

Otimização do Tempo de Recarga com Transmissão de Energia sem Fio Usando Beamforming Analógico Baseado nas Estatísticas do Canal

Victoria Dala Pegorara Souto, Osmel Martínez Rosabal, Samuel Montejo-Sánchez,
Onel Luis Alcaraz López, Richard Demo Souza e Hirley Alves

Resumo— Transmissão de energia sem fio é uma tecnologia chave para o futuro da Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of things*), permitindo sua operação ininterrupta. Neste trabalho, propomos uma nova abordagem visando minimizar o tempo total de recarga de energia do sistema enquanto atendemos à restrição de energia mínima de cada dispositivo IoT. Para resolver esse problema, o projeto do *beamforming* analógico no *power beacon* (PB) é realizado considerando apenas o conhecimento estatístico do canal (S-CSI, do inglês *statistical channel state information*). Além disso, consideramos que os dispositivos IoT podem coletar energia enquanto os vizinhos estão sendo carregados. A partir dos resultados obtidos, verifica-se que a proposta reduz o tempo de recarga de energia consideravelmente quando comparada com a abordagem onde os dispositivos IoT são carregados independentemente e em que assume-se o conhecimento perfeito da CSI.

Palavras-Chave— Transmissão de energia sem fio, Internet das coisas (IoT), Beamforming.

Abstract— Wireless energy transfer is a key technology for the future Internet of Things (IoT), enabling uninterrupted operation. In this work, we propose a novel approach to minimize the power recharging time while meeting a minimum harvested energy constraint at each IoT device. To solve this problem, the analog beamforming design at the power beacon (PB) is carried out considering only statistical channel state information (S-CSI). In addition, we consider that the IoT devices can harvest energy when the neighboring devices are being charged. From the simulation results, we can verify that the proposed approach can considerably reduce the recharging time when compared to an approach where the devices are independently recharged and perfect CSI knowledge is assumed.

Keywords— Wireless energy transfer, Internet of things (IoT), Beamforming.

I. INTRODUÇÃO

O número de dispositivos de Internet das coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) cresceu incrivelmente nos últimos anos. Esse fenômeno é motivado pelo número de aplicações em diferentes verticais, tais como cidades inteligentes, saúde, segurança, transporte e indústria. O número de dispositivos IoT conectados representa um desafio em termos de alimentação de

energia, pois as soluções atuais são baseadas em mecanismos com fio ou por bateria que são problemáticas em termos de custo, impacto ambiental e para a implantação massiva de dispositivos [1]. Portanto, o desenvolvimento de tecnologias de transmissão de energia é relevante para a plena implantação das futuras redes IoT, as quais têm como objetivo garantir conectividade massiva ilimitada e sustentável [1].

Para esse fim, a tecnologia de transmissão de energia sem fio (WET, do inglês *Wireless Energy Transfer*), baseada em sinais de radiofrequência (RF), é considerada uma alternativa viável para alimentar dispositivos IoT de forma contínua e estável sem a necessidade de fios [1]. WET elimina a necessidade de troca de baterias, diminuindo custos financeiros e ambientais, além de estender o tempo de vida do dispositivo. WET também permite casos de uso inovadores, como operação completamente livre de bateria.

Um dos principais desafios dos sistemas WET é o projeto do *beamforming* no *power beacon* (PB), visto que o PB pode ser equipado com múltiplas antenas, sendo possível apontar o feixe de energia para direções espaciais desejadas [2]–[6]. Para realizar o projeto do *beamforming* no PB é comum considerar alguma forma de informação do estado do canal (CSI, do inglês *channel state information*) para maximizar a transferência de energia. No entanto, a aquisição da CSI é um desafio para cenários práticos visto que requer quantidades significativas de tempo e energia dos dispositivos IoT, o que pode até mesmo anular os ganhos de *beamforming* de energia obtidos a partir do uso de múltiplas antenas no PB [3].

Visando superar as limitações impostas pela aquisição da CSI em sistemas WET, novos esquemas de projeto de *beamforming* sem considerar CSI no PB ou apenas considerando o conhecimento estatístico do canal (S-CSI, do inglês *statistical CSI*) foram recentemente propostos em [2]–[6]. Mais especificamente, em [5] foi proposto um método de projeto de *beamforming* para sistemas WET considerando apenas o conhecimento das estatísticas médias do canal visando alimentar de forma justa um conjunto de dispositivos IoT. Em [2], os autores propuseram uma abordagem denominada “*Random Phase Sweeping with Energy Modulation/Waveform*” (RPS-EMW) a qual não prevê conhecimento da CSI no PB, pois considera que as antenas são “burras” e transmitem sinais com mudança de fase para induzir flutuações rápidas em um canal sem fio de desvanecimento lento. Ademais, em [3], [4] foram propostos e analisados diferentes esquemas de projeto de *beamforming* sem considerar CSI no PB, demonstrando

V. D. P. Souto, Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí-MG, e-mail: victoria.souto@inatel.br; O. M. R., O. L. A. López e H. Alves, Centre of Wireless Communications (CWC), University of Oulu, Finland, e-mail: {osmel.martinezrosabal, onel.alcarazlopez, hirley.alves}@oulu.fi; S. Montejo-Sánchez, Programa Institucional de Fomento a la Investigación, Desarrollo e Innovación, Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago, Chile, e-mail: smontejo@utem.cl; R. D. Souza, Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, e-mail: richard.demo@ufsc.br.

que um PB pode alimentar eficientemente um grande número de dispositivos IoT próximos, considerando o seu desempenho em canais de desvanecimento Rice. Por fim, em [6] foi proposto um novo esquema de projeto de *beamforming* considerando o conceito de antena rotativa. O método proposto em [6] não considera CSI no PB e supera todos os esquemas livres de CSI de última geração em um cenário em que um PB equipado com um arranjo linear de antenas alimenta um grande conjunto de dispositivos IoT.

Motivados pelos desafios acima e pelas vantagens dos sistemas WET, consideramos um sistema com um PB equipado com múltiplas antenas para alimentar múltiplos dispositivos IoT. Porém, uma nova abordagem para minimizar o tempo total de carregamento de energia dos dispositivos IoT, considerando uma restrição de energia mínima, é proposta. Devido a seu menor custo e consumo do que versões digitais [7], consideramos o projeto de um *beamforming* analógico baseado apenas no conhecimento da S-CSI no PB. Ademais, visando otimizar o tempo de recarga dos dispositivos, consideramos que estes podem coletar energia quando os vizinhos estão sendo carregados. Embora diversos trabalhos na literatura tenham investigado a otimização de sistemas WET [3]–[6], [8], [9] e o projeto de *beamforming* considerando apenas S-CSI no PB [5], até onde sabemos, este é o primeiro trabalho na literatura que avalia a influência dos dispositivos vizinhos no tempo total de carregamento do sistema. Portanto, as principais contribuições deste trabalho são: (i) desenvolvemos uma nova abordagem para minimizar o tempo de carregamento de energia para cada dispositivo IoT com base no projeto de *beamforming* analógico considerando apenas S-CSI; e (ii) demonstramos que, em um cenário específico, é possível reduzir consideravelmente o tempo de carregamento total do sistema permitindo que os dispositivos IoT coletem energia enquanto seus vizinhos estão sendo carregados.

Notação: Letras minúsculas em itálico como a denotam variáveis, letra minúscula em negrito \mathbf{a} representa um vetor e \mathbf{a}_k denota o k -ésimo elemento do vetor \mathbf{a} . Além disso, $(\cdot)^T$ é o transposto, $(\cdot)^H$ o transposto conjugado, $|\cdot|$ é o valor absoluto e $\|\cdot\|$ a norma.

II. MODELO DO SISTEMA TÍPICO

Considere o modelo do sistema ilustrado na Fig. 1, com um PB equipado com um arranjo linear uniforme (ULA, do inglês *Uniform Linear Array*) com N antenas e K dispositivos IoT de antena única. Neste trabalho consideramos o *beamforming* analógico no PB, portanto, apenas um feixe é gerado. Dessa forma, o sistema típico considera o carregamento de apenas um dispositivo por vez, com um *beamforming* otimizado para este dispositivo, multiplexando os dispositivos no tempo. Assim, ignorando a potência do ruído¹, supondo o carregamento do k -ésimo dispositivo, o sinal recebido é dado por

$$y_k = \sqrt{\beta_k} \mathbf{\Psi}_k \mathbf{h}_k^H s_k, \quad (1)$$

¹Em sistemas WET, o desempenho depende da energia disponível na entrada do dispositivo *energy harvesting* (EH), que precisa ser na ordem de sub- μ W considerando dispositivos EH de alta sensibilidade. Portanto, o impacto do ruído é praticamente nulo e pode ser desconsiderado [2].

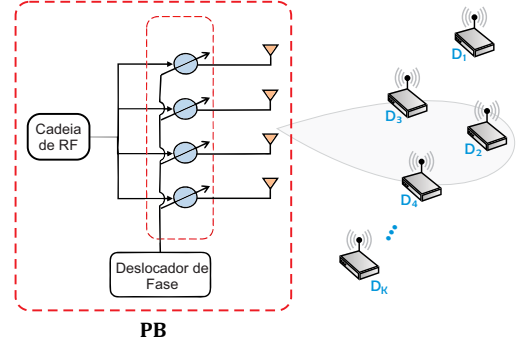


Fig. 1: Modelo do sistema, onde o PB está equipado com N antenas. Considera-se *beamforming* analógico no PB, portanto, apenas um feixe é gerado por vez.

onde β_k é o ganho médio de potência no canal entre o PB e o k -ésimo dispositivo IoT para $k \in [1, \dots, K]$, s_k denota o sinal transmitido definido por uma variável aleatória Gaussiana independente com média zero e variância unitária e $\mathbf{\Psi}_k \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ é o vetor de *beamforming* analógico no PB otimizado para o k -ésimo dispositivo, em que $\|\mathbf{\Psi}_k\|^2 = P_T$ é a potência de transmissão. Por sua vez, $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ denota o vetor de canal entre o PB e o k -ésimo dispositivo IoT, e é dado por

$$\mathbf{h}_k = \sqrt{\frac{\kappa}{1 + \kappa}} \bar{\mathbf{h}}_k + \sqrt{\frac{1}{1 + \kappa}} \tilde{\mathbf{h}}_k, \quad (2)$$

onde κ é o fator de Rice, $\bar{\mathbf{h}}_k = e^{j\phi_0} [1, e^{j\xi_1}, \dots, e^{j\xi_{N-1}}]^T \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ denota as componentes LoS (do inglês, *Line of Sight*) do vetor de canal entre o PB e o k -ésimo dispositivo IoT, sendo $\xi_n = -n\pi \sin(\theta)$ para $n \in \{1, \dots, N-1\}$ a mudança de fase média do $(n+1)$ -ésimo elemento da ULA com relação ao primeiro elemento, ϕ_0 denota a mudança de fase inicial e $\theta \in [0, 2\pi]$ é o ângulo de azimuth. Além disso, $\tilde{\mathbf{h}}_k \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ denota os componentes NLoS (do inglês, *Non Line of Sight*) do vetor de canal entre o PB e o k -ésimo dispositivo IoT modelados considerando desvanecimento *Rayleigh*. Para finalizar, o ganho médio de potência é $\beta_k = \frac{c^2}{16\pi^2 f^2 d_k^\alpha}$, onde c é a velocidade da luz, f denota a frequência da portadora, α denota o expoente de perda de percurso e d_k é a distância entre o PB e o k -ésimo dispositivo IoT.

A potência de RF recebida no k -ésimo dispositivo é [5]

$$P_k = \beta_k |\mathbf{\Psi}_k \mathbf{h}_k^H|^2. \quad (3)$$

Por sua vez, a energia coletada no k -ésimo dispositivo é definida pela relação não-linear [10]

$$\Phi_k = \tau_k \left[\frac{\Gamma_k - \mu\Omega}{1 - \Omega} \right], \quad (4)$$

onde τ_k denota o tempo de carregamento de energia para o k -ésimo dispositivo IoT, $\Omega = \frac{1}{1 + e^{ab}}$ denota uma constante que garante uma resposta zero-entrada/zero-saída, onde a e b são constantes relacionadas às especificações do circuito [10]. Além disso, μ é a potência máxima coletada no dispositivo IoT quando o circuito do dispositivo está saturado. Vale ressaltar que (4) modela bem sistemas reais [10], tais como os da Powercast[®]. Ademais, consideramos o mesmo valor de Ω ,

μ , a e b para todos os dispositivos IoT. Por fim, Γ_k denota a função logística tradicional em relação a P_k [10]:

$$\Gamma_k = \frac{\mu}{1 + e^{-a(P_k - b)}}. \quad (5)$$

III. ABORDAGEM PROPOSTA

Neste trabalho, uma nova abordagem para minimizar o tempo de carregamento dos dispositivos IoT, considerando uma restrição de energia mínima, é proposta. Diferentemente do sistema típico, visando otimizar o tempo de recarga dos dispositivos, consideramos que estes podem coletar energia quando os vizinhos estão sendo carregados. Ademais, por questões práticas, consideramos o projeto de *beamforming* analógico baseado apenas no conhecimento da S-CSI no PB. As etapas da abordagem proposta são descritas a seguir.

A. Influência dos Dispositivos Vizinhos

A partir de (4) podemos calcular a energia coletada no k -ésimo dispositivo IoT quando o carregamento é feito de forma individualizada. No entanto, enquanto um dispositivo IoT é recarregado (ou seja, o PB gera um feixe direcionado a este dispositivo), alguns dispositivos vizinhos sob influência do feixe projetado para o k -ésimo dispositivo podem coletar simultaneamente uma certa quantidade de energia, o que reduzirá seu tempo de carregamento, consequentemente, reduzindo o tempo total de recarga de energia necessário para atender a todos os dispositivos. Motivados por essa possibilidade, neste trabalho analisamos a influência dos dispositivos vizinhos no tempo total de carregamento de todos os dispositivos do sistema. Assim, considerando esta possibilidade, a energia coletada pelo k -ésimo dispositivo IoT pode ser reescrita como

$$\Phi'_k = \sum_{j=1}^{k-1} \Phi_{\text{NEIG}_j} + \Phi_k, \quad (6)$$

onde Φ_{NEIG_j} denota a energia total coletada no k -ésimo dispositivo quando o j -ésimo está sendo carregado e é

$$\Phi_{\text{NEIG}_j} = \tau_j \left[\frac{\Gamma_{k,j} - \mu\Omega}{1 - \Omega} \right], \quad (7)$$

onde

$$\Gamma_{k,j} = \frac{\mu}{1 + e^{-a(\beta_k |\Psi_j \mathbf{h}_k^H|^2 - b)}}. \quad (8)$$

Repare que, em (8), $\Psi_j \mathbf{h}_k^H$ influencia o quanto o k -ésimo dispositivo pode colher de energia quando o PB utiliza um *beamforming* projetado para o j -ésimo dispositivo.

A partir de (6) pode-se verificar que o carregamento dos dispositivos IoT é sequencial, iniciando em $k = 1$ e finalizando em $k = K$, portanto, a energia computada durante o carregamento dos dispositivos IoT vizinhos (primeiro termo da equação) é definida para $j = 1$ até $j = k - 1$, sendo k o índice do dispositivo IoT que está sendo recarregado.

B. Otimização do Tempo de Recarga

O principal objetivo deste trabalho é minimizar o tempo total de carregamento de energia ($\sum_{k=1}^K \tau_k$) enquanto atende a restrição mínima de energia coletada em cada dispositivo IoT. O problema de otimização proposto é

$$\begin{aligned} & \text{Minimize}_{\{\Psi_k\}, \{\tau_k\}} \quad \sum_{k=1}^K \tau_k \\ & \text{Subject to} \quad \Phi'_k \geq E_{\min}, \\ & \quad |\Psi_{k,n}|^2 = \frac{P_T}{N}, \\ & \quad k \in \{1, \dots, K\} \text{ e } n \in \{1, \dots, N\}. \end{aligned} \quad (9)$$

onde E_{\min} é a restrição de energia mínima, considerada a mesma para todos os dispositivos IoT e $|\Psi_{k,n}|^2 = \frac{P_T}{N}$ denota a restrição de ganho constante no PB.

Para encontrar a solução ótima do problema proposto é necessário ter disponível o conhecimento perfeito da CSI no PB, o que constitui uma limitação em sistemas WET, pois a aquisição precisa da CSI requer uma grande quantidade de tempo e energia dos dispositivos IoT, tornando-se inviável na prática [4]. Portanto, neste trabalho, uma solução sub-ótima é proposta², na qual o projeto do *beamforming* analógico no PB é realizado baseado em EGT (do inglês, *Equal Gain Transmitter*) e considera apenas no conhecimento da S-CSI ($\bar{\mathbf{h}}_k$). Neste caso, Ψ_k^* é dado por

$$\Psi_k^* = \sqrt{\frac{P_T}{N}} \begin{bmatrix} \frac{\bar{h}_{k,1}}{|\bar{h}_{k,1}|} & \frac{\bar{h}_{k,2}}{|\bar{h}_{k,2}|} & \dots & \frac{\bar{h}_{k,N}}{|\bar{h}_{k,N}|} \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

Por fim, substituindo (10) em (6), o problema de otimização proposto pode ser resolvido de forma sub-ótima, levando aos seguintes tempos de carregamento

$$\tau_k^* = \left[\frac{E_{\min}(1 - \Omega)}{\Gamma_k - \mu\Omega} \right] \text{ para } k = 1, \quad (11)$$

$$\tau_k^* = \left[\frac{(E_{\min} - \sum_{j=1}^{k-1} \Phi_{\text{NEIG}_j})(1 - \Omega)}{\Gamma_k - \mu\Omega} \right] \text{ para } k > 1, \quad (12)$$

em que $\tau_T = \sum_{k=1}^K \tau_k^*$ é o tempo total de carregamento. Por fim, note que (12) depende de (7) e portanto de (8), sendo que a última requer o conhecimento de \mathbf{h}_k para sua avaliação. Como só conhecemos a S-CSI, isto não pode ser feito *a priori*. Porém, esta questão pode ser contornada facilmente durante a operação, com o k -ésimo dispositivo informando pelo canal de controle que seu carregamento foi concluído, permitindo ao PB focar no próximo dispositivo.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho consideramos o cenário ilustrado na Fig. 2 onde o PB está localizado no centro da área avaliada e R denota seu raio. Os dispositivos IoT são distribuídos uniformemente nesta área. Além disso, os resultados apresentados nessa seção foram obtidos considerando os parâmetros de simulação apresentados na Tabela I. Nesta seção, resultados

²A S-CSI pode ser obtida, por exemplo, como discutido em [11].

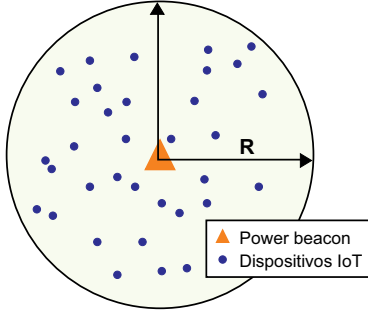


Fig. 2: Configuração do sistema avaliado.

TABELA I: Parâmetros de simulação.

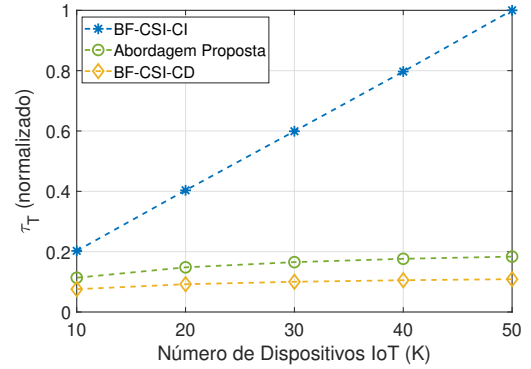
Parâmetro	Valor
Número de dispositivos (K)	20 (caso não esp.)
Número de antenas no PB (N)	10 (caso não esp.)
Raio (R)	10 m (caso não esp.)
Frequência da portadora (f) [12]	915 MHz
Fator de Rice (κ)	1.5 (caso não esp.)
Máxima potência coletada no disp. IoT (μ) [2]	10.73 mW
Const. relativas ao circuito (a) [2]	0.2308
Const. relativas ao circuito (b) [2]	5.365
Máxima potência de transmissão (P_T) [12]	3 W
Energia mín. coletada no disp. IoT (E_{\min_k})	200 μ J (caso não esp.)
Expoente de perda de percurso (α) [4]	2.7

numéricos obtidos com o método proposto são confrontados com os *benchmarks*: (i) *BF-CSI-CI*, onde a influência dos dispositivos IoT vizinhos não é considerada, ou seja carregamento independente (CI), onde apenas um dispositivo é recarregado a cada vez, enquanto o *beamforming* analógico no PB é projetado de forma ótima, considerando conhecimento perfeito da CSI; e (ii) *BF-CSI-CD*, onde a influência dos dispositivos IoT vizinhos é considerada, portando carregamento distribuído (CD), e o *beamforming* analógico no PB é projetado de forma ótima, considerando conhecimento perfeito da CSI em (10). Os resultados foram obtidos usando o *software* Matlab® e todas as curvas apresentam a média de 10^3 realizações de canal.

A. Influência do Número de Dispositivos IoT

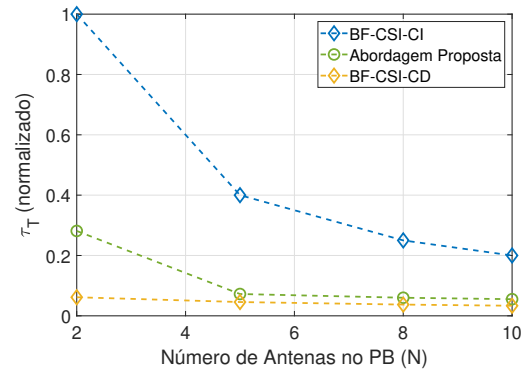
A Fig. 3 apresenta uma análise da influência do número de dispositivos (K) no tempo de carregamento do sistema (τ_T). Podemos verificar que a abordagem proposta pode reduzir τ_T em 62%, 77%, 83%, 86% e 89% para $K \in \{10, 20, 30, 40, 50\}$, respectivamente, quando comparado ao *benchmark* BF-CSI-CI, evidenciando a importância de considerar que os dispositivos podem coletar energia enquanto os vizinhos estão sendo carregados. Vale ressaltar que a abordagem proposta considera apenas o conhecimento da S-CSI no PB e a Fig. 3 considera um cenário com relativamente pouca LoS, $\kappa = 1.5$, o que demonstra a robustez da abordagem, a qual obtém um resultado próximo ao com *beamforming* ótimo no PB (BF-CSI-CD). Ademais, o desempenho relativo da abordagem proposta aumenta com K , o que é interessante para cenários massivos. Por fim, vale reforçar que reduzir o tempo total de carregamento do sistema pode reduzir a probabilidade de bloqueio dos dispositivos, visto que o sistema é capaz de realizar novas rodadas de carregamento em um menor período

de tempo, reduzindo as chances de um dispositivo não ser recarregado antes de atingir o seu limite mínimo de energia.


 Fig. 3: Influência de K em τ_T considerando $R = 10$ m e $E_{\min} = 200 \mu$ J.

B. Influência do Número de Antenas no PB

A Fig. 4 apresenta uma análise da influência de N no tempo total de carregamento de energia considerando $R = 50$ m. A redução relativa de desempenho da abordagem proposta com N pode ser explicada pelo fato de que quanto maior N , maior a diretividade do arranjo de antenas no PB e, conseqüentemente, menor energia coletada devida à influência dos dispositivos IoT vizinhos. Apesar disso, a abordagem proposta apresentou um desempenho superior ao *benchmark* BF-CSI-CI mesmo aumentando N , o que evidencia a sua aplicabilidade em cenários práticos com um grande número de dispositivos IoT e diferentes configurações do PB.


 Fig. 4: Influência de N em τ_T para $K = 30$, $R = 10$ m e $E_{\min} = 200 \mu$ J.

C. Influência dos Componentes NLoS

A Fig. 5 ilustra a influência dos componentes NLoS. Podemos verificar que ao diminuir κ , e portanto aumentar a influência dos componentes NLoS, a diferença de desempenho entre a abordagem proposta e o *benchmark* BF-CSI-CD diminui, visto a abordagem proposta considera apenas o conhecimento da S-CSI. Além disso, a abordagem proposta apresenta desempenho superior ao *benchmark* BF-CSI-CI mesmo para $\kappa = 0.5$,

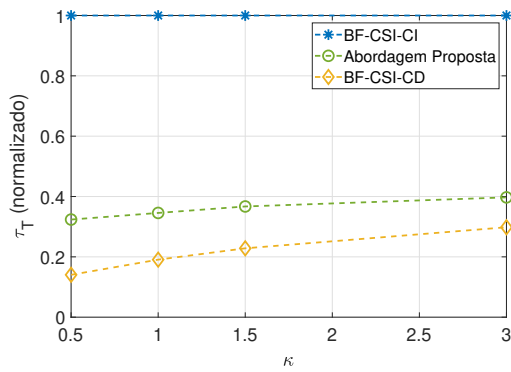


Fig. 5: Influência de κ em τ_T para $K = 20$, $R = 10$ m e $E_{\min} = 200 \mu\text{J}$.

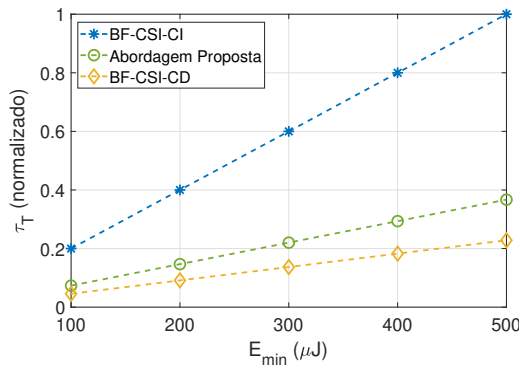


Fig. 6: Influência de E_{\min} em τ_T para $K = 20$ e $R = 10$ m.

visto que a influência dos dispositivos IoT vizinhos reduz a necessidade de conhecimento da CSI no PB. Por fim, vale ressaltar que a abordagem proposta apresenta uma redução de τ_T de pelo menos 75% para $\kappa \geq 0.5$ quando comparado com BF-CSI-CI.

D. Influência da Restrição de Energia Mínima

Por fim, a Fig. 6 apresenta uma análise da influência da restrição de energia mínima dos dispositivos IoT (E_{\min}) no tempo de carregamento total do sistema. A partir dos resultados obtidos pode-se verificar que a vantagem relativa da abordagem proposta em relação a BF-CSI-CI, onde a influência dos vizinhos não é levada em conta, aumenta com a restrição de energia mínima.

V. CONCLUSÕES

Propomos uma nova abordagem para minimizar o tempo de recarga de um conjunto de dispositivos alimentados sem fio, atendendo à restrição mínima de energia coletada em cada dispositivo. Introduzimos uma nova solução onde os dispositivos podem coletar energia enquanto os vizinhos estão sendo recarregados, utilizando um *beamforming* analógico baseado apenas na S-CSI. Resultados numéricos mostram que a abordagem proposta pode reduzir consideravelmente o tempo de carregamento do sistema em diferentes cenários.

Para trabalhos futuros pretende-se investigar diferentes abordagens de seleção de dispositivos visando minimizar o tempo

total de carregamento. Além disso, visto que a abordagem proposta considera apenas o conhecimento da S-CSI, a mesma poderia ser comparada com soluções que não exploram a CSI, como [4]. Uma comparação detalhada da abordagem proposta considerando *beamforming* analógico, digital e híbrido torna-se interessante, visto que existe um *trade-off* entre desempenho e consumo de energia no PB, o qual ainda não foi abordado na literatura. Por fim, o consumo no dispositivo, seja em mensagens de controle ou seja para ficar disponível para receber energia através do PB, também devem ser modelado.

VI. AGRADECIMENTOS

No Brasil, este trabalho foi parcialmente financiado pela RNP, com recursos do MCTIC, processo No 01245.020548/2021-07, sob o projeto Brasil 6G do Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel, Brasil, e pela Huawei, sob o projeto Formação Avançada em Redes e Sistemas de Telecomunicações, contract No PPA6001BRA23032110257684. No Chile por Projeto ANID FONDECYT Iniciación (11200659) e na Finlândia por Finnish Foundation for Technology Promotion e Academy of Finland (348515 e 346208 (6G Flagship)).

REFERÊNCIAS

- [1] O. L. A. López, H. Alves, R. D. Souza, S. Montejo-Sánchez, E. M. G. Fernández, and M. Latva-Aho, “Massive Wireless Energy Transfer: Enabling Sustainable IoT Toward 6G Era,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 11, pp. 8816–8835, 2021.
- [2] B. Clerckx, R. Zhang, R. Schober, D. W. K. Ng, D. I. Kim, and H. V. Poor, “Fundamentals of wireless information and power transfer: From RF energy harvester models to signal and system designs,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, no. 1, pp. 4–33, 2019.
- [3] O. L. A. López, H. Alves, R. D. Souza, and S. Montejo-Sánchez, “Statistical analysis of multiple antenna strategies for wireless energy transfer,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 10, pp. 7245–7262, 2019.
- [4] O. L. A. López, S. Montejo-Sánchez, R. D. Souza, C. B. Papadakis, and H. Alves, “On CSI-Free Multiantenna Schemes for Massive RF Wireless Energy Transfer,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 278–296, 2021.
- [5] O. L. A. López, F. A. Monteiro, H. Alves, R. Zhang, and M. Latva-Aho, “A low-complexity beamforming design for multiuser wireless energy transfer,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 1, pp. 58–62, 2021.
- [6] O. L. A. López, H. Alves, S. Montejo-Sánchez, R. D. Souza, and M. Latva-Aho, “CSI-free rotary antenna beamforming for massive RF wireless energy transfer,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 10, pp. 7375–7387, 2022.
- [7] S. Zhang, C. Guo, T. Wang, and W. Zhang, “ON-OFF Analog Beamforming for Massive MIMO,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 5, pp. 4113–4123, 2018.
- [8] F. A. Monteiro, O. L. A. López, and H. Alves, “Massive wireless energy transfer with statistical CSI beamforming,” *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 15, no. 5, pp. 1169–1184, 2021.
- [9] D. Zhang, Q. Wu, M. Cui, G. Zhang, and D. Niyato, “Throughput maximization for IRS-assisted wireless powered hybrid NOMA and TDMA,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 9, pp. 1944–1948, 2021.
- [10] E. Boshkovska, D. W. K. Ng, N. Zlatanov, and R. Schober, “Practical non-linear energy harvesting model and resource allocation for SWIPT systems,” *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 12, pp. 2082–2085, 2015.
- [11] Y. Alsaba, S. K. A. Rahim, and C. Y. Leow, “Beamforming in wireless energy harvesting communications systems: A survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 2, pp. 1329–1360, 2018.
- [12] Powercast, “Lifetime power energy harvesting development kit for wireless sensors - P2110-EVAL-01,” [urlhttps://powercastco.com/wp-content/uploads/2021/06/P2110-EVAL-01_Overview_2017.pdf](https://powercastco.com/wp-content/uploads/2021/06/P2110-EVAL-01_Overview_2017.pdf), 2017.