

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

HENRIQUE MACIEL DOS REIS

Consumo de energia em IoT: importância e alguns exemplos de soluções

SÃO PAULO

2022

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

HENRIQUE MACIEL DOS REIS

Consumo de energia em IoT: importância e alguns exemplos de soluções

Trabalho submetido como exigência parcial
para a obtenção do Grau de Tecnólogo em
Análise e Desenvolvimento de Sistemas
Orientador: Professor Mestre Valter Yogui

SÃO PAULO

2022

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

HENRIQUE MACIEL DOS REIS

Consumo de energia em IoT: importância e alguns exemplos de soluções

Trabalho submetido como exigência parcial para a obtenção do Grau de
Tecnólogo em Análise e Desenvolvimento de Sistemas.

Parecer do Professor Orientador aprovado

Conceito/Nota Final: 9,4

Atesto o conteúdo contido na postagem do ambiente TEAMS pelo aluno e assinada por mim para avaliação do TCC.

Orientador: Professor Mestre Valter Yogui

SÃO PAULO, 07 de dezembro de 2022.

Assinatura do Orientador



Assinatura do aluno

Agradecimentos

Gostaria de agradecer à minha querida e amada família: meus pais, meu irmão, minha tia Maria Socorro por todo amor e ajuda desde sempre, e especialmente à Tatiana pela compreensão, companheirismo e apoio. À todo corpo docente dos departamentos de ADS e Matemática da FATEC São Paulo, sobretudo ao meu orientador, professor Valter Yogui, por todo apoio e à professora Vânia Francescon, pelo carinho e dedicação prestados aos alunos de TCC. Agradeço também aos funcionários da FATEC São Paulo, pessoas essenciais à instituição e que também são responsáveis pela sua excelência. Gostaria de agradecer a todos os colegas de faculdade e todos os profissionais de TI com que tive honra e a alegria de trabalhar, cruzar caminhos e encarar desafios. Um agradecimento especial aos colegas do meu atual emprego no Departamento de TI da Secretaria de Administração e Tecnologia da Prefeitura Municipal de Itapevi.

Lista de abreviaturas e siglas

ADC - *Analogic Digital Conversor*
ADC - *Noise Reduction (SLEEP_MODE_ADC)*,
Ah – Amperes hora
AM - Modulação de Amplitude
AMQP - *Advanced Message Queuing Protocol*
API - *Application Programming Interface*
ARM - *Advanced RISC Machines*
CARP - *Common Address Redundancy Protocol*
CISC - *Complex Instruction Set Computer*
CoAP - *Constrained Application Protocol*
CORPL - *Cognitive Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*
COVID-19 - *Coronavirus Disease 2019*
DAS - *Data Acquisitio Systems*
DDS - *Data Distribution System*
DECT/ULE - *DECT Ultra Low Energy*
DRAM - *Dynamic Random Acess Memory*
DVFS - *Dynamic Voltage and Frequency Scalling*
EEI - *Efficiency Energy Indicators*
EMS - *Energy Managment Eschema*
FM - Modulação de Frequência
GPIO - *Generic Purpose Input/Output*
HTML - *HyperText Markup Language*
HTTP - *Hypertext Transfer Protocol*
I2C - *Inter-Integrated Circuit*
IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
IETF IPv6 over Networks of Resource-constrained Nodes (6Lo)
IoT - *A “Internet das Coisas” / Internet of Things*
IPET - *Implicit Path Enumeration Technique*
IP - *Internet Protocol*
IPv6 - *Internet Protocol v. 6*
LAN - *Local Area Network*
Li-íon - *Lítio-Íon* -
LoRaWan - *Long Range Wan*
LTE-A, *Long Term Evolution-Advanced*
M2M - *Machine to Machine*
mA - *MiliAmpère*
MAC – *Media Acces Control*
MQTT - *Message Queue Telemetry Transport*
NiCd - *Níquel-Cádmio*
OSI - *Open System Interconnection*
PC - *Personal Computer*
PDCA - *PLAN - DO - CHECK - ACT*
PMC - *Performance Monitoring Counters*
QoS - *Qualidade de Serviço*
RAM - *Random Access Memory*
RAMI - *Reference Architeture Model Industry*
RAN - *Radio Access Network*
REST - *Representational State Transfer*
RISC - *Reduced Instruction Set Computer*
RPL - *Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*
SEMS - *Smart Energy Managment System*
SoC - *System on Chip*
SPI - *Serial Peripheral Interface*

SRA - *Static Resources Analysis*
SRAM - *Static Random Access Memory*
TCP - *Transmission Control Protocol*
TIC - *Tecnologias da informação de comunicação*
UART - *Universal asynchronous receiver/transmitter*
UDP - *User Datagram Protocol*
UML - *Unified Modeling Language*
USB - *Universal Serial Bus*
V - Volts
W/s - Watts por Segundo
XML - *Extensible Markup Language*
XMPP - *Extensible Messaging and Presence Protocol*
 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ - MicroWatts por centímetro cúbico

Resumo

A Internet das Coisas (IoT) é um conceito ainda emergente e tende a se tornar cada vez mais pervasiva e abundante não somente nos diversos ambientes onde ela pode ser aplicada, mas nas atividades profissionais de arquitetos e analistas de sistemas, desenvolvedores, entre outros. A alta demanda de energia que bilhões de dispositivos e equipamentos que compõem a arquitetura da IoT causará, somada à crescente escassez de recursos e à necessidade global de mais eficiência energética, colocam-se como fatores de fundamental atenção para os profissionais citados. Esse trabalho visa apresentar e discutir, sem nenhuma pretensão de esgotar, esse debate e apresentar alguns exemplos de soluções que especialistas e pesquisadores buscam encontrar para a questão.

Abstract

The Internet of Things (IoT) is a still emerging concept and tends to become increasingly pervasive and abundant not only in the different environments where it can be applied, but in the professional activities of architects and systems analysts, developers, among others. The high demand for energy that billions of devices and equipment that make up the IoT architecture will cause, added to the growing scarcity of resources and the global need for more energy efficiency, are factors of fundamental attention for the aforementioned professionals. This work aims to present and discuss, without any intention of exhausting, this debate and present some examples of solutions that experts and researchers seek to find for the issue.

Sumário

1 Introdução	10
2 Material e Método	12
3 Desenvolvimento	13
3.1 Internet das Coisas: Conceito e Arquiteturas	13
3.2 A questão da energia no ecossistema de IOT	18
3.3 Aplicações IoT para Gestão de Energia	25
3.4 Exemplos de soluções para eficiência energética em IoT	31
3.4.1 <i>Hardware</i>	31
3.4.2 Tecnologias e protocolos de comunicação	46
3.4.3 <i>Design de software</i>	54
4 Considerações Finais	63
5 Referencial bibliográfico	65

1 Introdução

As aplicações práticas e comerciais em sistemas da informação e comunicação, em sistemas computacionais no âmbito do que se convencionou chamar de Internet das Coisas (IoT) apresentam uma grande tendência de crescimento em volume. Desse modo, tanto o mercado, quanto instituições governamentais e acadêmicas, passando pelo conjunto de profissionais da área de tecnologia quanto de outras diversas, tendem a observar, estudar e trabalhar em projetos que correspondam ao aumento desse volume, ou seja, projetos cada vez mais relacionados, direta ou indiretamente, com o universo da IoT.

Desse modo, diversos elementos relacionados à prática de profissionais de TI, como projetos e estrutura de redes, engenharia de software, arquitetura e organização de computadores, entre muitos outros, se somam aos que envolvem outros campos sociais e profissionais em diversos aspectos como ergonomia, design de interfaces, experiência do usuário e segurança, por exemplo, sem contar as múltiplas áreas de aplicações e domínios de negócios envolvendo a IoT, como agricultura, planejamento urbano, saúde, entre outras.

Este trabalho tem a perspectiva de apresentar, problematizar e apresentar brevemente algumas questões e soluções a respeito de um desses elementos, o uso, consumo e gerenciamento de recursos energéticos para aplicações em ambientes relacionados à Internet das Coisas, uma vez que tal questão encontra, no âmbito da IoT, importantes gargalos para que as funções dessa emergente tecnologia sejam realizadas com qualidade. Isso quer dizer que o consumo energético dos dispositivos que compõem o universo da IoT é um relevante tópico a ser considerado em sistemas de informação que utilize as tecnologias desse universo. Prova disso é o inúmero conjunto de material acadêmico cobrindo diversos prismas desse assunto. Além disso, a própria IoT vem sendo aplicada como meio de monitorar e gerenciar o consumo de energia em diversas aplicações, inclusive as de produção e distribuição de energia para cidades e indústrias.

O desenvolvimento de nosso trabalho está dividido em quatro capítulos.

No primeiro apresentamos uma definição básica de IoT, apresentamos alguns modelos de arquitetura desse universo, além de apresentar os estágios básicos para o design de um sistema baseado no uso da IoT.

No segundo capítulo apresentamos a questão da energia no ecossistema de IoT e a necessidade de reduzir o consumo geral de insumos energéticos em função dos preços, do aumento da demanda populacional e das mudanças climáticas. Em seguida apresentamos os conceitos de eficiência energética, de gestão de energia e ISO 50.001, certificação internacional referente à gestão de energia. Apresentamos também algumas abordagens possíveis de se analisar o tema do consumo de energia em ecossistemas IoT.

No terceiro capítulo apresentamos um breve levantamento bibliográfico de pesquisas de relacionadas às tecnologias IoT para monitoramento e gestão de energia em inúmeras aplicações, inclusive aplicações voltadas para a produção e distribuição de energia em cidades e sítios rurais. Apresentamos, portanto, alguns exemplos do uso da IoT para gestão de energia e algumas de suas relações com a ISO 50.001.

No quarto capítulo apresentamos algumas soluções para redução do consumo e aumento de eficiência energética no âmbito da IoT. Essas soluções foram divididas em três categorias: arquitetura de *hardware*, protocolos de comunicação e *design* de *software*.

Por fim apresentamos uma conclusão do trabalho.

2 Material e Método

Nosso trabalho consiste exclusivamente de levantamento bibliográfico de livros, artigos e páginas *web* de autores que se discursam sobre assunto. A partir desse levantamento, realizamos uma compilação ordenada de temas que acreditamos pertinentes e realizamos alguma discussão e problematização a respeito.

3 Desenvolvimento

3.1 Internet das Coisas: Conceito e Arquiteturas

A “Internet das Coisas” / *Internet of Things* (IoT) é uma expressão apresentada em 1999, pelo professor do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) Kevin Ashton, durante uma palestra dada na empresa *Protect Gamble*, em 1999. Ela refere-se, conceitualmente, a um sistema pervasivo de sensores conectando o mundo real à internet. Fruto da convergência de várias tecnologias em diversas áreas como identificação por rádio frequência, microeletrônica e sensoriamento, o termo se consolidou nas duas últimas décadas como uma promissora e emergente tecnologia, capaz de agregar valor em diversos campos de atividade humana, chamando a atenção de estudiosos e agentes do mercado. Nas palavras de Ashton:

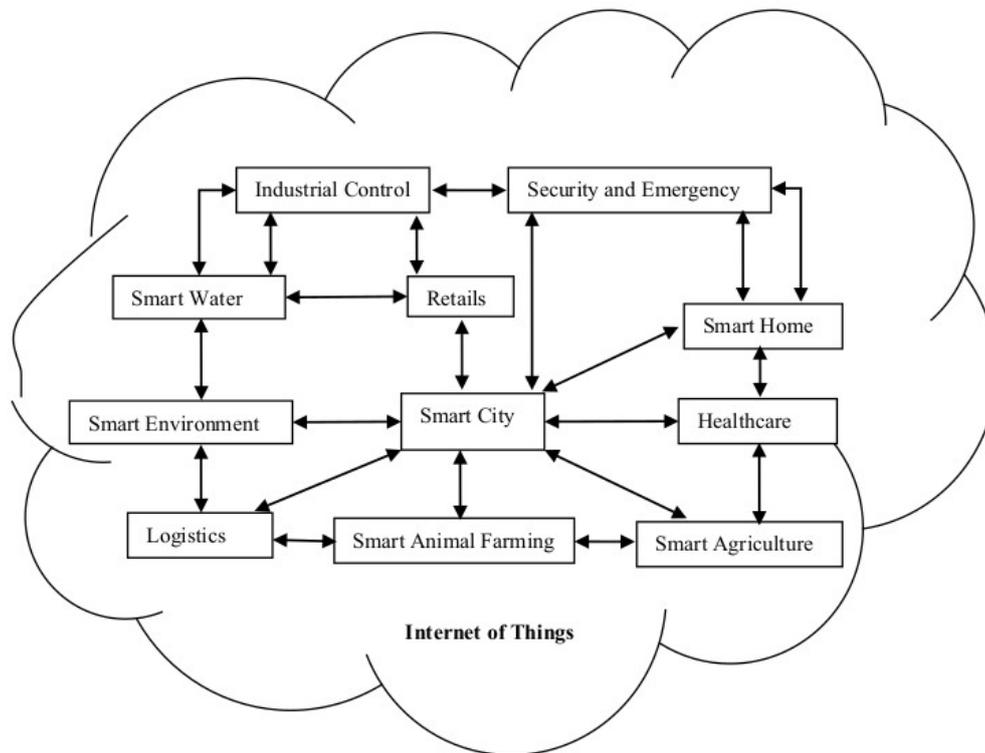
“se tivéssemos computadores que soubessem tudo o que há para saber sobre coisas/dispositivos, eles poderiam acumular dados sem qualquer tipo de ajuda nossa, com a ajuda desses dados/informações seríamos capazes de rastrear, calcular tudo, além disso, poderíamos reduzir tremendamente custos, perdas e desperdícios.” (ASHTON, 1999 *apud* PENG et al. 2020, p. 5, tradução nossa).

O leque de aplicações da IoT é bastante vasto. Passa pelo controle de estruturas e funções de um imóvel domiciliar, por exemplo notificar o proprietário, e prestadores de serviços, a respeito de vazamentos de gás e água, até o gerenciamento de plantas industriais e cidades inteiras. Diversos outros ramos como agricultura, saúde, logística entre outros, encontram aplicações de IoT. A Figura 1 mostra o domínio de aplicações da IoT. Segundo estimativas, na primeira metade da década de 2020, mais de vinte bilhões de dispositivos IoT já estão em atividade ao redor do planeta (PENG *et al.*, 2020, p. 5).

Segundo Magrani, o *conceito de internet das coisas (IoT)* não é um consenso entre pesquisadores:

“Existem fortes divergências em relação ao conceito de IoT, não havendo, portanto, um conceito único que possa ser considerado pacífico ou unânime. De maneira geral, pode ser entendido como um ambiente de objetos físicos interconectados com a internet por meio de sensores pequenos e embutidos, criando um ecossistema de computação onipresente (ubíqua), voltado para a facilitação do cotidiano das pessoas, introduzindo soluções funcionais nos processos do dia a dia. O que todas as definições de IoT têm em comum é que elas se concentram em como computadores, sensores e objetos interagem uns com os outros e processam informações/dados em um contexto de hiperconectividade.” (MAGRANI, 2018, p. 20).

Figura 1 – Domínio de aplicações da IoT.



Fonte – MITTAL; PANDEY, 2019, p. 3.

Partindo desse ponto comum, e de forma bastante simplificada, pressupomos que IoT pode ser compreendida como uma ou várias redes de objetos interconectados que dispõem e se utilizam de sensores, atuadores, sistemas computacionais e podem se comunicar, ou seja, trocar dados com outros objetos e sistemas, através de dispositivos, protocolos de comunicação e a internet. A “coisa” em IoT deve possuir, segundo Meira (MEIRA, 2016 *apud* MAGRANI, 2018, p. 20) três predicados fundamentais: controle, computação e comunicação. Caso algum desses itens falte, a “coisa” está incompleta no âmbito de IoT e se situa em outros campos como o da telemetria ou da automação, por exemplo. A “coisa” da IoT, portanto, através de sensores capta dados do ambiente, de artefatos do ambiente, de pessoas ou outros sistemas, emitindo diversas respostas através de atuadores (controle); possui um grau de “inteligência” em que decisões, seja através do controle de fluxo mais direto em programação (*if else, for, while, etc*), seja através de recursos como AI ou *Machine Learning*, são tomadas pelos dispositivos em função dos objetivos da aplicação, ou seja, seu algoritmo e dos *inputs* recebidos (computação); e possui conectividade, ou seja, estabelece direta ou indiretamente uma conexão com servidores, dispositivos ou serviços através de redes locais e da internet (comunicação).

A “coisa”, o dispositivo IoT, como dissemos, não opera isoladamente, mas em uma rede em que está conectada e se comunicando com outros dispositivos e plataformas, além de usuários, ou seja, consiste em um ecossistema (chamaremos de sistemas baseados em IoT) em que atores, eventos, protocolos, transmissões, processamento de *big data*, artefatos e plataformas operam concorrente e dinamicamente. Esse ecossistema é composto de estruturas arquiteturais, modelos comunicacionais, tecnologias e agentes.

“A estrutura arquitetônica da IoT diz respeito a protocolos de comunicação, objetos inteligentes, segurança, escalabilidade e interoperabilidade entre dispositivos heterogêneos (...). Às vezes, coisas/dispositivos podem se mover de sua própria localização para outros lugares em relações em tempo real através da atmosfera circundante, além de alguns designs adaptativos para interação dinâmica com outros dispositivos, o design descentralizado oferece capacidade eficiente orientada a eventos de IoT” (PENG et al., 2020, p. 6).

Existem quatro estágios básicos para o desenvolvimento de uma arquitetura de sistema baseado em IoT: Sensores/Atuadores, *Internet Gateway*, *Edge IT* (computação de borda) e *Data Center/Cloud* (MITTAL; PANDEY, 2019, p. 5).

Sensores e atuadores se encontram no primeiro estágio para o desenvolvimento de uma arquitetura de sistema baseado em IoT. Eles são os dispositivos IoT que extraem e/ou geram dados que serão processados nesse ou em qualquer outro estágio (através da comunicação com servidores que farão o processamento). São também atuadores que interferem na realidade física, inclusive afetando os dados que serão gerados e processados. Entre sensores podemos citar acelerômetros, sensores óticos, de imagem, de fumaça, de proximidade, de movimento, de infravermelho, entre outros. Resistências, motores e válvulas podem ser citados como exemplos de atuadores. É importante considerar a natureza dos dados que os sensores e atuadores vão lidar, uma vez que certas informações devem ser processadas pelo dispositivo isoladamente do sistema como um todo, enquanto outros deverão ser enviados para componentes externos do sistema. Por exemplo: um carro elétrico precisa tomar uma série de decisões críticas de forma independente, sem precisar fazer requisições para um servidor remoto, senão a segurança do usuário e de outras pessoas poderiam estar em risco (FULLER, 2016).

Internet Gateway é o segundo estágio. Ele opera associado aos sistemas de aquisição de dados (*Data Acquisition Systems – DAS*) para rotear o conjunto de informações que devem ser enviados para os estágios posteriores. Os DAS são responsáveis pela digitalização e agregação dos dados analógicos gerados pelos sensores e atuadores, uma vez que um sistema baseado em IoT pode gerar um montante gigantesco de *bytes*. Desse modo, uma vez que os dados analógicos pertinentes são digitalizados e agregados

o *gateway* de internet pode se utilizar dos recursos de comunicação (WiFi, LAN e Internet, por exemplo) para o devido despacho desses dados. Além de uma melhor estruturação e sintetização de dados, os *gateways* podem cumprir funções essenciais em relação à segurança, análise de dados e gestão de serviços de sistemas baseados em IoT:

“Os *gateways* inteligentes podem se basear em funcionalidades extras, adicionando recursos como análise, proteção contra malware e serviços de gerenciamento de dados. Esses sistemas permitem a análise de fluxos de dados em tempo real. Embora o fornecimento de *insights* de negócios a partir dos dados seja um pouco menos imediato no *gateway* do que seria quando enviado diretamente da zona do sensor/atuador, o gateway tem o poder de computação para renderizar as informações em um formato mais compreensível para as partes interessadas nos negócios.” (FULLER, 2016, tradução nossa).

O terceiro estágio se refere à computação de borda. Segundo a INTEL, cerca de 90% dos dados gerados pelos dispositivos IoT não necessitam de processamento nos data centers de modo que o envio dessas informações para servidores centrais remotos pode causar uma sobrecarga de demanda no centro do sistema e causam muitos tipos de desperdícios e excessos, por exemplo de tráfego, de armazenamento, de consumo elétrico etc. Assim, processamentos de dados efetuados “na borda”, ou seja, fisicamente localizados mais próximos aos dispositivos trazem benefícios em relação aos custos e à velocidade dos processos envolvidos nos sistemas baseados em IoT, mas também podem trazer um melhor aproveitamento desse montante de dados gerados. O pré-processamento na borda pode gerar análises e alertas e enviá-los para servidores centrais, que farão notificações para usuários e administradores interessados, consolidações de dados e relatórios de diversos outros nós do sistema, além de retornar comandos para os agentes da borda. Por exemplo: o controle de estoque dos supermercados nas redes de varejo pode ser controlado por dispositivos IoT e servidores de borda que somente enviariam relatórios diários, requisições e alertas específicos para os computadores centrais. Desse modo, os estoques das unidades dos supermercados conseguem estar sempre atualizados e transparentes para gestores locais e regionais, facilitando também sua reposição de acordo com a demanda (FULLER, 2016).

O quarto estágio para o desenvolvimento de uma arquitetura baseada em IoT contempla a computação em nuvem e os data centers. Este estágio é aplicado para processar, analisar, gerenciar e armazenar grandes quantidades de dados que não necessitam de retorno imediato na borda. Embora a resposta dos processamentos efetuados no quarto estágio sejam mais demorados, eles tendem a ser mais complexos, contemplando diversos nós do sistema baseado em IoT como um todo e demandando mais capacidade de processamento além de capacidade analítica de quem for lidar com os resultados. Por

exemplo: um sistema de controle de distribuição de energia elétrica (*smart grid*) pode obter dados de demanda, das condições físicas dos equipamentos e das oscilações de preços do mercado para emitir relatórios e alertas para técnicos, gestores e usuários de modo a prever a necessidade de manutenções, reduzir o excesso de consumo e aumentar a eficiência da distribuição de energia para as localidades que mais demandam (FULLER, 2016).

Existem diversos modelos arquiteturais para IoT. Alguns dos mais consolidados academicamente e pelo mercado são baseados em três camadas, cinco camadas e o modelo baseado em “nuvem e névoa” (Figura 2). Todos contemplam, com mais ou menos profundidade, os estágios de desenvolvimento de uma arquitetura para sistemas baseados em IoT descritos anteriormente.

O modelo baseado em três camadas é composto pelas camadas de percepção, camada de rede, camada de aplicação. A camada de aplicação fornece os serviços necessários para os usuários. A camada de rede é responsável pela infraestrutura de comunicação necessária para o sistema baseado em IoT. A camada de percepção abrange os componentes físicos do sistema que estão em contato direto com os usuários.

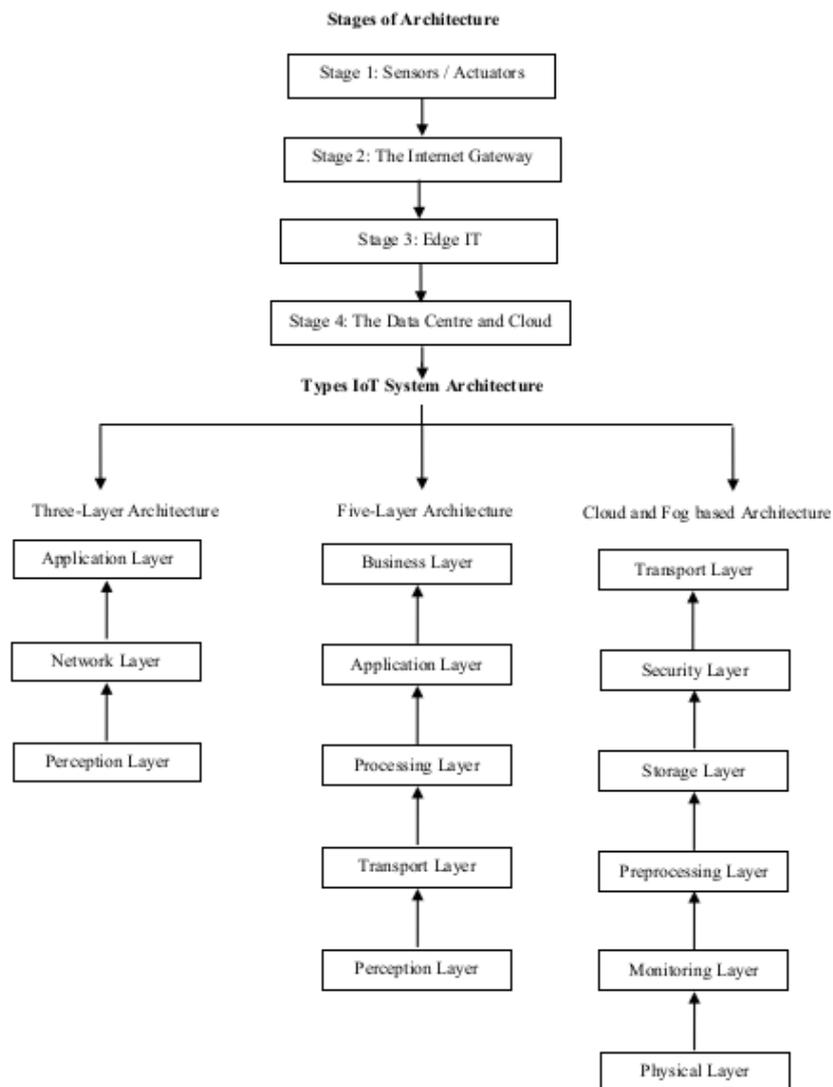
Em relação aos outros dois modelos citados:

“A arquitetura de cinco camadas retrata uma visão melhor e mais ampla da arquitetura IoT (...). Nessa arquitetura, a camada de negócios executa toda a ponta de negócios de todo o sistema IoT. Inclui principalmente protótipos que encontram modelos de lucro e de negócios. Além disso, a camada de transporte atua como uma interface permeável conectando as camadas de processamento e percepção. A próxima camada é a camada de processamento e a tarefa dessa camada é processar, analisar e armazenar o bloco de dados. Em circunstâncias peculiares, como quando a utilização e processamento de dados é uma tarefa árdua devido ao gigantesco volume de dados, as organizações geralmente exigem uma plataforma de data center separada. As arquiteturas centradas na nuvem podem desempenhar um papel substancial nessa posição. Em arquiteturas centradas em nuvem, a nuvem é considerada o nível mais alto e também possui o papel central de processamento devido à sua escalabilidade em tal operação. Além disso, a computação em névoa é análoga à computação de borda e sua função é diminuir a pressão do processo na plataforma central. A arquitetura em névoa também envolve o pré-processamento de dados nos sensores e no nível do *gateway* da Internet.” (MITTAL; PANDEY, 2019. pag 2. tradução nossa).

É importante ressaltar que existem muitos outros modelos e propostas de arquitetura para sistemas baseados em IoT.

O Modelo de Referência para Arquitetura da Indústria 4.0 (RAMI 4.0), por exemplo, integra uma série de padrões internacionais de tecnologias de operação com tecnologias da informação, incorporando a IoT para aplicação no ramo industrial.

Figura 2: Estágios para o desenvolvimento e tipos de Arquitetura IoT.



Fonte – MITTAL; PANDEY, 2019, p. 7

3.2 A questão da energia no ecossistema de IOT

O tema da energia é muito amplo e complexo. A produção bibliográfica é extremamente vasta tanto em quantidade, quando na variedade de abordagens e domínios do conhecimento humano que se debruçam sobre o assunto. Segundo Smil:

“De uma perspectiva biofísica fundamental, tanto a evolução humana pré-histórica quanto o curso da história podem ser vistos como a busca por controlar maiores estoques e fluxos, de formas mais concentradas e versáteis de energia e convertê-los, de maneiras mais acessíveis, com custos mais baixos e com maior eficiência, em calor, luz e movimento” (SMIL, 2017 p. 1, tradução nossa)

Desse modo optamos por não buscar um aprofundamento exaustivo dos conceitos relacionados à energia, embora façamos algumas definições mais simples, mas focar nos problemas de custo:

“Há muita discussão sobre as definições específicas de termos como eficiência energética, uso de energia, consumo de energia, intensidade de energia, etc. Não é muito importante quais são as definições você usa. O importante é que você reduza a energia utilizada em sua organização ao mínimo necessário para realizar suas operações de forma produtiva, segura e sustentável, atendendo aos requisitos de qualidade de seus clientes, internos e externos.” (UNIDO, 2015, p. 2)

Sob a perspectiva do custo é possível afirmar que, de uma maneira geral, os insumos energéticos encareceram na última década. Fatores mais recentes como as flutuações na demanda global devido à COVID-19, o aumento do preço de gás e fertilizantes com a guerra da Ucrânia, se somam a fatores mais estruturantes como a expectativa de aumento de populacional e da demanda, o esgotamento do modelo baseado em combustíveis fósseis e a necessidade de transição das matrizes energéticas para fontes mais limpas e renováveis que reduzam as emissões de carbono, medidas indispensáveis para frearmos as mudanças climáticas, colocam os custos dos insumos energéticos nos patamares mais elevados dos últimos anos.

“O consumo mundial de energia continua a aumentar: mais do que duplicou nos últimos 40 anos e deverá aumentar mais 30% até 2040. Além disso, a energia é o principal contribuinte para as alterações climáticas, representando cerca de 60% do efeito de estufa do mundo em emissão de gases. Tomar medidas para gerenciar melhor nosso consumo de energia não apenas ajuda o planeta, mas também economiza dinheiro para as organizações e a sociedade como um todo. Um estudo encomendado pela *Climate Works Foundation*, uma organização não governamental que fomenta a filantropia coletiva na luta contra as mudanças climáticas, mostrou que se mais fosse feito para melhorar a eficiência energética e reduzir as emissões de carbono apenas nos setores industrial e de construção, poderia gerar mais de US\$ 3,2 trilhões em economias relacionadas à saúde pública.” (ISO, 2018, p. 1, tradução nossa)

O Brasil sofre com tais condições externas e gerais e, apesar de possuir grandes fontes de energias renováveis, fatores internos também contribuem para o aumento do custo da energia para o consumidor em geral. A energia elétrica, por exemplo:

“No Brasil, a tarifa de energia elétrica superou a inflação em quase 50% nos últimos vinte anos. Em 2017, já era a sexta mais cara do mundo, segundo um levantamento da Federação das Indústrias do Rio de Janeiro. A entidade aponta ainda que a energia elétrica é o principal insumo em 79% das empresas do setor industrial. O que representa mais de 40% dos custos de produção em alguns segmentos.

No varejo, equivale de 1 a 2% do faturamento de supermercados e shopping centers, segundo a Sociedade Brasileira de Varejo e Consumo. A Associação Brasileira de Supermercados indica que ela é a segunda despesa mais alta do setor, perdendo apenas para a folha de pagamentos.

Nenhum nicho de negócio, portanto, está livre de repensar o custo da energia em suas operações. Sendo um insumo operacional tão importante, gerenciá-lo de forma inteligente pode trazer uma economia relevante para o negócio. Além de melhorar de forma significativa a sua competitividade.” (GIRARDI, 2020)

Para além do mercado e dos negócios, o custo da energia também impacta a vida e o orçamento do consumidor doméstico enquanto os hábitos e modelos de consumo deste impactam sobre a demanda e sobre meio ambiente.

Deste modo, as formas de obtenção, os custos e o consumo consciente dos insumos energéticos deveriam ser preocupações pertinentes para qualquer cidadão em geral, mas são questões críticas para muitos profissionais em âmbitos específicos, e para todas as organizações empresariais e estatais. Desse modo, a *eficiência energética*, ou seja, “reduzir o consumo de energia provendo o mesmo nível de serviço energético ou manter o consumo e aumentar o oferecimento do serviço energético” (GIMENES; SAIDEL, 2017, p.2), deveria ser uma meta para humanidade em geral:

“De fato, ações relacionadas à promoção da eficiência energética equivalem a aproximadamente 50% do potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa no mundo em determinados cenários estudados(...)” (ISO 50001)

Para alcançar a eficiência energética de modo sistêmico é necessária uma correta gestão de energia:

“O conceito de gestão de energia nasce a partir da constatação de que iniciativas isoladas de eficiência energética, mesmo se adotadas adequadamente na organização, não se perpetuam ao longo do tempo. De forma geral, mudanças de tecnologia pontuais, sem o devido acompanhamento sistemático das organizações, não gera valor ou consistência ao longo do tempo. Sendo assim, os benefícios decorrentes desse tipo de iniciativa, tais como a redução da emissão de gases de efeito estufa e o aumento da segurança energética e da produtividade, se mostravam demasiadamente pontuais e muitas vezes efêmeros. Em função disso, passou a ser demandado um mecanismo mais sofisticado de promoção do uso racional da energia, que garantisse que os benefícios decorrentes da eficiência energética fossem percebidos de forma permanente e continuada.” (FOSSA; SGARBI, 2015, p. 5)

Desde 2011 a *International Organization for Standardization* (ISO) estabeleceu o conjunto de práticas para que organizações alcancem a eficiência energética através da gestão de energia:

"A ISO 50001 é uma norma internacional que estabelece práticas para a implantação de Sistemas de Gestão de Energia Elétrica nas empresas e organizações. Publicada em 15 de junho de 2011 pela *International Organization for Standardization*, é considerada um dos meios mais seguros para se promover a eficiência energética em uma empresa. Estima-se que a norma impacte 60% do consumo total de energia no mundo.

As empresas certificadas com a ISO 50001 são aquelas que implantam sistemas para gerenciamento de energia conforme as condutas estipuladas pela norma. Desta forma, passam a ser reconhecidas, em nível mundial, por operarem com eficiência energética e mais conectadas à sustentabilidade. Com a eficaz gestão de energia, garantem o uso racional desse recurso e geram economia.

A norma existe desde 2011, foi atualizada em 2018, e já soma mais de vinte mil certificados emitidos no mundo. No Brasil, o número de empresas certificadas não é expressivo, mas, ainda assim, o país lidera o número de certificações na América do Sul e Central." (GIRARDI, 2019)

Desse modo a ISO 50001 é uma importante ferramenta para que organizações realizem sua gestão de energia implementando sistematicamente um conjunto de atividades e procedimentos em sua rotina diária, reduzindo o consumo total de energia e promovendo

a eficiência energética. No próximo capítulo, discorreremos brevemente a respeito de algumas soluções de IoT para o alcance da certificação e para uma boa gestão de energia.

No âmbito da IoT as possibilidades de sua aplicação com vistas a atingir a eficiência energética nas organizações são auspiciosas, porém a tendência de elevado aumento da demanda de serviços que os dispositivos e infraestrutura de IoT, associado aos aumentos de custos já discutidos, também apresentam desafios e pressões para a correta implementação de soluções energeticamente eficientes.

Segundo depoimento dado ao jornal *The Guardian* por um especialista que trabalha para Huawei:

“Temos um tsunami de dados se aproximando. Tudo o que pode ser está sendo digitalizado. É uma tempestade perfeita. O 5G [quinta geração da tecnologia móvel] está chegando, o tráfego IP [protocolo de internet] é muito maior do que o estimado, e todos os carros e máquinas, robôs e inteligência artificial estão sendo digitalizados, produzindo enormes quantidades de dados que são armazenados em data centers.” (THE GUARDIAN, 2017)

Além dos dispositivos sensores e atuadores, tanto veículos autômatos, quanto robôs conectados, data-centers, bem como diversos outros componentes e infraestruturas fazem parte de sistemas baseados em IoT de modo que se torna evidente a escalada global de seu uso, bem como do consumo de energia a ela associado:

“Pesquisadores americanos esperam que o consumo de energia triplique nos próximos cinco anos, à medida que mais um bilhão de pessoas se conectam à Internet nos países em desenvolvimento, e a ‘internet das coisas’ (IoT), carros sem motorista, robôs, vigilância por vídeo e inteligência artificial crescem exponencialmente nos países ricos.” (THE GUARDIAN, 2017)

Segundo o site *engineersgarage.com* sistemas baseados em IoT “devoram” energia elétrica de três modos principais:

“Data Centers: A coleta de dados no mundo IoT ocorre por meio de sensores, câmeras de vigilância, máquinas e aparelhos que estão presentes ao nosso redor. Pode ser chips, carros autônomos, humanos aprimorados, semicondutores, realidade aumentada, realidade virtual e assim por diante. Todos os dados coletados por esses meios são armazenados e analisados em data centers que já são culpados de consumir mega quantidades de energia. O aumento da demanda por IoT só aumentará esse consumo.

Energia incorporada: as tecnologias digitais precisam de muito mais energia nos processos de fabricação do que suas contrapartes manuais. As novas tecnologias de IoT vão aumentar a demanda com bilhões de nós [nodes] sensores, *microchips* e inúmeros semicondutores. Como espera-se que cada pessoa tenha de 5 a 6 dispositivos sem fio, isso representará uma quantidade excessiva de energia necessária apenas para fabricar produtos de IoT.

Comunicações M2M: As comunicações máquina a máquina incluem *backups* de dados, atualizações remotas de *software*, *backups* de mídia e transmissões de dados de dispositivos IoT. Por enquanto, a maioria das comunicações M2M consome muito menos energia, mas produtos

com uso intensivo de dados, como dispositivos médicos, vestíveis e carros autônomos, consumirão grandes quantidades de energia.” (ENGINEER.COM)

Uma vez que sistemas baseados em IoT são influenciados por diversas restrições de arquitetura e requisitos de implementação, tais restrições e requisitos geram um considerável gasto de energia:

“De fato, os sistemas IoT são amplamente utilizados como um meio de transmissão viável. No entanto, é influenciado por muitas restrições, como duração da bateria, memória e alcance de transmissão. Na IoT, cada nó [node] do sensor é confinado pela vida útil da bateria e alcance de transmissão limitados. Dessa forma, se os nós [nodes] não puderem se comunicar diretamente com o nó coletor, eles poderão usar diferentes companheiros como encaminhadores para roteá-lo para o coletor. Nesse caso, os nós que estão mais próximos do sorvedouro suportam cargas de tráfego pesadas substancialmente maiores do que outros. Assim, os nós da camada interna esgotam sua energia mais rapidamente do que seus pares. Assim, um imenso volume de energia é desperdiçado, pois outros dispositivos estão distantes do nó sorvedouro. De fato, o avanço na tecnologia de sensores criou muitos novos caminhos relacionados à implementação específica de aplicativos da IoT.” (MITTAL; PANDEY, 2019. pag 2. tradução nossa).

Segundo BIÑAS (2019), a autonomia em relação a alimentação energética é fundamental para dispositivos IoT:

"Os dispositivos IoT geralmente são alimentados por uma bateria porque não têm acesso direto a uma fonte de alimentação. Isso geralmente é causado por estar localizado em locais onde o acesso à rede elétrica simplesmente não é possível. (...) os dispositivos IoT representam um conjunto especial de dispositivos em que se espera que possam operar sem intervenção do usuário por meses ou anos. E antes que a bateria fique sem energia, eles o alertarão com antecedência de que a bateria precisa ser substituída. Dispositivos energeticamente autônomos são os fundamentos da IoT." (BIÑAS, 2019)

Desse modo é fundamental que sistemas baseados em IoT tenham a eficiência energética como um requisito de suma importância:

"No âmbito da IoT, um grande número de dispositivos está conectado à web e estes dispositivos são limitados em termos de energia e, portanto, a energia é um fator de suma importância no domínio da IoT. Na verdade, a aplicação da IoT é pervasiva e a energia deve ser guardada e poupada em diferentes níveis em sistemas baseados em IoT para que a vida útil de dos diversos nós [nodes] sensores diferentes possam ser aumentados" (MITTAL; PANDEY, pag 2. tradução nossa).

Segundo Mittal e Pandey e, o termo “eficiência energética” cobre diferentes aspectos no domínio dos sistemas baseados em IoT. Eles descrevem três dos mais comuns: *Energia por bit recebido corretamente*, ou seja, a energia usada para transportar um bit da origem ao destino; *Energia por evento reportado*, ou seja, a energia gasta para reportar um evento; *Atraso/compensação de energia*, ou seja, a rapidez no relato de eventos urgentes e *Vida útil da rede*, ou seja, o tempo que é necessário para concluir uma tarefa. (MITTAL e PANDEY, 2019, p. 2)

BIÑAS (2019) divide os procedimentos para redução do consumo dos dispositivos IoT em duas grandes categorias: procedimentos para redução do consumo ao desenhar *software* e procedimentos para redução de consumo ao desenhar hardware. De fato, embora outros atores façam divisões mais complexas, a divisão de BIÑAS circunscreve de maneira genérica e ampla as demais divisões. Tais procedimentos, geralmente são integrados no dispositivo final. Por exemplo, os requisitos de disponibilidade e segurança exigem que os dispositivos estejam constantemente acessíveis para as interações necessárias, porém também exigem que os dados que estejam neles armazenados ou são transmitidos sejam acessados apenas pelos usuários e sistemas pertinentes, além de conter criptografia. Desse modo tanto soluções que envolvam a arquitetura dos sistemas de comunicação, os procedimentos de comunicação, os algoritmos de criptografia devem atuar de maneira integrada para aumentar a vida útil da bateria dos dispositivos e, portanto, os procedimentos de design de *software* e *hardware* destinados à economia de energia também vão atuar de maneira integrada e demandar conhecimento interdisciplinar de engenheiros, analistas e desenvolvedores (BIÑAS, 2019)

Segundo Mittal e Pandey (2019, p. 5) existem diferentes abordagens de ação e pesquisa em relação à redução do consumo de energia em sistemas baseados em IoT, cada qual com seus méritos e deméritos. São eles:

Gerenciamento de atividade do nó (Node): refere-se às estratégias para que um nó do sistema execute apenas o trabalho necessário, evitando estar ativo em vão. Geralmente isso se dá através de agendamento do *sleep mode* ou funcionalidades que ativem o nó apenas quando demandado. Diferentes soluções como por exemplo o envio de sinais de *wake up* entre nós vizinhos compõem os estudos dessa abordagem.

Agregamento de dados e processos de transmissão: A transmissão de dados consome mais energia do que o processamento deles. Portanto a correta seleção, estruturação e agregamento de dados em pacotes antes do envio tende gerar excelentes resultados em relação à eficiência energética. Faz parte dessa abordagem o monitoramento do consumo de energia dos processos de transmissão de dados, dos algoritmos de empacotamento e envio dos mesmos.

Protocolo MAC – MEDIA ACCES CONTROL: Protocolos no padrão MAC, como MQTT, XMPP, DDS, e AMQ, são desenhados para que o envio de quadros na camada de enlace de dados de comunicação em rede tenha maior eficiência energética. Essa abordagem busca implementar melhorias e inovações em protocolos MAC.

Gestão de Segurança: As medidas de segurança que um sistema baseado em IoT necessita tendem a aumentar o consumo de energia. Ações como criptografia de dados, confirmações e autenticação entre dispositivos e nós são alguns exemplos. Manter a integridade e confidencialidade dos dados transmitidos também. Essa abordagem pesquisa arquiteturas e algoritmos que possam mitigar o consumo de energia das ações destinadas à segurança dos sistemas baseados em IoT.

Gerenciamento de Topologia: O objetivo dessa abordagem é estender o tempo de vida da rede, reduzindo seu consumo de energia, através do controle de topologia. Os tipos de controle de topologia para sistemas baseados em IoT são: Controle de topologia baseado em grafos, grafos de vizinhança relativa, grafo de Gabriel e árvore geradora mínima localizada.

Roteamento: Rotear é transferir, selecionando a melhor rota, informação pela camada de rede do modelo OSI. Os tipos de roteamento são categorizados em função dos papéis dos nós (plano, hierárquico e baseado em localização) e no seu comportamento (Proativo, Reativo e Híbrido). O número de saltos entre roteadores que uma transmissão executa é a métrica mais comum para verificação da eficiência energética de sistemas baseados em IoT nessa abordagem

Design de dispositivos IoT energeticamente eficientes: Mittal e Pandey descrevem uma extensa problematização dessa abordagem. O bom *design* de dispositivos IoT é fundamental e desafiador uma vez que a presença de dispositivos IoT tende a ser pervasiva e abundante. Além disso tais dispositivos precisam atender a requisitos de funcionalidade, com foco em problemas reais, ergonomia, segurança, eficiência energética. Precisam ainda ter um ciclo de obsolescência menos curto do que os dispositivos atualmente presentes no mercado, pois seria extremamente inconveniente e custoso que muitas das estruturas implementadas por sistemas baseados em IoT simplesmente sejam modificadas, ou mesmo atualizadas, frequentemente. O eficaz design no tratamento dos dados também é fundamental, uma vez que dispositivos IoT geram um imenso volume de dados e, portanto, o entendimento de estruturação de dados e como utilizar de ferramentas de *data science* pode potencializar o bom *design* de dispositivos IoT.

3.3 Aplicações IoT para Gestão de Energia

A perspectiva mais promissora, no que se refere aos sistemas baseados em IoT, no âmbito de um consumo consciente, da eficiência energética e uma eficaz gestão de energia, está em aplicações que visam a sustentabilidade:

"Nossa análise mostra que 84% das implantações de IoT estão atualmente abordando, ou tem o potencial de abordar, o Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), conforme definido pelo Nações Unidas. A análise apoia a intuição de que muitos compartilham – que a IoT tem benefícios de desenvolvimento que podem ser maximizada sem comprometer a viabilidade comercial. A razão pela qual a IoT pode se tornar um divisor de águas para sustentabilidade está em sua tecnologia. Em sua essência, a IoT é sobre medir e controlar remotamente ‘coisas’ anteriormente desconectados, alcançando pessoas e objetos que a tecnologia anteriormente não podia alcançar e em processos que também suportam elementos do desenvolvimento sustentável.” (WORLD ECONOMIC FORUM, 2018, p. 3, tradução nossa)

Aplicações da IoT na agricultura, na colheita e transmissão de energia, na gestão urbana por exemplo, podem atender objetivos como redução de emissões de carbono, melhor gerenciamento de resíduos, aproveitamento melhor da capacidade dos recursos, entre outros. No sentido da eficiência energética e do gerenciamento de energia, não é diferente:

“É um fenômeno comum que muitas vezes desperdiçamos inutilmente a energia dentro de casa. Também é verdade que as ações inócuas de desperdício de energia muitas vezes sejam por descuido. Muitas vezes, as luzes são deixadas acesas e os reguladores internos são deixados à nossa temperatura de conforto mais extrema enquanto ninguém está dentro de casa. Talvez os negócios também não estejam protegidos de tal negligência e, depois de algum tempo, a falta de atenção e as práticas de desperdício de energia imponham uma taxa gigantesca. De fato, a inovação inteligente pode responder a salas vazias, desligando nossas luzes e condicionadores de ar e economizando energia. É, portanto, óbvio que esta tecnologia possui a eficácia para nos capacitar a utilizar e controlar o uso de energia de forma otimizada em todos os lugares. Além de reagir e atender às necessidades de energia de uma instalação, os dispositivos IoT coletam dados que podem ter um impacto significativo e duradouro no uso futuro. Talvez, essa informação acumulada faça com que os empresários identifiquem os possíveis problemas e, posteriormente, os habilite a tomar decisões inteligentes. Além disso, os dados coletados também podem identificar problemas que podem ter passado despercebidos anteriormente. Por exemplo, um aumento no uso de energia em uma zona específica pode indicar problemas potenciais com sistemas de aquecimento ou resfriamento ou equipamentos defeituosos ou com baixo desempenho – ambos podem ser atribuídos a custos desnecessariamente altos. De fato, sensores avançados são necessários em dispositivos IoT para que possam alertar os proprietários de empresas sobre os possíveis problemas com antecedência antes que eles se tornem grandes problemas. Podemos considerar o caso de um tubo rachado que pode causar grande perda de produtos químicos caros. Os sensores podem resolver esses problemas imediatamente antes que ocorram danos reais. Um tipo semelhante de coisas pode existir dentro dos dispositivos de hardware (maquinaria), onde os sensores podem reconhecer mudanças no som e novas vibrações que podem passar totalmente despercebidas a olho nu ou ouvido. Esses problemas podem aumentar o nível de consumo de energia até o ponto em que o problema é notável e resolvido. Finalmente, e talvez acima de tudo, é benéfico do ponto de vista humano.” (MITTAL; PANDEY, 2019, p. 8, tradução nossa)

Os dispositivos e sistemas baseados em IoT tem potencial de nos auxiliarem a economizar energia, tanto nas tarefas domésticas quanto na indústria e comércio. Para além disso, é previsto que sua presença tenha um impacto transformador na realidade dos profissionais e organizações:

"Provavelmente não conseguiremos controlar a maneira como os trabalhadores/funcionários abordam ou lidam com nossas atividades de preservação de energia, portanto, com a ajuda de estratégias novas e inovadoras e os proprietários de instalações conectadas podem monitorar seu desempenho e incentivá-los. Os empresários podem incentivar e recompensar os departamentos que podem diminuir os consumos de energia. É, portanto, óbvio que o proprietário pode controlar o ambiente e oferece a oportunidade de máximo conforto humano sem inflação de custos desnecessária. Além disso, um funcionário confortável, satisfeito e feliz pode ajudar mais na produtividade e, sem dúvida, na atualização das instalações existentes, bem como o redesenho do escritório incorporando inovações de IoT podem ajudar nessa busca. É o fato empírico que espaços inteligentes levam a decisões inteligentes e essas decisões vão mudar tudo, desde o orçamento até a cultura organizacional." (MITTAL; PANDEY, 2019, p. 8-9, tradução nossa)

Existem inúmeras pesquisas e aplicações atuais a respeito, e uma variedade de produtos voltados para públicos diferentes: do consumidor doméstico passando pela indústria e grandes redes de atacado e varejo até setores do serviço público com gerenciamento de energia de redes elétricas e edifícios nos serviços de *smart city*.

Desse modo fica impossível ter fôlego para abarcar e citar todos aqui. Vamos, portanto, apenas elencar, e tentar apresentar uma variedade significativa, dos trabalhos a respeito.

Silva *et al.* (2021) apresentam um sistema de monitoramento doméstico de consumo de energia, através de módulo *WiFi* sensor de corrente e aplicativo para notificações e apresentação de dados a respeito do consumo. Severino *et al* (2020) utilizam os gráficos de um módulo sensor de corrente semelhante para desenvolver um algoritmo capaz de identificar, através dos modelos harmônicos dos gráficos gerados pelo monitoramento, quais eletrodomésticos estão sendo usados. Al Ali *et al* (2017) apresentam uma proposta para consolidação de um sistema de gerenciamento de energia em num sistema baseado em IoT que se utiliza de computação em nuvem e big data para monitorar em grande escala o consumo de energia de casas em uma região. Marinakis e Doukas (2018) propõem que monitoramentos semelhantes cruzem dados com informações do tempo, da oferta e preço de energia e do comportamento do usuário final, para gerar planos diários de ação destinados a gestores de *smarbuildings* e *smartcities*.

Sales-Junior *et. al* (2020) apresentam um sistema de monitoramento em tempo real de transformadores para redes inteligentes, identificando resultados positivos para ações de manutenção corretiva e treinamento de pessoal, mas com resultados negativos em termos de cobertura geográfica e manutenção preditiva. Martins (2019) descreve um

sistema de monitoramento remoto de geradores de energia fotovoltaica na Amazônia; segundo a autora o nível de precisão do monitoramento dos sensores dedicados a isso foi bastante satisfatório. Sabel *et al* (2017) apresenta uma prova de conceito de um sistema inteligente para eficiência energética em salas de aula, controlando iluminação, ar-condicionado e projetor. M. Shukla e M. S. Burdak (2021) aplicam algoritmos de aprendizado por reforço para reduzir o consumo de combustível utilizado em veículos elétricos.

Said *et al* (2020) elenca mais de quarenta projetos acadêmicos com diversas abordagens e formas de utilização de sistemas baseados em IoT para monitoramento de energia. Ele menciona que a grande maioria é de propósito especial, ou seja, implementado em condições experimentais ou laboratoriais, carecendo da interoperabilidade que sistemas baseados em IoT necessitam em condições reais de produção, ou são implementações pontuais, como uma pesquisa para monitorar e otimizar câmeras de segurança de modelos específicos. Para superar essa limitação ele propõe um esquema de gerenciamento de energia (EMS - *Energy Managment Eschema*) em que adotam a estratégia de minimização de dados, ou seja, uma série de ações para reduzir o volume de dados gerados, ajustá-los, ou seja, enviar informações concisas em formatos mínimos para compreensão do receptor e comprimi-los quando for necessário transmiti-los; a estratégia de *scheduling*, que consiste em operar em ciclos de funcionamento e adotar métodos, através de análise matemática, de divisão de processamento que otimizem a concorrência entre tarefas (reduzindo a ociosidade se ocupado e a aumentando-a caso não) no *scheduling*; a terceira estratégia se refere à tolerância à falhas, ou seja, através de uma categorização hierárquica dos nós do sistema, identificar os que não podem perder disponibilidade e garantir que outros nós possam assumir as funções de algum crítico que eventualmente venha a falhar.

Segundo Said *et al*:

“o EMS proposto assumiu que o(s) servidor(es) autônomo(s) observam as taxas e níveis de consumo de energia em cada nó baseado em energia no ambiente IoT. A missão do EMS começa quando detecta informações que sinalizam um ponto crítico para resolver o problema. Finalmente, no caso de falha de um nó, a terceira estratégia EMS deve ser aplicada. O nó importante deve ser coberto por vários nós alternativos. Além disso, o nó de importância média deve ser parcialmente coberto. Depois disso, o nó menos importante deve ser desprezado se não houver alternativa ou fonte de energia, e seus dados podem ser previstos” (SAID *et al.*, 2020, p.9-10).

Embora Said proponha a palavra “esquema”, propondo-se especificamente gerenciar o consumo de energia para sistemas baseados em IoT, a sigla EMS é muito usada no mercado como *Energy Managment System*, ou seja, Sistema e Gestão de Energia. Ela

refere-se, para além da IoT, mas geralmente a contemplando no caso das soluções mais novas, a uma série de procedimentos, metodologias e tecnologias para que uma organização realize uma efetiva gestão de energia:

“Um sistema de gerenciamento de energia ajuda as organizações a gerenciar melhor seu uso de energia, melhorando assim a produtividade. Envolve desenvolver e implementar uma política energética, estabelecer metas alcançáveis para o uso de energia e projetar planos de ação para alcançá-las e medir progresso. Isso pode incluir a implementação de novas tecnologias energeticamente eficientes, a redução do desperdício de energia ou a melhoria dos processos atuais para reduzir os custos de energia.” (ISO, 2018, p.2, tradução nossa)

Desse modo, a Organização para Desenvolvimento Industrial das Nações Unidas alerta para o fato de que um sistema de gestão de energia não deve ser confundido com Software de gestão de energia, uma vez que este último pode ser um importante componente do sistema, porém não se reduz a ele:

“Muitas empresas compram *software* e têm a impressão de que se trata de um sistema de gestão de energia, mas não é. O objetivo é economizar energia e é muito comum nos esquecermos disso. Precisamos de listas de verificação, precisamos de processos, auditoria e *software*, mas, em última análise, tudo isso deve levar à economia de energia. No final das contas, um EMS é principalmente sobre pessoas e gerenciamento.” (ARTHUR, 2021, tradução nossa)

No campo da indústria, o monitoramento do consumo de energia é uma preocupação constante, de modo que soluções que se utilizam de sistemas inteligentes e baseados em IoT, seguem em contínua evolução:

“a demanda por consumo de energia preocupa diversas organizações que fornecem respostas criativas de monitoramento no setor industrial, como *epi-sensor*, *wi-lem*, *wattsup*, *satec*, *change electric*, *energy metering innovation ltd*, *general electric*, *mitsubishi*, *siemens* e *schneider*. assim, várias organizações fornecem aplicativos de *software* de gerenciamento de energia de emergência (eem) para discriminaras informações coletadas, como *resource kraft*, *google*, *e-sight energy*, *eft-energy*, e assim por diante (...). os procedimentos aprovados pelo fornecedor são sumarizados e este pode decidir sobre o projeto de uma estrutura geral de monitoramento de energia, utilizando inovações na tecnologia da internet (...) por meio de um sistema com ou sem fio. os medidores de energia disponíveis podem obter vários parâmetros (por exemplo, consumo de energia, fator de potência e tensão máxima/mínima) para que possam se adaptar no monitoramento e análise do consumo de energia indicando condições anormais de crise de energia. o monitoramento do novo medidor de energia inteligente realizado pode ser utilizado para diversos alvos, como todas as linhas da usina ou uma máquina de uma fase.” (BAGDADEE *et al.*, 2020, p. 446, tradução nossa)

Nesse âmbito, a incorporação de tecnologias e sistemas baseados em IoT nos sistemas de gerenciamento de energia, também conhecidos com o SEMS (*Smart Energy Managment System*), já é uma realidade e agrega valor e funcionalidades emergentes que associadas a recursos como computação em nuvem, *big data* e aprendizado profundo, tendem a compor uma série contínua de melhoramentos na gestão de energia

como um todo, tanto na escala doméstica, quanto na comercial e industrial, bem como nos serviços públicos e governança estatal.

Por exemplo, Saleem *et al* (2021) apresentam estratégias e um *framework* para utilização de sistemas baseados em IoT para implementar um SEMS para a estrutura da rede elétrica do Paquistão. Desse modo os autores afirmam que:

“(…) a IoT é parte essencial do SEMS apresentado, pois fornece não apenas a motorização dos dados em tempo real, mas o controle bidirecional dos dispositivos conectados para um gerenciamento eficiente de energia, tanto no consumidor quanto do provedor de final de serviços. Em suma, o uso da IoT oferece uma solução inteligente para monitoramento e controle diário de energia. Com base no estudo de caso fornecido neste trabalho, conclui-se que o SEMS apresentado auxilia os consumidores a rastrear de maneira fácil, eficaz, confiável e precisa o seu consumo de energia, auxiliando-os a compreender e controlar o uso indesejado de energia, na conservação de energia. Além disso, este trabalho justifica as necessidades de uso de tecnologias da informação de comunicação (TIC) emergentes. O escopo deste trabalho foi fornecer a parte de monitoramento do SEMS e agora está sendo estendido para controle eficiente dos dispositivos conectados pela internet além disso, o trabalho estendido também mostrará como o SEMS apresentado pode auxiliar na configuração e monitoramento em tempo real de redes elétricas inteligentes. Por exemplo, para se ter uma ideia, a IoT oferece várias possibilidades de troca de dados coletados pela rede para aumentar seu desempenho. Esses dados podem ser transmitidos para locais remotos(...), permitindo que as concessionárias controlem as redes elétricas de acordo com as necessidades do cliente. Nos SEMS futuros, os medidores de energia inteligentes baseados em IoT poderão compartilhar o uso e a qualidade da energia com as redes elétricas, permitindo que eles melhorem seu desempenho e faturamento. Para aprimorar ainda mais o SEMS, as medições de dados do lado do consumidor e seus comportamentos de consumo de energia podem ser combinados com técnicas de aprendizado de máquina e aprendizado profundo para prever configurações de rede elétrica eficientes para distribuição de energia eficiente. No entanto, há muito espaço para melhorias devido a limitações, como padronização de protocolos de comunicação, redesenho de regras de segurança, assistência *plug and play*, controle de *big data* de entrada, recálculo de métricas de cobrança e melhoria da infraestrutura da rede elétrica existente especialmente nos países em desenvolvimento.” (SALEEM *et al.* 2021, p.14 tradução nossa)

Desse modo, segundo Kychikin, “sistemas baseados em IOT aplicados em SEMS proporcionam aumento de eficiência e competitividade, bem como de produtividade para empresas” (KYCHICKIN *et al.*, 2019 p. 1). Tais benefícios são ganhos através de:

“Aumentar a transparência das estatísticas do consumo de energia e sua acessibilidade, melhorando e aumentando a conscientização dos gestores de energia sobre a quantidade de energia necessária para manter a funcionalidade da empresa, identificando as principais fontes de consumo de energia e perdas em tempo real, fornecendo ferramentas de análise preditiva para antever possíveis acidentes industriais e demanda futura de energia.” (KYCHICKIN *et al.*, 2019 p. 1).

Eles propuseram uma ferramenta mais genérica: um ‘assistente’ para o *design* de arquitetura de Sistemas de Gerenciamento de energia baseados em IoT. Sua proposta é “fornecer uma arquitetura, aprimorada por IoT, genérica para um assistente de gerenciamento de energia que pode ser usado para facilitar o gerenciamento de energia nas empresas” (KYCHICKIN *et al.*, 2019 p. 2).

Para isso eles fizeram um levantamento bibliográfico de trabalhos relacionados, o levantamento de requisitos baseados na ISO 50.001 (as boas práticas recomendadas e o PDCA proposto) e necessidades levantadas no parque industrial russo e elaboraram diagramas UML e modelagens matemáticas através de análise de regressão com conjuntos de variáveis indicadoras como fatores operacionais, tecnológicos, climáticos e de energia. Tais indicadores nomeados no trabalho por “indicadores de eficiência de energia” EEI (*Efficiency Energy Indicators*), são coletados através dos dispositivos IoT e, portanto, ajudam no próprio processo de *design* do EMS:

“Na prática, os EEI são calculados com base na análise de séries temporais. As séries temporais são geradas por dispositivos IoT que monitoram os parâmetros de consumo de energia e as características do processo. Os dispositivos IoT possuem uma interface para conexão à Internet ou à rede local da empresa e podem ser facilmente conectados às plataformas da Internet das Coisas.” (KYCHICKIN *et al.*, 2019 p. 6).

Desse modo os autores afirmam que o assistente proposto avança na produção de uma modelo mais genérico para o design de EMS utilizando-se de sistemas baseados em IoT, e ilustrando na prática como integrar a IoT com o arcabouço já existente de EMS, do que outros modelos anteriormente propostos. Tal modelo, segundo os autores, pode ajudar na coleta de indicadores de gestão de energia que favoreçam a adoção de novos padrões de eficiência energética, pois a coleta de dados reais tende a aumentar a precisão dos parâmetros de consumo de energia definidos pelos designers de plantas industriais e edifícios, entre outros avanços.

3.4 Exemplos de soluções para eficiência energética em IoT

Como exposto anteriormente, a questão da eficiência energética para sistemas baseados em IoT possui tantos campos diversos de observação e estudo que é impossível tratar de todos neste trabalho. Eles perpassam a natureza dos materiais e arquiteturas de hardware, a interação dos usuários com as interfaces, as condições ambientais e de acesso a fontes de energia que estão sujeitas os dispositivos, as ações que estes realizam na camada de percepção, passando pelo planejamento e estruturação dos dados que serão coletados, soluções eficazes para sua transmissão, seu correto armazenamento e processamento a partir de nós sensores na borda para servidores em névoa e em nuvem, incluindo as boas práticas no trabalho de analistas de sistemas e desenvolvedores de software, se possível observando critérios para o bom gerenciamento de energia estabelecidos em normas como a ISO 50001.

Neste capítulo pretendemos apresentar, sem qualquer pretensão de esgotar tanto em quantidade quanto em profundidade, algumas soluções para eficiência energética em IoT. Elencamos três aspectos diferentes, que entendemos sempre pertinentes à observação tanto do analista de sistemas quanto do desenvolvedor de *software*: arquitetura de *hardware*, protocolos de comunicação e *design* de *software*.

3.4.1 Hardware

O ecossistema de IoT opera na borda através de dispositivos que dependem de fontes, principalmente através de baterias, coletores de energia e mais raramente tomadas ligadas a uma rede de distribuição, de energia elétrica que é consumida durante seu funcionamento, de modo que toda forma de otimização na coleta, armazenamento e consumo de energia desses dispositivos, desde que cumpra os requisitos e executando as funções do sistema, é bem-vinda. Isso se dá com qualquer componente ou equipamento que armazene, processe e transmita dados. Segundo Henkel et. al (HENKEL *et al.*, 2017, p. 1), diversos parâmetros como a tecnologia, a escala do nó, configurações de tensão e frequência, a temperatura do núcleo, o modo de consumo dos diferentes periféricos e o conjunto de instruções sendo executadas determinam o consumo de energia de um dispositivo IoT.

Um nó IoT costuma atuar em dois ciclos de operação, um cuja funcionalidade se dá em quatro estágios, sendo eles a aquisição de dados, processamento e controle, armazenamento, transmissão e comunicação, nos quais diferentes montantes de energia

são consumidos em cada estágio, e *sleep mode*, ou seja, o estado em que o sistema opera com baixíssimo consumo, o suficiente para iniciar o próximo ciclo.

A energia consumida por um dispositivo pode ser calculada pela integral de sua potência através do tempo, sendo medida em *Joules* ou em *Watts* por segundo (*W/s*). Quanto maior a tensão aplicada em um determinado estágio de operação do nó IoT, maior a frequência necessária para seu funcionamento, consumindo mais energia e elevando seu aquecimento. Uma instrução, portanto, possui valores máximos e mínimos de tensão para sua execução e conseqüentemente uma taxa frequência correspondente a essas tensões. Diversas arquiteturas de *hardware*, PC's modernos e *smartphones* por exemplo, utilizam-se da técnica conhecida com DVFS (*Dynamic Voltage and Frequency Scalling*), em que o sistema escala a tensão e a frequência em taxas mínimas necessárias para que a operação requerida pontualmente seja executada. Desse modo:

“em plataformas IoT onde o escalonamento de tensão é possível (não é um caso comum), então a opção de eficiência energética é reduzir a frequência de execução o máximo possível enquanto ajusta a tensão de alimentação precisamente para o valor mínimo para uma execução estável. A razão para isso é que, dado que quando reduzimos a frequência podemos também reduzir a tensão, então as economias no consumo de energia dinâmica são mais significativas do que os incrementos de fuga e energia independente (devido ao tempo de execução prolongado). No entanto, existe um ponto abaixo do qual novas reduções na frequência deixam de ser energeticamente eficientes, e isso ocorre quando as economias no consumo dinâmico de energia (devido à redução de tensão) tornam-se menos significativas do que os incrementos de fuga e energia independente. (...) em plataformas IoT onde o escalonamento de tensão não é possível (o caso mais comum), então a opção de eficiência energética é correr para [o estado] ocioso, o que implica executar núcleos o mais rápido possível para reduzir o tempo de execução e também reduzir o consumo de energia. (...). Naturalmente, em ambos os casos, a frequência selecionada deve ser alta o suficiente para que os requisitos de desempenho dos aplicativos sejam sempre satisfeitos.” (HENKEL *et. al*, 2017, p. 3)

Portanto, a melhor opção no que se refere às configurações de tensão e frequência de um dispositivo IoT dependerá da possibilidade de escalonamento em tempo real desses parâmetros, além dos requisitos de consumo e desempenho da aplicação.

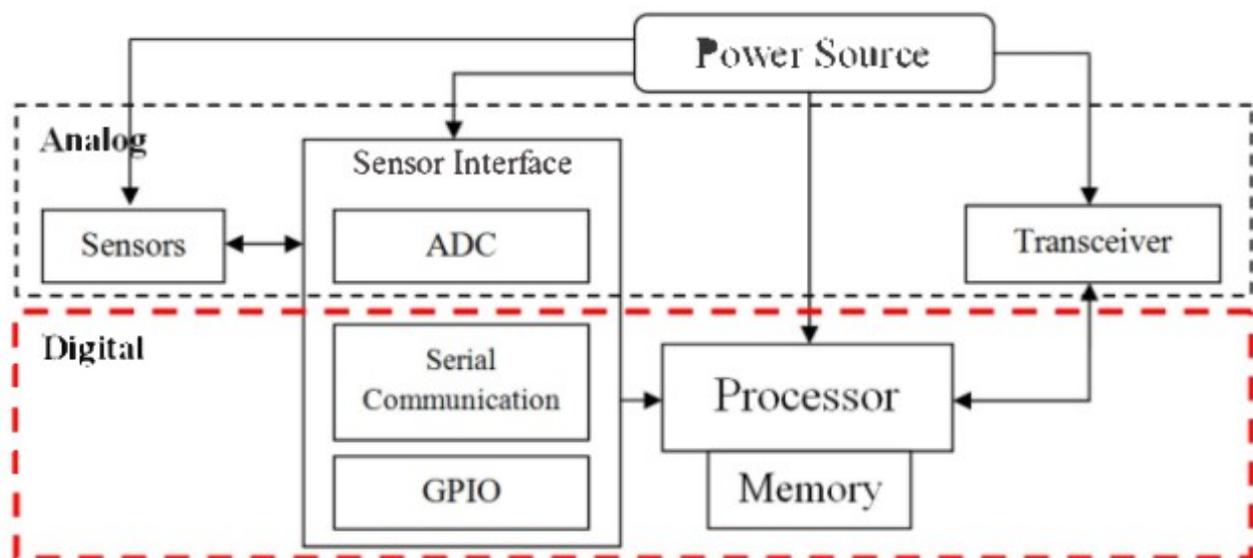
A utilização de baixas tensões pode prover consideráveis ganhos em relação à economia de consumo de energia, mas apresenta desvantagens que devem ser consideradas, pois diminui a confiabilidade do sistema, uma vez que aumenta a suscetibilidade a falhas que podem ser divididas em duas grandes categorias: Falhas independentes do tempo, ou seja, falhas de circuito intrínsecas às variações e ruídos de tensão dos próprios dispositivos, e falhas extrínsecas, como efeitos da radiação sobre os mesmos; Falhas dependentes do tempo, ou seja, problemas linearmente conectados com o envelhecimento dos dispositivos e seus componentes como o aumento da tensão limite de operação e impactos causados pela oxidação dos mesmos.

Em resumo:

“Ao contrário dos efeitos do envelhecimento, que se tornam menores em tensões mais baixas, falhas devido a ruído e radiação podem tornar-se significativamente mais altas. Em geral, os dispositivos IoT podem se beneficiar com o escalonamento de tensão em relação à potência ao consumo de energia, mas, ao mesmo tempo, eles podem sofrer uma degradação significativa da confiabilidade. Assim, ao selecionar a tensão de operação dos processadores, designers precisam encontrar boas compensações entre potência e consumo, economia e confiabilidade.” (HENKEL *et al.*, 2017, p. 4)

Um modelo de arquitetura básica de *hardware* para um nó sensor IoT é apresentada por Lim *et al.* (Lim *et al* 2015, p. 91). Ela é dividida em dois blocos: analógico e digital. O nó é alimentado por uma fonte de energia. O bloco analógico é composto por sensores, um transceptor wireless e eventualmente um conversor analógico digital ou ADC (*Analogic Digital Conversor*). O bloco digital é formado por uma interface de comunicação se o desenho do nó não possui um ADC no bloco analógico. A interface pode ser serial (I2C, UART, SPI, USB são alguns padrões de portas seriais existentes) ou a entrada digital do tipo GPIO (*Generic Purpose Input/Output*). Processador e memória completam o bloco digital. A Figura 3 mostra o modelo apresentado.

Figura 3 – Arquitetura típica de um nó sensor IoT.



Fonte – Lim *et al* 2015, p. 91.

O trabalho de Lim *et al.* (2015) se propõe a discutir o papel da redução de arquitetura de hardware para economia de energia. Ela é explicada como o design dedicado de arquitetura de hardware de um nó IoT para uma aplicação específica, no caso o sensoriamento de dados biométricos de seres humanos para assistência médica. O

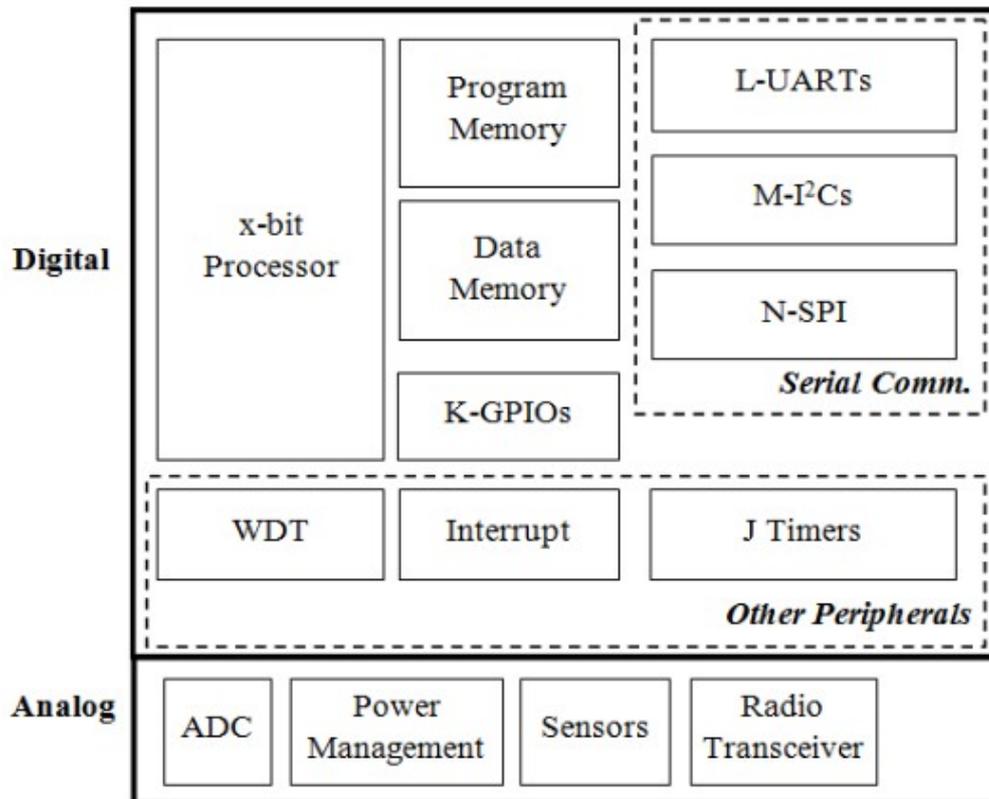
design reduzido foi proposto, implementado e avaliado a partir de um *design* de referência, retirado de um microcontrolador comercial, apresentado na Figura 4.

Os experimentos de redução de arquitetura de *hardware* foram realizados com testes em quatro aplicações ligadas ao monitoramento da saúde humana: oxímetro de pulso, eletrocardiograma, sistema de detecção de quedas e monitoramento contínuo de pressão arterial. Em todos os casos, as aplicações utilizam menos componentes em relação ao todo da arquitetura de referência, o que explicita o potencial que a redução de arquitetura de hardware possui.

Os componentes de *hardware* que consomem mais energia variam conforme a arquitetura. A Figura 4 apresenta a proporção que cada componente do modelo de referência consome em relação ao total consumido durante o processo de teste. Neste caso, memória RAM e processamento são elementos do sistema que mais consomem energia.

Em linhas gerais, processadores com palavras acima de 16 bits requerem um sistema operacional rodando em tempo real para executar funções pertinentes ao tamanho da palavra, o que aumenta a arquitetura do hardware e conseqüentemente o seu consumo de energia. Do mesmo modo, processadores *multicore* consomem tanto mais energia quanto a quantidade de núcleos. Por fim, o conjunto de instruções do processador é outro fator importante e uma arquitetura como a RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) consomem menos do que a arquitetura CISC (*Complex Instruction Set Computer*). O trabalho de Lim *et al.* operou com processadores RISC *single-core* de 8 bits (LIM *et al.*, 2015, p. 93).

Figura 4: *Design* de referência de uma arquitetura de nó sensor IoT.



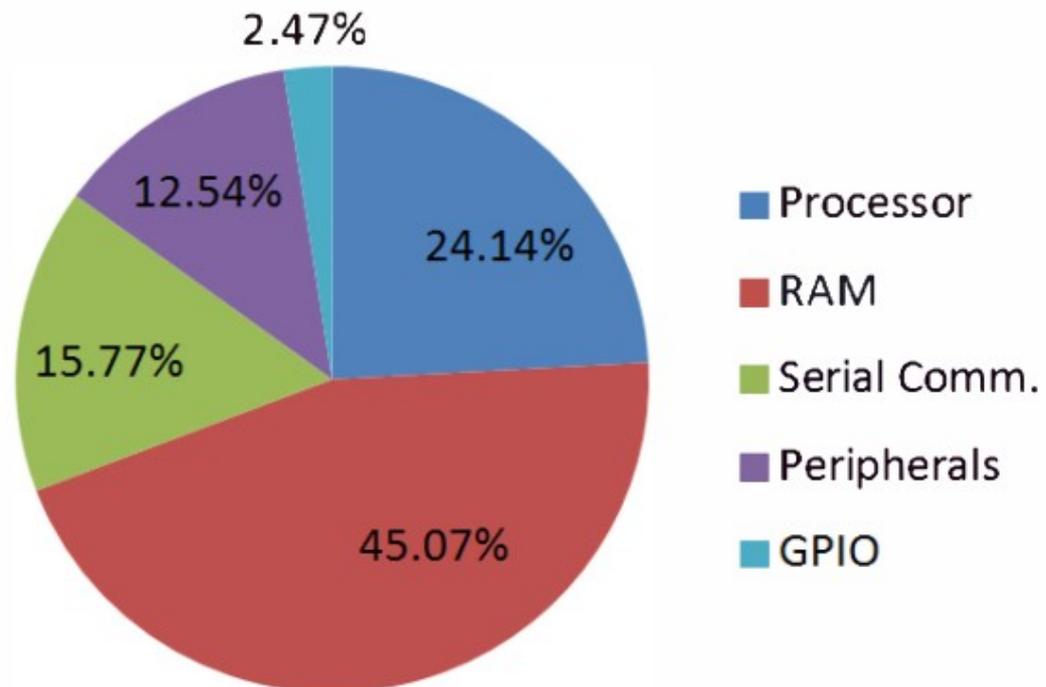
Fonte - Lim *et al* 2015, p. 91.

O conceito básico de memória é um circuito capaz de reter seu valor após mudanças de entrada ou após a fonte de alimentação ser cortada, no caso de memórias não voláteis. Os elementos básicos de armazenamento que podem ser considerados memória são circuitos capacitivos como os circuitos biestáveis *latch*, *flip-flops*, e os diferentes tipos de memória RAM (DRAM, SRAM). Vantagens e desvantagens relacionadas à tensão de alimentação, tamanho do circuito e aplicação do mesmo são presentes em qualquer projeto que se utilize de memórias. Em sensores IoT, algumas das questões mais importantes no que se refere ao design de memórias são potência consumida, velocidade de operação e área ocupada. Para o tratamento do consumo de energia:

“(…) existem três tipos de arquiteturas de memória comumente aplicáveis. Estes são 1) SRAM em tensão nominal juntamente a um deslocador de nível para aumentar a escala para se comunicar com o resto do circuito, 2) SRAM em tensão abaixo do limite com design personalizado para operação de tensão ultrabaixa ou 3) memórias baseadas em células padrão (que são basicamente *flip-flops* ou *latches*). Cada uma dessas abordagens tem suas próprias vantagens e desvantagens, onde a primeira opção tem perda de potência relativamente alta devido aos requisitos de alta-tensão, embora ocupe menor área. A segunda opção oferece um menor consumo de energia, porém ao custo de maior área devido à sua arquitetura que exigiria um número maior de transistores. A terceira opção oferece alta flexibilidade, pois pode ser projetada com macro totalmente personalizada para se adequar à arquitetura aplicável, mas exigiria uma área relativamente maior. A memória baseada em célula padrão funciona na mesma velocidade e tensão de alimentação que o núcleo. Portanto, não há necessidade de mudança de nível ou design de célula personalizado. (KHADER *et al.* 2019, p. 1)

Segundo Khader *et al.* memórias baseadas em *latch* possuem uma melhor utilização de recursos em termos de potência/área e RAM baseadas em *latch* preservam 60% de potência-área em relação a uma memória baseada em SRAM, enquanto esse valor sobe para 90% em relação a uma memória baseada em *flip-flop* (KHADER *et al.* 2019, p. 12).

Figura 5 – Consumo de energia do *design* de referência



Fonte – Lim *et al.* 2015, p. 92.

Lim *et al* são conclusivos ao apresentar a redução de hardware como uma bem-sucedida solução para redução do consumo de energia de um nó sensor, redução da dissipação de potência devido ao aquecimento, como também diminuir a área ocupada pelos componentes:

“O SoC proposto alcança eficiência energética em comparação ao design de referência devido à remoção de módulos periféricos desnecessários para o nó IoT de saúde individual. Os resultados mostram que periféricos e componentes não utilizados no SoC levam a um consumo excessivo de energia, especialmente energia de fuga, além do aumento área do chip. É claro que a arquitetura reduzida proposta pode prolongar a vida útil da bateria e reduzir o tamanho do chip em nós IoT.” (LIM *et al.*, 2015, p. 94)

Em contrapartida a “técnica de arquitetura de hardware reduzida poderia aumentar a latência de processamento de sinal para cada nó sensor” (LIM *et al.*, 2015, p. 92) além de limitar a versatilidade dos dispositivos, uma vez que diminui a generalidade de propósito

dos mesmos, o que não ocorre com microcontroladores e SoC's (*System on Chip*) comerciais genéricos.

Outra solução para diminuição do consumo de energia de dispositivos e nós IoT, tanto em nível de arquitetura de hardware quanto na implementação de software, é conhecida como aproximação. Ela opera a partir do fato de que a maioria das aplicações IoT atuando no mundo físico possuem entrada de dados repletas de ruídos provenientes das diferentes tensões e correntes recebidas, valores analógicos coletados dos objetos monitorados, por exemplo a condutividade elétrica do solo, que é um parâmetro extraído dos módulos sensores para medir sua acidez. Desse modo os dispositivos IoT estão sempre lidando com aproximação de valores.

“Por exemplo, o primeiro nível de aproximação acontece no ADC que introduz um erro de quantização. Além disso, o ADC usa uma referência de tensão em seu processo de conversão. Nos dispositivos IoT alimentados por bateria, a referência de tensão pode mudar à medida que a tensão da bateria muda, o que leva a uma entrada imprecisa do ADC. Embora esses aplicativos tolerem alguns erros, a saída final ou Qualidade de Serviço (QoS) deve estar em um determinado intervalo (definido pelo usuário ou projetista do sistema).” (HENKEL *et al.*, 2017, p. 956)

A tolerância ao erro é uma propriedade fundamental para definir o grau de aproximação desejável para aplicações IoT e as possíveis trocas de saída de dados em relação aos outros elementos de esforço computacional como consumo de energia, desempenho, uso de memória etc. Técnicas e algoritmos presentes nos quatro estágios do ciclo de atuação funcional de um nó IoT permitem a execução da aproximação. Além disso, esquemas híbridos no quais a aproximação é executada em mais de um estágio também são possíveis e são considerados “promissores” Nesse caso o desafio consiste em definir “1) em qual estágio, e 2) quanta aproximação deve ser aplicado a fim de minimizar o esforço computacional enquanto atende aos requisitos de QoS” (HENKEL *et al.*, 2017, p. 957)

No estágio de aquisição de dados a qualidade das entradas são definidas pela sua resolução e taxa de amostragem. Eles podem ser medidos em bits e amostras por segundo, respectivamente. Técnicas de aproximação de amostras de dados analógicos transformados em digitais têm utilizado o teorema de Nyquist-Shannon que trata dos cálculos necessários para transformação de funções contínuas em sequencias numéricas convencionáveis. Pesquisas em uma nova técnica conhecida como sensoriamento comprimido, que necessita de menos amostras para reconstituir digitalmente um sinal de modo que ele possa ser usado na aplicação, tem servido para reduzir o volume de dados coletados sem perdas significativas de informação. Desse modo “quando a aplicação IoT tolera erros, reduzir a qualidade dos dados de entrada é uma forma de aproveitá-los para

reduzir o consumo de energia(...)"(HENKEL *et al*, 2017, p. 957). Dispositivos IoT já estão sendo usados aplicações cuja integridade da informação é significativa, como dispositivos vestíveis que geram eletrocardiograma, utilizando esta técnica.

Unidades inexatas de *hardware* ou implementações de *software* são técnicas para se trabalhar com aproximação no estágio de processamento de dados. Algumas operações computacionais intensivas, como a multiplicação, tem demonstrado potencial para aproximação.

No estágio de armazenamento de dados a redução do tamanho da memória, o número de acessos a ela e operar em tensão abaixo da máxima, são técnicas que são combinadas para atingir objetivos relacionados à diminuição da área ocupada, redução do consumo e à aproximação.

No estágio de transmissão de dados implementações de *software* são mais bem sucedidas para alcançar a aproximação.

Por mais que o *design* de *hardware* possa ser um fator de extrema importância para a redução do consumo de energia dos dispositivos IoT, a expectativa do aumento de uso dessa tecnologia e a proliferação de ecossistemas baseados em IoT impõem grandes desafios em relação ao acesso e disponibilidade de fontes de energia, bem como sua correta gestão:

“Cada componente ativo na rede IoT consome uma certa quantidade de energia para realizar sua funcionalidade. Recentemente, testemunhamos um aumento significativo na quantidade de dados produzidos pela IoT, apesar do uso de recursos energéticos escassos. Em uma rede implantada, a troca de baterias também pode ser arriscada para cenários que exigem monitoramento contínuo. Nesses casos, a substituição da bateria pode ser um processo caro e trabalhoso. Assim, a coleta de energia é a única opção provável para fornecer recursos energéticos ilimitados para esses dispositivos de baixa potência em IoT. Um benefício adicional é que a coleta de energia requer pouca ou nenhuma manutenção por longos períodos de tempo.” (ZEADALLY *et al.*, 2019, p. 1)

A colheita de energia (*energy harvesting*), ou eliminação de energia (*energy scavenging*), é o processo de converter qualquer tipo de energia imediatamente disponível do ambiente (por exemplo luz, movimento, calor, eletromagnetismo, entre outras) em energia elétrica utilizável para componentes e dispositivos eletrônicos. Ela é uma solução viável para atender alguns dos desafios citados em relação à disponibilidade e acesso de fontes para ecossistemas baseados em IoT.

Técnicas para colheita de energia tem sido exploradas e aplicadas em diversas áreas e tecnologias facilitadoras para o ambiente IoT. Zeadally *et al* levantam mais de cinquenta trabalhos de pesquisas relacionados à colheita de energia em aplicações de

sensoriamento wireless de redes (monitoramento de dados biológicos, ambientais, rastreamento de veículos e animais), sistemas da informação e comunicação, sistemas cyber-físicos (monitoramento e controle de dispositivos reais através do ciberespaço) e comunicação máquina a máquina (ZEADALLY *et al.*, 2019, p. 1-3). Desse modo, essas pesquisas e aplicações emprestam certa maturidade para solução de colheita de energia em ambientes IoT, embora ainda existam muitos desafios a serem superados.

O processo de colheita de energia é composto por quatro estágios (ZEADALLY *et al.*, 2019, p. 3):

Recursos energéticos: A primeira fase consiste em escolher uma fonte adequada, disponível e abundante de energia presente no ambiente de implementação do sistema IoT em questão.

Conversão de energia e transferência: nessa fase um transdutor converte a energia colhida em energia elétrica e um circuito conversor retifica corrente e tensão de acordo com a necessidade do sistema. Nessa fase também ocorre a transferência de energia.

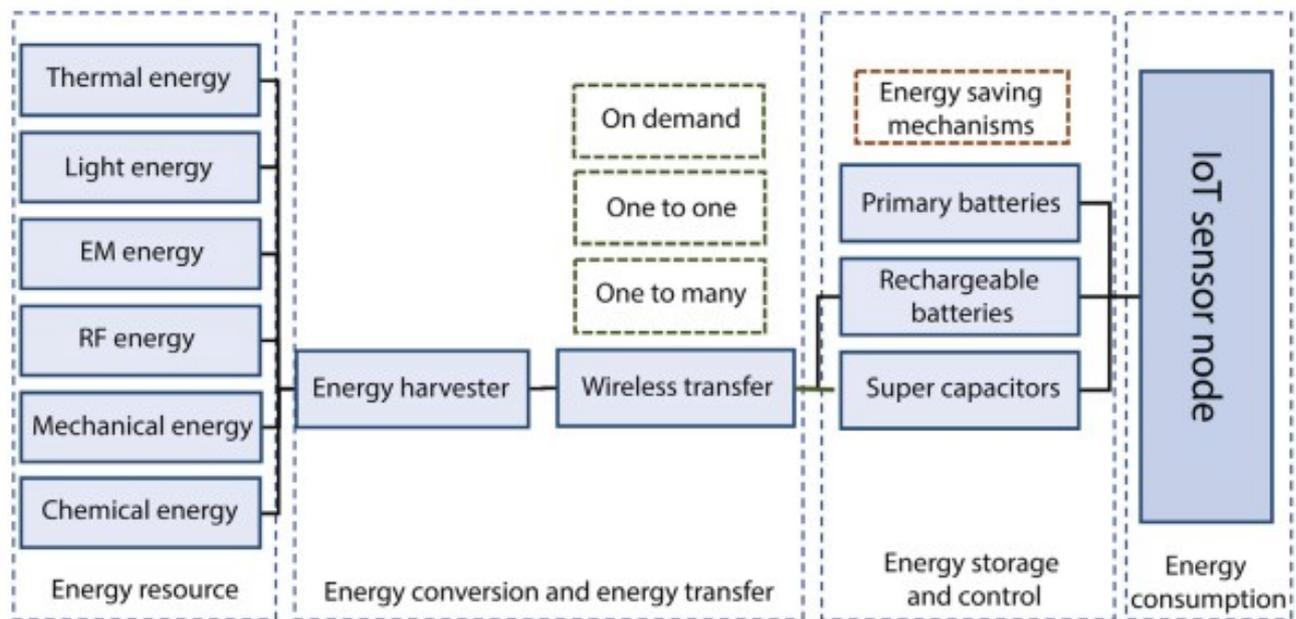
Armazenamento e gestão de energia: A terceira fase explora o uso de supercapacitores ou baterias para armazenar a energia. O gerenciamento de energia inclui reguladores, *software*, unidades ou equipamentos de controle para lidar com a necessidade de recarga com base na energia disponível.

Consumo de energia: A última fase é o consumo de energia, onde energia colhida é consumida por um dispositivo durante a execução de sua aplicação.

No meio ambiente estão as fontes de energia utilizadas para colheita de acordo com as especificidades, limitações e necessidades da aplicação IoT em questão. As fontes de energia são: termal, luminosa, eletromagnética, radiofrequência, química e mecânica (energia eólica, hidráulica e energia de deformação).

A Figura 6 mostra um diagrama de blocos de um sistema genérico de colheita de energia para nós sensores e a Figura 7 uma classificação das fontes de energia para colheita em um ecossistema IoT.

Figura 6 – Estágios do processo de colheita de energia



Fonte - ZEDADALLY *et al.*, 2019, p. 4.

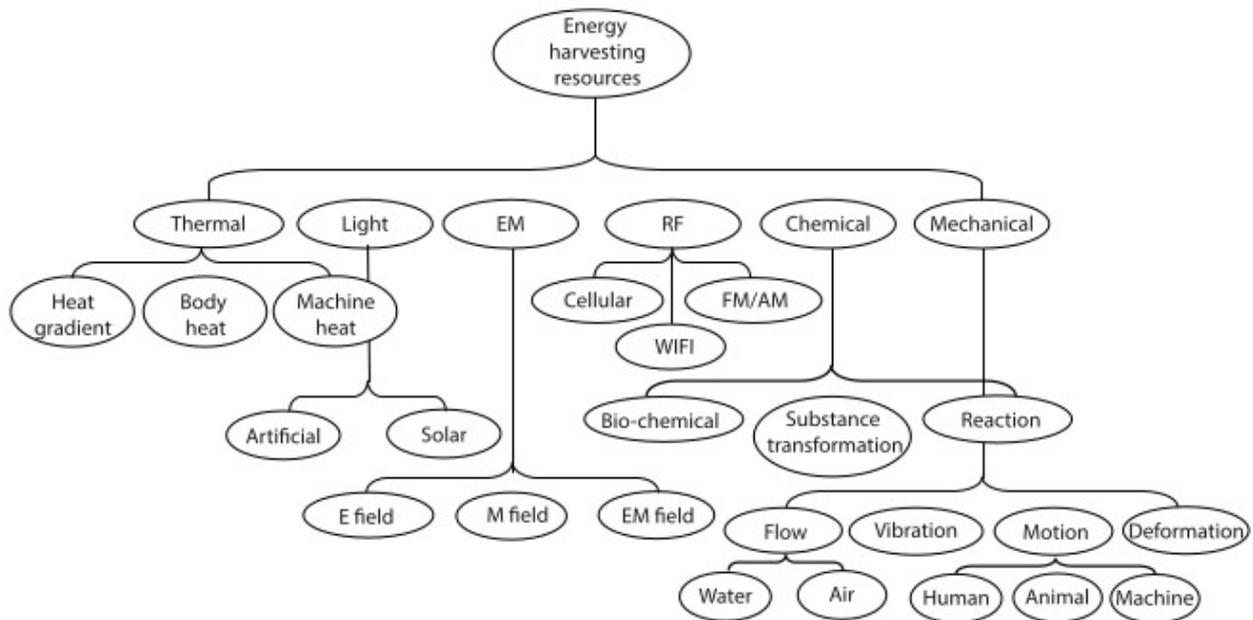
Diferentes ambientes podem fornecer diferentes fontes de energia. Além disso, cada fonte possui características, vantagens e desvantagens muito próprias em relação às quatro fases de um sistema de colheita e consumo de energia, o que faz variar qual fonte se torna mais viável para determinada aplicação.

A energia termal por exemplo, pode ser extraída do calor de motores, do corpo humano, de fontes geológicas do planeta e ainda explorando gradientes de temperatura e pode ser produzida a partir de aquecimento solar, exaustão de gases, fluxo de calor, resistência, entre outros. Ela tende a ser custosa, pois também gera calor como subproduto, possui alta confiabilidade devido a um longo tempo de vida, mas baixa eficiência de conversão, sendo também suscetível a uma alta taxa de variação. A colheita de energia termal para aplicações industriais é proeminente, e pode ser uma excelente fonte para alimentação de redes IoT.

A energia luminosa é a fonte de energia mais disponível e amplamente usada. Ao ar livre a melhor opção é a energia solar, em ambientes internos a luz artificial é normalmente usada com uma eficiência de geração de energia equivalente a um terço da energia solar. A solar sofre flutuações de extração em função da localização e da quantidade de exposição ao sol, condições do tempo e variação das estações do ano, mas é virtualmente infinita e com grande densidade potência extraída se comparada com a luz

artificial. Ela possui grande potencial para miniaturização, é considerada de alta potência para aplicações IoT, por exemplo *smarthomes*, projetos de agricultura e existe até mesmo um microcontrolador comercial amplamente usado que possui célula e funções de captação fotovoltaica.

Figura 7 – Categorização das fontes de energia que podem ser colhidas em IoT



Fonte - ZEDADALLY *et al.*, 2019, p. 4

A energia eletromagnética é colhida de duas formas, a depender do escopo do projeto. Em escopos de campo próximo, ou seja, de até um quilômetro de distância campos magnéticos e eletromagnéticos são induzidos para gerar energia elétrica e alimentar dispositivos de forma *wireless*. Em escopos de campo distante, ou seja, poucos quilômetros distância, radiação eletromagnética é transmitida por micro-ondas, recebidas por uma antena e convertidas em energia elétrica por um retificador. Seu uso é promissor em aplicações IoT devido à ubiquidade de fontes de rádio, sinais de TV e de celulares (ZEDADALLY *et al.*, 2019, p. 3).

A energia de radiofrequência combina alta disponibilidade, ubiquidade e confiabilidade. Pode ser extraída de Modulação de Frequência (FM), Modulação de Amplitude (AM), Sinais de *broadcast* (TV), Wi-Fi e estações celulares, fontes massivas em áreas urbanas, mas com flutuações de disponibilidade em áreas rurais ou remotas. Depende de uma antena e possui baixa densidade de potência gerada, mas possui um circuito de colheita

bastante simples, pouco maior do que um grão de arroz, o que é considerado uma grande vantagem. (ZEADALLY *et al.*, 2019, p. 3)

A energia química é gerada de reações e transformações de substâncias químicas ou processos bioquímicos. As baterias em são fontes de energia química. Aplicações IoT que se utilizam dessa energia em suas colheitas tendem utilizar a energia bioquímica como fonte. (ZEADALLY *et al.*, 2019, p. 4)

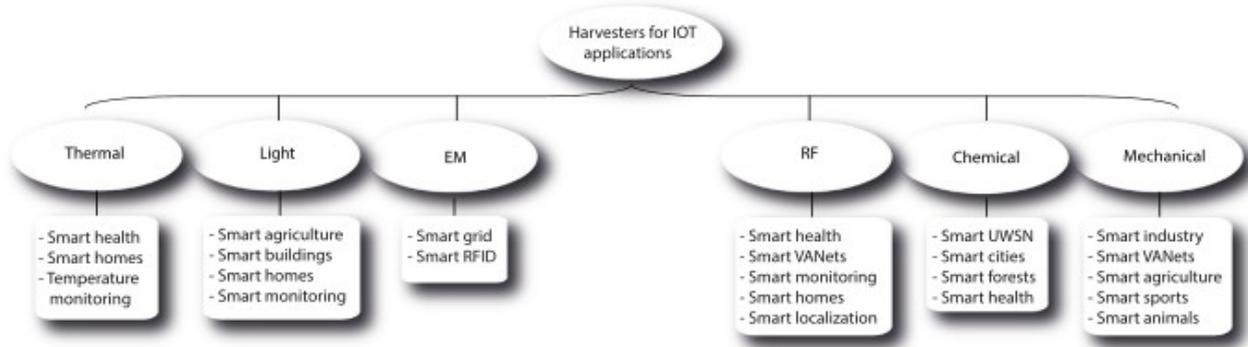
A energia mecânica é a mais prevalente no ambiente IoT, com um amplo aspecto de fontes disponíveis. Elas são categorizadas em três grandes grupos: vibração e movimento, eólica e hidráulica, e de deformação. Vibração e movimento podem ser provenientes de tração animal, rotação de motores, maquinário industrial, pontes e estradas, edifícios, entre outros. A energia colhida depende da amplitude e frequência da vibração. Possui alta densidade de potência gerada, existe no ambiente em variáveis frequências, pode ser imprevisível, mas de fácil conversão. Turbinas movidas a energia eólica e hidroelétrica são alguns dos mecanismos de extração de energia, mas antigos para gerar energia elétrica e sua grande vantagem é uma grandiosa quantidade de energia gerada. O potencial para miniaturização é uma vantagem dessa fonte para aplicações IoT. Zeadally cita um por exemplo a possibilidade de utilização da pressão da circulação sanguínea humana em um dispositivo de coleta de energia. A deformação dos materiais também gera eletricidade que poderia ser utilizada para coleta de energia para sistemas IoT. (ZEADALLY *et al.*, 2019, p. 5)

Zeadally *et al* apresentam uma série de pesquisas e relacionadas aos mecanismos colhedores e conversores para cada fonte de energia citado acima aplicados em projetos IoT (ZEADALLY *et al.*, 2019, p. 5-11). Na Figura 8 eles apresentam uma classificação de quais aplicações IoT podem tirar benefícios de coletores de energia específicos. A viabilidade de uso de um coletor de determinada fonte dependerá da impedância, tensão e potência de saída requerida pela aplicação ou serviço IoT em questão.

Após a coleta de uma entre as diferentes fontes de energia e sua conversão para energia elétrica, é necessário transferi-la para o dispositivo IoT que precisa ser carregado:

“A transferência de energia é o processo de transferência de energia elétrica da fonte de coleta para os nós de IoT implantados. Para sistemas IoT, o meio preferido de transferência de energia é sem fio. O conceito de transferência de energia sem fio é bastante antigo, proposto inicialmente em 1914 por Tesla. Desde então, muitos esforços de pesquisa refinaram e aumentaram a eficiência ou a distância alcançável de transferência.” (ZEADALLY *et al.*, 2019, p. 12)

Figura 8 – Aplicações IoT adequadas para os vários sistemas de colheita de energia



Fonte - ZEADALLY *et al.*, 2019, p. 13.

Existem três categorias de abordagens de arranjo e distribuição da transferência sem fio para IoT: (a) um para um; (b) um para muitos e, (c) sob demanda. A escolha da abordagem de distribuição depende do tipo de aplicação (ZEADALLY *et al.*, 2019, p. 12).

A abordagem um para um é a mais usada para distribuição de energia de colhedores para IoT. Nesse arranjo, uma unidade de coleta separada é implantada para cada nó de um sistema IoT. O circuito de colheita é fabricado com nó sensor. A falha de qualquer sistema de coleta único afetará apenas esse nó específico. Todos os outros nós do sistema funcionarão sem problemas. Essa abordagem opera de forma eficiente para redes pequenas. Em grandes redes a implantação de uma unidade de coleta separada para cada nó não é economicamente viável (ZEADALLY *et al.*, 2019, p. 3).

No arranjo um para muitos, uma única unidade de colheita é usada para alimentar um grupo de nós. Todos os nós de um grupo receberão, regularmente e sem utilização de fios, a energia coletada. A quantidade de transferência de energia pode variar para todos os nós, a depender da quantidade de energia consumida por cada um. A falha de uma única unidade de coleta afeta vários nós de trabalho. Para nós móveis, a eficiência da transferência de energia sem fio também será afetada pelas frequentes mudanças de distância. A transferência de energia de um para muitos tem uma grande desvantagem de distribuição indesejada de energia: às vezes, um nó não precisa dela, mas a energia indesejada pode ser transferida para o nó pela unidade de colheita. Outras vezes, o alto uso de um nó requer mais energia para funcionar com eficiência, mas apenas uma quantidade fixa de energia é sempre alocada. Isso resulta em perda de energia ou eficiência do sistema. Esse arranjo funciona bem em redes pequenas e grandes.

A abordagem de transferência de energia sob demanda busca mitigar as desvantagens da abordagem um para muitos, pois uma única unidade de coleta pode ser usada para alimentar um grupo de nós, semelhante à abordagem um para muitos. No entanto, a distribuição de energia não será periódica. A energia será distribuída de acordo com a demanda de um nó IoT. Cada nó é responsável por monitorar seu dispositivo de armazenamento e, se a energia cair abaixo de um determinado nível limite, uma solicitação será feita à unidade de coleta. Essa abordagem funciona bem para grandes redes IoT.

No estágio de armazenamento e gestão de energia, três categorias de reservatório de energia podem ser usadas: baterias primárias, baterias recarregáveis e supercapacitores. A vida útil desses reservatórios é dependente da capacidade de armazenamento dos mesmos. A gestão e o consumo dessa energia são controlados por unidades de controle que se utilizam dos colhedores e de técnicas de economia e podem ser baseadas tanto em *hardware* como em *software*. A escolha do tipo de reservatório também é dependente do tipo de aplicação IoT. (ZEADALLY *et al.*, 2019, p. 12)

As baterias primárias ou não carregáveis são o tipo mais comum de fonte de alimentação para sistemas baseados em IoT. Destinadas a operar por um longo período, alimentando sensores de baixa potência, tendem a perder a longevidade quando usadas em grandes redes. Sem o apoio de técnicas de economia de energia capazes de otimizar o consumo, baterias convencionais fornecem uma vida útil de um ano com uma densidade de potência de $45 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ e uma vida útil de 10 anos com uma densidade de potência de $3,5 \mu\text{W}/\text{cm}^3$. Desse modo, se a rede IoT for de pequeno porte e implantado em ambientes menos exigentes elas são uma excelente escolha. Caso contrário, em ambientes de difícil acesso, em redes de grande porte e situações críticas (como monitoramento ambiental e aplicações militares) o uso de baterias recarregáveis é uma melhor opção. (ZEADALLY *et al.*, 2019, p. 12)

Baterias recarregáveis minimizam o problema de substituição da bateria, de atendimento a redes em ambientes críticos e redes de grande porte, mas não prescindem de uma técnica de recarga para manter a energia contínua da rede. Elas são promissoras para o design econômico de sistemas IoT, pois diminuem a necessidade de substituição de baterias ao longo do tempo. Diferentes baterias recarregáveis, com distintas eficiências e adequabilidades de uso em relação às diversas aplicações e ambientes IoT, estão disponíveis no mercado. (ZEADALLY *et al.*, 2019, p. 12-13)

As baterias recarregáveis de chumbo ácido são as mais antigas, suas vantagens estão na versatilidade, pois podem ser especificadas com correntes de 1 a 3000 Amperes hora (Ah) e uma tensão potencial de 2048 V a 25°C. Possui estabilidade, ou seja, baixa flutuação de tensão, mas tende a perder capacidade com o tempo. As baterias recarregáveis de Níquel cádmio (NiCd) também são antigas e populares. No âmbito de IoT costumam ser usadas em aplicações médicas e projetos de rede. Possui custo baixo, mas também baixa densidade de energia. As baterias recarregáveis de Lítio Íon (Li íon) são amplamente usadas em eletroeletrônicos, dispositivos portáteis e redes distribuídas. Sua vantagem é a alta capacidade de reter carga, pois possui um tempo dilatado de descarregamento. Sua desvantagem é ser altamente inflamável. Existem sei subtipos de baterias de Lítio Íon (Li íon) adequadas a aplicações distintas. As baterias recarregáveis de Hidreto Metálico de Níquel são um aprimoramento das baterias de níquel cádmio e geram 40% mais energia do que esta e podem ser usadas em alta-tensão com segurança. Além disso são mais ambientalmente amigáveis do que as baterias anteriores, possuem um amplo *roll* de aplicações e baixo custo de manutenção. São ideais para redes distribuídas e possuem um grande *roll* de aplicações, inclusive IoT. (ZEADALLY *et al.*, 2019, p. 12-13)

Os supercapacitores completam o quadro de categorias de reservatório de energia para IoT atualmente. Supercapacitores operam em um grande número de ciclos de carga e descarga. Eles recarregam rapidamente, com uma eficiência de 98%. São a melhor escolha de armazenamento de energia para colheita de energia em IoT, pois podem ser utilizados sem nenhum circuito de transferência de energia, ou seja, a conexão direta de terminais de tensão é suficiente para armazenar energia no capacitor. Isso também é uma vantagem em ambientes hostis. Circuitos extras podem ser usados para otimizar a eficiência da transferência de energia. Supercapacitores tem taxas menores de tempo carregada e estabilidade de tensão em relação às baterias de chumbo. (ZEADALLY *et al.*, 2019, p. 14)

O último estágio do processo de colheita de energia ocorre quando uma unidade de consumo, por exemplo um módulo sensor, um nó IoT ou um *gateway* de borda consome a energia colhida, convertida e armazenada. Eles tendem a operar em tensões de 3 V a 5 V. A Tabela 1 apresenta o consumo de energia de vários componentes IoT. Zeadelly *et al* apresenta uma série de referências que detalham as quantidades e especificidades desse consumo para componentes IoT e uma discussão geral de como este consumo se dá em ambientes IoT (ZEADALLY *et al.*, 2019, p. 14-15).

Consumo de Energia de alguns componentes usados em IoT		
	Componente	Consumo (Potência/Corrente)
Tecnologia Wireless	Wi-Fi	835 mW
	Zigbee node	36.9 mW
	MiMAX node	36.78-36.94 W
	Bluetooth	215 mW
	BLE	10 mW
	Cellular	0.1-0.5 W
	LoRa	100mW
Módulo Sensor	Temperatura/umidade	0.2-1mA
	IR	16.5 mA
	Ultrasonic	4-20 mA
	PIR	65 mA
	Light	0.65 μ A
	Camera	270-585 Ma
Nó IoT /gateway	WASP node	9 mA
	PIR	100-500mA
	Xbow	17.5-19.7 mA
	Arduino	3.87-13.92 mA

Tabela 1 – Consumo de energia de alguns componentes usados em IoT

Fonte – ZEDADALLY et al., 2019, p. 15.

3.4.2 Tecnologias e protocolos de comunicação

Os ecossistemas IoT tendem a ser ambientes heterogêneos em que há uma grande diversidade de dispositivos que se utilizam de distintos padrões de especificação em termos de fabricantes, arquiteturas, tecnologias, gerações tecnológicas, sistemas de software, entre outros fatores, que necessitam se interconectar de maneira contínua, segura e eficiente, de modo que existem uma série de tecnologias e protocolos de comunicação desenhados para IoT, ou que facilitaram seu uso e emergência, favorecendo a interoperabilidade nesse contexto diverso. Elas se adéquam a diferentes necessidades conforme o projeto e aplicação.

Os fatores que sempre devem ser considerados em relação à transmissão de dados em sistemas IoT são a energia disponível, a velocidade de transmissão de dados e a distância entre os ativos da rede. As reais condições desses fatores são dependentes de vários atributos das tecnologias usadas, como as capacidades de processamento e memória, de características do ambiente como temperatura e barreiras como interferência eletromagnética, topologias de rede, requisitos de segurança e desempenho da aplicação por exemplo. Normalmente é necessário que os dispositivos usem algum meio sem fio (*wireless*) de transmissão dados. Assim os ecossistemas IoT costumam estar sujeitos a algumas restrições:

“(…) O volume de armazenamento da capacidade de processamento, a vida útil curta e o alcance do rádio estão entre essas restrições. Portanto, a implementação de IoT requer protocolos de comunicação que possam gerenciar com eficiência essas condições” (AL-SARAWI. *et al.* 2017, p. 685)

Portanto os objetivos ótimos para uma tecnologia ou protocolo de transmissão de dados são baixo consumo energético, alta velocidade de transmissão e longo alcance, mas os recursos disponíveis conseguem apenas a realização de combinações dois a dois desses objetivos, excluindo sempre a realização de um terceiro. Como nosso trabalho se refere à soluções de baixo consumo de energia, focaremos em discutir apenas alguns dos principais protocolos com essa característica, citando brevemente os demais.

A interconexão e transmissão de dados entre dispositivos, nós e *gateways* IoT pode ser abstraída, assim como as redes nos demais sistemas de tecnologia da informação e comunicação, em uma estrutura de camadas que considera o nível de codificação, encapsulamento e interface dos dados transmitidos nas diversas operações de software e hardware necessárias para a execução da transmissão:

“A camada de enlace de dados conecta dois elementos IoT que geralmente podem ser dois sensores ou o sensor e o dispositivo de gateway que conecta um conjunto de sensores à Internet. Muitas vezes, há a necessidade de vários sensores se comunicarem e agregarem informações antes de acessar a Internet. Protocolos especializados foram projetados para roteamento entre sensores e fazem parte da camada de roteamento. Os protocolos da camada de sessão permitem a troca de mensagens entre vários elementos do subsistema de comunicação IoT. Vários protocolos de segurança e gerenciamento também foram desenvolvidos para IoT (...)” (SALMAN;JAIN, 2017, p. 219-220)

A Figura 9 mostra quais protocolos, em suas diferentes camadas, operam em ecossistemas IoT.

Figura 9 – camadas de comunicação IoT

Sessão		MQTT, SMQTT, CoRE, DDS, AMQP, XMPP, CoAP...	Segurança	Gerenciamento
Rede	Encapsulamento	6LowPAN, 6TiSCH, 6Lo, Thread...	TCG, Oath 2.0, SMACK, SASL, ISAsecure, ace, DTLS, Dice...	IEEE 1905, IEEE 1451...
	Roteamento	RPL, CORPL, CARP...		
Enlace de dados		WiFi, Bluetooth Low Energy, Zwave, ZigBee Smart, DECT/ULE, 3G/LTE, NFC, Weightless, HomePlug GP, 802.11ah, 802.15.4e, G.9959, WirelessHART, DASH7, ANT+, LTE-A, LoRaWAN...		

Fonte - SALMAN; JAIN, 2017, p. 220.

Como os ecossistemas IoT são heterogêneos, muitos de seus projetos estão em redes largamente distribuídas e as comunicações precisam operar em diversas camadas, habitualmente diversos protocolos e tecnologias de comunicação são utilizados num mesmo sistema. Para se atingir os melhores resultados possíveis em termos de economia de energia, velocidade de transmissão e alcance da comunicação, o uso desses protocolos e tecnologias podem ser combinados, utilizando-se de estratégias de otimização multiobjetivo.

Alguns dos protocolos da camada de enlace de dados são o IEEE 802.15.4e, IEEE 802.11AH (IoT WiFi), Z-Wave, *Bluetooth Low Energy* (BLE), *ZigBee Smart Energy*, LTE-A, LoRaWan, *Weightless* e DECT/ULE. Os padrões mais usados em IoT são *Bluetooth* e *ZigBee*, embora a infraestrutura de redes wireless disponível para outras aplicações torne o IEEE 802.11ah a opção mais fácil. (SALMAN; JAIN, 2017, p. 220-231)

O protocolo IEEE 802.15.4e é uma versão do IEEE 802.15.4 para baixo consumo de energia e uso em aplicações IoT, sendo o mais comum encontrado. Assim como no IEEE 802.15.4, trabalha com frames em que o cabeçalho define remetente, destinatário e especificações de como os nós podem se comunicar. Opera numa estrutura desenhada para *scheduling* (agendamento) em que um nó pode estar dormiente (*sleep mode*), enviando ou recebendo. No modo dormiente ele desliga o rádio e armazena as mensagens pendentes. Enviando ele transmite os dados e espera a resposta de recebimento. Ao receber ele liga o rádio antes do momento agendado para recebimento, envia a resposta de recebimento, desliga o rádio, entrega os dados para as camadas acima e volta a dormir. O agendamento pode ser centralizado por um nó de gerenciamento, pois não existe uma regra definida pelo protocolo. Esse fator deve ser considerado com cautela, principalmente em ambientes em que grande há mobilidade dos nós. A sincronização de nós, necessária para manter conectividade entre nós vizinhos e gateways pode ser implementada de dois modos no IEEE 802.15.4e: baseado em confirmação e baseado em quadros. No modo baseado em confirmação os nós estabelecem comunicação e trocam confirmações para garantir conectividade e confiança no sistema. No modo baseado em quadros a sincronização dos nós é realizada com envio de quadros vazios em intervalos de tempo pré-determinados. Esse protocolo ainda possui recursos de identificação de novos nós na rede e de troca de canais de transmissão para descongestionar o tráfego de dados no sistema.

IEEE 802.11ah é uma versão de baixo consumo do padrão IEEE 802.11 (Wifi) o mais usado em redes sem fio atualmente. Produzido para atender os requisitos de ecossistema

IoT ele possui recursos de sincronização através de quadros com cabeçalhos que relatam a duração da transmissão ou por *timers* de *delays*, troca bidirecional de pacotes, quadros menores que a versão original e expressivo aumento do tempo de dormência.

Z-Wave é um protocolo projetado para automação residencial e pequenos projetos comerciais. É capaz de cobrir uma comunicação ponto-a-ponto de até 30 metros e atende perfeitamente aplicações IoT que precisam trocar pequenas mensagens como controle de lâmpadas, garagens, vestíveis na área da saúde, entre outros. Possui recursos para detecção de colisões e confirmação de mensagens e opera numa arquitetura *master/slave* em que um nó central controla os *slaves*, envia comandos e maneja o *scheduling* de toda a rede.

Bluetooth Low Energy opera em curtas distâncias e pode ser até dez vezes mais econômico que o *Bluetooth* convencional, com uma latência 15 vezes menor. Também segue a arquitetura *master/slave* com dois tipos de quadros: o de publicidade e quadros de dados. O quadro de publicidade é usado pelos *slaves* para serem descobertos na rede por meio de canais de publicidade. Os nós masters os encontram e os conectam na rede através desses canais. Após a conexão o nó master controla os ciclos em de agendamento e despertar dos nós *slave*, que permanecem em estado dormente até o momento da comunicação efetiva, voltando para esse estado assim que encerrado o envio ou recebimento de dados.

O protocolo *ZigBee Smart Energy* atende uma grande variedade de aplicações de IoT, como casas inteligentes, controles remotos e sistemas de saúde. Projetado para suportar uma ampla gama de topologias de rede, como estrela, ponto a ponto ou árvore de cluster. Um coordenador controla a rede sendo o nó central em uma topologia em estrela, a raiz em uma topologia de árvore ou cluster e pode estar localizada em qualquer lugar na topologia ponto a ponto. O padrão ZigBee pode operar em dois perfis: ZigBee e ZigBee Pro. Eles suportam redes *full mesh* e aplicações permitindo implementações com baixo poder de processamento e consumo de memória. O ZigBee Pro oferece mais recursos, incluindo segurança usando troca de chave simétrica, escalabilidade usando atribuição de endereço estocástico e melhor desempenho usando mecanismos de roteamento muitos-para-um.

Long-Term Evolution Advanced (LTE-A) é um conjunto de padrões projetados para se adequar à comunicação máquina-máquina (M2M) e aplicações de comunicação IoT em redes celulares. LTE-A é escalável para longo alcance e possui baixo consumo. Ele usa

uma tecnologia que divide a frequência em várias bandas e cada uma pode ser usada separadamente. A arquitetura do LTE-A consiste em uma rede central (CN), uma rede de acesso de rádio (RAN) e os nós móveis. A CN é responsável por controlar dispositivos móveis e acompanhar seus IPs. A RAN é responsável por estabelecer os planos de dados e seu controle, pela manipulação da conectividade sem fio e controle de acesso por rádio.

Assim como o LTE a LoRaWan é um protocolo desenvolvido para redes LPWAN (*Low Power Wide Area Network*), que na prática é uma rede WAN de longas distâncias, projetadas para um baixo consumo de energia, dando suporte a requisitos de implementação para ecossistemas IoT. Além do baixo custo, ela possui mobilidade, alta escalabilidade, segurança e comunicação bidirecional para aplicações IoT. Possui suporte às tecnologias de colheita de energia, o que tende a ser promissor em aplicações que necessitam de mobilidade. Encontra aplicações em *smart-cities*, veículos autômatos e indústrias.

Weightless também é tecnologia de LPWAN sem fio para aplicações IoT. Projetada por uma organização global sem fins lucrativos, *Weightless Special Interest Group* (SIG), pode ser implementada no padrão *Weightless-N* desenvolvido para oferecer suporte a baixo consumo de energia à comunicação M2M de usando recursos para minimização de interferência e bandas ultraestreitas na banda de frequência ISM sub-1GHz. Este protocolo também pode ser implementado no padrão *Weightless-W*, que fornece os mesmos recursos, mas usa frequências de banda de televisão.

DECT/ULE (*Ultra Low Energy*) é uma versão de baixo consumo de energia e projetada para aplicações IoT do padrão europeu DECT (*Digital Enhanced Cordless Telecommunications*). Devido aos seus canais dedicados, DECT não sofre com congestionamento nem interferência.

A camada de rede da arquitetura de comunicação para IoT apresentada é dividida em duas subcamadas: roteamento e encapsulamento. (SALMAN; JAIN, 2017, p. 231-234)

A subcamada de roteamento lida com a transferência dos pacotes da origem para o destino. O Principal protocolo para essa camada disponível é o RPL: *Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*. É um protocolo de vetor de distância que pode suportar uma variedade de protocolos de enlace dados citados anteriormente. Ele estabelece uma estrutura de roteamento que pode operar enviando e recebendo dados para um nó central que redistribui os dados pela rede, ou mapeando alguns nós e gerenciado o roteamento ponto-a-ponto de mensagens entre eles, ou seja, descentralizado. Em ambas as

implementações a mensagem “salta” de nó em nó da origem, passando ou não pelo nó central, até o nó de destino. A CORPL é uma implementação não oficial do RPL para redes cognitivas e CARP é uma versão da CORPL projetada para operar o roteamento em saltos em módulos sensores, encontrando aplicações experimentais e não comerciais em projetos submarinos ou subaquáticos.

A subcamada de encapsulamento, consiste em uma série de padrões para encapsular datagramas IPv6 em diferentes quadros da camada de enlace de dados para aplicações IoT, uma vez que esses datagramas são excessivamente grandes para os quadros da camada de enlace. Os padrões 6LoWPAN e 6TisCH, por exemplo operam sobre IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.4e. O grupo de trabalho da IETF *IPv6 over Networks of Resource-constrained Nodes* (6Lo) trabalha atualmente para ampliar a gama de padrões que possam encapsular IPv6, por exemplo os já desenvolvidos IPv6 sobre BLE, um padrão que usa as técnicas de compressão do 6LoWPAN sem usar a fragmentação (ambos são explicados adiante) e IPv6 sobre G.9959, este último um protocolo que define identificadores de nós controladores de 32 bits e de outros nós ativos na rede de 8 bits.

IPv6 over Low power Wireless Personal Area Network (6LoWPAN) é o primeiro e mais comum padrão usado entre eles. Ele encapsula cabeçalhos longos IPv6 em Pequenos pacotes IEEE802.15.4 de até 128 bytes. A especificação suporta endereços de comprimento diferentes, diversas topologias, como estrela ou malha, baixo consumo de energia, redes escaláveis e longo tempo em *sleep mode*. O protocolo dispõe de compressão de cabeçalho para reduzir a sobrecarga de transmissão e recursos de fragmentação para o comprimento máximo de quadro. Seus quadros usam quatro tipos de cabeçalhos: nenhum cabeçalho 6LoWPAN, em que qualquer *frame* que não segue as especificações 6LoWPAN é descartado; cabeçalho de despacho, usado para *multicast* e compactações de cabeçalho IPv6; cabeçalho de malha, usados para transmissão; e cabeçalho de fragmentação, usados para quebrar o cabeçalho IPv6 longo para caber em fragmentos de no máximo 128 bytes de comprimento.

6TISCH define uma matriz de canais de uso e distribuição que consiste em frequências acessíveis dispostas em colunas e intervalos de tempo disponíveis para operações de agendamento de rede em linhas. Esta matriz é dividida em pedaços onde cada pedaço contém tempo e frequências, conhecidos globalmente por todos os nós da rede. Os nós dentro do mesmo domínio de interferência negociam seu escalonamento para que cada nó transmita em canal de seu domínio de interferência no momento mais adequado. O agendamento torna-se um problema de otimização onde os intervalos de tempo são

atribuídos a um grupo de nós vizinhos que compartilham a mesma aplicação. Não existe uma especificação a respeito do agendamento, cabendo à aplicação determinar como ela será feita, o que permite máxima flexibilidade para diferentes aplicações de IoT. O agendamento pode ser centralizado ou distribuído dependendo da aplicação ou da topologia utilizada.

A camada de sessão lida com a implementação de padrões para as diversas mensagens de função que são comuns nas várias aplicações IoT de modo a garantir interoperabilidade e reaproveitamento das funções entre as aplicações. Desse modo esses protocolos são altamente dependentes da aplicação e de suas especificidades. O MQTT é o mais utilizado em IoT devido à sua baixa sobrecarga e consumo de energia, porém aplicações que utilizam de XML e têm tolerância à sobrecarga de cabeçalhos podem ter uma melhor opção no protocolo XMPP e aplicações que se utilizam de HTML e requisições REST podem se adequar mais ao uso do CoAP. Outros protocolos que operam nessa camada são o SMQTT, que implementa especificações de segurança e criptografia sobre o MQTT; AMQP, outra versão do MQTT utilizado em ambientes de aplicação financeira e DDS, utilizado em comunicação máquina-máquina(M2M). SALMAN; JAIN, 2017, p. 234-238)

O *Message Queue Telemetry Transport* (MQTT) foi projetado para fornecer conectividade embarcada entre aplicativos e middleware de um lado e redes e comunicações do outro lado. Segue uma arquitetura de publicação/assinatura, onde o sistema consiste em três componentes principais: editores, assinantes e um agente. Do ponto de vista da IoT os editores são basicamente os sensores leves que se conectam ao agente para enviar seus dados e voltar a dormir sempre que possível. Assinantes são aplicativos que estão interessados em um determinado tópico, ou dados dos sensores, para que eles se conectem aos agentes para serem informados sempre que novos dados são recebidos. Os agentes classificam os dados extraídos em tópicos e os enviam aos assinantes interessados.

CoAP é projetado para permitir sensores de baixa potência usar serviços RESTful, uma vez que o *Representational State Transfer* (REST) é a interface padrão entre cliente e servidores HTTP, sendo capaz de provocar sobrecarga significativa e alto consumo de energia. É construído sobre UDP, em vez de TCP e sua arquitetura é dividida em duas subcamadas principais: mensagem e solicitação/resposta. A subcamada de mensagem é responsável pela confiabilidade e duplicação de mensagens enquanto a subcamada solicitação/resposta é responsável pela comunicação. O protocolo possui quatro modos:

confirmável, não confirmável, *piggyback* e separado. Os modos confirmável e não confirmável representam as transmissões confiáveis e não confiáveis, respectivamente, enquanto os outros modos são usados para solicitação/resposta. *Piggyback* é usada para comunicação direta entre cliente e servidor, que envia suas respostas imediatamente dentro da mensagem de confirmação. O modo separado é usado quando a resposta do servidor vem em uma mensagem separada da confirmação, levando mais tempo para ser enviado. Como no HTTP, o CoAP utiliza mensagens *GET*, *PUT*, *PUSH*, *DELETE* para solicitações de recuperar, criar, atualizar e excluir, respectivamente.

O *Extensible Messaging and Presence Protocol* (XMPP) é um protocolo consolidado e reconhecido há mais de uma década, projetado originalmente para aplicativos de bate-papo e mensageria. O XMPP raramente é usado em IoT, uma vez que suas mensagens no padrão XML podem causar sobrecarga adicional devido a muitos cabeçalhos e formatos de *tags* que aumentam o consumo de energia. Ainda assim esse protocolo tem sido reutilizado em experimentos, pesquisas e despertado interesse em melhorar sua arquitetura para suportar aplicações IoT.

Alimentar bilhões de dispositivos embarcados implantados no ambiente é um dos maiores desafios que a IoT enfrenta. As soluções baseadas em bateria tendem a ser impraticáveis e caras devido à necessidade de recarga ou substituição. Colheita de energia aparece como uma opção viável para muitas aplicações de IoT, mas vem com duas ressalvas. Em primeiro lugar, muitas vezes é uma fonte não confiável de energia. Em segundo lugar, ainda existe uma grande lacuna entre a energia que pode fornecer e o orçamento de energia necessário para muitas aplicações de IoT. Para aplicativos de IoT de missão crítica, como cuidados de saúde, completar uma tarefa antes de ficar sem energia é fundamental (SALMAN; JAIN, 2017, p. 238-239). A camada de gerenciamento consiste de padrões para executar a desafiadora tarefa de fornecer interoperabilidade, comunicação e interconexão entre os múltiplos e heterogêneos protocolos e tecnologias que são constantes em qualquer ecossistema IoT. Ela opera em paralelo com diversas camadas, como mostrado na Figura 9. A camada de segurança também opera em paralelo acrescentando recursos de identificação e criptografia às mensagens e encapsulamentos. Protocolos como MAC 802.15.4, 6LoWPAN e RPL são de baixo consumo de energia e possuem implementações de segurança nativas (SALMAN; JAIN, 2017, p. 239-240).

3.4.3 *Design de software*

As múltiplas soluções para redução de consumo no âmbito de arquitetura de hardware, de protocolos e tecnologias de comunicação são insuficientes para atender os requisitos da emergência de inúmeros ecossistemas IoT previstos para as próximas décadas:

“Alimentar bilhões de dispositivos embarcados implantados no ambiente é um dos maiores desafios que a IoT enfrenta. As soluções baseadas em bateria tendem a ser impraticáveis e caras devido à necessidade de recarga ou substituição. Colheita de energia aparece como uma opção viável para muitas aplicações de IoT, mas vem com duas ressalvas. Em primeiro lugar, muitas vezes é uma fonte não confiável de energia. Em segundo lugar, ainda existe uma grande lacuna entre a energia que pode fornecer e o orçamento de energia necessário para muitas Aplicações de IoT. Para aplicativos de IoT de missão crítica, como cuidados de saúde, completar uma tarefa antes de ficar sem energia é fundamental.” (GEORGIU *et al*, 2017, p. 1)

Steve Furber, *designer* do processador ARM, em entrevista, fez as seguintes afirmações acerca da importância do software e da responsabilidade de seus desenvolvedores para a redução do consumo de energia em sistemas computacionais:

“Se você quer um sistema de baixo consumo de energia, então você tem que se preocupar com o uso de energia em todos os níveis do projeto do sistema, e você tem que acertar de cima para baixo, porque qualquer nível em que você errar vai perder talvez uma ordem de grandeza em termos de eficiência energética. A tecnologia de hardware tem um impacto de primeira ordem na eficiência de energia do sistema, mas você também precisa ter um software no topo que evite desperdícios sempre que possível. Você precisa evitar, por exemplo, qualquer coisa que se assemelhe a um *loop* de pesquisa porque isso é apenas queimar energia para não fazer nada.

Acho que uma das questões difíceis é se você pode passar a responsabilidade pela eficiência do *software* de volta para o programador. Os programadores realmente têm alguma compreensão de quanta energia seus algoritmos consomem? Trabalho em um departamento de ciência da computação e não está claro para mim que ensinamos muito aos alunos sobre quanto tempo seus algoritmos levam para serem executados, muito menos quanta energia eles consomem durante a execução e como você otimiza um algoritmo para seu consumo de energia.

Parte da responsabilidade por isso provavelmente será empurrada para os compiladores, mas ainda acho que fundamentalmente, em alto nível, os programadores não poderão se dar ao luxo de ignorar o custo de energia dos programas que escrevem.” (ACMQUEUE, 2010)

De fato, Georgiou *et al* estimam que cerca de 80% da energia consumida em sistemas embarcados são dependentes de como o software opera sobre o hardware, um fator que opera em favor do aumento da responsabilidade de desenvolvedores para sistemas IoT no que se refere à economia de energia dos sistemas. (GEORGIU *et al*, 2017, p. 1)

Eles apresentam uma abstração das diferentes aplicações da programação em ambientes IoT em quatro níveis: o mais alto se refere aos algoritmos, o próximo nível refere-se ao código fonte, em seguida um nível que trata de compiladores e código intermediário e o mais baixo nível que trata arquitetura do conjunto de instruções.

Discutimos brevemente a respeito da arquitetura do conjunto de instruções de um microcontrolador RISC de 8 bits quando discutimos o papel da redução de arquitetura para diminuição do consumo de energia em relação a um microcontrolador comercial em uma seção anterior. Em geral, menores conjuntos de instruções tendem a ser mais eficientes para ambientes IoT sensíveis ao consumo de energia. Desse modo Saso *et al* propõe um conjunto de instruções ultrarreduzido melhorando as ineficiências de um conjunto desenvolvido para fins educacionais e adicionando outras poucas instruções. O resultado é o conjunto de instruções de código aberto e microprocessador que eles denominaram SubRISC. Segundo os autores:

“Nossos experimentos demonstraram que o SubRISC pode superar dois processadores existentes em termos da área do circuito, desempenho e consumo de energia.” (SASO *et al.*, 2018. p.4)

No âmbito de compiladores e código intermediário, a perspectiva de economia de energia ainda vive sua “infância” segundo o especialista Ulrich Kremer (KREMER, 2018, p. 9). A abordagem central para desenvolvimento e melhoria de compiladores têm foco em melhorar a performance das aplicações em termos de tempo de execução e os ganhos em relação ao consumo de energia ainda são vistos como subprodutos desejáveis do primeiro. A efetividade de um compilador é tipicamente mensurada através do cotejamento do código elaborado por um expert no *assembly* de determinada máquina com o código gerado pelo compilador para aquela arquitetura. O mercado de embarcados, com seu reduzido ciclo de vida dos produtos, e ecossistemas de IoT tornam o “esforço para escrever programas eficientes ou mesmo corretos inibitivamente alto” (KREMER, 2018, p. 2) ou até mesmo incalculável, pois é difícil mensurar o esforço do expert. Desse modo, a portabilidade e a capacidade de redirecionamento de compiladores, ou seja, a possibilidade de um mesmo compilador portar executáveis funcionais em *chips* diferentes são importantes características desejáveis para essas ferramentas em ambientes embarcados e IoT.

Compiladores que buscam analisar e otimizar software realizam transformações em diversos níveis de abstração do desenvolvimento de um programa, indo do código fonte, passando por árvores de endereços, *assembly* e código de máquina. Há um largo espaço para decisões de design com diversas trocas a serem consideradas para justificação de uma determinada implementação ou estratégia de otimização. De qualquer modo, três questões estarão sempre presentes: oportunidade, ou seja, quando a otimização pode ser aplicada; segurança, ou seja, verificar se a otimização preserva a semântica original do programa e lucratividade, ou seja, qual é a expectativa de melhoria de performance.

A própria ideia de performance precisa ser discutida. Pois otimizar a dissipação de potência e o tempo de execução de um programa compilado, não necessariamente reduz o consumo de energia. Compiladores que otimizam código através do método do caminho crítico, por exemplo, podem ter benefícios em relação ao tempo da tarefa executando dentro de um laço a instrução invariante, ou seja, uma instrução independente dos termos de iteração do laço, “ $a = b * 2$ ”. O mesmo não ocorre com o consumo de energia pois a execução da instrução a faz aumentar a cada iteração do laço. Desse modo para a redução do consumo a instrução “ $a = b * 2$ ” deve ser executada apenas uma vez, fora do laço e do caminho crítico identificado pelo compilador. Embora essa opção consuma menos energia, ela perde performance em tempo de execução de modo que esse tipo de decisão é dependente da aplicação e seus requisitos em termos de velocidade, disponibilidade e custos (KREMER, 2018, p. 5).

Outras estratégias de otimização que compiladores utilizam podem sofrer o mesmo problema. A especulação, por exemplo, é uma estratégia que busca “adivinhar” o comportamento futuro do programa, como alocar endereços de memória. O custo de tempo de execução e de consumo de energia no caso de um erro de especulação, e o esforço computacional necessários para corrigi-los, são extremamente dependentes da aplicação e essa estratégia só é raramente viável em condições específicas de determinadas aplicações.

Ainda assim, no nível dos compiladores e código intermediário, existem soluções mais gerais que certamente reduzem o consumo:

“Claramente, a redução da carga de trabalho também pode resultar em economia de potência/energia. Otimizações de hierarquia de memória, como *loop* alocação de blocos e registradores tentam manter os dados mais próximos do processador, uma vez que tais os dados podem ser acessados mais rapidamente. Manter um valor em um *cache* no *chip* em vez de uma memória *off-chip*, ou em um registrador em vez do cache também economiza potência/energia devido a atividades de comutação reduzidas e capacitância de comutação.” (KREMER, 2018, p. 5)

Kremer ainda debate, a título de exemplo, outros tipos de otimização possíveis de serem realizadas por compiladores. Um deles é o escalonamento dinâmico de tensão e frequência (DVFS ou DVS), que discutimos anteriormente no âmbito da arquitetura de hardware. O Compilador pode gerar um executável que oriente o sistema operacional acerca das configurações ótimas de tensão e frequência por bloco de execução ou o faça sozinho:

“Um algoritmo DVS eficaz é aquele que determina inteligentemente quando ajustar a configuração de tensão e frequência atual (pontos de escala) e para qual configuração de

tensão e frequência (fatores de escala), para que economias consideráveis de energia possam ser alcançadas enquanto o desempenho necessário ainda é entregue.” (KREMER, 2018, p. 7)

O autor ainda apresenta três questões fundamentais para o *design* de compiladores capazes de otimizar o gerenciamento de potência e energia:

“1 – Você pode correr, mas não pode se esconder: Todas as instruções, incluindo instruções sobre o caminho não crítico contribuem para a dissipação geral de potência e consumo de energia. Como resultado, as otimizações de potência/energia têm uma maior limite de lucratividade do que a otimização de desempenho, se exigirem instruções adicionais a serem executadas.

2 - Mantenha o quadro geral em mente: uma otimização de potência/energia com uma leve penalização de desempenho pode ser lucrativa para um único componente do sistema (por exemplo: *cache*, CPU, memória), mas pode não ser lucrativo para o sistema em geral devido ao seu impacto nos requisitos de potência/energia de outro sistema de componentes. Além disso, as características de potência/energia de outros ativos e processos devem ser considerados em um ambiente de multiprogramação.

3 – Você não pode vencer o hardware: Se uma operação for implementada em hardware, e um aplicativo pode tirar proveito desse hardware (por exemplo: unidade de ponto flutuante), um compilador deve tentar gerar código para ele. Se o *hardware* dissipa potência enquanto ocioso, o compilador precisa ser capaz de desativá-lo durante esses períodos ociosos.” (KREMER, 2018, p. 7-8)

No nível do código, BIÑAS apresenta um tutorial em que analisa teoricamente e demonstra com exemplos como a utilização de certas práticas de programação em C com o microcontrolador Arduino pode otimizar as operações de um módulo sensor de movimento de modo a consumir o mínimo possível de energia em projetos para IoT. (BIÑAS, 2019)

Uma das soluções recomendadas e explicadas é a utilização de interrupções tanto externas, ou de *hardware* do microcontrolador, quanto internas, ou de sistemas como *timers*, em preferência a funções de sondagem, que opera em loops ou laços. Tanto as interrupções internas quanto externas passíveis de serem acionadas vão depender da arquitetura de hardware do dispositivo, de modo que é necessário aos desenvolvedores terem esse conhecimento. Embora uma rotina de interrupção de serviço possa ter o mesmo código que haveria no interior de um laço, ela tende a ter um desempenho melhor e economiza recursos. Sua desvantagem se encontra no fato de que rotinas de interrupção são mais difíceis de debugar. Recomendações de boas práticas para trabalhar com interrupções são manter o código executado com o acionamento o mais curto possível, jamais usar comunicações seriais ou a função *delay (...)* e evitar desativar ou ativar o suporte a interrupções dentro de uma rotina de interrupção. Vale mencionar

que muitos microcontroladores dão suporte superior ao Arduino em relação a interrupções internas e externas.

Conhecer os diferentes modos que o *sleep mode* pode ser implementado em um microcontrolador através de código de alto nível também é apresentado por Blavestky como uma forma de encontrar soluções para diminuição de consumo de energia para ambientes IoT. O site oficial do Arduino afirma que esta é a melhor opção para economizar energia com esse microcontrolador.

Um Arduino Mini Pro, por exemplo, pode passar do consumo de 25mA em modo normal para 0.57 mA em *sleep mode*. Evidentemente esse fato depende de cada arquitetura de hardware individualmente. Cada diferente microcontrolador existente no mercado possui uma lista própria de *sleep modes*, ou seja, diversos estados em que conjuntos diferentes de componentes são desligados enquanto outros permanecem ligados. Esses componentes desligados se tornam dependentes de interrupções para voltarem ao estado ativo de funcionamento e a quantidade de energia economizada dependerá de quais componentes permanecem ligados. BIÑAS (2019) alerta que programar determinados estados de *sleep mode* devem ser feitos com cautela, pois se o código determina que a ação será feita antes que seja declarada qual é a devida interrupção necessária para reativar o componente, este, até mesmo o microcontrolador inteiro, podem ficar inutilizáveis. A documentação oficial do Arduino afirma que “é sempre recomendável projetar a estrutura do *software* e depois começar a escrever o código real, o que será útil para obter um dispositivo com eficiência de energia” (CHUNG; BAGUR, 2022)

O Arduino, modelo que o autor usa em seus exemplos têm cinco diferentes *sleep modes*, cada um desativa um conjunto diferente de componentes de sua placa: *idle* (SLEEP_MODE_IDLE), *ADC Noise Reduction* (SLEEP_MODE_ADC), *Power-save* (SLEEP_MODE_PWR_SAVE), *Standby* (SLEEP_MODE_STANDBY) e *Power-down* (SLEEP_MODE_PWR_DOWN). De modo a emular a redução de hardware, o programador também simplesmente desligar seletivamente componentes específicos do sistema que não serão utilizados. (CHUNG; BAGUR, 2022)

Como discutido anteriormente, a frequência de um componente tem uma relação linear com seu consumo de energia. A redução da frequência do microcontrolador de um nó IoT é outra solução apresentada por BIÑAS (2019) para reduzir, através de codificação de *software*, o gasto energético. Preferir determinar as configurações de frequência nas rotinas de setup e declaração de variáveis ao invés das rotinas de execução principal,

entender qual é real necessidade, em termos de frequência, da aplicação e estar atento que a mudança desse parâmetro influenciará o funcionamento de *timers*, *delays* e portas de entrada e saída são recomendações de boas práticas apresentadas pelo autor.

O desafio de produzir sistemas IoT capazes de operar com alta restrição de disponibilidade de energia contínua significativo. Embora mais exemplos de código utilizando as soluções descritas até agora, entre outras, como a verificação do estado da bateria do nó, possam ser encontradas, por exemplo, na documentação oficial de microcontroladores como o Arduino, existam API's com rotinas próprias para soluções de código mais eficientes em relação ao consumo, existem boas práticas tanto para codificação de *software*, quanto esforços para elaboração de conjuntos de instruções e compiladores capazes de realizar otimização de executáveis focados na economia de energia, o desafio permanece grande.

Segundo Furber, existe uma grande dificuldade entre desenvolvedores de mensurar a quantidade de energia, no nível do algoritmo, que seus softwares consomem:

“O que você precisa para poder trabalhar dessa maneira é uma instrumentação que lhe diga que a execução deste algoritmo tem esse tipo de custo de energia e a execução desse algoritmo tem aquele tipo de custo de energia. Você precisa de ferramentas que lhe dêem *feedback* e lhe digam quão boas são suas decisões. Atualmente as ferramentas não te dão esse tipo de *feedback*.” (ACMQEUE, 2010)

Georgiou *et al* (2017) afirmam que programadores têm restrito acesso à informação acerca de quanta energia os programas consomem, o que implica consequências como um excesso de trabalho especulativo em relação às escolhas de consumo energético, o mal funcionamento e falhas de sistemas, a necessidade de desenvolvedores altamente especializados em relação às questões de gerenciamento de energia por *software* e à escassez de ferramentas de mensuração de consumo.

“O consumo de energia de um programa em hardware específico sempre pode ser determinado através de medições físicas. Embora este seja potencialmente o método mais preciso, muitas vezes não é facilmente acessível. Medir o consumo de energia pode envolver equipamentos sofisticados e conhecimento especial de hardware. Modificações personalizadas podem ser necessárias para sondar a fonte de alimentação. Mesmo que os módulos de monitoramento de energia estejam tornando-se cada vez mais populares em processadores modernos, seu número e disponibilidade são ainda limitados em sistemas embarcados. Além disso, a caracterização refinada do consumo de energia de componentes de software, como gráficos de fluxo de controle, blocos básicos ou loops, não pode ser alcançada usando apenas medições de energia. Tudo isso dificulta para a maioria dos desenvolvedores de software avaliar o consumo de energia de um programa.” (GEORGIU *et al*, 2017, p.2)

Kremer (2018) corrobora com esse diagnóstico, observando da perspectiva da comunidade de desenvolvedores de compiladores:

“A comunidade de compiladores depende principalmente de medições físicas em sistemas-alvo para um conjunto de benchmarks representativos para avaliar os benefícios de uma determinada otimização ou conjunto de otimizações. Os resultados da simulação são aceitos como uma indicação de um benefício potencial de uma otimização, mas são normalmente não é considerado prova suficiente de que a otimização vale a pena na prática. O que é necessário é uma infraestrutura de avaliação para otimizações de potência e energia que consiste em uma combinação de medições físicas e modelagem de desempenho. As medições físicas precisam incluir medições de corrente e tensão, bem como medições de temperatura. Modelos de desempenho são necessários para a CPU, subsistemas de memória, controladores, módulos de comunicação e dispositivos de E/S, como disco e tela. Essa tecnologia é crucial para entender e avaliar os benefícios de uma otimização proposta para todo o sistema de destino, subconjuntos de componentes do sistema ou componentes únicos do sistema.” (KREMER, 2018, p. 9)

Georgiou *et al* (2017) endossam e explicam as afirmações de Kremer, pois que declaram que a medição física ainda é incapaz de atender alguns requisitos necessários para a uma medição eficiente dos gastos energéticos de um software. São elas a medição atual dos limites do sistema; transparência energética em múltiplos níveis de abstração de software (Código-fonte, Representações intermediárias do compilador, arquitetura do conjunto de instruções); caracterização refinada do consumo de energia por bloco de código, por exemplo; objetivar independência da linguagem e do software em relação aos sistemas alvos, ou seja, favorecer a existência de programas agnósticos; explorar situações de processamento *multicore*; permitir a exploração do espaço de design, ou seja, permitir que desenvolvedores consigam aplicar critérios multiobjetivos para avaliar qual é a melhor correlação de fatores como tamanho do código, tempo de execução, consumo energético, quantidade de cores e threads de um processador em relação à aplicação implementada e ter sistemas que sejam fáceis e rápidos de implementar, mesmo com as questões acerca do consumo de energia constando no *roll* de considerações dos desenvolvedores. (GEORGIU *et al*, 2017, p.2)

Segundo Georgiou *et al* (2017) existem dois elementos principais para estimar o consumo de energia de um programa para um hardware particular: uma modelagem que captura a dinâmica do comportamento de um processador em relação ao seu consumo de energia e uma análise técnica. Cada nível de abstração de software necessita de uma modelagem apropriada e qualquer tipo de imprecisão do modelo acarretará uma imprecisão de ordem igual ou superior na análise técnica:

“A modelagem em um nível baixo é sempre mais precisa, pois é mais próxima do *hardware*, onde a dissipação de potência real ocorre. Por outro lado, ao passar para níveis mais altos de abstração, a quantidade de informações do programa, como tipos e estruturas de loop, aumenta. Tais informações podem ser cruciais a para análise e otimização de código estático. No entanto, ao passar do código-fonte para o nível da arquitetura do conjunto de instruções, grande parte desta informação é perdida devido às várias transformações e passos de otimização que ocorrem nos respectivos níveis do de abstração de software.” (GEORGIU *et al*, 2017, p.2)

Existem duas grandes técnicas de análise para avaliar o consumo de energia a partir dos modelos: perfil baseado em consumo de energia e estimativa de consumo de energia baseado em SRA.

As primeiras estimativas são realizadas coletando estatísticas de execução aplicadas ao modelo apropriado, que necessita ter informações das várias entidades consumidoras de energia do sistema. Existem três formas de realizar essa técnica: simulação, instrumentação do código e monitoramento por contadores de performance.

A simulação é geralmente aplicada em *design* de baixo de nível, mais próximo ao *hardware*. Isso gera dificuldades para uma avaliação refinada em todos os níveis de software em gera impeditivos grandes para casos de *hardware* e arquiteturas proprietárias, uma vez que boa parte das informações necessárias não estão disponíveis. Para contornar essas dificuldades, simulações ao nível da arquitetura do conjunto de instruções, que trata o hardware como uma caixa-preta, podem ser feitas com bons resultados em termos de velocidade e caracterização do consumo de *software*. Uma das grandes vantagens da simulação é que demanda tempo de modelagem e análise, portanto não pode ser facilmente incorporada em ferramentas de desenvolvimento de *software*.

A instrumentação de código é a utilização de implementações no próprio código do programa para extrair estatísticas de consumo em tempo de execução. Essa técnica tem grande vantagem sobre a simulação em relação à velocidade do teste, mas tem mais desvantagens em relação à precisão das medições.

O monitoramento de contadores de performance (PMC) é utilizado para analisar arquitetura mais complexas, como processadores *multicore*. Dependendo do processador a análise pode encontrar dificuldades em identificar os tipos de eventos a serem monitorados ou ainda não possuir contadores suficientes para realizar as estimativas com precisão. (GEORGIU *et al*, 2017, p.4)

A segunda técnica, estimativa de consumo por SRA, utiliza a análise estática de recursos (SRA), para estimar os limites de consumo de energia. Através da análise automática de complexidade, é possível gerar, automaticamente e independentemente da linguagem de programação, uma relação entre custo de energia e *inputs* de programa tanto no nível da arquitetura do conjunto de instruções, quanto no de compiladores e código intermediário. A maior desvantagem é a falta de escalabilidade para projetos complexos. A outra forma de estimativa de consumo por SRA é conhecida como técnica de enumeração implícita de

caminho (IPET) e *server* para identificar os limites de consumo de energia de um processador. Ela opera através do suporte do método do pior caso, ou seja, quando o maior número possível de instruções de um algoritmo é executado. Algumas das desvantagens dessa técnica novamente são as dificuldades em ter total transparência a respeito de arquiteturas de *hardware*, além disso, pode ser bastante complicado conseguir explorar em tempo de execução uma situação de pior caso de execução. (GEORGIU *et al*, 2017, p. 3)

Assim as características de *hardwares* proporcionam aos *softwares* formas de economizar energia. Georgiou *et al*. afirmam que cabe aos engenheiros de *software* programar e configurar os dispositivos da melhor forma para um excelente aproveitamento de energia, aos fornecedores de ferramentas de desenvolvimento oferecer recursos para medições mais rápidas e precisas e ainda aos vendedores de *hardware* a disponibilização de arquiteturas e modelagens de consumo de energia, aumentando a transparência energética e facilitando o trabalho de analistas.

Por fim, é importante ressaltar que no âmbito de IoT todas as observações a respeito da medição do consumo ao nível de *software* ainda demandam diversas dimensões de estudo e pesquisa:

"(...) aplicativos de IoT geralmente funcionam com uma bateria ou em um coletor de energia. Para poder usar as estimativas de energia para tomar decisões em tempo real, o perfil de energia da fonte de energia para uma aplicação específica deve ser levado em consideração tanto pela modelagem de energia quanto pelas técnicas de estimativa de consumo de energia. Atividades externas ao processador, como detecção e comunicação, podem consumir significativamente mais energia do que a parte de computação de um sistema embarcado. A computação geralmente controla tal atividade. Portanto, o uso de energia de periféricos e operações de E/S pode ser traçado e incluído como parte do custo de energia da computação que os acionam. Isso permitirá que as técnicas existentes de estimativa de energia forneçam estimativas de energia em todo o sistema. Tal abordagem é mais viável para sistemas com comportamento previsível." (GEORGIU *et al*, 2017, p.4)

4 Considerações Finais

A emergência de IoT é um processo já iniciado e que tende a tomar proporções consideravelmente maiores. Tal fenômeno atualiza algumas perspectivas e pontos de observação nas atividades profissionais de analistas de sistemas e desenvolvedores. Ao realizar este trabalho percebemos a existência de diversas formas, perspectivas e escalas de abordar o tema do consumo de energia no âmbito da IoT. Nosso levantamento bibliográfico nos ajudou principalmente a discriminar alguns dos caminhos que as pesquisas e aplicações comerciais estão tomando ao tratar esse assunto. O caminho escolhido foi selecionar e apresentar algumas dessas abordagens, problemáticas e soluções, que julgamos pertinentes à nossa formação de tecnólogo do curso de ADS da FATEC-SP, ou ainda que se firmam como tendências e destaques. Só podemos pretender que, apresentar algumas dessas questões nesse trabalho, sirva como um ponto de partida para profissionais que desejam ter um primeiro contato, em língua portuguesa, com o assunto e encontrar uma forma de começar a abordar alguns desses temas.

Existem, por exemplo, experiências e pesquisas sobre a qualidade dos materiais, suas propriedades físicas e melhores formas de aplicá-los em dispositivos para obter mais energia ou economizá-la. Os projetistas de *hardware* atentam-se também para a arquitetura e de quais modos a integração dos diferentes componentes dos dispositivos, quais especificações geram maior consumo e quais são as melhores implementações para evitá-lo. Isso se dá em diferentes escalas e camadas dos ecossistemas IoT, pois além dos dispositivos sensores de borda, temos por exemplo, os coletores de energia, *gateways*, servidores de grande porte ou diferentes terminais como *notebooks* e celulares que eventualmente os usuários utilizem ou ainda robôs montadores na indústria, drones entregadores, veículos autômatos, etc. É sobre os dispositivos afinal que recaem a preocupação de usuários comuns a respeito do consumo de energia.

As topologias de rede, as tecnologias de transmissão e os protocolos de comunicação também são importantes elementos a serem considerados sob diversos aspectos, inclusive o da economia de energia, de modo que os projetos de rede e as formas de transmissão de dados são um outro conjunto de elementos que devem ser observados de maneira sistêmica. Outro conjunto de abordagens observa o *software* e pode ser subdividido em muitas outras que tentam analisar a eficiência das linguagens, dos compiladores, estruturas e gerenciamento dos dados, dos algoritmos, num

escalonamento que, como acontece com arquitetura de hardware, também perpassa as diferentes camadas de uma arquitetura de ecossistema IoT.

É importante observar que na implementação competente de um modelo de negócio, o correto direcionamento de sua estrutura e processos é de grande importância não apenas para sua eficaz realização, mas para otimização de seu consumo energético, de modo que o tema encontra suma relevância entre analistas de sistemas, gestores, entre outros profissionais e pesquisadores, e a existência de normatizações como a ISO 50.001, que estabelece boas práticas para gestão de energia em organizações corrobora com essa abordagem, que opera na camada de negócios e afins dos ecossistemas IoT.

Foi significativo aprender que, quando se trata de economizar energia, os ecossistemas IoT encontram verdadeiro potencial ao serem aplicados para monitorar e controlar a extração, consumo e distribuição em todos os setores de atividade e tem aplicações promissoras em usinas, *smartgrids*, *smarthomes* entre outros. Desse modo ecossistemas IoT podem vir a se tornar elementos chaves para diminuição das emissões de carbono, contribuindo para a tarefa global que humanidade possui de frear as mudanças climáticas. Já existem aplicações comerciais como sistemas de monitoramento e controle do consumo doméstico e industrial, além dos veículos autômatos, como também inúmeras pesquisas buscando encontrar novas aplicações e otimizações desse potencial. Pudemos apresentar algumas dezenas de trabalhos existentes, parte de uma extensa literatura dedicada a esse assunto.

Concluímos também que é importante observar o consumo de energia em relação aos requisitos do projeto em todos os âmbitos, pois economizar mais energia não está sempre relacionado a um processo ser mais rápido ou ter mais performance, como pudemos perceber e mencionar ao longo desse trabalho. É importante notar que requisitos como disponibilidade, interoperabilidade e segurança em sistemas que tendem ser críticos, heterogêneos e operar em ambientes difíceis são desafios que devem ser atendidos e que elevam a demanda de energia. Entre outros desafios significativos que a emergência da IoT impõe são confiança, escalabilidade, mobilidade e facilidade de gerenciamento. A ocorrência do conflito entre velocidade de execução e performance de um lado e consumo energético de outro, ocorre em escalas que vão da arquitetura do hardware de um sensor ao cálculo das rotas em tempo real de um veículo, ou a distribuição regional de energia em uma cidade e, portanto, merece o devido cuidado dos pertinentes times que pretendem implementar um ecossistema IoT em determinada aplicação.

5 Referencial bibliográfico

AL-ALI, AbdelRahman *et al* A smart home energy management system using IoT and big data analytics approach. In **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, vol. 63, no. 4, pp. 426-434, 2017, doi: 10.1109/TCE.2017.015014.

AL-SARAWI, Shadi *et al*. *Internet of Things (IoT) communication protocols*. In: 2017 8th **International conference on information technology (ICIT)**. IEEE, 2017. p. 685-690.

BAGDADEE, Amam Hossain. *et al*. A brief review of the IoT-Based energy management system in the smart industry. *Artificial intelligence and evolutionary computations in engineering systems*. Singapura, Springer. 781p. 2020.

FOSSA, Alberto; SGARBI, Felipe. Guia para aplicação da norma ABNT NBR ISO 50001 - Gestão de energia. **International Copper Association Brazil**. 84p. 2015.

GEORGIYOU, Kyriakos, *et al*. *Energy transparency for deeply embedded programs*. In. **ACM Transactions on Architecture and Code Optimization**, Volume 14. Issue 1. Article 8: p-1-26. 2017. Doi: <https://doi.org/10.1145/3046679>

GEORGIYOU, Kyriakos; XAVIER-DE-SOUZA, Samuel; EDER, Kerstin. *The IoT energy challenge: A software perspective*. **IEEE Embedded Systems Letters**, v. 10, n. 3, p. 53-56, 2017.

HENKEL, Jörg *et al*. *Ultra-low power and dependability for IoT devices (Invited paper for IoT technologies)*. In **Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)**, 2017, pp. 954-959, doi: 10.23919/DATE.2017.7927129.

ISO - *International Organization for Standardization*. **ISO 50001 - Energy management systems**. Folder Genebra, Suíça. 2018 [ISO - International Organization for Standardization](https://www.iso.org/)

KHADER, Mohammad *et al*. *Embedded memory options for ultra-low power IoT devices*. In **Microelectronics Journal**, V 93, 2019, 104634, <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2019.104634>.

KREMER, Ulrich. *Low-Power/ Energy Compiler Optimizations*. In. **Low-Power Processores and Systems on Chips**. Ed. Piget. C. Ed. 1. Boca Raton. Ed. CRC Press. 392 p. 2018 <https://doi.org/10.1201/9781315220581>

KYCHKIN, Aleksey *et al*. IoT-based Energy Management Assistant Architecture Design. In: 2019 **IEEE 21st Conference on Business Informatics (CBI)**. 2019. doi:10.1109/cbi.2019.00067

LIM, YangWei *et al*. *Reduced hardware architecture for energy-efficient IoT healthcare sensor nodes*. In: **IEEE International Circuits and Systems Symposium (ICSS)**. IEEE. p. 90-95, 2015.

MAGRANI, Eduardo. **A internet das coisas**. Ed.1. Rio de Janeiro. FGV Editora. 192p. 2018.

MARINAKIS, Vangelis, DOUKAS, Haris. *An Advanced IoT-based System for Intelligent Energy Management*. In **Buildings Sensors** 18, no. 2: 610. 2018 <https://doi.org/10.3390/s18020610>

MARTINS, Joice. Sistema de monitoramento de dados provenientes da energia Fotovoltaica através de uma plataforma IoT de aquisição e controle. **Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Ambiental**, Universidade Federal Rural da Amazônia. Belém, Pará. 80p. 2019.

MITTAL, Mamta; PANDEY, Subhash Chandra. The rudimentos of energy conservation and IoT. In: **Energy Conservation for IoT devices**. Singapura, Springer. 359p. 2019

PENG, Sheng-Lung; *et al*. *Principles of Internet of Things (IoT) Ecosystem: Insight Paradigm*. Springer. Cham, Switzerland. 636p. 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-33596-0>

SABEL, Gustavo. *et al.* Sistema de Gestão de Energia Elétrica em Salas de Aula de uma Universidade Baseado em IOT. In: **Revista de Sistemas e Computação**, Salvador, v. 7, n. 2, 385-405. 2017 <http://www.revistas.unifacs.br/index.php/rsc>

SAID, Omar et al. EMS: *An Energy Management Scheme for Green IoT Environments in IEEE Access*, vol. 8, pp. 44983-44998, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2976641.

SALES-JUNIOR, Rafael, *et al.* IoT no Monitoramento de Transformadores de Distribuição de Energia Elétrica: uma revisão sistemática. In. **Encontro de Computação do Oeste Potiguar (ECOP 2020)**. 2020. Doi: <https://periodicos.ufersa.edu.br/ecop/issue/view/238>

SALEEM, M. Usman, et al. *Design, Implementation, and Deployment of na IoT Based Smart Energy Management System*. In: **IEEE Access**. 2021. *Digital Object Identifier* 10.1109/ACCESS.2021.3070960

SALMAN, Tara; JAIN, Raj. *Networking protocols and standards for internet of things*. In **Internet of Things and Data Analytics Handbook**, Wiley, 2017, pp.215-238, doi: 10.1002/9781119173601.ch13.

SASO, Kaoru., HARA-AZUMI, Yuko. Simple Instruction-Set Computer for Area and Energy-Sensitive IoT Edge Devices. **ASAP**. 1-4. 2018. <https://doi.org/10.1109/ASAP.2018.8445085>

SEVERINO, Valdenir *et al.* Monitoramento Inteligente de Consumo Energético em Ambiente Residencial utilizando IoT. In: **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Computação Ubíqua e Pervasiva**. 2020. <https://doi.org/10.5753/sbcup.2020>

SILVA, Cleso *et al.* Uso da tecnologia Internet das coisas para gerenciamento do consumo de energia elétrica residencial. **Trabalho de Conclusão de Curso - ATCC - Faculdade UNA de Pouso Alegre**. Pouso Alegre – MG. 22p. 2021.

SMIL, Vaclav. **Energy and civilization: a history**. Cambridge, MA : The MIT Press. 552p. 2017.

SHUKLA, Manavi; BURDAK, Mandeep Singh. Reinforcement learning algorithm to reduce energy consumption in electric vehicles. In: **AI and IoT in renewable energy**. Singapura, Springer. 119p. 2021.

UNIDO - *United nations industrial development organization*. **Practical Guide for Implementing an Energy Management System**. Viena, Áustria, 2015.

WORLD ECONOMIC FORUM - **Internet of Things Guidelines for Sustainability. Future of Digital Economy and Society System Initiative**. Genebra, Suíça. 22p. 2018.

Zeadally, Sherali *et al.* *Design architectures for energy harvesting in the Internet of Things. Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 128. P2-22. 2020 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109901>

Web:

ACMQUEUE. Interview. **A conversation with Steve Furber**. 2010. Disponível em: [A Conversation with Steve Furber - ACM Queue](#). Acesso em: 09/10/2022

ARTHUR, Charles. **What is an energy management system?** *United Nations Industrial Development Organization*. 2021 Disponível em: [What is an energy management system? | UNIDO](#) Acesso em: 24/09/2022

BIÑAS, Miroslav. **Advanced Applications of IoT: Low Power**. 2018-2019. Disponível em: [1. The Problem of Power Consumption in IoT · Advanced IoT Applications \(gitbooks.io\)](#) Acesso em: 02/08/2022

CHUNG, Taddy.; BAGUR, José. **The Arduino Guide to Low Power Design**. Arduino.CC. 2022. Disponível em: [The Arduino Guide to Low Power Design | Arduino Documentation | Arduino Documentation](#) Acesso em: 13/11/2022

FULLER, J. R. **The 4 stages of an IoT architecture**. TeachBeacon, 2016 - Disponível em: <https://techbeacon.com/enterprise-it/4-stages-iot-architecture>. Acesso em: 13/07/2022

GIMENES, André; SAIDEL, Marco. **Conceitos em eficiência energética**. São Paulo. 2017. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4008334/mod_resource/content/1/Conceitos%20em%20Efici%C3%Aancia%20Energ%C3%A9tica%20-%20partes%201%20e%202.pdf Acesso em: 21/09/2022

GIRADI, Greyci. **Gestão de energia: o que é e como fazer**. Way2Blog, 2020 - Disponível em: [Gestão de energia: o que é e como fazer - Way2](#) . Acesso em: 18/09/2022

GIRADI, Greyci. **ISO 50001: tudo o que você precisa saber**. Way2Blog, 2019 - Disponível em: [ISO 50001: tudo o que você precisa saber - Way2](#) . Acesso em: 18/09/2022

THE GUARDIAN. (2017) “**Tsunami of data could consume one fifth of global electricity by 2025.**” Disponível em: [‘Tsunami of data’ could consume one fifth of global electricity by 2025 | Environment | The Guardian](#) Acesso em: 23/09/2022

