	3	0
4	60	8	1170	4187	0,1	0,1	0
5	24	120	690	2616	38	64	0
6	29	111	624	2215	26	74	0
7	44	104	736	2862	16	88	0
8	22	1	102	1199	6	0,1	0
9	32	63	226	1512	178	47	0

10	1	0,2	2	36	0,1	0,1	0
11	12	0,4	36	523	4	0,1	0
12	55	123	227	1818	266	68	0,7
13	63	7	657	2341	0,5	1	0
14	30	225	678	3374	168	76	0

Para o estudo foram consideradas 354 amostras, estando a sua representação no tempo ilustrada na Figura 19.

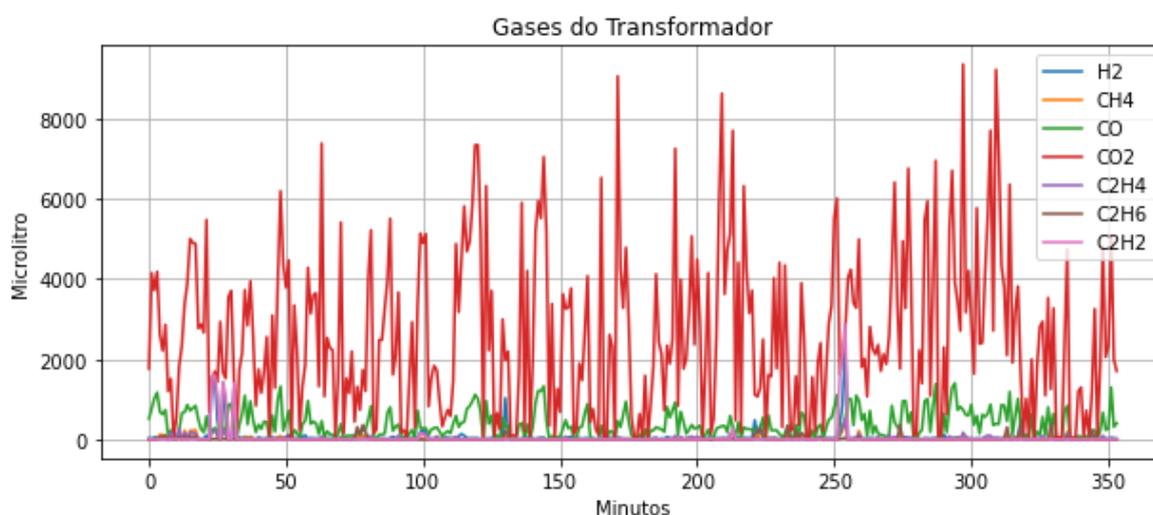


Figura 19 - Variáveis de entrada

3.2 - Apresentação do software

O Projeto *Jupyter* é uma organização sem fins lucrativos criada para "desenvolver *software* de código aberto"; é um ambiente de desenvolvimento interativo baseado na Web para *notebooks*, códigos e dados da *Jupyter*. O *JupyterLab* é flexível: configura-se e organiza-se o *interface* do utilizador para suportar uma ampla variedade de fluxos de trabalho nas ciências de dados, computação científica e aprendizagem de máquina (Pérez & Granger, 2015).

3.3 - Método IEC

O método apresentado pela IEC (International Electrotechnical Commission) foi apresentado em 1978, na primeira edição da norma IEC 60599, e atualizado na sua

segunda edição, em março de 1999, pela norma IEC 60599 (Marques, 2019; Rogers, 1978). A IEC tem tido uma grande utilização, pois apresenta uma elevada eficiência e melhor definição para um diagnóstico coerente a partir de análises cromatográficas do óleo isolante dos transformadores. O método utiliza gases, metano (CH₄), hidrogênio (H₂), etano (C₂H₆), etileno (C₂H₄) e acetileno (C₂H₂), utilizando as relações C₂H₂/C₂H₄, CH₄/H₂, e C₂H₄/C₂H₆ para estabelecer os seus diagnósticos (Hongzhong Ma et al., 2005). Estas relações são apresentadas de uma forma estruturada na Tabela 3.

Tabela 3 - Razões de gás e valores IEC (Hongzhong Ma et al., 2005; Rogers, 1978)

Indicador Calculado	Valor	Código
$R_1 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$R_1 < 0.1$	0
	$0.1 \leq R_1 \leq 3$	1
	$R_1 > 3$	2
$R_2 = \frac{CH_4}{H_2}$	$R_2 < 0.1$	1
	$0.1 \leq R_2 \leq 1$	0
	$1 < R_2$	2
$R_3 = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$R_3 < 1$	0
	$1 \leq R_3 \leq 3$	1
	$R_3 > 3$	2

O método IEC estabelece a organização dos agnósticos por combinações de números que vão de 0 até 2, conforme é ilustrado na Tabela 4, estas combinações seguem a sequência: R_1, R_2 e R_3 (retirado da norma IEC 60599).

Tabela 4 - Diagnóstico sugerido pelo método IEC (Hongzhong Ma et al., 2005)

Código Gerado	Diagnóstico Sugerido
000	Sem Falha
001	Sobreaquecimento ou defeito térmico de baixa temperatura (<150°)
010	Descargas parciais de pequena densidade de energia
011	Descargas parciais de alta densidade de energia
020	Sobreaquecimento ou Defeito térmico de média temperatura (150°C a 300°C)
021	Sobreaquecimento ou Defeito térmico de média temperatura (300°C a 700°C)
022	Sobreaquecimento ou defeito térmico de alta temperatura (<700°)
101	Arco ou Descargas de Baixa energia
102	Arco ou Descarga de Alta energia

No presente projeto foram abordadas todas as avarias presentes na tabela anterior, que vão desde o sobreaquecimento, descargas de energia e arcos elétricos a que um transformador é sujeito; para isso foram considerados os códigos 000, 001, 010, 011, 020, 021, 022, 101 e 102.

$$X = \begin{bmatrix} H_2 \\ CH_4 \\ CO \\ CO_2 \\ C_2H_4 \\ C_2H_6 \\ C_2H_2 \end{bmatrix}$$

Os números das amostras obtidos na base de dados é de 7 variáveis, desenhando o sistema seria conforme está presente na Figura 20, entrada de 7 variáveis, de seguida o processamento pelas funções de pertinências e por último a saída.

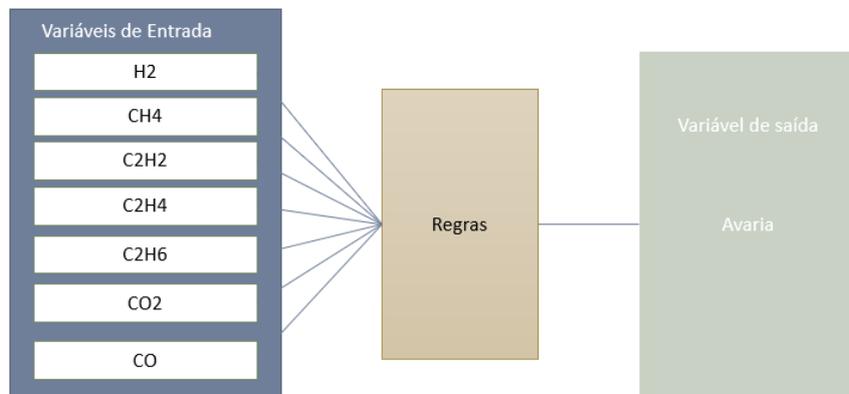


Figura 20 - Diagrama do sistema Fuzzy Logic com sete variáveis de entrada.

Com a norma utilizada para o caso de estudo foi possível reduzir estas 7 variáveis para apenas três conforme é mostrado na Figura 21. Com isso utilizaram-se as fórmulas presentes na Tabela 3, para R₁, R₂ e R₃.

$$X = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{bmatrix}$$

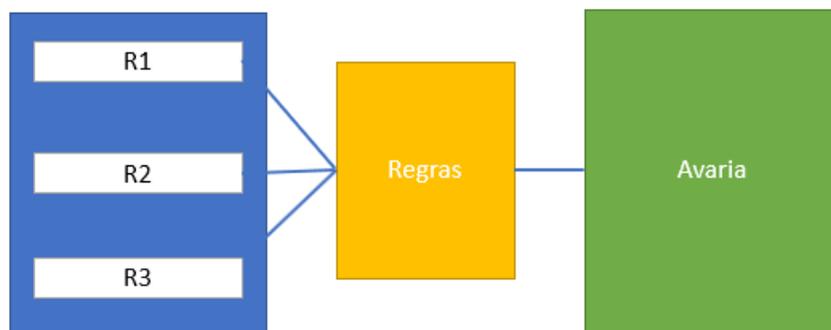


Figura 21 - Diagrama do sistema Fuzzy Logic com três variáveis de entrada

Utilizando este método, os valores das amostras ficaram com os valores apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Amostras dos gases pelo método IEC.

Nº Amostras	R1	R2	R3
1	-	0,00	1,00

2	-	0,00	1,00
3	-	0,00	0,03
4	-	0,00	1,00
5	-	1,58	0,59
6	-	0,90	0,35
7	-	0,36	0,18
8	-	0,27	60,00
9	-	5,56	3,79
10	-	0,10	1,00
11	-	0,33	40,00
12	0,00	4,84	3,91
13	-	0,01	0,50
14	-	5,60	2,21
15	-	0,06	1,00
16	-	4,92	2,09

3.4 - Resultados

Após o tratamento das amostras, com o intervalo de confiança apresentado na Tabela 3, criaram-se as funções de pertinência, e os valores foram substituídos por valores linguísticos, de acordo com o apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Exemplo de Variáveis linguísticas do sistema.

Variável Linguística	Valores Linguísticos (Adjetivos)		
Entrada			
R_1	Baixo	Baixo	Baixo

R_2	Baixo	Médio	Alto
R_3	Baixo	Alto	Alto
Saída			
Avaria	000	010	022

As funções de pertinência estão representadas graficamente pela função “trimf” que é um triângulo conforme é ilustrado nas Figuras 22, 23 e 24.

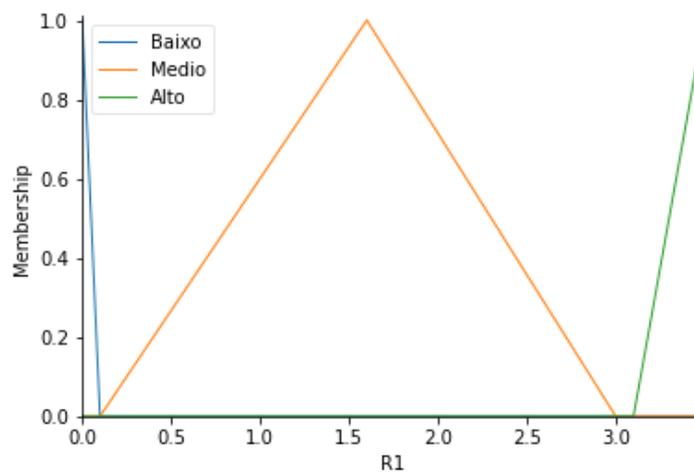


Figura 22 - Variável R_1

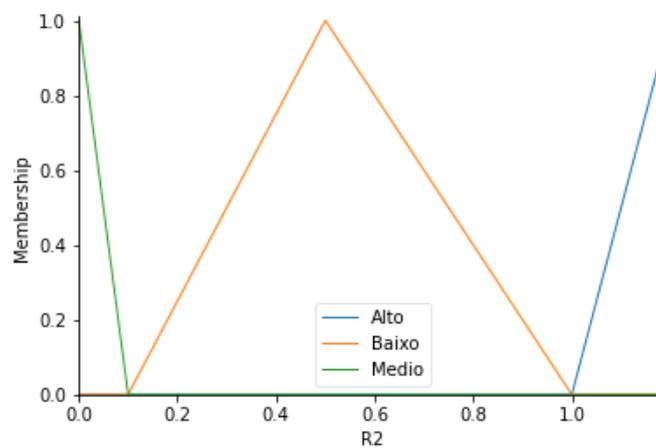


Figura 23 - Variável R_2

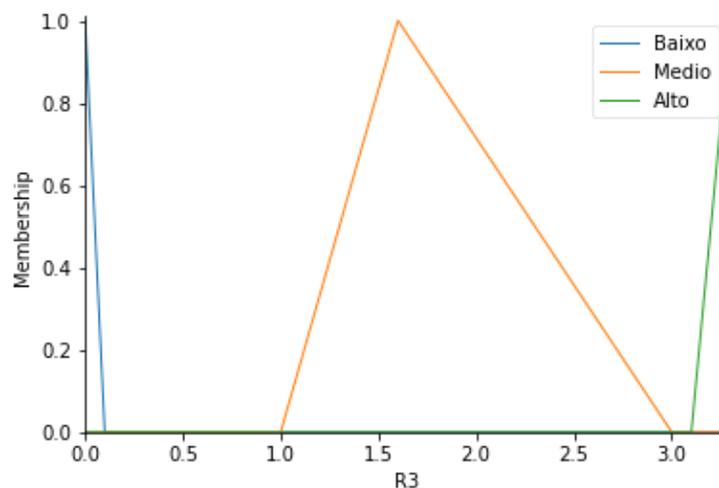


Figura 24 - Variável R_3

A aplicação foi desenvolvida de modo a representar o estado do equipamento *online*. Após a construção da função de pertinência foram criadas as regras em relação à variável de entrada e de saída, de que resultaram os valores de saída apresentados abaixo. As entradas dos dados foram feitas, inicialmente, de forma manual (utilizando a relação entre entrada e saída presente na Tabela 6). Na figura 25 está presente o resultado de saída da primeira calibração estando associado ao primeiro diagnóstico do transformador.

#teste de algumas variáveis

Avaria1.input['R1'] = 0.09

Avaria1.input['R2'] = 0.09

Avaria1.input['R3'] = 0.09

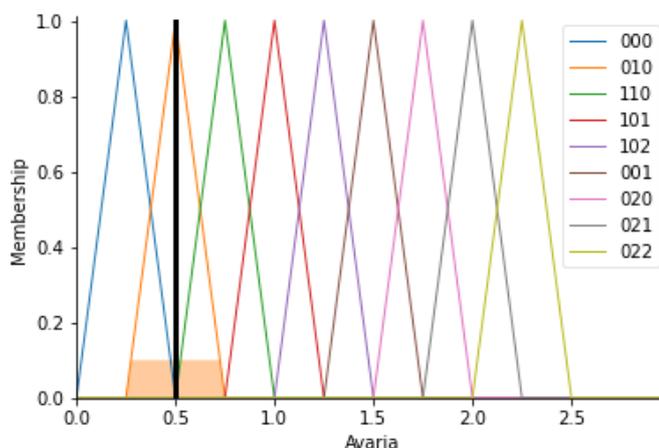


Figura 25 - Variáveis de saída "010".

O algoritmo calcula valores, que nos possibilitam classificar os tipos de avarias através de um modelo de classificação existente no programa desenvolvido.

Saída:

Descargas parciais de baixa densidade de energia= 0.50

O intervalo dos triângulos de saída foi construído com base nos intervalos dos códigos IEC e reajustado com as variáveis de entrada, para que se tenha um bom resultado no que diz respeito à deteção do tipo de sobreaquecimento. Na figura 26 está presente o resultado de saída da segunda calibração estando associado ao segundo diagnóstico do transformador.

#teste de algumas variáveis

Avaria1.input['R1'] = 0.5

Avaria1.input['R2'] = 0.02

Avaria1.input['R3'] = 0.02

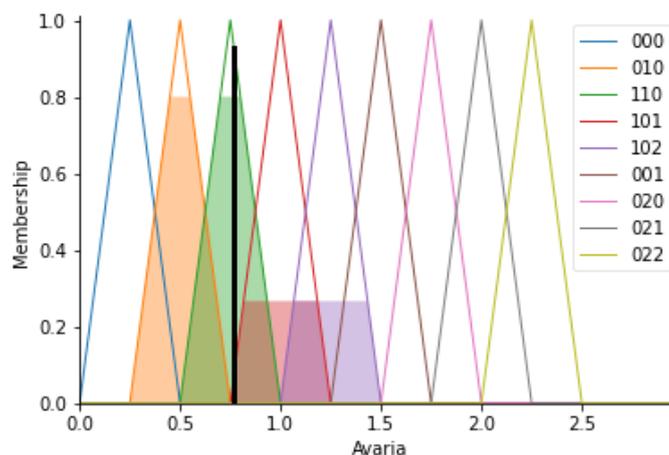


Figura 26 - Variáveis de saída “110”.

Saída:

Descargas de baixa energia densidade= 0.76

Na figura 27 está presente o resultado de saída da terceira calibração estando associado ao terceiro diagnóstico do transformador.

#teste de algumas variáveis

Avaria1.input['R1'] = 0.5

Avaria1.input['R2'] = 0.5

Avaria1.input['R3'] = 1

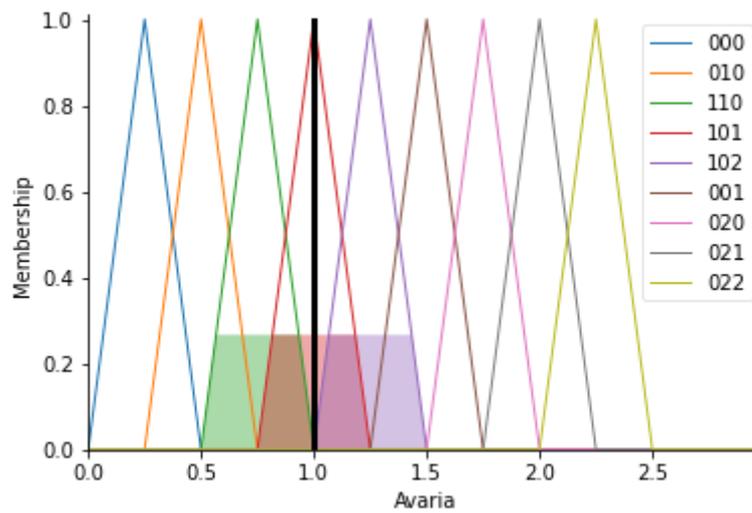


Figura 27 - Variáveis de saída “101”.

Descargas de alta densidade de energia= 0.99

Na figura 28 está presente o resultado de saída da quarta calibração estando associado ao quarto diagnóstico do transformador.

#teste de algumas variáveis

Avaria1.input['R1'] = 0.9

Avaria1.input['R2'] = 0.9

Avaria1.input['R3'] = 3.155

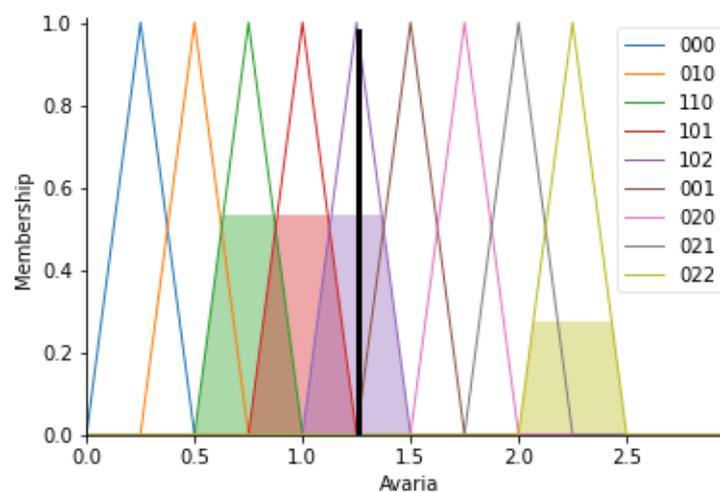


Figura 28 - Variáveis de saída “102”.

Descargas de alta densidade de energia= 1.25

Na figura 29 está presente o resultado de saída da quinta calibração estando associado ao quinto diagnóstico do transformador.

#teste de algumas variáveis

Avaria1.input['R1'] = 0.09

Avaria1.input['R2'] = 0.95

Avaria1.input['R3'] = 2.212

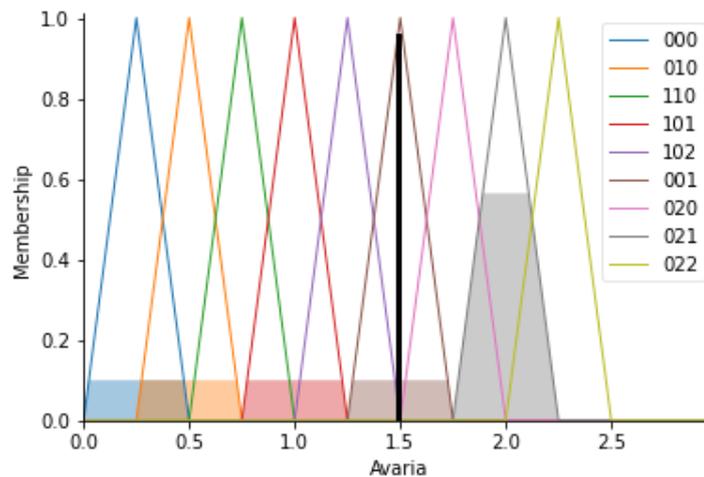


Figura 29 - Variáveis de saída “001”.

Falha térmica de baixa temperatura <math><150^{\circ}\text{C}</math>=1.48

Na figura 30 está presente o resultado de saída da sexta calibração estando associado ao sexto diagnóstico do transformador.

#teste de algumas variáveis

Avaria1.input['R1'] = 0.09

Avaria1.input['R2'] = 3.1

Avaria1.input['R3'] = 0.09

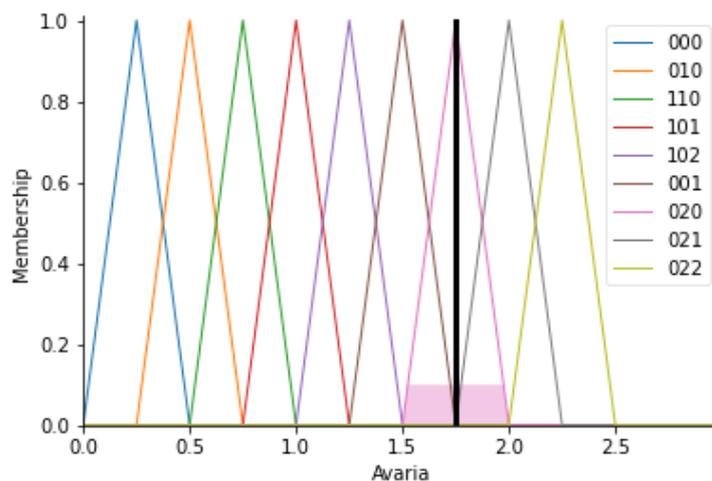


Figura 30 - Variáveis de saída “020”.

Falha térmica de baixa temperatura 150° - 300° C= 1.75

Na figura 31 está presente o resultado de saída da sétima calibração estando associado ao sétimo diagnóstico do transformador.

#teste de algumas variáveis

Avaria1 = ctrl.ControlSystemSimulation(Avaria_ctrl)

Avaria1.input['R1'] = 0.1

Avaria1.input['R2'] = 3.1

Avaria1.input['R3'] = 3.2

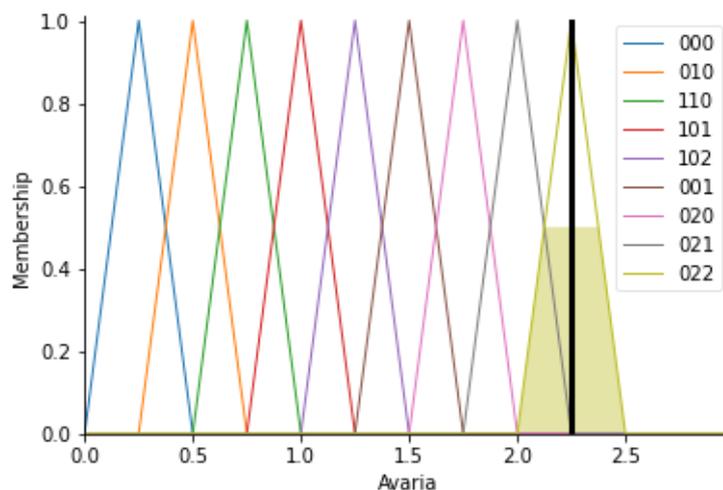


Figura 31 - Variáveis de saída “022”.

Falha térmica de alta temperatura $700^{\circ}\text{C} = 2.25$

Para a validação do algoritmo *Fuzzy* foram testadas 50 amostras; pela nossa análise, a mesma foi bem-sucedida, uma vez que há uma correspondência com os intervalos definidos pelo método IEC. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 7- Resultados do algoritmo na calibração.

Nº teste	H2	CH4	CO	CO2	C2H4	C2H6	C2H2	Saída	Avarias
1	32	4	520	1766	0,1	0,1	0	0,375	110
2	24	4	766	4154	0,1	0,1	0	0,375	110
3	50	9	1025	3723	0,1	3	0	0,5	110
4	60	8	1170	4187	0,1	0,1	0	0,375	110
5	24	120	690	2616	38	64	0	1,2487	102
6	29	111	624	2215	26	74	0	0,375	110
7	44	104	736	2862	16	88	0	0,375	110
8	22	1	102	1199	6	0,1	0	1,0937	102
9	32	63	226	1512	178	47	0	1,2487	102
10	1	0,2	2	36	0,1	0,1	0	0,375	110
11	12	0,4	36	523	4	0,1	0	1,1003	102
12	55	123	227	1818	266	68	0,7	2,25	102
13	63	7	657	2341	0,5	1	0	1,2487	110
14	30	225	678	3374	168	76	0	1,2487	110
15	36	10	862	3898	2	2	0	0,375	110
16	37	218	716	5005	182	87	0	1,2487	110
17	24	222	783	4908	168	84	0	1,2487	110
18	27	235	843	4880	151	77	0	1,2487	110
19	27	8	500	2774	0,3	3	0	0,375	110



Figura 32 - Variáveis de saída de todas as amostras.

Utilizando os intervalos da norma IEC (Tabela 4), foram usadas as primeiras 50 amostras de modo a verificar o comportamento do modelo tendo ajustado o número de intervalos e os seus limites para obter um resultado adequado. Após a calibração do sistema segue-se para a detecção *online* das avarias, através da automatização da função, em que foi possível fazer a leitura de todas as amostras conforme mostra a Figura 32 e Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados do algoritmo autónomo.

Nº Teste	Valores de Saída	Tipo de Avaria
1	0,38	110
2	0,38	110
3	0,49	110
4	0,38	110
5	1,25	102
6	0,38	110
7	0,38	110
8	1,09	102
9	1,25	102
10	0,38	110
11	1,1	102
12	1,25	102
13	0,38	110
14	1,25	102

15	0,38	110
16	1,25	102
17	1,25	102

3.5 - Discussão dos Resultados

Sendo que é possível uma readaptação de redes convencionais em *SmartGrid*, é necessário ter em consideração alguns aspetos importantes, com base em estudos já realizados; tal como é referido na bibliografia, é possível verificar se cada uma das tecnologias possui comportamentos diferentes. Desde a facilidade do acoplamento das máquinas, e da propagação do sinal até à receção, é necessário primeiro considerar o objetivo sobre o uso da tecnologia, seja para longa ou curta distância, bem como os ambientes onde possam coexistir dispositivos que operam nas mesmas frequências, onde a tecnologia venha a ser implementada, causando distúrbios nos sinais e na sua capacidade.

Existem vários métodos para a resolução do problema no que diz respeito às avarias de transformadores, designadamente pelos líquidos de refrigeração, como DRM, DTM, mas alguns deles exigem a utilização do valor total para se chegar ao valor da falha do equipamento; para que seja dinâmico foi escolhido o método IEC, pois reduz as variáveis; nesta redução pode haver perdas de informação causando algumas restrições no modelo.

Os resultados apresentaram-se credíveis uma vez que conseguiram detetar os vários estágios de sobreaquecimento do transformador em estudo. Os ensaios foram feitos de uma forma estática, colocando os valores individualmente em cada variável de entrada de modo a serem bem calibrados e, por fim, a automatização do mesmo, que foi bem-sucedido.

O objetivo é tornar o projeto dinâmico, realizando o *input* das variáveis de forma automática, retirando as amostras dos sensores, passando-as para a base de dados e, por consequência, para o algoritmo compilado, de forma a poder-se ver a deslocação da variável de saída do algoritmo *Fuzzy Logic*; mas, devido a algumas restrições financeiras e à dificuldade na requisição dos equipamentos necessários, ficamos pelos resultados apresentados.

CAPÍTULO 4 CONCLUSÕES

4.1 - Conclusões

Existem inúmeros projetos e estudos teóricos focados em solucionar problemas em equipamentos elétricos, nomeadamente nas redes elétricas; com este Projecto foi possível verificar como as *Smart Grids* estão a ganhar espaço no mundo das energias, e que existe uma parte muito importante que está dependente da robustez do sistema de comunicações. Através da literatura especializada foi possível avaliar a disponibilidade de tecnologias de comunicações e de quais as suas vantagens e desvantagens, sendo que algumas se destacaram em relação às outras.

Uma vez que o projeto teve como principal objetivo a monitorização de equipamentos elétricos, é necessário haver uma integração de tecnologias que façam a recolha dos seus dados. É aqui que surge a necessidade da IoT, como uma tecnologia atual que tem tido uma adesão muito forte.

Com o presente projeto pode concluir-se que, se reunimos os recursos necessários, é possível obter uma boa prática de manutenção condicionada, ou até mesmo preditiva, através da *Fuzzy Logic*, atendendo a que esta permite a classificação dos problemas de forma mais próxima à sensibilidade humana, bem como devido à sua forma de tratamento dos dados, permitindo ao responsável da manutenção uma mais fácil classificação do estado dos equipamentos.

4.2 - Desenvolvimentos Futuros

Com base nos resultados conseguidos é possível verificar como o modelo é rápido no diagnóstico de avarias e não exige elevada capacidade computacional, o que traz uma grande vantagem; porém, existem limitações que advêm da formulação do conceito do diagnóstico, sendo que há pontos de convergência que podem levar a ilações menos assertivas.

Para desenvolvimentos futuros, propõe-se integrar o sistema *Fuzzy Logic* numa *Smart Grid* integrando todos os equipamentos, tais como, turbinas, transformadores, bancos de baterias etc., em pequena escala, passível de verificar o quanto pode trazer de vantagens no sistema de manutenção dinâmico a aplicação desse sistema de AI; para além disso, propõe-se o desenvolvimento de sistemas

preditivos com as mesmas metodologias, de modo a prever falhas que podem ser evitadas tornando a *Grid* efetivamente *Smart*.

REFERÊNCIAS

- Aalamifar, F., & Lampe, L. (2017). Optimized WiMAX Profile Configuration for Smart Grid Communications. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(6), 2723–2732.
<https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2536145>
- Abinayaa, V., & Jayan, A. (2014). Case study on comparison of wireless technologies in industrial applications. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 4(2), 1–4.
- Abiri-Jahromi, A., Parvania, M., Bouffard, F., & Fotuhi-Firuzabad, M. (2013). A Two-Stage Framework for Power Transformer Asset Maintenance Management—Part I: Models and Formulations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(2), 1395–1403. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2216903>
- Aghili, S. F., Mala, H., Kaliyar, P., & Conti, M. (2019). SecLAP: Secure and lightweight RFID authentication protocol for Medical IoT. *Future Generation Computer Systems*, 101, 621–634. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.07.004>
- Aloul, F., Al-Ali, A. R., Al-Dalky, R., Al-Mardini, M., & El-Hajj, W. (2012). Smart Grid Security: Threats, Vulnerabilities and Solutions. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 1–6. <https://doi.org/10.12720/sgce.1.1.1-6>
- Asghari, M., Yousefi, S., & Niyato, D. (2019). Pricing strategies of IoT wide area network service providers with complementary services included. *Journal of Network and Computer Applications*, 147, 102426. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.102426>
- Ashton, K. (1999). That «Internet of Things» Thing. *RFID Journal*, 22(7), 1.

- Astely, D., Dahlman, E., Furuskar, A., Jading, Y., Lindstrom, M., & Parkvall, S. (2009). LTE: The evolution of mobile broadband. *IEEE Communications Magazine*, 47(4), 44–51. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2009.4907406>
- ATEC. (2018). *KNX e Smart Metering—A Medição Inteligente*. ATEC - Academia de Formação. <https://www.atec.pt/artigos-tecnicos/knx-e-smart-metering-a-medicao-inteligente.html>
- Bakar, N. A., Abu-Siada, A., & Islam, S. (2014). A review of dissolved gas analysis measurement and interpretation techniques. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 30(3), 39–49. <https://doi.org/10.1109/MEI.2014.6804740>
- Bakken, D. (2017). *Smart Grids: Clouds, Communications, Open Source, and Automation*. CRC Press.
- Barbeau, M. (2005). WiMax/802.16 threat analysis. *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Quality of Service & Security in Wireless and Mobile Networks - Q2SWinet '05*, 8. <https://doi.org/10.1145/1089761.1089764>
- Barbosa, F. R. (2008). *Monitoramento on-line e diagnóstico inteligente da qualidade dielétrica do isolamento líquido de transformadores de potência*.
- Barker, P., & Boucouvalas, A. C. (1998). Performance modeling of the IrDA protocol for infrared wireless communications. *IEEE Communications Magazine*, 36(12), 113–117. <https://doi.org/Khan & Khan>
- Bassi, A., Bauer, M., Fiedler, M., Kramp, T., Kranenburg, R. van, Lange, S., & Meissner, S. (Eds.). (2013). *Enabling things to talk: Designing IoT solutions with the IoT architectural reference model ; [IoT-A, Internet of things - architecture]*. Springer.

- Baumeister, T. (2010). *On Smart Grid Cyber Security*.
<https://www.semanticscholar.org/paper/on-Smart-Grid-Cyber-Security-Baumeister/0ea04b2c12945f486c7967699f00433a8a98a1f1>
- Boucouvalas, A. C., & Ghassemlooy, Z. (2000). Optical wireless communications. *IEEE Proceedings - Optoelectronics*, 147(4), 279–280.
- Boyer, K. K., & McDermott, C. (1999). Strategic consensus in operations strategy. *Journal of Operations Management*, 17(3), 289–305. [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(98\)00042-4](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(98)00042-4)
- Brevi, D., Mazzocchi, D., Scopigno, R., Bonivento, A., Calcagno, R., & Rusina, F. (2006). A Methodology for the Analysis of 802.11a Links in Industrial Environments. *2006 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*, 165–174.
<https://doi.org/10.1109/WFCS.2006.1704147>
- Bruno, A. A. (2003). *CCIE routing and switching exam certification guide*. Cisco Press.
- Camargos, F. L. (2002). *Lógica Nebulosa: Uma abordagem filosófica e aplicada*. Florianópolis: UFSC.
- Carcelle, X., Dang, T., & Devic, C. (2006). Industrial Wireless Technologies: Applications for the electrical utilities. *2006 4th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, 108–113. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2006.275726>
- Chang, C. S., Wang, Z., Yang, F., & Tan, W. W. (2012). Hierarchical Fuzzy Logic System for Implementing Maintenance Schedules of Offshore Power Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1), 3–11.
<https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2173358>

- Chatterjee, B. C., Sarma, N., & Oki, E. (2015). Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(3), 1776–1800. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2431731>
- Chaudhuri, S., Hjalmtysson, G., & Yates, J. (2000). Control of lightpaths in an optical network. *Optical Internetworking Forum*.
- Chen, J., Gusikhin, O., Finkenstaedt, W., & Liu, Y.-N. (2019). Maintenance, Repair, and Operations Parts Inventory Management in the Era of Industry 4.0. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 171–176. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.171>
- Chen, S., Song, S., Li, L., & Shen, J. (2009). Survey on smart grid technology. *Power system technology*, 33(8), 1–7.
- Chlamtac, I., Farago, A., & Tao Zhang. (1996). Lightpath (wavelength) routing in large WDM networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 14(5), 909–913. <https://doi.org/10.1109/49.510914>
- Cirstea, M., Dinu, A., McCormick, M., & Khor, J. G. (2002). *Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems* (1 edition). Newnes.
- Cirstea, M. N. (Ed.). (2002). *Neural and fuzzy logic control of drives and power systems*. Newnes.
- Civerchia, F., Bocchino, S., Salvadori, C., Rossi, E., Maggiani, L., & Petracca, M. (2017). Industrial Internet of Things monitoring solution for advanced predictive maintenance applications. *Journal of Industrial Information Integration*, 7, 4–12. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.02.003>
- Dahlman, E., Parkvall, S., Skold, J., & Beming, P. (2010). *3G evolution: HSPA and LTE for mobile broadband*. Academic press.

- Dey, S., Roy, A., & Das, S. (2016). Home automation using Internet of Thing. *2016 IEEE 7th Annual Ubiquitous Computing, Electronics Mobile Communication Conference (UEMCON)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/UEMCON.2016.7777826>
- Dian, F. J., Yousefi, A., & Lim, S. (2018). A practical study on Bluetooth Low Energy (BLE) throughput. *2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*, 768–771. <https://doi.org/10.1109/IEMCON.2018.8614763>
- Dian, F. J., Yousefi, A., & Somaratne, K. (2017). A study in accuracy of time synchronization of BLE devices using connection-based event. *2017 8th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*, 595–601. <https://doi.org/10.1109/IEMCON.2017.8117156>
- Díaz, M., Martín, C., & Rubio, B. (2016). State-of-the-art, challenges, and open issues in the integration of Internet of things and cloud computing. *Journal of Network and Computer Applications*, 67, 99–117. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.01.010>
- Fallou, B. (1975). Detection of and research for the characteristics of an incipient fault from analysis of dissolved gases in the oil of an insulation. *Electra*, 42, 31–52.
- Farinha, J. (2011). *Manutenção A Terologia e as Novas Ferramentas de Gestão* (1.^a ed., Vol. 1–1). Monitor.
- Fouad, R. H., & Samhoury, M. (2011). A Fuzzy Logic Approach for Scheduling Preventive Maintenance in ERP System. *2011 International Conference on Management and Service Science*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICMSS.2011.5999330>
- Fwa, T. F., & Shanmugam, R. (1998). *Fuzzy Logic Technique for Pavement Condition Rating and Maintenance-Needs Assessment*.

- García, B., Burgos, J. C., & Alonso, Á. (2005). Winding deformations detection in power transformers by tank vibrations monitoring. *Electric Power Systems Research*, 74(1), 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2004.09.010>
- Gehrmann, C., Persson, J., & Smeets, B. (2004). *Bluetooth security*. Artech House.
- Georgievskaia, E. (2020). Predictive analytics as a way to smart maintenance of hydraulic turbines. *Procedia Structural Integrity*, 28, 836–842. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.10.098>
- Ghosh, A., Ratasuk, R., Mondal, B., & Mangalvedhe, N. (2010). LTE-ADVANCED: NEXT-GENERATION WIRELESS BROADBAND TECHNOLOGY. *IEEE Wireless Communications*, 13.
- Giovanelli, D., Milosevic, B., & Farella, E. (2015). Bluetooth Low Energy for data streaming: Application-level analysis and recommendation. *2015 6th International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces (IWASI)*, 216–221. <https://doi.org/10.1109/IWASI.2015.7184945>
- Golarz, J. (2015). *Guest Editorial / Understanding Dissolved Gas Analysis (DGA) Techniques and Interpretations*. Electric Energy Online. <http://electricenergyonline.com/energy/magazine/913/article/Guest-Editorial-Understanding-Dissolved-Gas-Analysis-DGA-Techniques-and-Interpretations.htm>
- Goleniewski, L., & Jarrett (editor), K. W. (2006). *Telecommunications Essentials, Second Edition: The Complete Global Source*. Pearson Education.
- Gov, E. (2019). *Department of Energy*. http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/Smart_Grid_Workshop_Report_Final_Draft_08_12_08.pdf
- Green, P. E., Coldren, L. A., Johnson, K. M., Lewis, J. G., Miller, C. M., Morrison, J. F., Olshansky, R., Ramaswami, R., & Smithand, E. H. (1993). All-optical packet-

- switched metropolitan-area network proposal. *Journal of Lightwave Technology*, 11(5/6), 754–763. <https://doi.org/10.1109/50.233238>
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- Hammond, G. (2020). *Fiber optics / Definition, Inventors, & Facts*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/fiber-optics>
- Hassan, R., & Radman, G. (2010). Survey on smart grid. *Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2010 (SoutheastCon)*, 210–213.
- Heywood, R. J., Xiao, X., Emsley, A. M., & Ali, M. (2000). Degradation of cellulosic insulation in power transformers. Part 2: Formation of furan products in insulating oil. *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, 147(3), 110–114. <https://doi.org/10.1049/ip-smt:20000259>
- Ho, R., Mai, K. W., & Horowitz, M. A. (2001). The future of wires. *Proceedings of the IEEE*, 89(4), 490–504. <https://doi.org/10.1109/5.920580>
- Hodge, V. J., O’Keefe, S., Weeks, M., & Moulds, A. (2015). Wireless Sensor Networks for Condition Monitoring in the Railway Industry: A Survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(3), 1088–1106. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2366512>
- Hongzhong Ma, Zheng Li, Ju, P., Jingdong Han, & Limin Zhang. (2005). Diagnosis of power transformer faults on fuzzy three-ratio method. *2005 International Power Engineering Conference*, 1–456. <https://doi.org/10.1109/IPEC.2005.206897>

- Huang, X. (2020). Intelligent remote monitoring and manufacturing system of production line based on industrial Internet of Things. *Computer Communications*, 150, 421–428. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.12.011>
- Huang, Y., & Li, G. (2010). Descriptive models for Internet of Things. *2010 International Conference on Intelligent Control and Information Processing*, 483–486. <https://doi.org/10.1109/ICICIP.2010.5564232>
- Hung-Yu Wei, Ganguly, S., Izmailov, R., & Haas, Z. J. (2005). Interference-Aware IEEE 802.16 WiMax Mesh Networks. *2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference*, 5, 3102–3106. <https://doi.org/10.1109/VETECS.2005.1543918>
- IEA, I. E. A. (2011). *Technology roadmaps smart grids* [Iea]. IEA. https://www.iea.org/papers/2011/smartgrids_roadmap.pdf
- IN2. (2018). Smart Grid ou Redes inteligentes • iN2. *iN2*. <https://in2.com.br/smart-grid-ou-redes-inteligentes/>
- IoT-Internet of. (2014, Março 19). Gartner Says the Internet of Things Will Transform the Data Center. *IoT - Internet of Things*. <https://iot.do/gartner-says-internet-things-will-transform-data-center-2014-03>
- Jia, X., Feng, Q., Fan, T., & Lei, Q. (2012). RFID technology and its applications in Internet of Things (IoT). *2012 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*, 1282–1285. <https://doi.org/10.1109/CECNet.2012.6201508>
- Jiang, R. (2013). A multivariate CBM model with a random and time-dependent failure threshold. *Reliability Engineering & System Safety*, 119, 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.05.023>

- Jones, D. (1998). Introduction to fiber optics. *Naval Education and Training Professional Development and Technology Center*.
- Kalogridis, G., Efthymiou, C., Denic, S. Z., Lewis, T. A., & Cepeda, R. (2010). Privacy for Smart Meters: Towards Undetectable Appliance Load Signatures. *2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, 232–237.
<https://doi.org/10.1109/SMARTGRID.2010.5622047>
- Keshtkar, A., Arzanpour, S., Keshtkar, F., & Ahmadi, P. (2015). Smart residential load reduction via fuzzy logic, wireless sensors, and smart grid incentives. *Energy and Buildings*, 104, 165–180. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.068>
- Khan, R., Khan, S. U., Zaheer, R., & Khan, S. (2012). Future Internet: The Internet of Things Architecture, Possible Applications and Key Challenges. *2012 10th International Conference on Frontiers of Information Technology*, 257–260.
<https://doi.org/10.1109/FIT.2012.53>
- Khandekar, A., Bhushan, N., Tingfang, J., & Vanghi, V. (2010). LTE-Advanced: Heterogeneous networks. *2010 European Wireless Conference (EW)*, 978–982.
<https://doi.org/10.1109/EW.2010.5483516>
- Kim, Y., Ngai, E. C.-H., & Srivastava, M. B. (2011). Cooperative state estimation for preserving privacy of user behaviors in smart grid. *2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, 178–183.
<https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2011.6102313>
- Koksal, A., & Ozdemir, A. (2016). Improved transformer maintenance plan for reliability centred asset management of power transmission system. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(8), 1976–1983. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.1286>

- Kroes, N. (2012). *Neelie Kroes: On Internet of Things the ethical implications of tomorrow's internet* | *IoT Council* [Council]. Council.
<https://www.theinternetofthings.eu/neelie-kroes-internet-things-ethical-implications-tomorrows-internet>
- Lasse Lueth, K. (2014). Why it is called Internet of Things: Definition, history, disambiguation. *IoT Analytics*. <https://iot-analytics.com/internet-of-things-definition/>
- LEAF GROUP LTD. (2020). *Definition of Smart Appliances* | *Hunker*.
<https://www.hunker.com/13409415/definition-of-smart-appliances>
- Leandro, W. A. (2012). *Universidade tecnológica federal do parana departamento acadêmico de eletrônica curso de especialização em configuração e gerenciamento de servidores e equipamentos de redes*. 40.
- Lee, I., & Lee, K. (2015). The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, 58(4), 431–440.
<https://doi.org/10.1016/j.bushor.2015.03.008>
- Lee, S.-H., & Lee, D.-W. (2016). Actual Cases for Smart Fusion Industry based on Internet of Thing. *Journal of the Korea Convergence Society*, 7(2), 1–6.
<https://doi.org/10.15207/JKCS.2016.7.2.001>
- Lehr, W. H., & Chapin, J. M. (2010). On the convergence of wired and wireless access network architectures. *Information Economics and Policy*, 22(1), 33–41.
<https://doi.org/10.1016/j.infoecopol.2009.12.006>
- Li, F., Qiao, W., Sun, H., Wan, H., Wang, J., Xia, Y., Xu, Z., & Zhang, P. (2010). Smart Transmission Grid: Vision and Framework. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1(2), 168–177. <https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2053726>

- Li, X., Lu, R., Liang, X., Chen, J., & Lin, X. (2011). Smart Community: An Internet of Things Application. *IEEE Communications Magazine*, 8.
- Liang, Z., & Parlikad, A. (2018). A Markovian model for power transformer maintenance. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 99, 175–182.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.12.024>
- Lin, Z.-M., Chang, C.-H., Chou, N.-K., & Lin, Y.-H. (2014). Bluetooth Low Energy (BLE) based blood pressure monitoring system. *2014 International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG)*, 1–4.
<https://doi.org/10.1109/IGBSG.2014.6835225>
- Liu, F. (2008). An efficient centroid type-reduction strategy for general type-2 fuzzy logic system. *Information Sciences*, 178(9), 2224–2236.
<https://doi.org/10.1016/j.ins.2007.11.014>
- Loia, V., Vaccaro, A., & Vaisakh, K. (2013). A Self-Organizing Architecture Based on Cooperative Fuzzy Agents for Smart Grid Voltage Control. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(3), 1415–1422. <https://doi.org/10.1109/TII.2013.2249074>
- Mainetti, L., Patrono, L., & Vergallo, R. (2011). Combining EPCglobal and HL7 to deploy innovative e-health services for patients affected by multiple intolerances. *Proceedings of the 4th International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies - ISABEL '11*, 1–6.
<https://doi.org/10.1145/2093698.2093784>
- Majumder, A., & Caffery J, Jr. (2004). Power line communications. *IEEE Potentials*, 23(4), 4–8. <https://doi.org/10.1109/MP.2004.1343222>

- Marmé, P. (2018, Março 9). *O que é a Internet das Coisas (IoT – Internet of Things)?* Watts On. <https://www.wattson.pt/2018/03/09/o-que-e-a-internet-das-coisas-iot-internet-of-things/>
- Marques, A. P. (2019). *Diagnóstico Otimizado de Transformadores de Potência: Integração de Técnicas Preditivas*. Editora Kelps.
- Masoum, A. S., Deilami, S., Abu-Siada, A., & Masoum, M. A. S. (2015). Fuzzy Approach for Online Coordination of Plug-In Electric Vehicle Charging in Smart Grid. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6(3), 1112–1121. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2014.2327640>
- McNeill, F. M., & Thro, E. (1994). *Fuzzy Logic: A Practical Approach* (Pap/Dskt edition). Morgan Kaufmann Pub.
- Millar, I., Beale, M., Donoghue, B. J., Lindstrom, K. W., & Williams, S. (1998). *The IrDA Standards for High Speed Infrared Communications*. 20.
- Miller, S. S. (2003). *Wi-Fi security*. McGraw-Hill.
- Misic, J., & Misic, V. B. (2018). Proxy Cache Maintenance Using Multicasting in CoAP IoT Domains. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(3), 1967–1976. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2818115>
- Mohammed, M. N., & Sulaiman, N. (2012). Intrusion Detection System Based on SVM for WLAN. *Procedia Technology*, 1, 313–317. <https://doi.org/10.1016/j.protecy.2012.02.066>
- Molina-Markham, A., Shenoy, P., Fu, K., Cecchet, E., & Irwin, D. (2010). Private memoirs of a smart meter. *Proceedings of the 2nd ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Building*, 61–66. <https://doi.org/10.1145/1878431.1878446>

- NIST. (2010). NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 1.0. *NIST Special Publication*, 145.
- Noshad, M., & Rostami, A. (2012). FWM minimization in WDM optical communication systems using the asymmetrical dispersion-managed fibers. *Optik*, 123(9), 758–760. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2011.06.022>
- Ou, Q., Zhen, Y., Li, X., Zhang, Y., & Zeng, L. (2012). Application of Internet of Things in Smart Grid Power Transmission. *2012 Third FTRA International Conference on Mobile, Ubiquitous, and Intelligent Computing*, 96–100. <https://doi.org/10.1109/MUSIC.2012.24>
- Panetta, K. (2017). *Top Trends in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2017*. [//www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-in-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2017/](http://www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-in-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2017/)
- Panizza, A., Lindmark, S., & Power, R. (2010). *RFID: Prospects for europe item-level tagging and public transportation*. <https://businessdocbox.com/Logistics/67847477-Rfid-prospects-for-europe-item-level-tagging-and-public-transportation-authors-andrea-de-panizza-sven-lindmark-and-pawel-rotter-pre-print-version.html>
- Perahia, E., & Stacey, R. (2013). *Next Generation Wireless LANs: 802.11n and 802.11ac*. Cambridge University Press.
- Pérez, F., & Granger, B. (2015). *JupyterLab: Jupyter's Next-Generation Notebook Interface*. <https://www.jupyter.org>
- Pintelon, L. M., & Gelders, L. F. (1992). Maintenance management decision making. *European Journal of Operational Research*, 58(3), 301–317. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90062-E](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90062-E)

- Pirmagomedov, R., & Koucheryavy, Y. (2019). IoT technologies for Augmented Human: A survey. *Internet of Things*, 100120. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2019.100120>
- Predictive Maintenance: What is the Economic Value?* (2019, Maio 18). Anodot. <https://www.anodot.com/blog/predictive-maintenance/>
- Qian Li, Hu, R. Q., Yi Qian, & Geng Wu. (2012). Cooperative communications for wireless networks: Techniques and applications in LTE-advanced systems. *IEEE Wireless Communications*, 19(2), 6189409. <https://doi.org/10.1109/MWC.2012.6189409>
- Quinn, E. L. (2009). *Smart Metering and Privacy: Existing Laws and Competing Policies* (SSRN Scholarly Paper ID 1462285). Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1462285>
- Ramaswami, R., & Sivarajan, K. N. (1995). Routing and wavelength assignment in all-optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 3(5), 489–500. <https://doi.org/10.1109/90.469957>
- RF Wireless World. (2012). *Advantages of WiFi Disadvantages of WiFi*. RF Wireless World. <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-802-11ac.html>
- Rogers, R. R. (1978). IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient Faults in Transformers, Using Gas in Oil Analysis. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, EI-13(5), 349–354. <https://doi.org/10.1109/TEI.1978.298141>
- Rohjans, S., Uslar, M., Bleiker, R., González, J., Specht, M., Suding, T., & Weidelt, T. (2010). Survey of Smart Grid Standardization Studies and Recommendations. *2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, 583–588. <https://doi.org/10.1109/SMARTGRID.2010.5621999>

- Rouse, T. O. (1998). Mineral insulating oil in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 14(3), 6–16. <https://doi.org/10.1109/57.675572>
- Schwartz, D. G., & Klir, G. J. (1992). Fuzzy logic flowers in Japan. *IEEE Spectrum*, 29(7), 32–35. <https://doi.org/10.1109/6.144509>
- Shirin Abkenar, F., & Ghaffarpour Rahbar, A. (2017). Study and Analysis of Routing and Spectrum Allocation (RSA) and Routing, Modulation and Spectrum Allocation (RMSA) Algorithms in Elastic Optical Networks (EONs). *Optical Switching and Networking*, 23, 5–39. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2016.08.003>
- Singh, J., Sood, Y. R., & Verma, P. (2012). The influence of service aging on transformer insulating oil parameters. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19(2), 421–426. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2012.6180234>
- Spencer, L. (2014). *Internet of Things market to hit \$7.1 trillion by 2020: IDC*. ZDNet. <https://www.zdnet.com/article/internet-of-things-market-to-hit-7-1-trillion-by-2020-idc/>
- Strand, J., Chiu, A. L., & Tkach, R. (2001). Issues for routing in the optical layer. *IEEE Communications Magazine*, 39(2), 81–87. <https://doi.org/10.1109/35.900635>
- Street, A. M., Stavrinou, P. N., O'brien, D. C., & Edwards, D. J. (1997). Indoor optical wireless systems—a review. *Optical and Quantum Electronics*, 29(3), 349–378. <https://doi.org/10.1023/A:1018530828084>
- Tang, W. H., Goulermas, J. Y., Wu, Q. H., Richardson, Z. J., & Fitch, J. (2008). A Probabilistic Classifier for Transformer Dissolved Gas Analysis With a Particle Swarm Optimizer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(2), 751–759. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.915812>

techterms. (2016). *Wired Definition*. Home : Technical Terms : Wired Definition.

<https://techterms.com/definition/wired>

Tobon-Mejia, D. A., Medjaher, K., Zerhouni, N., & Tripot, G. (2012). A Data-Driven Failure Prognostics Method Based on Mixture of Gaussians Hidden Markov Models. *IEEE Transactions on Reliability*, *61*(2), 491–503.

<https://doi.org/10.1109/TR.2012.2194177>

Tozlu, S., Senel, M., Wei Mao, & Keshavarzian, A. (2012). Wi-Fi enabled sensors for internet of things: A practical approach. *IEEE Communications Magazine*, *50*(6), 134–143. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2012.6211498>

Tsang, A. H. C. (2002). Strategic dimensions of maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *8*(1), 7–39.

<https://doi.org/10.1108/13552510210420577>

Unknown. (2013, Março 17). Infraestrutura de Rede Interna: Fibra Óptica ou Cabo de Cobre? *Infraestrutura de Rede Interna*.

<http://fabiomontoro.blogspot.com/2013/03/fibra-optica-ou-cabo-de-cobre.html>

Van Rijn, C. F. H. (1987). A systems engineering approach to reliability, availability, and maintenance. *Conf. on Foundation of Computer Aided Operations, FOCAP-O*, 221–251.

Varma, V. K., Ramesh, S., Wong, K. D., Barton, M., Hayward, G., & Friedhoffer, J. A. (2003). Mobility management in integrated UMTS/WLAN networks. *IEEE International Conference on Communications, 2003. ICC '03.*, *2*, 1048–1053.

<https://doi.org/10.1109/ICC.2003.1204514>

- Vasconcelos, J. (2008). *Survey of Regulatory and Technological Developments Concerning Smart Metering in the European Union Electricity Market*.
<http://cadmus.eui.eu/handle/1814/9267>
- Viegas, C. M. D., Júnior, A. D. M. B., Anjos, I. M. D., & Pires, P. S. M. (2007). *Uma Visão Geral sobre Tecnologias Wireless em Ambientes Industriais*.
<https://doi.org/10.13140/2.1.2262.6883>
- Vitsas, V., & Boucouvalas, A. C. (2003). Optimization of IrDA IrLAP link access protocol. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2(5), 926–938.
<https://doi.org/10.1109/TWC.2003.816776>
- Wang, W., Xu, Y., & Khanna, M. (2011). A survey on the communication architectures in smart grid. *Computer Networks*, 55(15), 3604–3629.
<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2011.07.010>
- Yates, J. M., Rumsewicz, M. P., & Lacey, J. P. R. (1999). Wavelength converters in dynamically-reconfigurable WDM networks. *IEEE Communications Surveys*, 2(2), 2–15. <https://doi.org/10.1109/COMST.1999.5340515>
- Yu, Y., & Luan, W. (2009). Smart grid and its implementations. *Proceedings of the CSEE*, 29(34), 1–8.
- Zahran, M. (2013). *Smart grid technology, vision, management and control*. 12, 11–21.
- Zaslavsky, A., Perera, C., & Georgakopoulos, D. (2012, Julho 1). *Sensing as a Service and Big Data*. CoRR, abs/1301.0159.
- Zheng, J., Simplot-Ryl, D., Bisdikian, C., & Mouftah, H. (2011). The internet of things [Guest Editorial]. *IEEE Communications Magazine*, 49(11), 30–31.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2011.6069706>

Zhu, T., Sheng Xiao, Yi Ping, Towsley, D., & Weibo Gong. (2011). A secure energy routing mechanism for sharing renewable energy in smart microgrid. *2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, 143–148. <https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2011.6102307>

ANEXO A

24/03/2021

teste_SUB

In [1]:

```
import numpy as np
import pandas as pd
import skfuzzy as fuzz
import matplotlib.pyplot as plt
from skfuzzy import control as ctrl
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
```

In [2]:

```
df = pd.read_csv("C:/Users/marci/Ambiente de trabalho/
                Futuro/Data/trans_dados.csv", sep = ';')
df = df.dropna()
```

In [4]:

```
r1 = df['C2H2']/df['C2H4']
r2 = df['C2H4']/df['H2']
r3 = df['C2H4']/df['C2H6']
```

In [5]:

```
# Variáveis de entradas do gaseses em estudos
R1 = ctrl.Antecedent(np.arange(0, 3.5, 0.01), 'R1')
R2 = ctrl.Antecedent(np.arange(0, 1.2, 0.01), 'R2')
R3 = ctrl.Antecedent(np.arange(0, 3.3, 0.01), 'R3')
Avaria = ctrl.Consequent(np.arange(0, 3, 0.01), 'Avaria')
```

In [6]:

```
# Gerar Função de Associação Difusa

R1['Baixo'] = fuzz.trimf(R1.universe, [-0.5, 0, 0.1])
R1['Medio'] = fuzz.trimf(R1.universe, [0.1,1.6,3])
R1['Alto'] = fuzz.trimf(R1.universe, [3.1, 3.5, 4])

R2['Baixo'] = fuzz.trimf(R2.universe, [0.1, 0.5, 1])
R2['Medio'] = fuzz.trimf(R2.universe, [-0.5, 0, 0.1])
R2['Alto'] = fuzz.trimf(R2.universe, [1, 1.2, 1.4])

R3['Baixo'] = fuzz.trimf(R3.universe, [-0.5, 0, 0.1])
R3['Medio'] = fuzz.trimf(R3.universe, [1,1.6,3])
R3['Alto'] = fuzz.trimf(R3.universe, [3.1, 3.3, 3.5])

Avaria['000'] = fuzz.trimf(Avaria.universe, [0,0.25,0.5])
Avaria['010'] = fuzz.trimf(Avaria.universe, [0.25,0.5,0.75])
Avaria['110'] = fuzz.trimf(Avaria.universe, [0.5, 0.75, 1])
Avaria['101'] = fuzz.trimf(Avaria.universe, [0.75, 1, 1.25])
Avaria['102'] = fuzz.trimf(Avaria.universe, [1, 1.25, 1.5])
Avaria['001'] = fuzz.trimf(Avaria.universe, [1.25, 1.5, 1.75])
Avaria['020'] = fuzz.trimf(Avaria.universe, [1.5, 1.75, 2])
Avaria['021'] = fuzz.trimf(Avaria.universe, [1.75, 2, 2.25])
Avaria['022'] = fuzz.trimf(Avaria.universe, [2, 2.25, 2.5])

Avaria['111'] = fuzz.trimf(Avaria.universe, [0, 0, 0])
```

localhost:8888/notebooks/Ambiente de trabalho/Futuro/Mestrado/DissertaçãoEletro/pratica/teste_SUB.ipynb

1/3

24/03/2021

teste_SUB

In [78]:

```
# visualização dos graficos
R1.view()
R2.view()
R3.view()
Avaria.view()
```

In [43]:

```
rule1 =ctrl.Rule(R1['Baixo'] | R2['Baixo'] & R3['Baixo'],Avaria ['000']);
rule2 =ctrl.Rule(R1['Baixo'] | R2['Medio'] & R3['Baixo'],Avaria ['010']);
rule3 =ctrl.Rule(R1['Medio'] | R2['Medio'] & R3['Baixo'],Avaria ['110']);
rule4 =ctrl.Rule(R1['Medio'] | R2['Baixo'] & R3['Medio'],Avaria ['101']);

rule11 =ctrl.Rule(R1['Alto'] | R2['Baixo'] & R3['Medio'],Avaria ['111']);

rule5 =ctrl.Rule(R1['Medio'] | R2['Baixo'] & R3['Alto'],Avaria ['102']);
rule6 =ctrl.Rule(R1['Baixo'] & R2['Baixo'] & R3['Medio'],Avaria ['001']);
rule7 =ctrl.Rule(R1['Baixo'] & R2['Alto'] & R3['Baixo'],Avaria ['020']);
rule8 =ctrl.Rule(R1['Baixo'] & R2['Alto'] | R3['Medio'],Avaria ['021']);
rule9 =ctrl.Rule(R1['Baixo'] & R2['Alto'] | R3['Alto'],Avaria ['022']);
```

In [44]:

```
import os

a =[]
for i in range(len(df)):

    Avaria_ctrl = ctrl.ControlSystem([rule1,rule2,rule3, rule4,
                                     rule5, rule6, rule7, rule8, rule9, rule11])

    #teste de algumas variaveis
    Avaria1 = ctrl.ControlSystemSimulation(Avaria_ctrl)
    Avaria1.input['R1'] = r1.iloc[i]
    Avaria1.input['R2'] = r2.iloc[i]
    Avaria1.input['R3'] = r3.iloc[i]
    # Resultado
    Avaria1.compute()
    a.append(Avaria1.output['Avaria'])
```

In [45]:

```
df1 = pd.DataFrame(a)
```

In [79]:

```
plt.figure(figsize=(10, 4))
plt.plot(df['H2'], label='H2') # green
plt.plot(df['CH4'], label='CH4') # green
plt.plot(df['CO'], label='CO') # green
plt.plot(df['CO2'], label='CO2') # green
plt.plot(df['C2H4'], label='C2H4') # green
plt.plot(df['C2H6'], label='C2H6') # green
plt.plot(df['C2H2'], label='C2H2') # green
plt.grid(True)
plt.title('Gases do Transformador')
plt.legend()
plt.savefig('reta-titulo-legendas.png')
plt.show()
```

localhost:8888/notebooks/Ambiente de trabalho/Futuro/Mestrado/DissertaçãoEletro/pratica/teste_SUB.ipynb

2/3

24/03/2021

teste_SUB

In [80]:

```
Avaria.view(sim=Avaria1)
```

In [49]:

```
y = []
for i in range(len(df1)):
    if (df1.iloc[i] <=0.252).any():
        x = 10
    if (df1.iloc[i] >= 0.252).any() & (df1.iloc[i] <=0.52).any():
        x = 110
    if (df1.iloc[i] >= 0.52).any() & (df1.iloc[i] <=1).any():
        x = 101
    if (df1.iloc[i] >= 1).any() & (df1.iloc[i] <=1.252).any():
        x = 102
    if (df1.iloc[i] >= 1.252).any() & (df1.iloc[i] <=1.52).any():
        x = 1
    if (df1.iloc[i] >= 1.52).any() & (df1.iloc[i] <=1.751).any():
        x = 20
    if (df1.iloc[i] >= 1.751).any() & (df1.iloc[i] <=2.1).any():
        x = 21
    if (df1.iloc[i] >= 2.1).any() & (df1.iloc[i] <=2.51).any():
        x = 22
    y.append(x)
```

In [81]:

```
df2 = pd.DataFrame(y)
len(df2)
df1.head()
```

In [82]:

```
df3 = pd.concat([df1])
df3=df3.rename(columns={0: 'Valores'})
df3['Tipo de Avaria']= df2
df3.head()
```

In [83]:

```
plt.figure(figsize=(10, 4))
plt.plot(df3['Valores'], label='Valor de Saída') # green
plt.grid(True)
plt.title('Gases do Transformador')
plt.legend()
plt.savefig('reta-titulo-legendas.png')
plt.show()
```