

Impacto de SIC imperfeito em sistemas WPCN-NOMA com garantias de QoS

Hugo Victor Bezerra Aragão, Pedro Victor Martins Castro, Cibelly Azevedo de Araújo Lima, Francisco Rafael Marques Lima e Jhenifer de Oliveira Melo

Resumo—Redes de comunicações energizadas através de meios sem-fio ou, do inglês, *Wireless Powered Communication Network* (WPCN), consistem em um novo paradigma em que dispositivos móveis podem ser energizados através de ondas rádio em uma primeira fase, relaxando assim a necessidade de trocas de baterias. Posteriormente, na fase 2, estes mesmos dispositivos transmitem informações para um ponto de acesso. Neste estudo, assumimos que o acesso múltiplo não-ortogonal ou, do inglês, *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA), é aplicado na fase 2 de forma a prover ganhos de eficiência espectral quando comparado aos outros esquemas de múltiplo acesso ortogonal. Contudo, assumimos que o cancelamento sucessivo de interferência ou, do inglês, *Successive Interference Cancellation* (SIC), realizado no receptor é imperfeito. O objetivo deste estudo é avaliar o impacto do SIC imperfeito no desempenho de um sistema WPCN com garantias de qualidade de serviço ou, do inglês, *Quality of Service* (QoS), em que a duração das fases 1 e 2, assim como a ordem de decodificação SIC são otimizadas. Resultados de simulação demonstram que o grau de imperfeição de SIC possui um grande impacto na taxa de dados assim como na garantia de QoS.

Palavras-Chave— Comunicação em redes sem fio, Acesso Múltiplo Não-Ortogonal, SIC imperfeito, Fator de Erro Residual.

Abstract—WPCN consists in a new paradigm where mobile devices can be energized through radio waves (first phase), then relaxing the need of battery replacement. After that, the same devices transmit information to the access point (second phase). In this study we assume that NOMA is used in the second phase so as to obtain gains in terms of spectral efficiency when compared to orthogonal multiple access schemes. However, we assume imperfect SIC at the receiver. The main objective of this study is to evaluate the impact of imperfect SIC on the performance of WPCN with QoS guarantees, where the time length of phases 1 and 2, as well as the SIC decoding order are optimized. Simulation results show that imperfect SIC has an important impact on both the transmit data rates and QoS assurance.

Keywords— Wireless Powered Communication Network, Non-Orthogonal Multiple Access, imperfect SIC, Residual Error Factor.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas de comunicações móveis estão em constante evolução e atualmente presenciamos a comercialização dos

Hugo V. B. Aragão, Pedro V. M. Castro e Cibelly A. de A. Lima são filiados ao Curso de Engenharia Elétrica, campus Sobral, Universidade Federal do Ceará, Sobral-CE, Brasil, e-mail: hugovictor@alu.ufc.br, pedrovmc@alu.ufc.br, cibellyazevedo@gmail.com; Francisco R. M. Lima e Jhenifer de O. Melo (jhenifer.o.melo@gmail.com) são filiados 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 (GTEL), 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).

sistemas de Quinta Geração (5G) em diversos países. As redes 5G, assim como as novas gerações de comunicações móveis, possuem uma série de novos casos de uso. Dentre eles, destacamos a comunicação massiva entre máquinas ou, do inglês, *Massive Machine-Type Communications* (mMTC), que inclui uma utilização massiva de novos dispositivos de *internet* das coisas ou, do inglês, *Internet of Things* (IoT), e sensores. Estes novos casos de uso possuem potencial de prover grandes ganhos econômicos às operadoras e revolucionar diversas outras indústrias [1].

Contudo, esses novos casos de uso também impõem grandes desafios. Um maior número de conexões na rede e maior eficiência espectral e energética são os principais. Portanto, novas tecnologias são primordiais para atender a essas novas demandas. Nesse contexto, destacamos as redes de comunicações energizadas através de meios sem-fio ou, do inglês, *Wireless Powered Communication Network* (WPCN), que empregam um novo paradigma na forma como dispositivos são energizados: transferência de potência sem fio ou, do inglês, *Wireless Power Transfer* (WPT). Especificamente, o quadro de transmissão ou *frame* nestes sistemas é dividido em duas fases. Na fase 1, os dispositivos móveis são energizados através de ondas eletromagnéticas enviadas de um ponto de acesso ou fonte dedicada. Na fase 2, utilizando a energia recebida na primeira fase, os dispositivos móveis realizam a transmissão de dados para um ponto de acesso.

De forma a aumentar a eficiência espectral de redes WPCN, assumimos que o esquema de múltiplo acesso não-ortogonal ou, do inglês, *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA), é empregado na fase 2 em que há a transmissão de dados. Como mostrado na literatura, NOMA possui maior eficiência espectral que outros esquemas de múltiplo acesso [2]. Quando NOMA é aplicado no *uplink* ou enlace reverso, os dispositivos móveis transmitem suas informações que chegam sobrepostas no ponto de acesso que atua como receptor. Este receptor aplica o cancelamento sucessivo de interferência ou, do inglês, *Successive Interference Cancellation* (SIC). Com o SIC, o receptor define uma ordem de decodificação das informações dos dispositivos móveis de tal forma que o primeiro sinal decodificado sofre com a interferência de todos outros sinais. Contudo, o segundo dispositivo a ter seu sinal decodificado sofre com a interferência apenas dos sinais dos usuários seguintes na sequência de decodificação, mas não do primeiro sinal decodificado. Isso ocorre porque os sinais que já foram decodificados são sucessivamente subtraídos do sinal total recebido. Atuando dessa forma, o último dispositivo a ter sua informação decodificada não sofre interferência de nenhum

outro sinal (apenas do ruído térmico presente no receptor).

Apesar do grande potencial da tecnologia NOMA, algumas imperfeições podem degradar seu desempenho. Dentre elas, destacamos as possíveis imperfeições que podem ocorrer no processo SIC. Estimativas imperfeitas de canal, limitações de *hardware* e qualidade de canal ruim podem levar ao não cancelamento perfeito da interferência no SIC (SIC imperfeito).

Neste artigo, tratamos de um cenário WPCN com NOMA e objetivamos avaliar o impacto do SIC imperfeito no desempenho do sistema quando o tempo dedicado às fases 1 e 2, assim como a ordem de decodificação SIC são otimizadas. O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: na Seção II revisamos alguns trabalhos da literatura e apresentamos as nossas principais contribuições, na Seção III definimos nosso modelo de sistema, na Seção IV formulamos o problema de otimização a ser estudado, na Seção V apresentamos uma análise de desempenho e discutimos os resultados, e por fim, na Seção VI resumizamos as principais conclusões do estudo e apresentamos algumas perspectivas.

II. REVISÃO DA LITERATURA E CONTRIBUIÇÕES

Redes WPCN foram estudadas na literatura recente utilizando esquemas de múltiplo acesso ortogonal como em [3] em que múltiplo acesso por divisão no tempo ou, do inglês, *Time Division Multiple Access* (TDMA), foi aplicado na fase 2. Em um dos problemas estudados em [3], os autores otimizaram o tempo reservado para as fases 1 e 2, assim como o tempo alocado para cada dispositivo na fase 2 para maximização da taxa total de dados na fase 2.

NOMA foi considerado para transmissão de informações na fase 2 de redes WPCN em [1, 4] assumindo que a ordem de decodificação SIC é fixa. Nestes trabalhos, alocação de potência e otimização da duração temporal das fases 1 e 2 foram estudadas com a finalidade de maximizar a taxa total transmitida na fase 2. O objetivo do estudo realizado em [5] foi maximizar a justiça em um sistema NOMA/WPCN. A técnica de decomposição dual de Lagrange foi empregada em [5] com o objetivo de maximizar a justiça proporcional ou *proportional fairness*. Recentemente, em [6], a maximização da taxa de dados sujeita a garantias de qualidade de serviço ou, do inglês, *Quality of Service* (QoS), em termos de taxa de dados foi estudada em um sistema NOMA/WPCN. Soluções ótimas e subótimas foram propostas em [6].

Todos os artigos supramencionados para sistemas NOMA/WPCN tem em comum um aspecto: eles consideram que o SIC realizado no receptor NOMA é perfeito. Com SIC imperfeito, seguindo a ordem de decodificação estabelecida, uma fração da potência dos sinais que já foram decodificados anteriormente reaparece como interferência para os sinais ainda a serem decodificados. NOMA com SIC imperfeito foi estudado em [2, 7], mas não em redes WPCN. Enquanto em [2] o foco foi em redes heterogêneas, em [7] o SIC imperfeito foi considerado em redes cooperativas.

Motivado pela lacuna existente na literatura em trabalhos que assumem NOMA/WPCN com SIC imperfeito, temos como contribuições neste trabalho: 1) Formulação do problema de maximização da taxa de dados total na fase 2 de um sistema

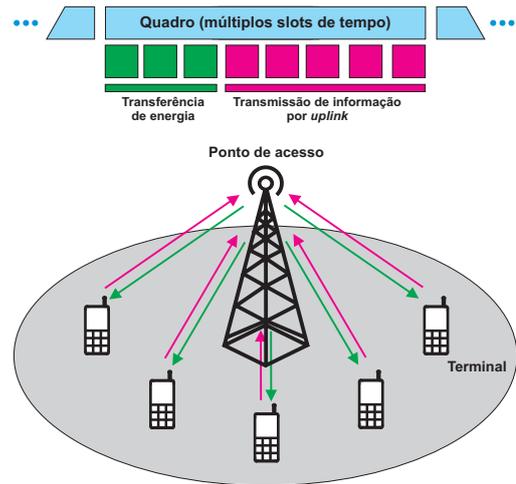


Fig. 1: Modelo do sistema WPCN baseado em NOMA.

NOMA/WPCN assumindo SIC imperfeito e otimizando tanto a duração das fases 1 e 2 como também a ordem de decodificação SIC; 2) Análise através de simulações computacionais do impacto do SIC imperfeito e requisitos de QoS no desempenho do sistema.

III. MODELO DO SISTEMA

Consideramos um sistema do tipo WPCN com uma célula circular, diversos dispositivos ou terminais distribuídos uniformemente na área e um ponto de acesso no centro da célula. Em nosso modelo de sistema, o tempo é discretizado em quadros ou *frames* e estes, por sua vez, são discretizados em *slots* de tempo conforme mostrado na Fig. 1. Cada quadro é dividido em duas fases distintas. A primeira fase refere-se a parte de transferência de energia do ponto de acesso aos terminais por meio da técnica WPT. Já a fase 2 refere-se à transmissão de informações dos terminais para o ponto de acesso utilizando a energia que foi colhida na primeira fase pelos terminais [5]. A transmissão de dados no enlace direto não é analisada neste estudo.

Assuma que $\mathcal{J} = \{1, \dots, J\}$ consiste no conjunto de terminais, em que J indica a quantidade máxima de terminais. Sejam $n^e, n^i \in \{1, \dots, N-1\}$ a quantidade de *slots* dedicados, respectivamente, às fases 1 e 2, em que N é a quantidade de *slots* em um quadro. A duração de um *slot* é dada por T^s . Assim, o intervalo de tempo de um quadro é $T^q = N \cdot T^s$.

Assumimos que o canal de comunicação permanece aproximadamente constante durante o tempo de um quadro [4, 1, 5, 8]. Mais detalhes sobre o modelo de canal considerado neste estudo serão providos na Seção V. Assuma que g_j consiste no ganho entre o ponto de acesso e o terminal j para ambos *downlink* e *uplink*. O ponto de acesso transmite na fase 1 com uma potência constante igual a P^T . Portanto, a quantidade de energia coletada e disponível para transmissão para o terminal j quando n^e *slots* são empregados para fase 1 de um quadro específico é dada por $E_{j,n^e} = P^T \cdot \eta \cdot g_j \cdot n^e \cdot T^s$ em que $0 \leq \eta \leq 1$ é o fator de eficiência de colheita de energia que assume o valor 1 para máxima eficiência e 0 para um dispositivo sem a capacidade de realizar colheita de energia. A potência de

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

transmissão disponível para o terminal j na fase 2 quando a fase 1 dura n^e slots é $P_{j, n^e} = (E_{j, n^e}) / (T^s \cdot (N - n^e))$.

Na fase 2 ocorre a transmissão no uplink onde NOMA é empregado. Portanto, os terminais transmitem seus dados de forma simultânea e o ponto de acesso emprega SIC assumindo uma certa ordem de decodificação. Consideramos que $\rho_p \in \mathcal{P}$ é a $p^{\text{ésima}}$ permutação dos elementos de \mathcal{J} , e \mathcal{P} é o conjunto de todas as possíveis permutações. O número total de permutações, P , é dado por $P = J!$. O $i^{\text{ésimo}}$ elemento da permutação p é representado por $\rho_{p, i}$. Por exemplo, para $J = 3$ temos que $P = 3! = 6$ e $\mathcal{P} = \{(1, 2, 3), (2, 1, 3), (3, 2, 1), (3, 1, 2), (1, 3, 2), (2, 3, 1)\}$. Neste exemplo, $\rho_{3, 2} = 2$, i.e., terminal 2.

Baseado nas definições que foram apresentadas, a taxa de dados transmitida no *uplink* para o terminal $\rho_{p, i}$, isto é, o $i^{\text{ésimo}}$ terminal da permutação p , é dada pela equação (1) quando a ordem de decodificação SIC corresponde a permutação ρ_p e n^e slots são utilizados para colheita de energia. Nesta equação, B é a largura de banda do sistema, σ^2 é a potência do ruído na banda utilizada e $0 \leq \epsilon \leq 1$ é o fator de erro residual ou, do inglês, Residual Error Factor (REF), que corresponde a fração de potência dos sinais que foram previamente decodificados e que permanece como interferência para os próximos sinais a serem decodificados devido ao cancelamento imperfeito de interferência no SIC [7].

IV. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Neste artigo estudamos o problema de maximização da taxa total de dados transmitida no *uplink* sujeito a restrições de taxa requisitada mínima, isto é, restrições de QoS. A seguir, definimos algumas variáveis adicionais que são relevantes para formulação do problema. Assuma que $x_{n^e, p}$ é uma variável de otimização binária que assume o valor 1 se o número de slots na fase 1 é n^e e a $p^{\text{ésima}}$ permutação é escolhida para ordem de decodificação SIC, e 0 caso contrário. Consideramos que o terminal j tem um requisito de taxa de dados R_j .

Baseado nessas definições, o problema a ser estudado pode ser formulado como a seguir

$$\max_{x_{n^e, p}} \left\{ \sum_{n^e=1}^{N-1} \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J (r_{j, n^e, p}(\epsilon) \cdot x_{n^e, p}) \right\}, \quad (2a)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{n^e=1}^{N-1} \sum_{p=1}^P (r_{j, n^e, p}(\epsilon) \cdot x_{n^e, p}) \geq R_j, \quad \forall j \in \mathcal{J}, \quad (2b)$$

$$\sum_{n^e=1}^{N-1} \sum_{p=1}^P x_{n^e, p} = 1. \quad (2c)$$

No problema (2), a função objetivo (2a) representa a taxa total transmitida no *uplink*. A restrição representada na equação (2b) modela a restrição de QoS por terminal. Na restrição

representada pela equação (2c), asseguramos que somente um valor de n^e e uma permutação p deve ser selecionada. Note que o problema (2) é combinatorial e pertence a classe de problemas inteiros e lineares ou, do inglês, *Integer Linear Program* (ILP), que em geral são difíceis de serem resolvidos de forma ótima quando a dimensão das variáveis de entrada é grande. O uso de busca exaustiva requer uma enumeração completa de todas possíveis instâncias da variável de otimização, $x_{n^e, p}$. De acordo com nosso modelo, a variável de otimização tem dimensão $P \cdot (N - 1)$. Portanto, o número de instâncias da nossa variável de otimização é dado por $2^{P \cdot (N-1)}$. Para este tipo de problema, o algoritmo ramificar e limitar ou, do inglês, *Branch-and-Bound* (BB), pode ser empregado para reduzir a complexidade média para obtenção da solução ótima quando consideramos entradas de tamanho pequeno e médio [9]. O algoritmo BB atua de forma a evitar que seja necessário testar todas as possíveis instâncias de uma variável de otimização. Para atingir este fim, o algoritmo BB contrasta as soluções obtidas com limitantes superiores e inferiores e, a partir disso, consegue reduzir o espaço de soluções definidos pelas restrições do problema.

V. ANÁLISE DE DESEMPENHO

O modelo de sistema apresentado na Seção III foi reproduzido por meio de simulações computacionais. Assumimos um sistema que possui 5 terminais distribuídos uniformemente em uma área no formato de um anel, onde o raio interno é igual a 1 m e o raio externo igual a 10 m (raio da célula). A potência de transmissão do ponto de acesso é de 5 W e a largura de banda do canal é igual a 1 MHz. O quadro de transmissão possui uma duração de 2 ms e é composto de 20 slots. A potência do ruído foi configurada com um valor de -104 dBm e a eficiência da colheita de energia nos terminais é de 0,5. Assumimos 1.000 repetições de Monte Carlo de forma a assegurar confiabilidade estatística. O ganho do canal entre o ponto de acesso e o terminal j é dado por

TABELA I: Parâmetros da simulação.

Parâmetros	Valores
Raio da célula	10 metros
Potência transmitida do ponto de acesso (P^T)	5 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 (η)	0,5
REF (ϵ)	$0, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 2 \cdot 10^{-2}, 3 \cdot 10^{-2}$
Número de repetições de Monte Carlo	1.000

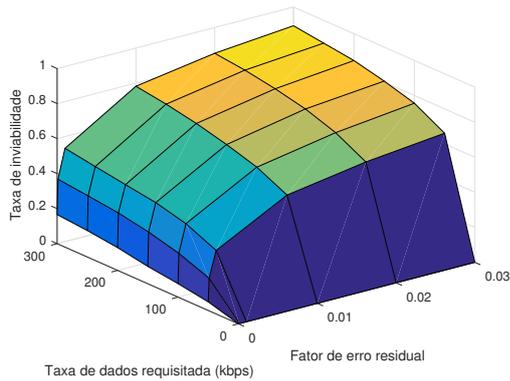


Fig. 2: Taxa de inviabilidade versus REF e a taxa de dados requisitada.

$10^{-3} \cdot X \cdot d_j^{-3}$, em que d_j é a distância, em metros, entre o terminal j e o ponto de acesso, e X é uma variável aleatória distribuída exponencialmente com média unitária [10]. Os parâmetros de simulação são ilustrados na Tabela I. A solução ótima do problema (2) foi obtida utilizando o *software* IBM ILOG CPLEX [11], o qual é capaz de resolver problemas ILP. Assumimos que os terminais possuem o mesmo requisito de taxa em nossas análises, isto é, $R_j = R_i \forall j \neq i$.

As principais métricas a serem avaliadas nesta seção são:

- Taxa de inviabilidade: Consiste na fração das repetições de Monte Carlo em que não foi possível obter a solução ótima. Isto ocorre quando o problema de otimização em (2) é inviável, ou seja, não existe uma solução que satisfaça às restrições de QoS. Essa métrica demonstra quão difícil é o problema a ser estudado para uma dada configuração do sistema;
- Número médio de *slots* para fase 1: Essa métrica é calculada através da média do número de *slots* dedicados a fase 1, n^e , definidos pela solução ótima. A média é calculada considerando apenas as repetições de Monte Carlo em que a solução ótima foi obtida para todos cenários simulados, isto é, o problema foi viável;
- Taxa total média: Essa métrica é calculada através da média da taxa total transmitida no *uplink* na fase 2, isto é, soma das taxas transmitidas por todos terminais. A média é calculada considerando apenas as repetições de Monte Carlo em que a solução ótima foi obtida para todos cenários simulados, isto é, o problema foi viável;

Como primeiro resultado, consideramos na Fig. 2 a taxa de inviabilidade em função da taxa requisitada pelos terminais (R_j) e o parâmetro REF. Primeiramente, vemos que a taxa de inviabilidade aumenta conforme a taxa requisitada e a REF aumentam. Este comportamento é esperado pois: 1) o aumento da taxa requisitada sem um aumento dos recursos do sistema torna o problema mais desafiador e, 2) o aumento do REF diminui as taxas de transmissão a serem obtidas devido a maior interferência observada no sistema.

Outro comportamento a ser observado na Fig. 2 é quanto à sensibilidade da taxa de inviabilidade a variações do REF. Nota-se que um leve aumento do REF já é responsável por um grande aumento da taxa de inviabilidade. Como exemplo,

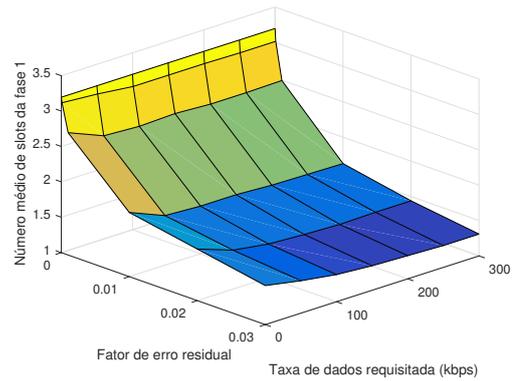


Fig. 3: Número médio de slots da fase 1 versus REF e a taxa de dados requisitada.

assumindo uma taxa requisitada de 100 kbps, a taxa de inviabilidade é de 0,07, 0,25 e 0,40 para REF de 0, 10^{-4} e 10^{-3} , respectivamente. Isto mostra que a garantia de QoS é fortemente impactada por imperfeições do processo SIC. Do ponto de vista de engenharia, é importante que novas estratégias e soluções sejam estudadas a fim de que as imperfeições no processo SIC sejam reduzidas.

Na Fig. 3 apresentamos o número médio de *slots* para fase 1 (n^e médio) em função da taxa requisitada pelos terminais e o parâmetro REF. Primeiramente, devemos notar que o n^e médio permite a inferência de quanto de energia, portanto, potência, foi captada pelos terminais na fase 1. Podemos perceber que o n^e médio apresenta uma redução à medida que aumentamos o requisito de QoS e o REF. Note que a variável n^e aparece na equação da taxa de dados dos terminais mostrada em (1) tanto externamente como internamente¹ ao fator logarítmico. Assim, uma redução de n^e tem como consequência um aumento do fator externo. Por outro lado, esta mesma redução de n^e causa uma redução das potências de transmissão dos terminais. Como há uma razão de potências (SINR) dentro do fator logarítmico, este termo torna-se mais neutro. Portanto, o aumento dos requisitos de QoS e REF resulta em uma redução do n^e médio a fim de que todos terminais consigam taxas de transmissão maiores. Note que a redução do n^e médio com aumento do REF é mais acentuada devido a maior interferência resultante da imperfeição no processo SIC. Neste caso, é necessário um menor valor de n^e , reduzindo as potências de transmissão, reduzindo assim, a interferência observada na recepção dos dados.

Como último resultado, apresentamos na Fig. 4 a taxa total média transmitida no *uplink* em função da taxa requisitada pelos terminais e o REF. Note que a taxa total transmitida segue a mesma tendência do número de *slots* dedicados a fase 1: há uma redução da taxa total de dados transmitida ao aumentarmos o requisito de QoS e o REF. Note que o aumento do requisito de QoS e REF tornam mais desafiador a satisfação dos requisitos de QoS. Assim, a alocação de recursos torna-se menos oportunista reduzindo a taxa total transmitida no sistema a fim de satisfazer os requisitos de QoS.

¹A potência de transmissão dos terminais depende de n^e .

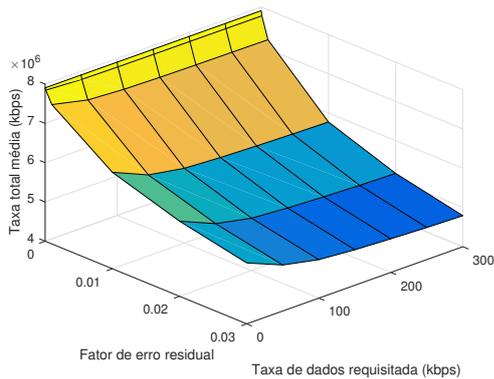


Fig. 4: Taxa total média versus REF e a taxa de dados requisitada.

Um último comportamento a ser ressaltado em nossos resultados consiste no caso em que o fator REF e/ou os requisitos de QoS são iguais a zero. Este caso corresponde à maximização da taxa total no sistema irrestrita uma vez que a restrição (2b) pode ser ignorada. Neste cenário, podemos observar na Fig. 2 que temos uma taxa de inviabilidade zero, conforme esperado. Na Fig. 4, podemos constatar que neste cenário uma maior taxa total de dados é obtida. Além disso, constatamos que a taxa total obtida no sistema independe da taxa requisitada para REF igual a zero (SIC perfeito). Isso deve-se ao fato que a ordem de decodificação SIC não é importante quando REF é zero. Este resultado foi observado em [1] onde apenas SIC perfeito foi considerado. Note que esta mesma conclusão não é válida para o caso com SIC imperfeito. Finalmente, observamos na Fig. 3 que o número de *slots* é relativamente alto. A explicação para tal fato é que, a fim de maximizar a taxa total no sistema, há uma prioridade expressa para o terminal de melhor condição de canal em detrimento dos outros. Neste cenário, há uma maior injustiça visto que a maioria dos terminais obtém uma taxa de transmissão muito reduzida. Portanto, um valor relativamente alto de n^e é escolhido com a finalidade de aumentar a potência do terminal com canal mais forte até um ponto em que a interferência dos outros terminais não torne-se danosa.

VI. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste artigo, estudamos redes WPCN em que o quadro de transmissão temporal é dividido em duas fases: fase 1 em que ocorre transmissão de energia por parte de um ponto de acesso no *downlink* com o objetivo de energizar dispositivos móveis, e fase 2 em que estes dispositivos móveis transmitem informações no *uplink* com a potência recebida na fase 1. Neste contexto, consideramos o problema de maximização da taxa total sujeito a restrições de QoS em que NOMA é empregado no *uplink* assumindo que a técnica SIC aplicada no receptor é feita de forma imperfeita. Este problema foi resolvido de forma ótima através de *softwares* especializados em problemas inteiros e lineares. Por fim, uma análise de desempenho foi realizada a fim de caracterizar o impacto dos requisitos de QoS e a imperfeição no SIC. Como conclusões relevantes, destacamos: 1) imperfeições em SIC possuem um

grande impacto no atendimento aos requisitos de QoS e, portanto, esforços por parte da comunidade científica devem ser dirigidos em reduzir o grau de imperfeição, 2) o número de *slots* dedicados a fase 1 diminui à medida que aumentamos a imperfeição no SIC e os requisitos de QoS e, 3) a taxa total transmitida no *uplink* não é constante quando há imperfeição no processo SIC diferentemente do que ocorre para SIC perfeito. Como uma perspectiva deste estudo, elencamos a concepção de soluções de baixo custo computacional para resolver o problema de otimização aqui formulado.

REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] Xiaopeng Yan, Jianhua Ge, Yangyang Zhang e Lina Gou. “NOMA-based multiple-antenna and multiple-relay networks over Nakagami- m fading channels with imperfect CSI and SIC error”. Em: *IET Commun.* 12 (17 out. de 2018), 2087–2098(11). DOI: 10.1049/iet-com.2018.5248.
- [3] Hyungsik Ju e Rui Zhang. “Throughput Maximization in Wireless Powered Communication Networks”. Em: *IEEE Trans. on Wireless Commun.* 13.1 (2014), pp. 418–428. DOI: 10.1109/TWC.2013.112513.130760.
- [4] C. Guo, B. Liao, L. Huang, Q. Li e X. Lin. “Convexity of Fairness-Aware Resource Allocation in Wireless Powered Communication Networks”. Em: *IEEE Commun. Lett.* 20.3 (2016), pp. 474–477.
- [5] P. D. Diamantoulakis e G. K. Karagiannidis. “Maximizing Proportional Fairness in Wireless Powered Communications”. Em: *IEEE Wireless Commun. Lett.* 6.2 (2017), pp. 202–205.
- [6] 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.
- [7] A. Celik, M. Tsai, R. M. Radaydeh, F. S. Al-Qahtani e M. Alouini. “Distributed User Clustering and Resource Allocation for Imperfect NOMA in Heterogeneous Networks”. Em: *IEEE Trans. on Commun.* 67.10 (2019), pp. 7211–7227.
- [8] W. Wang, S. Yan e S. Yang. “Optimally Joint Subcarrier Matching and Power Allocation in OFDM Multihop System”. Em: 2008 ([02] de 2008).
- [9] George Nemhauser e Laurence Wosley. *Integer and Combinatorial Optimization*. 1999.
- [10] 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.
- [11] IBM. *IBM ILOG CPLEX Optimizer*. URL: <http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer/>.