



Associação Propagadora Esdeva
Centro de Ensino Superior de Juiz de Fora – CES/JF
Curso de Engenharia Elétrica
Artigo do Projeto de Iniciação Científica

TÍTULO: CAPTURA DE ENERGIA AMBIENTE: O POTENCIAL DOS SINAIS DE RADIOFREQUÊNCIA

*Alunos: Daniel T. da Silva, João V. N. Cardoso; Anapaula P. Guimarães;
Pedro A. R. Mendes*

Prof. Orientador: Victor Fernandes

Centro de Ensino Superior de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e Telemetria

RESUMO

Esse trabalho visa analisar estatisticamente e quantitativamente a potência e a taxa de dados de um sistema de comunicações que opera utilizando somente a energia provinda dos sinais de radiofrequência sem fio presentes no ambiente. Baseado em um banco de dados de amostras de ruído aditivo sem fio que compreende a faixa de frequência de 0 a 100 MHz, foi observado que a potência captada pode ser suficiente para alimentar dispositivos de baixo consumo de potência. Além disso, as taxas de dados obtidas através desse sistema são suficientes para suportar aplicações de redes inteligentes, Internet das Coisas e Indústria 4.0.

Palavras-chave: Eficiência energética. *Energy harvesting*. Taxa de dados alcançável. Sistema de comunicações. Internet das Coisas.

ABSTRACT

This paper aims to statistically and quantitatively analyze the power and data rate of a communications system that operates using only the energy from ambient wireless radio frequency signals. Based on a database of wireless additive noise samples comprising the frequency range from 0 to 100 MHz, it has been observed that the captured power may be sufficient to feed low-power-consumption devices. Moreover, the obtained data rates by this system are sufficient to support smart grids, the Internet of Things, and Industry 4.0 applications.

Keywords: Energy efficiency. Energy harvesting. Achievable data rate. Communications system. Internet of Things.

1 INTRODUÇÃO

A eficiência energética é cada vez mais fundamental nos dias atuais, e provavelmente é uma das atividades mais importantes quando falamos de aproveitamento de energia elétrica. O avanço industrial faz com que a demanda por energia aumente cada vez mais, ao passo que o consumo de energia elétrica de uma determinada população é proporcional ao seu crescimento, por isso a exploração de novos meios e formas para atingir uma elevada eficiência energética se torna extremamente importante. Entre as formas de geração de energia elétrica existem os combustíveis fósseis, que são recursos finitos, e as fontes sustentáveis que podem ser obtidas através de hidrelétricas, energia solar, eólica, entre outras. A eficiência energética é a utilização racional de energia e consiste da relação entre a quantidade de energia empregada em uma atividade e aquela disponibilizada para a sua realização. (ABESCO, [s.d]).

Uma das técnicas mais recentes no contexto de reaproveitamento energético é a colheita de energia (em inglês, *Energy Harvesting* - EH), que é baseada na captura de pequenas quantidades de energia que são desperdiçadas tais como calor, luz, som, vibração ou movimento (IOP, 2019). O EH pode ser utilizado, por exemplo, para alimentar dispositivos de redes de sensores sem fio, que serve de suporte às mais diversas aplicações de baixa taxa de dados tais como às redes inteligentes (do inglês, *smart grids*), cidades inteligentes (do inglês, *smart cities*), Internet das Coisas e Indústria 4.0. Além disso, a necessidade de manutenção destes dispositivos é reduzida, uma vez que a recarga ou a troca de bateria demora mais para ocorrer.

Outra forma de aplicar o conceito de EH é a captação de energia através dos sinais de radiofrequência (RF)¹ presentes no ambiente através das ondas eletromagnéticas. As ondas eletromagnéticas dos sinais de informação providas dos sistemas de telecomunicações que realizam comunicação de dados podem ser capturadas e convertidas em energia elétrica, ótima para uma ampla gama de dispositivos eletrônicos de baixo consumo de potência. Essa energia está

¹ Radiofrequência: é o espectro de frequência compreendido no intervalo de 3 kHz a 300 GHz.

prontamente disponível na forma de onda eletromagnética, tais quais as ondas das estações de transmissão de rádio AM e FM, assim como daquelas de muitos dispositivos sem fio que transmitem sinais ao nosso redor, como estações rádio base celulares e redes locais sem fio de curta distância. A chave para coletar essa energia disponível no ambiente ocorre através de um dispositivo receptor capaz de receber os sinais sem fio disponíveis no ambiente, e com um circuito capaz de converter a potência do sinal recebido em energia elétrica da maneira mais eficiente possível (BROWNE, 2016). Uma das vantagens da utilização do EH de sinais de RF é o prolongamento da vida útil ou até mesmo a extinção de baterias de dispositivos eletrônicos de baixo consumo de potência, tornando-os menos dependentes de uma alimentação externa e mais energeticamente autônomos.

Dentre os estudos na área de EH no contexto de sinais de RF, a exploração do desenvolvimento de *hardwares* para captação de energia e utilização na alimentação de dispositivos em redes de comunicações se revela realizável e eficiente, apesar da baixa taxa de transferência de energia (MISHRA, 2015). A colheita de energia por dispositivos sem fio para processamento e transmissão de informações como sensores, por exemplo, encontram rapidamente suas aplicações (NISHIMOTO, 2010; KAWAHARA & ASAMI, 2010). Circuitos integrados que comandam pequenos sensores corporais sem fio de baixa potência através de EH foram projetados para aplicações médicas (ZHANG, 2010). Sistema de retransmissão de energia e informação em redes cooperativas sem fio alimentado pela própria rede também são uma aplicação de EH (CHALISE, 2012; ZHANG & AMIN, 2012). Por fim, a diversidade entre os meios com e sem fio foi explorada para fins de EH de sinais de RF (FERNANDES, 2018). Nesse trabalho, foi mostrado que o uso paralelo de ambos os meios de comunicação, resulta no aumento da taxa de dados alcançável de um sistema híbrido de comunicação de dados.

Diferentemente dos trabalhos anteriores, neste artigo abordaremos um estudo sobre EH em sinais de RF considerando a faixa de frequência de 0 a 100 MHz, que engloba aplicações como as rádios de transmissão AM, FM, estações de TV, entre outras. Baseado em um banco de dados com amostras de sinais medidos, o trabalho visa quantificar e analisar estatisticamente o uso de EH em sinais de RF, através da potência, em bandas de frequência contidas na faixa de frequência mencionada anteriormente. Também, essa potência é reutilizada para alimentar

dispositivos transmissores em um sistema de comunicação de dados sem fio, e a taxa de dados alcançável desse sistema é calculada.

A Seção 2 aborda o referencial teórico deste artigo, onde é introduzida uma contextualização do mesmo, as definições matemáticas e o banco de dados utilizado. A Seção 3 detalha a metodologia utilizada e como foi conduzido o desenvolvimento da pesquisa, enquanto que a Seção 4 apresenta os resultados numéricos obtidos no trabalho. Por fim, a conclusão é apresentada na Seção 5.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Um sistema de telecomunicações engloba um conjunto de subsistemas interconectados que comunicam uns com os outros através de um processamento entre o envio e o recebimento de mensagens de informação. O processo de comunicação é visto como um fluxo linear unidirecional que cessa quando a mensagem chega a seu destino. Como mostrado na Figura 1, a fonte produz a mensagem, um aparelho transmissor a codifica em sinal e a envia por um canal (meio de comunicação), na forma de onda eletromagnética, até um aparelho receptor. Este decodifica o sinal e reconstrói a mensagem, possibilitando que o destinatário receba o que lhe foi passado (BORBA, BRITO & CANDIDO, 2016).

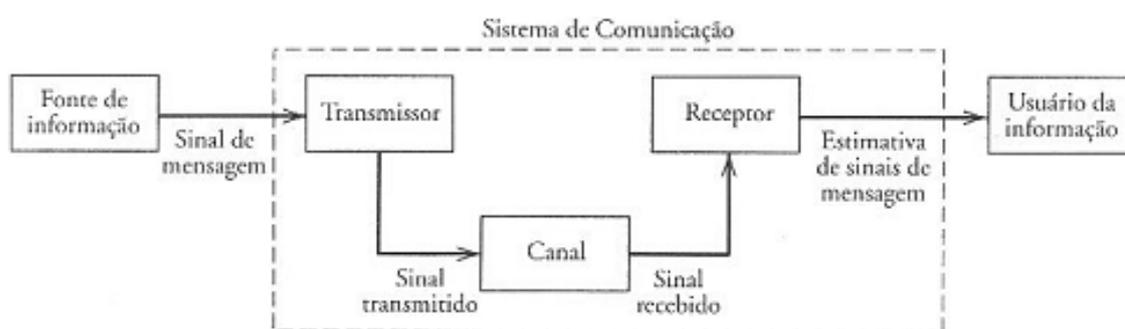


Figura 1: Elementos de um sistema de comunicação

Visto a parte funcional de um sistema de comunicação, podemos ressaltar dois aspectos importantes citados como recursos principais: a potência transmitida, que é a potência média do sinal transmitido e a largura de banda do canal, sendo definida como a banda de frequência reservada para a transmissão do sinal de mensagem no meio de comunicação.

Em telecomunicações, a comunicação de dados através de sinais sem fio está sujeita a distúrbios. Esses distúrbios são causados pelo meio de comunicação (ar) e podem ser divididos em duas partes principais: i) a atenuação e o atraso sofrido pelo sinal e ii) o ruído aditivo. O ruído é um sinal indesejável que perturba a recepção e o processamento do sinal no receptor durante uma comunicação de dados e é uma característica intrínseca do meio de comunicação e da banda frequência adotada. Logo, o ruído aditivo sem fio é um sinal interferente justaposto ao sinal principal (onda eletromagnética que contém a mensagem de informação) que pode causar falhas na comunicação e que não tem utilidade para fins de comunicação de dados. É justamente esse ruído que é aproveitado para a geração de energia através da técnica de EH.

O sistema estudado é mostrado na Figura 2. Nesse sistema, o processo ocorre a partir da captação das ondas eletromagnéticas, pela antena receptora (transdutor), dos sinais de RF emitidos pelas diversas estações de transmissão espalhadas pelo ambiente. Após sua captação, o casamento de impedância² é utilizado para que se tenha o mínimo possível de energia desperdiçada entre a antena e o armazenador de energia. Para a alimentação do dispositivo eletrônico (dispositivo 1) é necessária uma onda contínua e o sinal de entrada é uma onda alternada de tensão. Sendo assim, o retificador realiza o processo de retificação dessa onda, ou seja, ele transforma a onda alternada para uma contínua, após o casamento de impedância. Por fim, o capacitor realiza o papel de armazenador de energia.

A eficiência da conversão RF-CC, ou seja, da conversão da potência da onda eletromagnética na entrada da antena até o armazenamento no capacitor é dado por η , onde $1 > \eta > 0$. Após realizar a captação da energia, o dispositivo 1 reutiliza essa energia para realizar comunicação de dados sem fio com o dispositivo 2. Assume-se que o dispositivo 1 já tenha o circuito necessário para realizar essas etapas, logo, ele é autônomo para executar a sua função de EH e transmissão de dados, como representado no diagrama de blocos. O meio de comunicação (canal) entre os dispositivos 1 e 2 é o ar e tem frequência central de 5,8 GHz, que é uma frequência no espectro não-licenciado e livre para comunicação de dados (TELECO, c2019).

² Casamento de Impedância: conexão de circuitos diferentes, ou seja, com impedâncias distintas de forma a obter o máximo de rendimento dos circuitos.

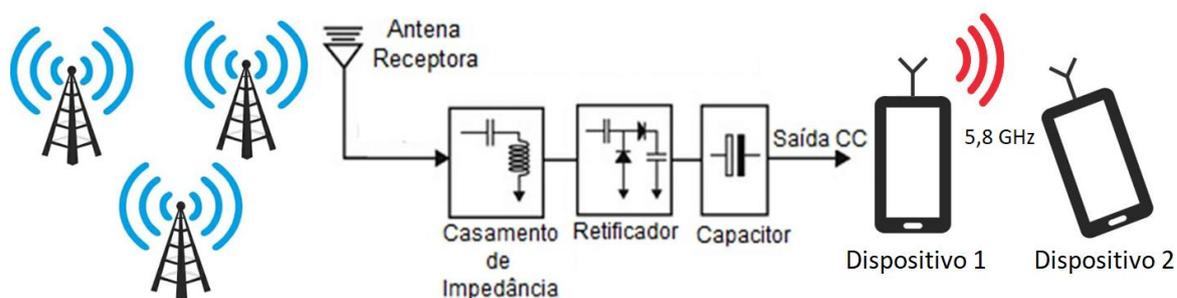


Figura 2: Dispositivo 1 realiza EH e comunica com o dispositivo 2.

Nesse trabalho, utilizamos um banco de dados composto por 29×10^6 amostras de ruído aditivo sem fio medidas em 12 residências distintas na cidade de Juiz de Fora. Essas amostras foram coletadas em diferentes horários por uma placa de aquisição acoplada a uma antena omnidirecional (AMADO, L. R., 2012). Como a placa de aquisição, utilizada para coleta de dados, possui uma frequência de amostragem de 200 MHz, os dados amostrados contemplam a banda de frequência de 0 a 100 MHz. Isso ocorre devido ao teorema de amostragem ou teorema de Nyquist-Shannon, que prevê que qualquer sinal deve ser amostrado com uma frequência, pelo menos, duas vezes maior que a maior frequência do sinal original, conferindo maior confiabilidade na reconstrução do sinal original (LATHI, 2012). Devido as características da antena, a banda de frequência é reduzida para o intervalo de 1 a 100 MHz.

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada na realização deste trabalho é como se segue:

a) Mapeamento das bandas de frequência

Antes de começarmos a analisar as amostras de ruído aditivo sem fio, verificamos junto às informações da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) sobre as aplicações de cada faixa de frequência para podermos selecionar diferentes bandas de frequências de interesse dentro do espectro de frequência medido (ANATEL, 2017).

A Figura 3 ilustra um exemplo de atribuição de faixas de frequências entre 73 a 108 MHz no Brasil, onde pode ser visto que a faixa de frequências de 73 a 76 MHz

é utilizada nas aplicações de telefonia fixa e móvel, que serão detalhadas mais a frente (ANATEL, 2018). A banda de frequência de 74,6 MHz a 74,8 MHz é utilizada em estações de radioastronomia, sendo o ramo da astronomia baseado na recepção de ondas eletromagnéticas para estudos de elementos de origem cósmica (ANATEL 2012). A faixa de frequência de 74,8 MHz a 75,2 MHz é utilizada em aplicações de radio navegação aeronáutica, que tem como principais motivadores a necessidade de harmonizar a destinação das faixas de radiofrequências para o Serviço de Radionavegação Aeronáutica no Brasil, além de possibilitar o licenciamento de estações de radionavegação pela Infraero (ANATEL, 2016).

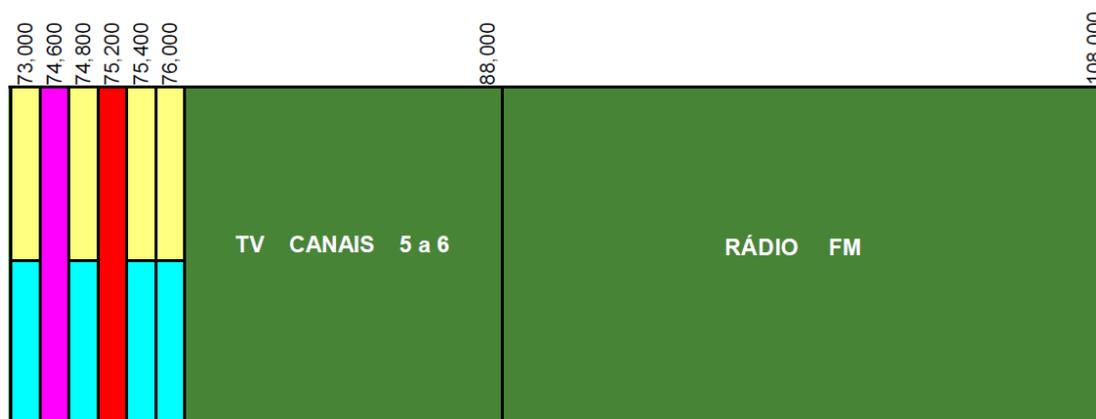


Figura 3: Exemplo da atribuição de faixas de frequências (73-108 MHz) no Brasil pela ANATEL.

b) Determinação das bandas de frequência de interesse

Várias aplicações para as bandas de frequência no intervalo de 1 a 100 MHz foram identificadas, dentre elas destacam-se: 1 a 12 MHz – transmissão da rádio AM e móvel aeronáutico, que é o serviço de telecomunicações móvel, de interesse restrito, explorado em âmbito nacional e internacional, no regime privado e sem exclusividade, que possibilita a transmissão e recepção de informações por meio de radiocomunicação entre Estações de Aeronave e Estações Aeronáuticas, bem como entre estas e outras estações, incluindo dispositivos de segurança e salvamento (ANATEL, 2015); 12 a 50 MHz - serviços de telecomunicação móvel marítimo e serviços de telefonia fixo e móvel; 50 a 88 MHz – canais 2 a 6 de TV e radiodifusão; 88 a 100 MHz - rádio FM. A partir destas as bandas de interesse, as análises em termos de potência e taxa de dados foram realizadas.

Tabela 1: Aplicações e Potência Coletada das Bandas de Frequência de Interesse

Banda de Frequência	f_{inf}, f_{sup}	Aplicação
B1	[1, 12) MHz	Radio AM e Móvel Aeronáutico
B2	[12, 50) MHz	Móvel marítimo, Fixo e Móvel
B3	[50, 88) MHz	Canais de TV 2-6 e Radiodifusão
B4	[88, 100] MHz	Rádio FM

A banda B1 tem como principais aplicações os sistemas de transmissão de rádio utilizando a modulação por amplitude (do inglês, AM) e o serviço móvel aeronáutico, citado anteriormente.

Entre os serviços em destaque da banda B2 temos o móvel marítimo que é o serviço de telecomunicações móvel, de interesse restrito, explorado em âmbito nacional e internacional, no regime privado e sem exclusividade, que possibilita a transmissão e recepção de informações por meio de radiocomunicação entre estações costeiras, portuárias e móveis marítimas, bem como entre estas e outras estações, incluindo dispositivos de segurança e salvamento (ANATEL, 2015). O serviço de telefonia fixa como o sistema de telecomunicações que, por meio de transmissão de voz e de outros sinais, destina-se à comunicação entre pontos fixos determinados, utilizando processos de telefonia. São modalidades do serviço telefônico fixo comutado destinado ao uso do público em geral o serviço local, o serviço de longa distância nacional e o serviço de longa distância internacional e o sistema de telefonia móvel que permite a comunicação entre aparelhos celulares ou entre um aparelho celular e um telefone fixo; e possibilita, inclusive, o acesso à internet em banda larga (ANATEL, 2015).

As aplicações destacadas na banda B3 são canais de TV de 2 a 6 destinado à transmissão de sons e imagens, por ondas radioelétricas. A televisão digital é a tecnologia que utiliza transmissão, recepção e processamento digitais, podendo exibir programas por meio de equipamento digital ou de aparelho analógico acoplado a uma Unidade Receptora Decodificadora. Ainda dentro da banda B3 temos o serviço de radiodifusão que é a modalidade de serviço de radiodifusão sonora em frequência modulada operado em baixa potência e com cobertura restrita, outorgado a fundações e associações comunitárias, sem fins lucrativos, com sede na localidade de prestação do serviço.

Por fim, a banda B4 engloba somente os sistemas de transmissão de rádio utilizando a modulação por frequência (do inglês, FM). Vale ressaltar que essa aplicação vai até a frequência de 108 MHz, porém os dados medidos (ruído aditivo sem fio) não ultrapassam a frequência de 100 MHz.

c) Estimação da densidade espectral de potência

Para o processamento e obtenção dos resultados deste artigo utilizamos o MATLAB, que é um *software* interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico. Com os dados amostrados, através do MATLAB estimamos a Densidade Espectral Potência (DEP) dessas amostras e obtivemos a potência coletada em cada banda de frequência de interesse.

A DEP é uma função real positiva de frequência variável associada com um processo estocástico, ou uma função determinística do tempo, que possui dimensão de potência por Hertz (Hz). Geralmente é chamada apenas por espectro de potência do sinal. Intuitivamente, a DEP possibilita a análise do sinal ou ruído no domínio da frequência e, conseqüentemente, auxilia no cálculo da potência do mesmo. A DEP é estimada através da aplicação do método de Welch (WELCH, P., 1967).

d) Quantificação da potência em cada banda de interesse

Para calcular a potência de uma determinada banda de frequência de um dado sinal, basta realizar a integral na faixa de frequência de interesse. Matematicamente:

$$P = \int_{f_{inf}}^{f_{sup}} S(f) df,$$

em que a DEP do ruído é dada por $S(f)$ e f_{inf} e f_{sup} representam as frequência inferior e superior da banda de frequência que se deseja calcular a potência, respectivamente.

e) Cálculo da taxa de dados alcançável

Utilizando as potências coletadas para fins de comunicação de dados sem fio, a taxa de dados alcançável da comunicação sem fio entre os dispositivos 1 e 2 foi calculada. Essa taxa de dados é dada por (FERNANDES, 2018):

$$C = \max_{\rho(f)} \int_B \log_2 \left(1 + \frac{\rho(f)|H(f)|^2}{S_V(f)} \right) df,$$

onde B é a largura de banda da comunicação; $\rho(f)$ é a máscara de potência de transmissão em que $P = \int \rho(f) df$; $H(f)$ é resposta em frequência do canal; e $S_V(f)$ é a DEP do ruído aditivo da comunicação sem fio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises da seção de resultados consideram que a potência está sendo continuamente e consecutivamente capturada do ruído aditivo sem fio, ao longo do tempo. Além disso, assumimos que a informação de estado do canal completa está disponível e que a alocação ótima de potência é aplicada em $\rho(f)$ por meio da técnica de *water-filling* (CIOFFI, 2008). Os parâmetros utilizados na simulação foram $\eta = 0,5$ (o circuito tem uma eficiência de 50% na conversão RF-CC), $B = 500$ kHz, $S_V(f) = -100$ dBm/Hz. Para analisar os resultados obtidos, dBm foi a unidade escolhida por ser uma unidade bastante utilizada em sistemas de telecomunicações. Essa unidade de medida expressa a potência absoluta de uma medição logarítmica e é dada por

$$P_{\text{dBm}} = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1\text{mW}} \right),$$

em que P_{dBm} é a potência em dBm e P é a potência em Watts.

Na Figura 4 são apresentados os valores mínimo, médio e máximo da DEP na faixa de frequência entre 0 e 100 MHz. Nessa figura, é possível constatar as melhores bandas de frequência para captura de potência. Podemos observar que a curva DEP média possui picos de potência que se aproximam de -49 dBm/Hz no intervalo de 0 a 10 MHz e -47dBm/Hz entre 70 a 80 MHz. Além dos picos

mencionados, foi possível constatar que a maior concentração deles na curva DEP média compreende o intervalo de 90 a 100 MHz que é a faixa de frequência da rádio FM. Sendo assim, essa banda de frequência é a que apresenta maior concentração de potência para um dado intervalo de frequências.

Quanto a curva de DEP mínima, nota-se que ela apresenta um valor quase constante e igual a cerca de -130 dBm/Hz enquanto que o valor máximo está concentrado entre 90 e 100 MHz (curva DEP máxima), com aproximadamente -47 dBm/Hz. Em todas as três curvas, é possível observar que o pico dos valores de potência está concentrado na banda de frequência onde se encontram as aplicações das rádios AM e FM.

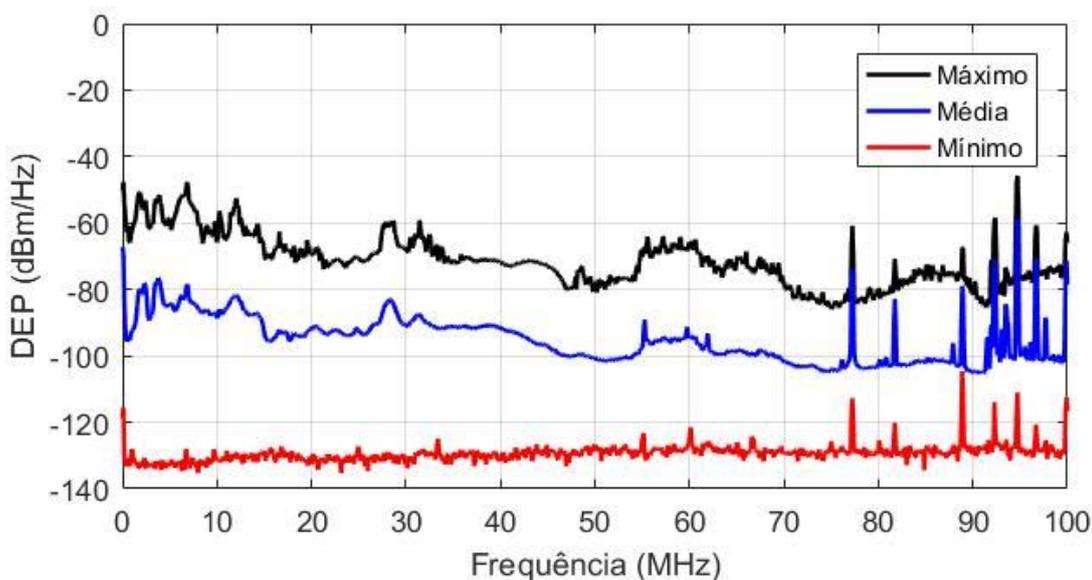


Figura 4: DEP das amostras de ruído aditivo sem fio na banda de frequência de 0 a 100 MHz.

A função distribuição comutativa complementar (do inglês, *Complementary Cumulative Distribution Function* - CCDF) é uma função que demonstra a probabilidade de ocorrência, no eixo das ordenadas, dos valores dispostos no eixo das abscissas (potência em dBm). Nesse contexto, a Figura 5 tem por finalidade demonstrar a performance probabilística da potência de cada uma das bandas de interesse mencionadas anteriormente. As curvas estão classificadas de acordo com sua frequência em ordem crescente, sendo BT o espectro que compreende toda a faixa de frequência analisada (1 a 100 MHz). Na curva B1, o valor máximo de potência está em 12 dBm e o valor mínimo em -45 dBm. Na curva B2, a máxima é 6

dBm com mínimo de -46 dBm. Já em B3, o máximo e o mínimo são, respectivamente, 2 dBm e -44dBm, enquanto que em B4, a máxima potência é 6 dBm e a mínima, -39 dBm. A banda total (BT) possui o maior valor de potência em aproximadamente 13 dBm e o menor valor de potência em - 28 dBm.

Por meio da análise desta figura, a melhor banda de frequência, ou seja, aquela com a maior probabilidade de entregar uma potência mais elevada é a BT. Entretanto, sua utilização pode ser de difícil implementação, pois o circuito da Figura 2 seria mais complexo, justamente por compreender uma maior largura de banda no espectro de frequência. Desconsiderando BT, as melhores bandas de frequência de interesse são B4 e B1, respectivamente.

Ainda sobre a Figura 5, podemos explorar uma performance de alta probabilidade (0,8) e comparar a potência de todas as curvas. Em B1, a potência obtida com probabilidade de 0,8 é - 34 dBm, em B2, -37 dBm, em B3 temos - 37dBm, o valor da potência em B4 é -24dBm e finalmente em BT, temos - 18 dBm. Esses números confirmam que as duas melhores bandas de frequência de interesse são B4 e B1, que compreendem os espectros de frequência das rádios FM e AM, respectivamente.

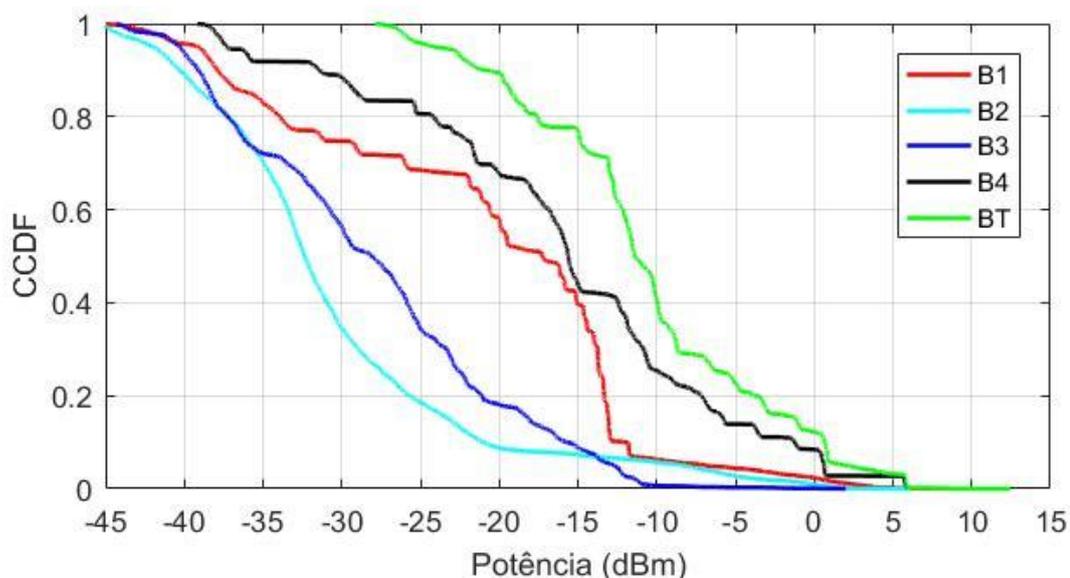


Figura 5: CCDF da potência captura de cada uma das bandas de frequência interesse.

A Figura 6 mostra as taxas de dados alcançáveis através da potência obtida de cada banda de frequência interesse. Em análise às curvas do gráfico podemos notar que as taxas máximas alcançadas, em ordem decrescente, são: 3470 kbps

(BT); 2926 kbps (B4); 3452 kbps (B1); 2603 kbps (B3); 2948 kbps (B2). A banda total (BT), demonstrada pela curva em verde no gráfico, por se tratar da maior banda de frequência, alcança a maior taxa de dados máxima, seguido das bandas B4 e B1, indicadas pelas curvas preta e vermelha, respectivamente.

Ainda analisando as curvas do gráfico, para uma probabilidade igual a 0,8, obtém-se os valores de 525 kbps utilizando a BT, 156 kbps com a B4, 38 kbps através da banda B1, 15 kbps com a B3 e 13 kbps com a B2. Podemos verificar que em ambos casos, tanto em termos de potência obtida quanto em termos de taxa de dados, que a melhor banda de frequência de interesse é a banda B4, onde se encontram as estações de transmissão de rádio FM.

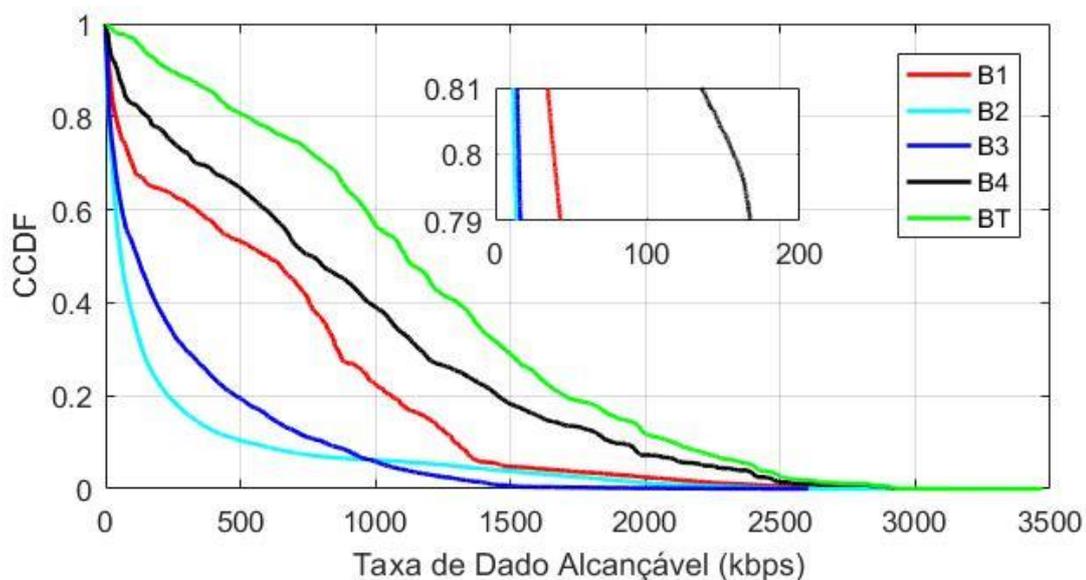


Figura 6: CCDF da taxa de dados alcançável de obtida pela potência captura de cada uma das bandas de frequência de interesse entre os dispositivos 1 e 2 da Figura 2.

Apesar das taxas de transferência dados serem relativamente baixas em comparação a sistemas de banda larga, estas são suficientes para suportar a comunicação de dados entre dispositivos e aplicações de baixo consumo de potência ou baixa taxa de dados, como por exemplo, aqueles utilizados em *smart grids*, *smart cities*, Internet das Coisas e Indústria 4.0.

5 CONCLUSÃO

De maneira geral, este artigo dedicou-se ao estudo do aproveitamento da energia de ruído sem fio provindo dos sinais de RF presentes no ambiente para fins de alimentação de dispositivos de comunicação de baixo consumo de potência. Através um banco de dados, coletados na cidade de Juiz de Fora, foram selecionadas determinadas banda de frequência de interesse de acordo com suas aplicações junto à ANATEL.

Baseado no banco dados, foi possível estimar a potência destes sinais de ruído através da DEP e a taxa de dados alcançável de uma comunicação sem fio por um dispositivo alimentado exclusivamente pela potência estimada. Os resultados numéricos mostraram que esse sistema de comunicação sem fio pode atingir de dezenas até centenas de quilo bits por segundo de taxa de dados, o que é suficiente para suprir demandas de aplicações de *smart grids*, *smart cities*, Internet das Coisas e Indústria 4.0.

REFERÊNCIAS

ABESCO - Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia. **O que é Eficiência Energética?(EE)** [s.d.]. Disponível em: <http://www.abesco.com.br/pt/o-que-e-eficiencia-energetica-ee>. Acessado em: novembro de 2019.

AMADO, L. R. et al., **Spectrum sensing for powering power line communications**. In: XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Setembro de 2012.

ANATEL. **Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Frequências no Brasil**, 2017. Disponível em: <https://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documento.asp?numeroPublicacao=347196>. Acessado em: novembro 2019.

ANATEL. **Serviço Móvel Marítimo**, 2015. Disponível em: <https://www.anatel.gov.br/setorregulado/servico-movel-maritimo>. Acessado em: novembro 2019.

ANATEL. **Telefonia Fixa**, 2015 Disponível em: <https://www.anatel.gov.br/setorregulado/telefonia-fixa-outorga>. Acessado em: novembro 2019.

ANATEL. **Telefonia Móvel**, 2015. Disponível em: <https://www.anatel.gov.br/setorregulado/telefonia-movel-outorga>. Acessado em: novembro 2019.

ANATEL. **Atribuição de Faixas de Frequência no Brasil**, 2018. Disponível em: <https://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documento.asp?numeroPublicacao=349401>. Acessado em novembro de 2019.

ANATEL. **Publicada destinação de faixa para radionavegação aeronáutica**, 2016. Disponível em: <https://www.anatel.gov.br/institucional/mais-noticias/982-publicada-destinacao-de-faixa-para-radionavegacao-aeronautica>. Acessado em: novembro 2019.

ANATEL. Glossário de Termos da Anatel. **Estação de Radioastronomia**, 2012. Disponível em: <https://www.anatel.gov.br/legislacao/glossario-anatel?catid=5&faqid=993>. Acesso em: novembro de 2019.

BROWNE, J. **Harvesting Energy from RF Sources. Microwaves & RF**, 2016. Disponível em: <https://www.mwrf.com/systems/harvesting-energy-rf-sources>. Acessado em: outubro de 2019.

CIOFFI, J. M. **Chapter 4: Multi-channel modulation**. 2016. Disponível em: <http://web.stanford.edu/group/cioffi/book/chap4.pdf>. Acessado em: maio de 2019.

D. MISHRA *et al.* **Smart RF energy harvesting communications: Challenges and opportunities**. *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 4, pp. 70–78. 2015.

CHALISE, B. K.; ZHANG, Y. D.; AMIN, M. G. **Energy harvesting in an OSTBC based amplify-and-forward MIMO relay system**, in Proc. IEEE ICASSP. 2012

FERNANDES, V. et al. **A hybrid power line/wireless dual-hop system with energy harvesting relay**. IEEE Internet of Things Journal, v. 5, n. 5, p. 4201-4211, Oct. 2018.

IOP – Institute of Physics. **Energy Harvesting**, c2014. Disponível em: <https://www.iop.org/resources/energy/index.html>. Acesso em: outubro de 2019.

LATHI, B. P. **Sistemas de Comunicações Analógicas e Digitais Modernos: Amostragem e Conversão Analógico-Digital**, v.1, n.4, p. 232-248, 2012.

NISHIMOTO, H.; KAWAHARA, Y.; ASAMI, T. **Prototype Implementation of Ambient RF Energy Harvesting Wireless Sensor Network**. *IEEE Sensors*, 2010.

TELECO, Inteligência em Telecomunicações. **Redes Wi-Fi I: Espectro de Frequência ISM**, c2019.

Disponível em: https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredeswifi1/pagina_5.asp. Acessado em: novembro 2019.

WELCH, P. **The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectral: A method based on time averaging over short, modified periodograms**, *transactions on Audio and Electroacoustics*, v.15, n.2, p. 70-73, 1967.

ZHANG, X. et al. **An Energy-Efficient ASIC for Wireless Body Sensor Networks in Medical Applications**. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, v. 4, n. 1, pp.11–18, 2010.