

# Impacto da Formatação de Feixes de Energia e SIC Imperfeito em Sistemas WPCN-NOMA com Garantias de QoS

Pedro Victor Martins Castro e Francisco Rafael Marques Lima

**Resumo**—A estratégia de formatação de feixes de energia, do inglês, *Energy Beamforming* (EB), realizado por uma torre transmissora de energia ou, do inglês, *Power Beacon* (PB), com múltiplas antenas em redes de comunicações energizadas por ondas de rádio, do inglês, *Wireless Powered Communication Network* (WPCN), possui um grande potencial de aplicação em redes sem fio modernas. Nestas redes, primeiramente, o PB envia energia aos dispositivos que realizam colheita de energia (fase 1). Na segunda fase, a transmissão de informações é realizada pelos dispositivos para um ponto de acesso utilizando a energia coletada na fase 1. Neste estudo, é assumido que a técnica de EB é aplicada na primeira fase para aumentar a eficiência do processo de energização dos dispositivos. Já na segunda fase, o acesso múltiplo não ortogonal, do inglês, *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA), é aplicado com o objetivo de aumentar o ganho espectral. Além disso, assume-se que o receptor do ponto de acesso na fase 2 aplica o cancelamento sucessivo de interferência, do inglês, *Successive Interference Cancellation* (SIC), de forma imperfeita. Neste estudo, é avaliado o impacto no desempenho do sistema quando se incrementa as taxas de dados requisitadas ou qualidade de serviço, do inglês, *Quality of Service* (QoS), por parte dos dispositivos móveis, assim como quando se eleva o número de antenas no PB. Os resultados alcançados por meio de simulação demonstram que o emprego de múltiplas antenas no PB proporciona um aumento na taxa de dados e na eficiência energética, além de ser capaz de aliviar os problemas relacionados a imperfeições no processo SIC. Como exemplo, para uma taxa de outage de 4% o uso de apenas 8 antenas no PB permitiu requisitos de taxa de dados dos usuários duas vezes maiores quando comparadas ao caso de uma única antena.

**Palavras-Chave**—Acesso Múltiplo Não-Ortogonal, Colheita de Energia, Comunicações em redes sem fio, Energy Beamforming, Fator de Erro Residual, SIC imperfeito.

**Abstract**—Energy beamforming, when applied by a power beacon equipped with multiple antenna elements in WPCN, has a great potential to be present in future wireless networks. In WPCN, firstly, a power beacon transfers energy by employing energy beamforming to the mobile devices that, in its turn, perform energy harvesting (phase 1). In a second phase, the devices transmit information to an access point by using the collected energy in phase 1. While energy beamforming is applied in phase 1, NOMA is considered in phase 2 in order to increase the spectral efficiency. In the second phase, we assume that the access point employs imperfect SIC due to hardware impairments. In this study, we evaluate the impact of the increased QoS demanded by mobile devices and different number of antennas at the power

beacon on the system performance. Simulation results show that the use of multiple antennas at the power beacon can increase the transmit data rate and energy efficiency, as well as decrease the performance loss due to the imperfect SIC process. As an example, for an outage rate of 4% the use of only 8 antennas in the PB allowed data rate requirements of users twice as high when compared to the case of a single antenna.

**Keywords**—Non-Orthogonal Multiple Access, Energy Harvesting, Wireless Powered Communication Network, Energy Beamforming, Residual Error Factor, Imperfect SIC.

## I. INTRODUÇÃO

Redes de sensores sem fio e internet das coisas, do inglês, *Internet of Things* (IoT), são redes de telecomunicações que possuem potencial de revolucionar diversos outros setores da sociedade. A viabilização desse tipo de rede consiste em um grande desafio em termos de engenharia por dois motivos principais. Primeiramente, redes de IoT devem ser capazes de suportar uma grande quantidade de conexões simultâneas que transmitem pequenas quantidades de informações de forma esporádica. Um segundo desafio consiste na necessidade de uma alta eficiência energética em que a necessidade de recarga ou substituição de baterias dos sensores móveis seja minimizada ou até mesmo evitada.

Redes de comunicações energizadas por meio sem fio ou, do inglês, *Wireless Powered Communication Network* (WPCN), consiste em um novo paradigma de redes que é capaz de aumentar a eficiência energética. Em redes WPCN, um quadro ou *frame* é dividido em duas fases. Na primeira fase, há a transferência de energia através de uma torre transmissora de energia ou *Power Beacon* (PB), para os dispositivos móveis. Na segunda fase, os dispositivos móveis realizam a transmissão de informações para um ponto de acesso.

Redes WPCN podem ser associadas ao esquema de múltiplo acesso não-ortogonal ou, do inglês, *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA), a fim de prover um maior número de conexões além de ganhos em eficiência espectral. Assim, na fase 2, os dispositivos móveis realizam transmissão conjunta de suas informações usando codificação com sobreposição, do inglês, *superposition coding*. Na recepção, o ponto de acesso realiza cancelamento sucessivo de interferência ou, do inglês, *Successive Interference Cancellation* (SIC).

Um ponto que deve ser destacado durante a recepção SIC é que dificuldades no cancelamento de interferências podem surgir. Nesse caso, imperfeições de *hardware* ou falhas na aquisição do estado do canal podem dificultar a aplicação

Pedro V. M. Castro é filiado ao Curso de Engenharia Elétrica, campus Sobral, Universidade Federal do Ceará, Sobral-CE, Brasil, e-mail: pedrovmc@alu.ufc.br; Francisco R. M. Lima é filiado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e da Computação (PPGEEC), campus Sobral, Universidade Federal do Ceará, Sobral-CE, Brasil e também ao Grupo de Pesquisa em Telecomunicações sem Fio (GTFL), campus do Pici, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, Brasil, e-mail: rafaelm@gtel.ufc.br. Trabalho financiado pela FUNCAP (projeto BPI no. BP4-0172-00245.01.00/20)

correta do SIC pelo receptor. Tal dificuldade gera o que se conhece por SIC imperfeito. Neste caso, uma fração da energia dos sinais que já foram decodificados reaparecem como interferência para os próximos dispositivos a terem seus sinais decodificados.

Com o intuito de aumentar a eficiência energética de redes WPCN, o conceito de formatação de feixes de energia ou, do inglês, *Energy Beamforming* (EB), pode ser empregado na primeira fase. Essa técnica consiste no uso de múltiplas antenas no PB para criação de feixes de energia onde cada um desses feixes são direcionados a cada dispositivo móvel. Uma das consequências da alta diretividade é a redução do desperdício de energia que outrora seria enviada em direções diferentes de onde os terminais se localizam [1].

Neste artigo, são consideradas redes WPCN que empregam EB na fase 1 e NOMA com SIC imperfeito na fase 2. Baseado na otimização do número de *slots* para as fases 1 e 2 e da ordem de decodificação SIC, é pretendido entender os compromissos existentes entre o grau de imperfeição no processo SIC e o número de elementos de antenas no PB. O restante do artigo está estruturado da seguinte forma. Na Seção II são apresentadas a revisão da literatura e nossas contribuições à área. Na Seção III é apresentada a modelagem do sistema. Na Seção IV o problema é formulado. Na Seção V é mostrada a análise de desempenho do sistema simulado. Por fim, na Seção VI, é concluído o estudo e citadas novas perspectivas sobre o assunto.

## II. REVISÃO DA LITERATURA

Sistemas WPCN-NOMA foram considerados em alguns artigos tais como [2, 3, 4]. Em [2], os autores buscaram maximizar a justiça proporcional ou, do inglês, *proportional fairness*. O tempo de transferência de energia é otimizado enquanto que uma ordem de decodificação SIC fixa foi usada. A técnica de decomposição dual de Lagrange foi empregada para resolver o problema formulado. O problema de maximização da taxa total sujeito a garantias de *Quality of Service* (QoS) foi abordado em [3] onde a ordem de decodificação SIC e o tempo de transferência de energia foram otimizados. Soluções ótimas e subótimas foram propostas. Em [4], o mesmo problema de [3] foi abordado com a consideração que a detecção SIC ocorre de forma imperfeita. Portanto, sinais que já foram detectados no processo SIC reaparecem como interferência para os próximos sinais a serem detectados.

Todos trabalhos citados anteriormente assumem que a fase de transferência de energia é realizada por um PB com apenas uma única antena. Como explicado anteriormente, o uso de múltiplas antenas permite que feixes de energia sejam customizados melhorando a colheita de energia por parte dos dispositivos móveis. Conceitos fundamentais sobre colheita de energia com formatação de feixes de energia além de uma vasta revisão da literatura na área foram abordados em [1]. Em [5], os autores estudaram o problema de maximização da eficiência energética assumindo a formatação de feixes de energia em sistemas que empregam múltiplo acesso por divisão no tempo ou, do inglês, *Time Division Multiple Access* (TDMA) e múltiplo acesso no domínio do espaço ou, do

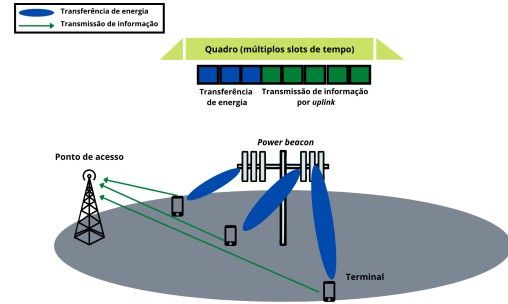


Fig. 1: Modelo do sistema WPCN baseado em NOMA e energy beamforming

inglês, *Space Division Multiple Access* (SDMA) na fase 2 de um sistema WPCN. Por outro lado, no problema estudado por [6], uma célula circular com um ponto de acesso no centro é dividida em duas áreas: área circular interna e externa. Os dispositivos na área interna recebem potência do ponto de acesso via EB no *downlink*, enquanto que no *uplink* ocorre transmissão de informação para o ponto de acesso. Na área externa, há dispositivos móveis e PBs. Esses PBs fornecem energia no *downlink* por meio de EB para esses dispositivos, e no *uplink* os dispositivos transferem suas informações para o ponto de acesso. O esquema de múltiplo acesso na frequência é assumido e o problema estudado consiste na minimização do consumo de potência total médio satisfazendo restrições de potência média e probabilidade de cobertura.

Um sistema com PB foi proposto por [7]. Neste esquema foram considerados múltiplos repetidores, um transmissor de informação e 2 dispositivos de recepção além de um PB. Dessa forma, o cenário apresentado é um pouco diferente em relação aos cenários anteriores. Ademais, existe a limitação de ser um problema estudado apenas para 2 dispositivos.

Motivados pela escassez de trabalhos em alocação de recursos para redes WPCN-NOMA com EB, neste trabalho, é estudado o problema de maximização da taxa total na fase 2 sujeito a garantias de QoS para 5 dispositivos móveis. Considera-se que EB é utilizado na fase 1 enquanto que NOMA com SIC imperfeito é modelado na fase 2 da rede WPCN. Após obter a formulação do problema e obtenção da solução ótima, avalia-se, através de simulações computacionais, o impacto do número de antenas, nível de QoS requisitado e do grau de imperfeição SIC no desempenho do sistema.

## III. MODELO DO SISTEMA

Considera-se um sistema do tipo WPCN com uma célula circular, diversos terminais distribuídos uniformemente com um PB no centro da célula e um ponto de acesso também presente na área circular. Neste tipo de sistema, as transmissões ao longo do tempo são organizadas através de quadros ou, do inglês, *frames*, e estes, por sua vez, são discretizados em *slots* de tempo. Cada quadro é dividido em duas fases distintas. A primeira fase refere-se à transferência de energia do PB para os terminais por meio do *Wireless Power Transfer* (WPT) e EB. Já a segunda fase refere-se à transmissão de informações dos terminais para o ponto de acesso usando a energia que foi recebida na primeira fase pelos terminais.

Seja  $\mathcal{J} = \{1, \dots, J\}$  o conjunto dos terminais, em que  $J$  indica a quantidade máxima de terminais. Assuma que  $M$  consista na quantidade de antenas no PB. Considere também que  $n^e, n^i \in \{1, \dots, N - 1\}$  sejam as quantidades de *slots* dedicados, respectivamente, à primeira fase e segunda fase. Além disso,  $N$  é o total de *slots* em um quadro e a duração de um *slot* é  $T^s$ . Assim, o intervalo de tempo de um quadro é  $T^f = N \cdot T^s$ .

É assumido que a resposta em frequência do canal entre o PB na fase 1 e o terminal  $j$  é dado por  $\mathbf{h}_j \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  e que o ganho de canal entre o ponto de acesso e o terminal  $j$  na fase 2 é dado por  $g_j \in \mathbb{R}$ . Na fase 1, o PB emprega um vetor de precodificação ou formatação de feixe  $\mathbf{v}_j \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  de forma a realizar EB. De acordo com essas definições, a energia capturada pelo terminal  $j$  quando  $n^e$  *slots* são usados na fase 1 é dada por

$$E_{j,n^e} = (\eta \cdot n^e \cdot T^s) \sum_{j=1}^J \left( \frac{P}{J} \right) \cdot |\mathbf{h}_j^H \mathbf{v}_j|^2, \quad (1)$$

em que  $\mathbf{h}_j^H$  é uma matriz hermitiana,  $\eta$  consiste na eficiência de colheita no receptor e a potência total no PB,  $P$ , é igualmente dividida entre os precodificadores. Assume-se que o precodificador do usuário  $j$  é dado pelo critério *maximum ratio transmission* que consiste em um tipo comum de formatação de feixe para EB [6]:  $\mathbf{v}_j = \mathbf{h}_j / \|\mathbf{h}_j\|_2$ , em que  $\|\mathbf{h}_j\|_2$  é a norma de  $\mathbf{h}_j$ .

A potência total coletada pelo terminal  $j$  na fase 1 e que estará disponível para transmissão de informações na fase 2 é dada por

$$P_{j,n^e} = E_{j,n^e} / ((N - n^e) T^s). \quad (2)$$

Na segunda fase, onde ocorre a transmissão *uplink*, é empregado o NOMA. Assim, os terminais fazem suas transmissões simultaneamente, e o ponto de acesso aplica o SIC assumindo uma determinada ordem de permutação. É assumido que  $\rho_p$  seja a  $p$ -ésima permutação do conjunto de todas as permutações possíveis entre os  $J$  terminais,  $\mathcal{P}$ . A quantidade máxima de permutações é  $P = J!$  e o  $i$ -ésimo elemento da permutação  $p$  é representado por  $\rho_{p,i}$ . Por exemplo, se  $J = 3$ , há  $3! = 6$  permutações possíveis no conjunto  $\mathcal{P}$ . Logo,  $\mathcal{P}$  seria  $\{(1, 2, 3), (1, 3, 2), (2, 1, 3), (2, 3, 1), (3, 1, 2), (3, 2, 1)\}$ . Neste exemplo,  $\rho_{3,2} = 1$ , isto é, o segundo terminal.

Desta forma, a taxa de dados no *uplink* considerando SIC imperfeito no ponto de acesso para o terminal  $\rho_{p,i}$ , isto é, o  $i$ -ésimo terminal da  $p$ -ésima permutação, assumindo a permutação  $\rho_p$  e  $n^e$  *slots* para fase 1, é dada pela expressão mostrada em (3) conforme abordada por [4]. Note que  $B$  é a largura de banda do canal,  $\sigma^2$  é a potência do ruído térmico na banda de transmissão e  $0 \leq \epsilon \leq 1$  é o Fator de Erro Residual (FER) que corresponde ao ruído remanescente resultante do cancelamento de interferência imperfeito no SIC.

#### IV. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Neste trabalho, o objetivo é estudar o problema de maximização da taxa total de dados transmitida no *uplink* sujeito a restrições de QoS (em termos de taxa mínima requisitada pelos terminais). Para que se possa formular o problema, define-se

a seguir algumas variáveis relevantes. Seja  $x_{n^e,p}$  uma variável de otimização binária que possui o valor 1 caso o número de *slots* na fase 1 seja  $n^e$  e a  $p$ -ésima permutação seja escolhida para ordem de decodificação SIC, e 0 caso contrário. Ademais, é assumido que o terminal  $j$  possui um requisito de taxa de dados  $R_j$  na fase 2. O problema de otimização é mostrado a seguir:

$$\max_{x_{n^e,p}} \left\{ \sum_{n^e=1}^{N-1} \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J (r_{j,n^e,p}(\epsilon) \cdot x_{n^e,p}) \right\}, \quad (4a)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{n^e=1}^{N-1} \sum_{p=1}^P (r_{j,n^e,p}(\epsilon) \cdot x_{n^e,p}) \geq R_j, \quad \forall j \in \mathcal{J}, \quad (4b)$$

$$\sum_{n^e=1}^{N-1} \sum_{p=1}^P x_{n^e,p} = 1. \quad (4c)$$

O problema pode ser dividido em três partes em conformidade com [3] e [4]. A primeira parte trata da função objetivo, a qual é mostrada na equação (4a). Tal função representa a taxa total de dados recebida no ponto de acesso no *uplink*. A segunda parte do problema trata da restrição da taxa mínima de dados, a qual é mostrada na equação (4b). Essa restrição assegura que a taxa mínima de dados de cada usuário  $j$  na fase de *uplink* deve ser no mínimo  $R_j$ . Já a terceira parte do problema trata da existência e unicidade da solução, ou seja, a equação de restrição (4c) afirma que apenas um valor para  $n^e$  e permutação devem ser escolhidos. É importante notar que o problema (4) é combinatorial e de difícil solução, principalmente quando a variável de otimização possui alta dimensão. Mais especificamente, o problema de otimização é linear e inteiro ou, do inglês, *Integer Linear Problem* (ILP). Quanto maior a quantidade de dispositivos e *slots* em um *frame*, maior torna-se o espaço de busca do problema, pois há uma variável de otimização de dimensão  $P \cdot (N - 1)$ , ou seja, há  $2^{(P \cdot (N - 1))}$  possibilidades para encontrar a variável de otimização que melhor resolve o problema [8]. Dessa forma, algoritmos gulosos tornam-se inviáveis na resolução do problema. Entretanto, o algoritmo ramificar e limitar ou, do inglês, *Branch and Bound* (BB) pode ser útil em problemas de dimensão pequena ou média de entradas. O algoritmo BB é viável, pois reduz a dimensão do conjunto das respostas comparando as soluções alcançadas com limitantes inferiores e superiores.

#### V. ANÁLISE DE DESEMPENHO

O modelo descrito na seção III foi simulado computacionalmente. O sistema possui uma célula circular de raio 10 m com 5 usuários distribuídos uniformemente no anel circular de raio interno 1 m e raio externo 10 m. No centro da célula encontra-se o PB com 1, 8 ou 256 antenas que transmite uma potência total de 10 W cuja banda do canal é de 1 MHz. A 8 metros do centro do círculo, encontra-se o ponto de acesso. O quadro temporal possui uma duração de 2 ms e é dividido em 20 *slots*. A eficiência do processo de colheita de energia é de 0,5, ou seja,  $\eta = 0,5$ , e o ruído tem potência de -104 dBm. Ademais, são tomadas 1.000 simulações de Monte Carlo

$$r_{\rho_p^i, n^e, p}(\epsilon) = \frac{B \cdot (N - n^e)}{N} \log_2 \left( 1 + \left( P_{\rho_p^i, n^e} \cdot g_{\rho_p^i} \right) / \left( \underbrace{\epsilon \sum_{k \leq i-1} \left( P_{\rho_p^k, n^e} \cdot g_{\rho_p^k} \right)}_{\text{Sinais não cancelados de forma perfeita}} + \sum_{k \geq i+1} \left( P_{\rho_p^k, n^e} \cdot g_{\rho_p^k} \right) + \sigma^2 \right) \right) \quad (3)$$

TABELA I: Parâmetros da simulação.

Parâmetros	Valores
Raio da célula	10 metros
Potência transmitida do ponto de acesso ( $P^T$ )	10 W
Banda larga do canal ( $B$ )	1 MHz
Número de slots de tempo ( $N$ )	20
Potência de ruído	-104 dBm
Tamanho do quadro ( $T^q$ )	2 ms
Eficiência da coleta de energia ( $\eta$ )	0,5
Fator Residual de Erro ( $\epsilon$ )	0, $10^{-4}$ , $10^{-3}$ , $10^{-2}$ , $2 \cdot 10^{-2}$ , $3 \cdot 10^{-2}$ , $4 \cdot 10^{-2}$ , $5 \cdot 10^{-2}$
Número de repetições de Monte Carlo	1.000
Distância do PB ao ponto de acesso	8 metros
Número de antenas no Power Beacon	1, 8, 256

para garantir confiança estatística nos resultados encontrados. Assume-se que o canal nas fases 1 e 2 são modelados através de desvanecimento Rayleigh e perda de percurso baseado na distância com coeficiente de perda de percurso igual a 3 [4, 9]. Também é assumido que as restrições de taxas de dados mínimas é uniforme, ou seja,  $R_j = R_i, \forall j \neq i$ . Para resolver o problema (4) inteiro e linear, foi usado o *software* IBM ILOG CPLEX [10]. Os principais parâmetros de simulações estão dispostos na TABELA I.

As métricas analisadas nas simulações computacionais são:

- Taxa de inviabilidade: Indica a fração das repetições de Monte Carlo em que não há solução viável para o problema. Isto pode ser inferido a partir do *software* CPLEX utilizado para obter as soluções ótimas. Não há solução para o problema sempre que o *software* não é capaz de encontrar soluções que satisfaçam as restrições do problema (4). Essa métrica indica a complexidade de encontrar soluções viáveis para uma determinada realização do problema.
- Número de slots da primeira fase,  $n^e$ : Parâmetro que indica a quantidade de slots de um *frame* alocados para fazer a transferência de potência. Quanto menor  $n^e$ , menor a potência gasta pelo PB e maior é o tempo para os usuários transmitirem os dados para o ponto de acesso.

Como primeiro resultado, é observado na Fig. 2 a taxa de inviabilidade versus a taxa de dados requisitada para uma FER nula assumindo diferentes números de antenas no PB. Primeiramente, note que a taxa de inviabilidade aumenta com a taxa requisitada. Este comportamento é esperado, pois quanto maior a taxa requisitada, mais desafiador torna-se encontrar

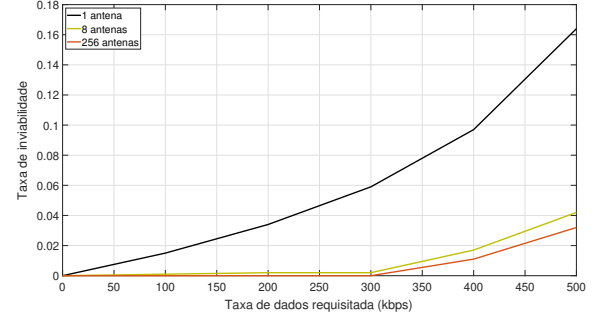


Fig. 2: Taxa de inviabilidade versus Taxa de dados requisitada para FER = 0.

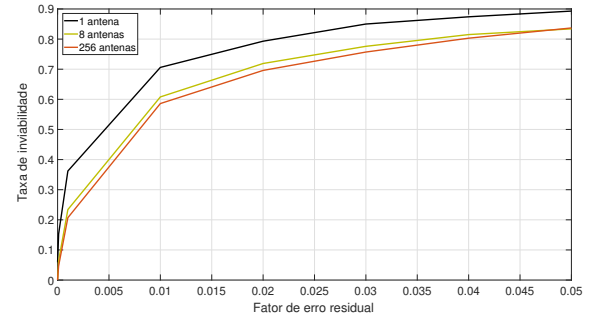


Fig. 3: Taxa de inviabilidade versus Fator de erro residual para taxa requisitada de 300 kbps.

uma solução viável para o problema estudado. A taxa de inviabilidade para o caso de uma única antena no PB é semelhante a apresentada em [3].

Um resultado importante consiste no fato do aumento de antenas no PB levar a um notável ganho de desempenho em relação ao caso de uma única antena. Por exemplo, enquanto que uma taxa de inviabilidade de 4% é atingida para uma taxa requisitada de 225 kbps quando uma única antena é utilizada, essa mesma taxa de inviabilidade só é atingida para taxa de dados requisitada de 500 kbps quando 8 antenas são utilizadas no PB.

Na Fig. 3 são mostradas as curvas de taxa de inviabilidade versus o FER para um PB com 1, 8 e 256 antenas e uma taxa de dados requisitada de 300 kbps. É observado que todas as curvas têm uma inclinação positiva, ou seja, quanto maior for o FER, maior será a taxa de inviabilidade. Isso pode ser explicado pela maior interferência experimentada durante o processo de decodificação SIC. Isso leva a uma menor vazão de dados entregue por cada usuário. Por consequência, torna-se mais difícil satisfazer às restrições do problema estudado. Outro ponto a ser analisado na Fig. 3 é o efeito do aumento do número de antenas no PB. A partir da análise da Fig. 3, vê-se que o uso de EB é capaz de amenizar os efeitos

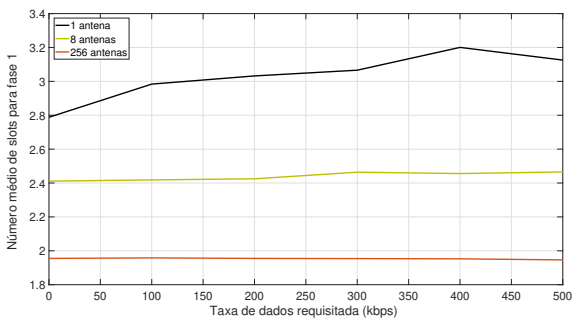


Fig. 4: Número de slots da fase 1 versus Taxa de dados requisitada para FER = 0.

adversos resultantes do processo imperfeito de decodificação SIC. Apesar de ocorrer uma saturação na taxa de inviabilidade mesmo com aumento da quantidade de antenas, acredita-se que usar uma abordagem de alocação de potência adaptativa geraria melhores ganhos.

Na Fig. 4 são apresentadas as curvas relacionadas à métrica de número médio de *slots* da fase 1,  $n^e$ , em função da taxa de dados requisitada para um FER nulo com as configurações de antenas do PB variando em 1, 8 e 256 antenas. Nota-se que um FER nulo implica que o processo SIC feito no receptor seja realizado de forma que os sinais já decodificados não interfiram nos sinais ainda a serem decodificados. No caso de uma única antena no PB, o resultado obtido é semelhante ao encontrado por [3] e [4]. Em geral, o uso de múltiplas antenas no PB requer um menor número de *slots* na fase 1 para transferência de energia. Assim, há um menor gasto de potência por parte do PB. Isso mostra outro viés do uso de múltiplas antenas no PB para EB: ganhos de eficiência energética.

## VI. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste artigo foram estudados os impactos de *Energy Beamforming* (EB) em redes *Wireless Powered Communication Network* (WPCN) empregando *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA) com *Successive Interference Cancellation* (SIC) imperfeito na recepção. Em redes WPCN, em uma primeira fase, ocorre a transferência de energia no *downlink*, enquanto que na fase 2 ocorre a transmissão de dados dos dispositivos para o ponto de acesso no *uplink* com emprego do NOMA e aplicação do SIC imperfeito no ponto de acesso. O problema estudado consistiu na maximização da taxa total de dados sujeito a restrições de *Quality of Service* (QoS) por parte dos dispositivos. O problema proposto foi então resolvido de forma ótima através do uso de bibliotecas especializadas em otimização. Por fim, foi realizada uma análise de desempenho a fim de verificar o impacto do uso de EB no desempenho do sistema. Em suma, destacam-se as seguintes conclusões: 1) O aumento da quantidade de antenas no *Power Beacon* (PB) diminui consideravelmente a taxa de inviabilidade quando o nível de QoS demandado pelos dispositivos é aumentado. 2) O aumento de antenas no PB torna o sistema mais robusto às

imperfeições no processo SIC. 3) O uso de EB leva a ganhos em termos de eficiência energética em redes WPCN através de redução do número de *slots* requisitados na fase 1. Em relação às perspectivas, a concepção de meta-heurísticas são relevantes, pois podem resolver o problema com um menor custo computacional.

## REFERÊNCIAS

- [1] Yamen Alsaba, Sharul Kamal Abdul Rahim e Chee Yen Leow. “Beamforming in Wireless Energy Harvesting Communications Systems: A Survey”. Em: *IEEE Communications Surveys Tutorials* 20.2 (2018), pp. 1329–1360. DOI: 10.1109/COMST.2018.2797886.
- [2] P. D. Diamantoulakis, K. N. Pappi, Z. Ding e G. K. Karagiannidis. “Wireless-Powered Communications With Non-Orthogonal Multiple Access”. Em: *IEEE Trans. on Wireless Commun.* 15.12 (2016), pp. 8422–8436.
- [3] Jhenifer de Oliveira Melo, Raissa Ellen de Sousa e Francisco Rafael Marques Lima. “QoS Guarantees in NOMA-based Wireless Powered Mobile Communications”. Em: *2020 XXXVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*. 2020.
- [4] Hugo Victor Bezerra Aragão, Pedro Victor Martins Castro, Cibelly Azevedo de Araújo Lima, Francisco Rafael Marques Lima e Jhenifer de Oliveira Melo. “Impacto de SIC imperfeito em sistemas WPCN-NOMA com garantias de QoS”. Em: *2021 XXXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*. 2021.
- [5] Hunwoo Lim e Taewon Hwang. “User-Centric Energy Efficiency Optimization for MISO Wireless Powered Communications”. Em: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 18.2 (2019), pp. 864–878. DOI: 10.1109/TWC.2018.2886015.
- [6] Kai Liang, Liqiang Zhao, Gan Zheng e Hsiao-Hwa Chen. “Non-Uniform Deployment of Power Beacons in Wireless Powered Communication Networks”. Em: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 18.3 (2019), pp. 1887–1899. DOI: 10.1109/TWC.2019.2899098.
- [7] Yafang Zhang, Suili Feng e Weijun Tang. “Performance Analysis and Optimization for Power Beacon-Assisted Wireless Powered Cooperative NOMA Systems”. Em: *IEEE Access* 8 (2020), pp. 198436–198450. DOI: 10.1109/access.2020.3034917. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3034917>.
- [8] George Nemhauser e Laurence Wosley. *Integer and Combinatorial Optimization*. 1999.
- [9] Z. Yang, W. Xu, Y. Pan, C. Pan e M. Chen. “Optimal Fairness-Aware Time and Power Allocation in Wireless Powered Communication Networks”. Em: *IEEE Trans. on Commun.* 66.7 (2018), pp. 3122–3135.
- [10] IBM. *IBM ILOG CPLEX Optimizer*. URL: <http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer/>.