 <https://doi.org/10.56238/tecavanaborda-010>

**Luiz Fernando Pinto de Oliveira**

Mestrado em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – FEEC/UNICAMP

Instituição: Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

E-mail: luizoliveira@ieee.org

**Gabriel Ayres de Oliveira**

Bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

Instituição: Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

E-mail: g234619@dac.unicamp.br

**Flávio José de Oliveira Morais**

Doutorado em Engenharia Elétrica na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – FEEC/UNICAMP

Instituição: Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – UNESP

E-mail: flavio.morais@unesp.br

**RESUMO**

Atualmente, o mundo avança rapidamente na quarta revolução industrial, que tem como foco o desenvolvimento de sistemas ciberfísicos. Quando se busca atingir requisitos de consumo ultrabaixo em aplicações envolvendo dispositivos autoalimentados de Internet das Coisas (IoT) em cenários semiestruturados, não apenas as técnicas de captação de energia devem ser bem especificadas, mas também a própria Rede de Sensores Sem Fio (WSN). As características elétricas de cada módulo de comunicação devem ser não apenas conhecidas, mas também eficientes em geral, maximizando assim a autonomia do dispositivo IoT. Nesse sentido, este trabalho busca realizar um estudo em termos de eficiência energética de dispositivos IoT autossustentáveis no contexto de redes de comunicação sem fio.

**Palavras-chave:** Energy harvesting, Ultra-low power systems, Internet of Things.

**1 INTRODUÇÃO**

Atualmente, com o barateamento contínuo de soluções integradas que embarcam microcontroladores e rádios wireless, uma gama de diferentes dispositivos inteligentes que se conectam à internet vem sendo introduzida de maneira crescente. O custo baixo desses dispositivos permite que diversas aplicações, tanto domésticas quanto industriais, se beneficiem de sua flexibilidade. Visto que estes dispositivos estão munidos de diversos sensores, sua conexão constante permite que uma análise de dados possa ser feita em tempo real. Uma de suas aplicações está em soluções de baixo consumo, onde os dispositivos se mantêm conectados por longos períodos de tempo às suas redes, alimentados por baterias. Nesse trabalho explora-se então a maximização da longevidade deste tipo de sistema, analisando não somente técnicas de captura de energia (energy harvesting) e armazenamento de energia, como também o consumo de algumas tecnologias comuns utilizadas para Internet das Coisas (Internet of Things - IoT).

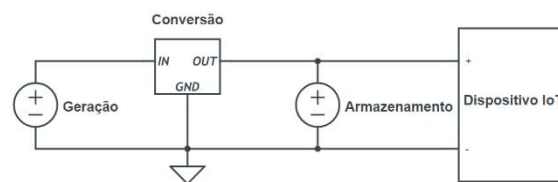
Esse trabalho está dividido da seguinte forma, na Seção II são expostas diferentes partes da colheita de energia, incluindo sua geração, armazenamento e conversão. Na Seção III são descritos os principais tipos de geradores de energia elétrica utilizados em sistemas de colheita de energia. Na

Seção IV serão introduzidas as diferentes tecnologias de rede sem fio voltadas para redes de IoT, sendo elas: Wi-SUN, Bluetooth Low Energy (BLE), LoRa e ZigBee. A Seção V apresenta a análise energética de cada uma dessas redes sem fio, e na Seção VI realizam-se as suas respectivas comparações, apresentando-se as principais conclusões na Seção VII.

## 2 SISTEMAS DE COLHEITA DE ENERGIA

Devido aos desenvolvimentos tecnológicos e à implementação de redes em toda a indústria, a IoT alcançou a todos. De forma a garantir que a longevidade planejada para as próximas décadas se realize, os sensores atuais precisarão ser cada vez menores, mais precisos e acurados, podendo ser aplicados em ambientes cada vez mais diversos. A diversidade, porém, também engloba cenários onde a energia necessária não pode ser fornecida por cabos para alimentar esses sensores e seus sistemas associados. Conforme ilustrado na Figura 1, um sistema de colheita de energia pode ser compreendido por meio da junção de três subsistemas: os geradores de energia elétrica, os circuitos conversores de tensão elétrica e os sistemas de armazenamento de energia elétrica.

Figura 1. Sistema de colheita de energia.



As subseções seguintes abordarão cada um desses subsistemas, destacando sua utilização em aplicação de IoT de ultrabaixo consumo energético.

## 3 GERADORES DE ENERGIA ELÉTRICA

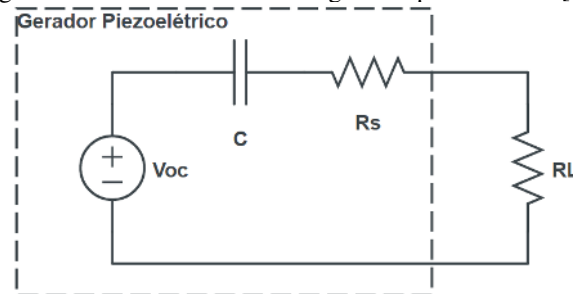
Sistemas de colheita de energia são sistemas que realizam a conversão da energia já disponível no cenário da aplicação (que se apresenta em suas diversas formas) em energia elétrica. As energias luminosa, térmica e mecânica são as principais fontes de energia comumente encontradas em cenários industriais, caracterizados por serem ambientes semiestruturados, com iluminação artificial gerada por lâmpadas além de calor e vibração gerados por máquinas elétricas. De acordo com [1]-[3], a seleção dos painéis fotovoltaicos (Photovoltaic - PV) mais adequados para os sistemas de colheita de energia em ambiente industrial está diretamente relacionada ao tipo de iluminação artificial utilizada. Por outro lado, conforme [4], os geradores termoelétricos (Thermoelectric Generator - TEG) independem das condições de iluminação locais, mas são fortemente dependentes da diferença de temperatura aplicada em suas extremidades. Mesmo que um determinado gerador seja capaz de fornecer energia elétrica

para um dispositivo, este, por sua vez, deve ser capaz de permanecer em operação mesmo em períodos de indisponibilidade de geração de energia elétrica. Nesse sentido, o desenvolvimento de sistemas de colheita de energia híbridos torna-se desejáveis, pois conforme descrito em [5], [6], essa técnica contribui não só para aumentar a disponibilidade da fonte de energia, mas também para reduzir o tempo de carga de dispositivos de armazenamento de energia.

### 3.1 GERADORES PIEZOELÉTRICOS

O desenvolvimento tecnológico para coletores de energia muitas vezes visa aumentar a potência produzida e estender a banda de frequência do sistema. Dentre as principais propostas de coletores de energia vibracional destacam-se os piezoelétricos, cujos dispositivos piezoelétricos atingiram um faturamento global de US\$ 37 bilhões em 2017 [7]. Portanto, os Coletores Piezoelétricos de Energia Vibracional (PVEH) podem resolver problemas de suprimento de energia de aplicações que possuem uma determinada frequência de vibração, como por exemplo em vagões de carga, relativos a sensores de baixo consumo [8], devido a alguns fatores como o mecanismo de conversão direta, flexibilidade em termos de configurações possíveis, fácil miniaturização [9], grande densidade de energia [10], e a alta tensão de saída quando sob estresse mecânico [11]. A Figura 2 exibe uma modelagem real de um gerador piezoelétrico.

Figura 2. Modelo de um sistema gerador piezoelétrico [12].

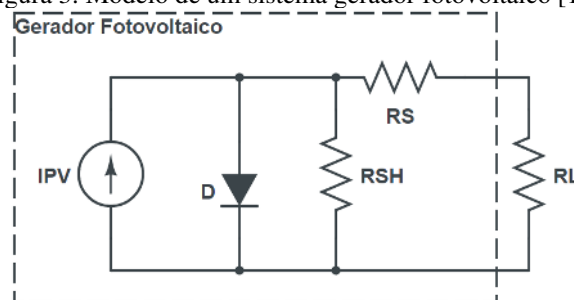


Conforme observado na Figura 2, a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) é a tensão gerada pelo sistema piezoelétrico quando este está sob estresse mecânico. Já a capacitância ( $C$ ) é específica para cada material (semicondutores) e geometria do gerador, porém seu valor é fundamental para se conhecer a frequência de ressonância do gerador. Por fim, a resistência série ( $R_s$ ) representa a resistência elétrica interna ao gerador, informação essencial para se escolher o melhor conversor CC-CC para um determinado gerador piezoelétrico. Em suma, os geradores piezoelétricos possuem grandes valores de  $V_{oc}$ , porém a frequência de vibração do sistema deve ser próxima à frequência natural do gerador para que haja máxima transferência de potência.

### 3.2 GERADORES FOTOVOLTAICOS

Os painéis fotovoltaicos realizam a transformação da energia contida em fótons, provenientes de fontes de luz, em energia elétrica. Como vantagens dos painéis fotovoltaicos destacam-se a simplicidade da estrutura física do gerador (não possuem partes móveis, material composto de elementos semicondutores) e versatilidade (pode ser fabricado de diferentes formas e tamanhos). Como desvantagens do sistema tem-se: estrutura frágil, baixa eficiência e não possui geração de energia durante os períodos noturnos. A Figura 3 exibe uma modelagem real de um gerador fotovoltaico.

Figura 3. Modelo de um sistema gerador fotovoltaico [13].



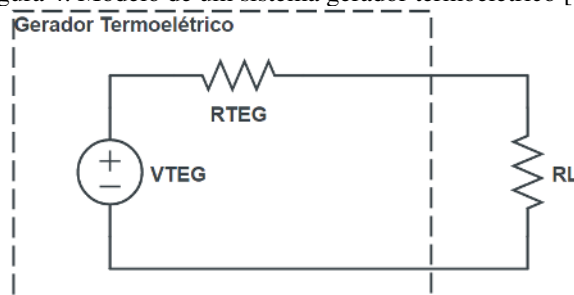
Basicamente existem dois tipos de cenários de aplicação de painéis fotovoltaicos: indoor e outdoor. Em ambientes internos (indoor) a iluminação é feita de forma artificial, com baixa potência luminosa, quando comparado com a iluminação natural (outdoor, proveniente do sol). Os geradores PV são constituídos de diodos semicondutores, cujas junções PN são expostas para receber a injeção de fótons e, assim, induzir a geração de corrente elétrica. Por esse motivo, a Figura 3 exibe uma fonte de corrente (IPV) com um diodo em paralelo. Já as resistências RSH e RS são as resistências de folha (dependente de parâmetros da física do estado sólido) e a resistência série do gerador. Diferentemente dos geradores piezoelétricos, os geradores fotovoltaicos possuem um baixo valor de  $V_{oc}$  e a corrente IPV é fortemente dependente do tipo de fonte de luz existente no cenário da aplicação.

### 3.3 GERADORES TERMOELÉTRICOS

Outra alternativa comumente encontrada na literatura está em utilizar células termoelétricas. Tais células transformam o gradiente de temperatura existente entre estruturas semicondutoras conectadas em série eletricamente e em paralelo termicamente, em energia elétrica. Diferentemente dos painéis fotovoltaicos, os geradores termoelétricos TEG podem operar de dia e/ou de noite desde que haja uma diferença de temperatura entre as suas duas superfícies de contato. A diferença de temperatura entre as junções PN induzem a geração de corrente elétrica por difusão de portadores. Porém, como desvantagens do sistema tem-se: sua estrutura é muito frágil, além de não ser capaz de

operar em locais com valores extremos de temperatura (climas desérticos e/ou de altitude), isto é, onde não há diferença de temperatura em nenhum local da aplicação. A Figura 4 exibe uma modelagem real de um gerador termoelétrico.

Figura 4. Modelo de um sistema gerador termoelétrico [14].



De acordo com a Figura 4, um TEG pode ser modelado como uma tensão de circuito aberto de  $V_{TEG}$  volts e uma resistência série interna de  $R_{TEG}$  ohms. Quanto maior for a diferença de temperatura entre as faces de um TEG, maior será sua  $V_{TEG}$ . Baseando-se na lei de Fourier da termodinâmica da condução de calor por contato, quanto maior for a área de contato entre o TEG e o material em que ele se encontra fixado e, quanto menor for a espessura deste material, maior será o fluxo de calor que percorrerá as faces do TEG. Porém, diferentemente dos geradores anteriormente descritos, os TEGs possuem os menores valores de  $V_{oc}$ , informação de grande relevância para a correta escolha de um conversor CC-CC.

### 3.4 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

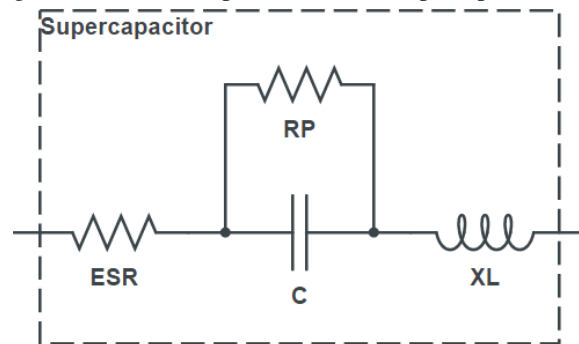
O uso de baterias, no passado, já foi a escolha mais comum para atuar como sistemas portáteis de alimentação associados a sensores, porém pilhas e baterias necessitam ser recarregadas e/ou substituídas periodicamente devido a capacidade de carga limitada. Tais características aumentam os custos de manutenção, principalmente se o dispositivo estiver constantemente ativo e/ou localizado em posições de difícil acesso [15]. Embora as baterias ainda sejam os dispositivos de armazenamento de energia comumente encontrados, elas não são a solução mais adequada para as aplicações envolvendo circuitos de ultrabaixo consumo alimentados por sistemas de colheita de energia. Isto porque, dependendo do tipo da tecnologia utilizada, as baterias podem explodir e causar incêndios em casos de sobretensão de alimentação e/ou sobretemperatura de armazenamento, o que pode ser extremamente perigoso caso sejam utilizadas em indústrias de materiais perigosos ou inflamáveis.

Os chamados supercapacitores, também chamados de ultra capacitores ou capacitores de dupla camada, por outro lado, podem ser recarregados. Além disso, possuem também alta capacidade de armazenamento de energia, baixa autodescarga, sendo também dispositivos inerentemente mais



seguros devido à sua construção. Seus eletrodos e dielétrico são baseados em carbono ativado, material que possibilita uma grande área de superfície com uma espessura muito pequena, quando submetido a um campo elétrico devido sua alta porosidade [16]. A sua principal vantagem em relação as baterias é sua capacidade de suportar picos de descargas com grandes quantidades de energia. Em contrapartida, possuem desvantagem em relação as baterias por ter o custo mais elevado [17]. A Figura 5 exibe um modelo simplificado de um supercapacitor.

Figura 5. Modelo simplificado de um supercapacitor [17].



Aplicações que utilizam transmissão a rádio, que são exemplos de aplicações pulsadas, são impactadas negativamente pelo valor da resistência equivalente série (ESR) presentes nos supercapacitores, pois a energia é dissipada por efeito joule. O valor da capacitância (C) determina a quantidade de carga elétrica que este armazenará após um ciclo de carga completo. Este valor deve ser projetado considerando os intervalos de máximo consumo de energia (como os períodos de transmissão/recepção de dados por módulos de RF) do sistema, bem como os possíveis intervalos de ausência de geração de energia elétrica pelo elemento coletor. Dessa forma, ao especificar os valores de capacitância (C), ESR, autodescarga (RP) e tensão máxima suportada pelo supercapacitor, finaliza-se o circuito eletrônico de colheita de energia.

### 3.5 CONVERSORES CC-CC

Independentemente do tipo de gerador de energia adotado, os sistemas de colheita de energia possuem um circuito eletrônico mínimo, normalmente baseado em um conversor CC-CC, que realiza a gestão de energia elétrica gerada. Portanto, para além de se regular os níveis de tensão gerados, os circuitos eletrônicos conversores de tensão são responsáveis por realizar o controle de energia entre o elemento coletor e o de armazenamento de energia. Dessa forma, os conversores de tensão CC-CC são comumente utilizados no processo de ajuste dos níveis variantes de tensão de entrada (fornecida pelo gerador de energia) para níveis fixos de tensão de saída (para a carga e/ou elemento de armazenamento de energia).

Existem diversos Circuitos Integrados (CIs) conversores CC-CC off-the-shelf, entretanto, cada qual possui requisitos de operação adequados para diferentes aplicações de coleta de energia. Como exemplo, destacam-se o CI LTC3108 projetado para operar com geradores termoelétricos, o CI BQ25505 para geradores fotovoltaicos, o CI LTC3588 para geradores piezoelétricos e o CI AEM30940 para geradores via Radiofrequência (RF).

A tensão de entrada mínima de um conversor deve ser alcançada para que o mesmo seja capaz de realizar a rotina de ajuste da tensão a ser controlada. Embora o coletor de energia seja capaz de fornecer a tensão de entrada mínima para o conversor CC-CC, uma vez que este CI é alimentado pelo próprio coletor, a primeira vez em que o CI for alimentado deve-se fornecer uma tensão de entrada mínima para que ele inicialize o seu circuito eletrônico interno. Devido a este processo ser comum a todos CIs conversores CC-CC, ele é comumente chamado de partida fria (cold start). O processo de partida fria dos conversores CC-CC não deve ser desprezado, uma vez que nesse instante os níveis de tensão de entrada mínima para sair da fria normalmente são maiores do que os níveis de tensão de entrada mínima quando o CI já está ativo. Logo, o elemento coletor deve ser capaz não só de operar na faixa de tensão de entrada do conversor CC-CC, mas também deve ser capaz de fornecer um sinal de tensão maior do que a tensão de entrada de partida fria do conversor. Por exemplo, o CI AEM10900 (projetado para operar com geradores fotovoltaicos) apesar de possuir uma tensão de entrada que opera na faixa de 50 mV a 5 V, necessita de uma tensão mínima de 380 mV para sair da etapa de partida fria.

Os limites de potência de entrada dos conversores CC-CC também devem ser atendidos, pois caso a potência de entrada seja inferior ao mínimo exigido, mesmo que o coletor forneça a tensão de entrada dentro dos limites, o conversor não irá operar. De igual forma, caso a potência de entrada seja superior à máxima potência permitida, os conversores CC-CC realizam a desconexão elétrica automaticamente para proteger o circuito contra sobretemperatura.

A impedância da fonte coletora de energia deve coincidir ou aproximar-se da impedância de entrada do conversor CC-CC, para que ocorra o casamento de impedâncias, isto é, haja a máxima eficiência na conversão. Mesmo cumprindo as especificações de operação do conversor CC-CC, a eficiência de conversão de energia deste pode impactar no desempenho geral de colheita de energia. Logo, a eficiência de conversão do CI CC-CC torna-se outro parâmetro relevante a ser considerado. À saber, a eficiência de conversão do CI LTC3108 atinge no máximo 60 %, por outro lado, o CI BQ25505 pode alcançar uma eficiência maior do que 90 %, dentro de certos limites. Visto que os geradores anteriormente descritos são diretamente impactados pelo nível de disponibilidade de energia (vibracional, luminosa e/ou térmica) presente no cenário, deve-se optar por conversores CC-CC que implementem o algoritmo que traça o ponto de máxima transferência de potência (Maximum Power Point Tracking - MPPT) continuamente. Dessa forma, o desempenho do sistema de colheita de energia

tem potencial de permanecer constante mesmo que o elemento coletor de energia não opere em sua melhor condição de operação.

Por se tratar de um circuito ativo, os CIs conversores CC-CC drenam uma corrente elétrica constante para operarem conforme o projetado, conhecida como corrente quiescente. A corrente quiescente dos componentes que constituem o conversor CC-CC deve ser contabilizada, de modo que a sua magnitude não inviabilize o fornecimento de corrente para os demais circuitos do sistema. Como exemplo, o CI MP3414 possui uma corrente quiescente de 35  $\mu\text{A}$ , por outro lado, o CI BQ25505 consome cerca de 325 nA, ou seja, drena cerca de 107 vezes menos corrente elétrica.

Embora seja desenvolvido um circuito eletrônico de colheita de energia que opere dentro das especificações ótimas do coletor de energia, conversor CC-CC e do supercapacitor, todos os demais componentes eletrônicos constituintes da aplicação a ser desenvolvida também devem ser especificados para operarem no modo de ultrabaixo consumo. Os dispositivos eletrônicos desenvolvidos para as aplicações em IoT possuem características como: possuem baixo poder de processamento e memória disponíveis, dimensões reduzidas, leves, baixo consumo e baixo custo. Assim, em se tratando de uma aplicação em IoT que possui um sistema microcontrolado como sendo a sua unidade de processamento de dados sensoriais central, este deve possuir um período de modo ativo o mínimo possível. Para alcançar a maior taxa de execução das instruções, o microcontrolador deve operar em sua máxima frequência de relógio e, imediatamente após finalizar suas rotinas, deve entrar no seu modo de menor consumo de corrente elétrica, conhecido como modo deep sleep. Neste caso, o firmware implementado deve ser energeticamente eficiente, isto é, consumir o menor número de ciclos de relógio, mantendo a mesma funcionalidade.

Atuando como elemento de comunicação entre os dispositivos microcontrolados, os módulos de RF são os elementos que consomem a maior quantidade de energia das aplicações envolvendo circuitos de ultrabaixo consumo alimentados por sistemas de colheita de energia. O tipo do protocolo de comunicação serial estabelecido entre o microcontrolador e módulo de RF também pode impactar no consumo energético. De acordo com [18], o protocolo de comunicação serial Serial Peripheral Interface (SPI), consome menos energia do que o Inter-Integrated Circuit (I2C) e o Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART) [18]. Uma técnica de redução de consumo de energia dos dispositivos que não estão sendo utilizado no momento consiste em remover a alimentação dos mesmos. Dessa forma, apenas quando for utilizar determinado CI ou módulo de RF, que se fornecem as suas respectivas tensões de alimentação.

Portanto, após instruir-se das principais características pertinentes à área de desenvolvimento de sistemas inteligentes de ultrabaixo consumo alimentados por sistemas de colheita de energia, passar-



se-á para a etapa da análise das principais tecnologias de Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) utilizadas em aplicações de IoT.

## **4 TECNOLOGIAS DE IOT**

### **4.1 Wi-SUN FAN**

O Wireless Smart Ubiquitous Network Field Area Network (Wi-SUN FAN) é um padrão aberto baseado em sua maioria na especificação IEEE 802.15.4g, contendo também partes menores de outros padrões IEEE. Com características de autoformação, a adição de novos dispositivos é fácil, além de permitir a restauração automática caso um caminho da rede falhe. Gerido pela Wi-SUN Alliance, um conglomerado de empresas cujo objetivo está em promover e desenvolver essa especificação, além de gerir a certificação de dispositivos compatíveis produzidos por múltiplas fabricantes. Em relação à sua topologia, apresenta um modo híbrido que permite conexões densas, como redes de medidores inteligentes urbanos, e também em estrela de modo a conectar dispositivos espalhados por um campo aberto por exemplo. Com taxas de transmissão de até 300 Kbps, este formato habita em bandas não licenciadas do espectro, variando conforme a região em que está sendo usado [19]. Seu alcance está na faixa dos poucos quilômetros, podendo variar com a aplicação.

### **4.2 BLE**

Com o propósito de suprir a demanda de aplicações IoT que necessitam operar sob baixo consumo de energia elétrica, curto alcance e alta taxa de transferência de dados, a Bluetooth SIG reprojeteu sua própria tecnologia para criar o protocolo de comunicação BLE. Diferentemente de suas versões anteriores que possuíam taxas de transferências de dados de até 3 Mbps, o BLE opera em no máximo 1 Mbps, porém é capaz de operar até a metade da potência do Bluetooth clássico [20]. Operando em 2,4 GHz, divide sua banda em quarenta canais, três dedicados para operar na descoberta e estabelecimento de conexão com os demais dispositivos e o restante para a troca de dados. Entretanto, o número máximo de dispositivos ativos na rede depende da aplicação, podendo em alguns casos chegar a cinquenta dispositivos simultaneamente [21].

### **4.3 LoRa**

A tecnologia Long Range (LoRa) é uma outra solução utilizada em RSSF. Trata-se de uma técnica de modulação de dispersão espectral capaz de realizar a troca de dados em longas distâncias sob baixas taxas de transferência de dados. Já o LoRaWAN refere-se ao protocolo de comunicação aberto para a classe de redes sem fio Low Power Wide Area Network (LPWAN) que faz uso da modulação LoRa (camada física), operando nas bandas ISM de 433 MHz, 868 MHz e 915 MHz [22].

Sua grande vantagem está no alcance da transmissão de dados, chegando até 10 km de distância. Porém, para alcançar tais distâncias a taxa de transferência máxima é limitada em até 27 kbps (LoRa) ou 50 kbps (FSK). De acordo com [23], embora o desempenho do LoRaWAN seja determinado pelas camadas PHY e de MAC, os regulamentos do ciclo de trabalho máximo (definido como a porcentagem máxima de tempo durante o qual um dispositivo final pode ocupar um canal) nas bandas de frequências não-licenciadas, Industrial, Scientific and Medical (ISM) surgem como um fator limitante. Para que não haja a sobrecarga da rede e, portanto, reduzir a probabilidade de erros de transmissão, para uma rede com 5000 dispositivos finais em média cada dispositivo deve gerar até 2 pacotes de dados por dia [24]. Logo, para aplicações que necessitam de uma maior demanda de pacote de dados por dia, o LoRaWAN torna-se incapaz de ser utilizado.

#### 4.4 ZigBee

O IEEE desenvolveu um padrão para dispositivos de comunicação de dados usando transmissões de RF de curto alcance com baixa taxa de dados, baixa potência e baixa complexidade em uma rede de área pessoal sem fio (WPAN), conhecido como IEEE 802.15.4 [25]. Baseadas no padrão IEEE 802.15.4, diversas empresas de desenvolvimento de tecnologias de comunicação sem fio implementaram protocolos de comunicação para a troca de dados em uma RSSF. A ZigBee Alliance é uma associação de empresas de diferentes segmentos do mercado que desenvolveu protocolos de comunicação baseados na camada física e de link de dados do padrão IEEE 802.15.4 com a intenção de se tornar uma plataforma universal para a implementação de RSSF. O protocolo, denominado de ZigBee, possui vantagens como a segurança na transmissão de dados, suporte para RSSF complexas, baixo consumo de energia e com capacidade de endereçar até 65536 dispositivos na mesma rede. Embora o tamanho máximo teórico de uma rede Zigbee seja superior a 65000 nós, na prática, os problemas relacionados à largura de banda e atrasos nos quais o crescimento da rede pode incorrer devem ser considerados, restringindo o seu horizonte de aplicações, além disso ele possui taxa de transmissão de dados máxima de até 250 kbps (limite estipulado pelo padrão IEEE 802.15.4) [26]. O ZigBee também opera em 2,4 GHz, dentro da banda ISM. Para aplicações industriais críticas o tempo de atraso é um fator muito importante da rede, sendo que para o ZigBee o atraso na transmissão das mensagens não é causado pelo aumento da carga útil (conhecida como payload), mas sim na criação de seus cabeçalhos [27].

## 5 ANÁLISE ENERGÉTICA DAS TECNOLOGIAS IOT

### 5.1 MÉTODO

De maneira a realizar uma análise comparativa bem embasada entre as diferentes tecnologias presentes nesse trabalho, faz-se necessária uma métrica comum que possa ser derivada dos diversos estudos energéticos feitos separadamente em cima das mesmas.

De modo a comparar as tecnologias de forma fácil e direta, será usada uma métrica matemática generalizada, visto que as medições e os métodos variam de maneira substancial na literatura para os diferentes tipos de tecnologias. A solução utilizada aqui está em ponderar os valores de potência para três períodos substanciais onde essas tecnologias se encontram: período ocioso, transmissão e recepção. Também se levou em conta a vazão de bits dentro desse período. Na Equação (1),  $C_{bit}$  denota o custo energético de um bit.  $P_S$ ,  $P_{TX}$  e  $P_{RX}$  são respectivamente a potência em repouso (idle), transmissão e recepção, e  $n_{bits}$  o número de bits transmitidos no total por janela.

$$C_{bit} = \frac{0,99 \times P_S + 0,01 \times (P_{TX} + P_{RX})}{n_{bits}} \quad (1)$$

Dessa forma as seções seguintes avaliarão tais parâmetros elétricos de cada tecnologia de RSSF, especificando todas as considerações necessárias para se realizar as análises comparativas.

### 5.2 AVALIAÇÃO DO PADRÃO BLE

Para o estudo do BLE, assume-se que os dispositivos já estão no modo de conexão, o que implica que todos os procedimentos anteriores no modo de advertising não serão considerados. Todas as informações aqui utilizadas foram tiradas dos datasheets dos respectivos transceivers [28]-[32].

Tabela I - Características dos módulos BLE comerciais

Transceiver	TX [mA]	RX [mA]	Sleep [μA]	Bytes Úteis	Taxa [Kbps]
E72-2G4M02S2B/4.2	11,00	2,00	0,2	251	1000
BT40E/5.2	3,2	2,60	0,9	251	2000
BT680T/5.0	11,5	6,60	0,1	251	921,6
E73-2G4M08S1CX/5.0	17,05	8,27	2	251	1000
nRF52862/5.0	5,30	11,0	0,3	251	1000
Média					

	9,6 1	6,2 34	0,7	251	1184, 32
--	----------	-----------	-----	-----	-------------

Conforme exposto na Tabela I, o consumo de corrente durante a transmissão de dados difere do consumo durante a recepção, e essa informação é de extrema importância pois, dependendo da aplicação (somente transmissão ou somente recepção de dados) a autonomia do sistema será drasticamente afetada. Ao olhar para as taxas de transmissão nota-se que todos os módulos alcançam altas taxas de dados, até 1 Mbps. Dependendo de qual protocolo de comunicação que será utilizado para se comunicar com o módulo (UART, I2C ou SPI), esses altos valores de taxa podem impactar na eficiência energética do sistema. Pensando nesse tipo de situação, alguns fabricantes de microcontroladores e de rádios desenvolveram uma UART de baixo consumo, chamada de LPUART.

### 5.3 AVALIAÇÃO DO PADRÃO LoRa

Os dispositivos LoRa podem ser separados em classe A, B e C, cuja diferença está no consumo de energia devido ao tamanho de sua janela de recepção. Com o foco em eficiência, nesse trabalho serão estudados somente os dispositivos de classe A, que são aqueles mais energeticamente eficientes [33].

A conexão usando modulação LoRa apresenta taxas de dados (Data Rate, DR) que variam de 0,3 Kbps a 5 Kbps (DR0 à DR5) [34]. A conexão também permite que alguns parâmetros sejam configurados, como a largura de banda (BW), fator de espalhamento (SF) e taxa de codificação (CR). Para uma conexão de maior eficiência, porém de menor alcance, ainda é útil em um ambiente industrial por exemplo, esses valores são definidos como descrito na Tabela II. Geralmente para os diferentes hardwares, combinações desses parâmetros são definidas de antemão e podem ser acessadas usando diferentes modos disponíveis para o usuário.

Tabela II - Parâmetros de configuração do rádio LoRa para maximizar o seu desempenho

BW [kHz]	SF	CR
500	7	4/5

A Tabela III apresenta os dados de diferentes rádios LoRa, no cenário de menor consumo energético [34]-[36]. No seu fim também está uma média dos resultados, de maneira a encontrar um valor comum.

Tabela III - Características dos módulos LoRa comerciais

Transceiver	TX [mA]	RX [mA]	Sleep [ $\mu$ A]	Bytes Úteis	Taxa [Kbps]
RN2483	32,9	14,2	9,9	64	300
MTDOT-868-XI-SMA	26	12	30,9	64	21,9
Nemeus-MM002	20	11,7	2	64	40
HM-TRLR-LF/HFS	33	13	1,5	64	17,35
SX1276	29	10,8	1	64	37,5
<b>Média</b>					
	28,18	12,34	9,06	64	1184,32

Ao analisar os dados de consumo de corrente elétrica de diferentes rádios LoRa, nota-se que, ainda que haja pequenas variações entre os rádios, o consumo médio de corrente dos mesmos é superior ao consumo médio dos transceivers dos BLEs.

## 6 AVALIAÇÃO DO PADRÃO Wi-SUN FAN

O padrão Wi-SUN FAN sofre da falta de dados sobre suas características e análises mais aprofundadas sobre seu consumo. Dessa forma, a análise aqui será baseada nas informações disponíveis nos datasheets [37]-[39].

Tabela IV - Características dos módulos Wi-SUN FAN comerciais

Transceiver	TX [mA]	RX [mA]	Sleep [ $\mu$ A]	Bytes Úteis	Taxa [Kbps]
CC1312R	24,9	5,8	0,85	250	1000
CC1352P7	63	5,8	1	250	500
CC1200	35	23	8	250	1250
<b>Média</b>					
	40,97	11,53	3,28	250	916,67

Conforme exposto na Tabela IV, apesar do Wi-SUN FAN ser especificado para operar em ambiente com elevados níveis de interferência (como o encontrado em ambientes industriais), o



consumo médio de TX do Wi-SUN FAN é cerca de 326,32 % maior do que o consumo médio de TX do BLE. Porém parte desse consumo está atrelado ao consumo dos circuitos de Power Amplifier (PA) e Low Noise Amplifier (LNA) presentes em tecnologias de médio e longo alcance, como é o caso do Wi-SUN FAN.

## 6.1 AVALIAÇÃO DO PADRÃO ZIGBEE

De modo a comparar com os dispositivos equivalentes de outros protocolos, os dispositivos utilizados são aqueles chamados de dispositivos de borda (end-devices), caracterizados por serem Reduced Function Devices (RFD) e que estariam se comunicando com um dispositivo gateway operando como Full Function Device (FFD). A Tabela V exibe a comparação de alguns dos principais transceivers utilizados para se implementar uma RSSF do tipo ZigBee. Todos os dados da Tabela V estão presentes em [40].

Tabela V - Característica dos módulos ZigBee comerciais

Transceiver	TX [mA]	RX [mA]	Sleep [ $\mu$ A]	Bytes Úteis	Taxa [Kbps]
deRFmega128 - 22M00	12,7	17,6	1	102	250
MRF24J40MA	23	19	2	102	250
CC2430	25	27	0,9	102	250
ANY900	33	17	6	102	250
RC2400	34	24	1	102	250
<b>Média</b>					
	25,54	20,92	2,18	102	250

No caso dos transceivers ZigBee o consumo médio de TX e RX são semelhantes, conforme a Tabela V. Com exceção do LoRa, todas as demais RSSF possuem soluções da fabricante Texas Instruments, cuja característica principal de seus transceivers é possuir baixo consumo em modo sleep.

## 7 COMPARAÇÃO DAS TECNOLOGIAS

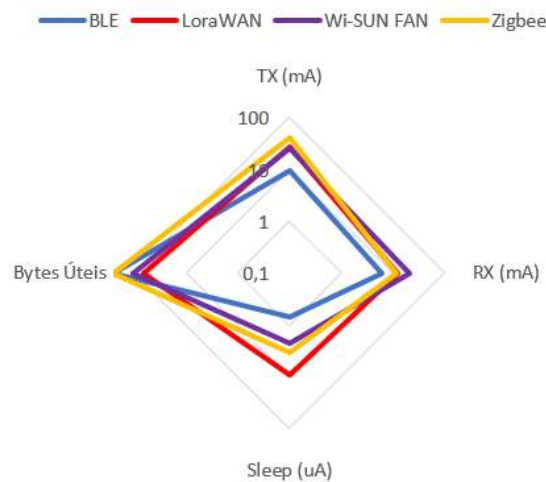
Usando a metodologia descrita na Seção V.A, o cálculo da Equação (1) é então aplicado para todas as médias encontradas para os padrões escolhidos. Todos os transmissores aqui utilizados têm tensão nominal de 3,3 V, sendo assim, sua potência pode ser calculada por  $P=U \times I$ . Este resultado é mostrado na Tabela VI.

Tabela VI - Comparação usando a métrica para 1000 bits em Watts

BLE	ZigBee	Wi-SUN FAN	LoRa WAN
12,7	17,6	1	102

O gráfico da Figura 6 mostra uma comparação entre os dados médios de cada uma das RSSF. Todos os dados presentes estão em escala logarítmica.

Figura 6. Comparação visual entre os dados das RSSFs.



Visualmente, considerando uma mesma quantidade de bytes úteis, uma maior área dos losangos correspondentes a cada uma das RSSF indica um maior consumo energético. Mesmo os bytes úteis não sendo os mesmos, ainda sim pode-se observar que o consumo energético está bem representado pelo gráfico.

## 8 CONCLUSÃO

O maior problema quando se comparam diferentes RSSF está em suas vastas diferenças em relação aos diferentes modos de operação, nos passos que definem as sequências de inicialização de conexão além das sequências de transferência e recepção de dados nas janelas especificadas. Assim, uma comparação detalhada se torna difícil de ser realizada. Independente disto, pode-se encontrar como resultado que o Bluetooth Low Energy é o mais eficiente entre as tecnologias aqui propostas.

Portanto, quando se é desejado alcançar os requisitos de ultrabaixo consumo em aplicações envolvendo dispositivos de IoT autoalimentados em cenários semiestruturados, não somente o sistema de energy harvesting deve ser bem especificado, mas também a escolha da RSSF a ser utilizada deve ser feita com base nas características elétricas individuais de cada módulo transceptor, aumentando-se, portanto, a autonomia do dispositivo de IoT.

## **AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil (161957/2022-6).

## REFERÊNCIAS

- X. Ma, s. Bader, and b. Oelmann, “characterization of indoor light conditions by light source classification,” *iee sensors journal*, vol. 17, no. 12, pp. 3884–3891, 2017.
- X. Yue, m. Kauer, m. Bellanger, o. Beard, m. Brownlow, d. Gibson, c. Clark, c. Macgregor, and s. Song, “development of an indoor photovoltaic energy harvesting module for autonomous sensors in building air quality applications,” *iee internet of things journal*, vol. 4, no. 6, pp. 2092–2103, 2017.
- A. Nasiri, s. A. Zabalawi, and g. Mandic, “indoor power harvesting using photovoltaic cells for low-power applications,” *iee transactions on industrial electronics*, vol. 56, no. 11, pp. 4502–4509, 2009.
- A. D. Dos santos, s. C. De brito, a. V. Martins, f. F. Silva, and f. Morais, “thermoelectric energy harvesting on rotation machines for wireless sensor network in industry 4.0,” in 2021 14th *iee international conference on industry applications (induscon)*, 2021, pp. 694–697.
- N. Kanagaraj, “photovoltaic and thermoelectric generator combined hybrid energy system with an enhanced maximum power point tracking technique for higher energy conversion efficiency,” *sustainability*, vol. 13, no. 6, 2021. [online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/6/3144>
- M. K. Mishu, m. Rokonuzzaman, j. Pasupuleti, m. Shakeri, k. S. Rahman, s. Binzaid, s. K. Tiong, and n. Amin, “an adaptive te-pv hybrid energy harvesting system for self-powered iot sensor applications,” *sensors*, vol. 21, no. 8, 2021. [online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/8/2604>
- K. Uchino, “piezoelectric energy harvesting systems—essentials to successful developments,” *energy technology*, vol. 6, no. 5, pp. 829–848, 2018. [online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ente.201700785>
- F. Qian, w. Zhou, s. Kaluvan, h. Zhang, and l. Zuo, “theoretical modeling and experimental validation of a torsional piezoelectric vibration energy harvesting system,” *smart materials and structures*, vol. 27, no. 4, p. 045018, mar 2018. [online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1361-665x/aab160>
- W. Wei, y. Hu, q. Wu, x. Zhao, j. Zhang, and y. Zhang, “an air brake model for longitudinal train dynamics studies,” *vehicle system dynamics*, vol. 55, no. 4, pp. 517–533, 2017.
- Z. Chen, j. He, j. Liu, and y. Xiong, “switching delay in self-powered nonlinear piezoelectric vibration energy harvesting circuit: mechanisms, effects, and solutions,” *iee transactions on power electronics*, vol. 34, no. 3, pp. 2427–2440, 2019.
- J. Wang, g. Li, m. Zhang, g. Zhao, z. Jin, k. Xu, and z. Zhang, “energy harvesting from flow-induced vibration: a lumped parameter model,” *energy sources, part a: recovery, utilization, and environmental effects*, vol. 40, no. 24, pp. 2903–2913, 2018.
- T. J. Kazmierski and s. Beeby, *energy harvesting systems*. Springer, 2011.
- M. Alhawari, m. H. Saleh, and m. Ismail, *energy harvesting for self-powered wearable devices*. Springer, 2018.
- S. Priya and d. J. Inman, *energy harvesting technologies*. Springer, 2009.

N. Tran, m. H. Ghayesh, and m. Arjomandi, “ambient vibration energy harvesters: a review on nonlinear techniques for performance enhancement,” *international journal of engineering science*, vol. 127, pp. 162–185, 2018. [online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020722517327830>

A. Cultura and z. M. Salameh, “modeling, evaluation and simulation of a supercapacitor module for energy storage application,” in *proceedings of the international conference on computer information systems and industrial applications*. Atlantis press, 2015/, pp. 876–882. [online]. Available: <https://doi.org/10.2991/cisia-15.2015.235>

T. Kovaltchouk, b. Multon, h. Ben ahmed, j. Aubry, and p. Venet, “enhanced aging model for supercapacitors taking into account power cycling: application to the sizing of an energy storage system in a direct wave energy converter,” *ieee transactions on industry applications*, vol. 51, no. 3, pp. 2405–2414, 2015.

K. Mikhaylov and j. Tervonen, “evaluation of power efficiency for digital serial interfaces of microcontrollers,” in *2012 5th international conference on new technologies, mobility and security (ntms)*, 2012, pp. 1–5.

W.-s. Alliance, “white paper: comparing iot networks at a glance. How wi-sun fan stacks up against lorawan and nb-iot,” *wi-sun alliance, tech. Rep.*, 2019. [online]. Available: <https://wi-sun.org/wp-content/uploads/wisun-alliance-comparing-iot-networks-2019-nov-a4.pdf>

K. E. Jeon, j. She, p. Soonsawad, and p. C. Ng, “ble beacons for internet of things applications: survey, challenges, and opportunities,” *ieee internet of things journal*, vol. 5, no. 2, pp. 811–828, april 2018.

J. A. Afonso, a. J. F. Maio, and r. Simoes, “performance evaluation of bluetooth low energy for high data rate body area networks,” *wireless personal communications*, vol. 90, no. 1, pp. 121–141, sep 2016. [online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11277-016-3335-4>

A. I. Ali, s. Z. Partal, s. Kepke, and h. P. Partal, “zigbee and lora based wireless sensors for smart environment and iot applications,” in *2019 1st global power, energy and communication conference (gpecom)*. Ieee, june 2019, pp. 19–23.

F. Adelantado, x. Vilajosana, p. Tuset-peiro, b. Martinez, j. Melia-segui, and t. Watteyne, “understanding the limits of lorawan,” *ieee communications magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 34–40, sep. 2017.

D. Bankov, e. Khorov, and a. Lyakhov, “on the limits of lorawan channel access,” in *2016 international conference on engineering and telecommunication (ent)*. Ieee, nov 2016, pp. 10–14.

Ieee, “ieee standard for low-rate wireless networks,” *ieee std 802.15.4-2015 (revision of ieee std 802.15.4-2011)*, pp. 1–709, april 2016.

A. Proskochylo, a. Vorobyov, m. Zriakhov, a. Kravchuk, a. Akulynichev, and v. Lukin, “overview of wireless technologies for organizing sensor networks,” in *2015 second international scientific-practical conference problems of infocommunications science and technology (pic s t)*. Ieee, oct 2015, pp. 39–41

E. D. Pinedo-frausto and j. A. Garcia-macias, “an experimental analysis of zigbee networks,” in *2008 33rd ieee conference on local computer networks (lcn)*. Ieee, oct 2008, pp. 723–729.



- L. Chengdu ebyte electronic technology co., “e72-2g4m02s2b user manual,” chengdu ebyte electronic technology co.,ltd, tech. Rep., 2020. [online].available:<https://www.ebyte.com/en/downpdf.aspx?id=248>
- F. T. Corp., “ble 5.2, 802.15.4 modules, bt40/f/e/x/xe,” fanstel technologies corp., tech. Rep., 2021. [online]. Available: <https://static1.squarespace.com/static/561459a2e4b0b39f5cefa12e/t/6105a6225ac1744ea69c78dd/1627760164658/bt40f\ product+specifications.pdf>
- F. T. Corp., “bluefan bt680f/e/t ble 5 module,” fanstel technologies corp., tech. Rep., 2019. [online]. Available: <https://static1.squarespace.com/static/561459a2e4b0b39f5cefa12e/t/5d094951670b590001190b02/1560889682510/bluefanbt680f\ datasheets.pdf>
- L. Chengdu ebyte electronic technology co., “e73-2g4m08s1cx,” chengdu ebyte electronic technology co.,ltd, tech. Rep., 2020. [online]. Available: <https://www.ebyte.com/en/product-view-news.html?id=1320>
- N. Semiconductor, “nrf52832 product specification v1.4,” nordic semiconductor, tech. Rep., 2017. [online]. Available: <https://www.mokosmart.com/pt/bluetooth-low-energy-module-nrf52832/>
- P. S. Cheong, j. Bergs, c. Hawinkel, and j. Famaey, “comparison of lorawan classes and their power consumption,” in 2017 ieee symposium on communications and vehicular technology (scvt), 2017, pp. 1–6.
- L. Casals, b. Mir, r. Vidal, and c. Gomez, “modeling the energy performance of lorawan,” sensors, vol. 17, no. 10, 2017. [online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/10/2364>
- L. Hope microelectronics co., “hm-trlr-lf/hfs series 100mw lora transceiver,” hope microelectronics co.,ltd, tech. Rep., 2006. [online]. Available: [www.image.micros.com.pl/dane\techniczne\auto\rf\%20hm-trlr-hfs470.pdf](http://www.image.micros.com.pl/dane\techniczne\auto\rf\%20hm-trlr-hfs470.pdf)
- S. Corporation, “sx1276/77/78/79 - 137 mhz to 1020 mhz low power long range transceiver,” semtech corporation, tech. Rep., 2020. [online]. Available:<https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#e0000000jelg/a/2r0000001rbr/6efvzuorppokffvaf\fkpgp5kzjinyiabqcpqh9qsje>
- T. Instruments, “cc1312r simplelink™ high-performance sub-1 ghz wireless mcu,” texas instruments, tech. Rep., 2020. [online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1312r.pdf>
- T. Instruments, “cc1352p7 simplelink™ high-performance multi-band wireless mcu with integrated power amplifier,” texas instruments, tech. Rep., 2021. [online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1352p7.pdf>
- T. Instruments, “cc1200 low-power, high-performance rf transceiver,” texas instruments, tech. Rep., 2014. [online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1200.pdf>
- M. S. Mahmoud and a. A. Mohamad, “a study of efficient power consumption wireless communication techniques/ modules for internet of things (iot) applications,” advances in internet of things, vol. 06, no. 02, p. 19–29, 2016.