



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE SOBRAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MICHEL BERNARDO DE PAIVA

**ANÁLISE DE SOLUÇÕES HEURÍSTICAS E ÓTIMAS PARA OTIMIZAÇÃO DE
SISTEMAS WPCN/NOMA COM SIC IMPERFEITO E GARANTIAS QOS**

SOBRAL

2022

MICHEL BERNARDO DE PAIVA

ANÁLISE DE SOLUÇÕES HEURÍSTICAS E ÓTIMAS PARA OTIMIZAÇÃO DE
SISTEMAS WPCN/NOMA COM SIC IMPERFEITO E GARANTIAS QOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica
do Campus de Sobral da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Rafael
Marques Lima

SOBRAL

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P169a Paiva, Michel Bernardo de.
Análise de Soluções Heurísticas e Ótimas para Otimização de Sistema WPCN/NOMA com SIC Imperfeito e Garantias QoS / Michel Bernardo de Paiva. – 2022.
45 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral, Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Rafael Marques Lima.

1. WPCN. 2. NOMA. 3. SIC Imperfeito. 4. EH. 5. QoS. I. Título.

CDD 621.3

MICHEL BERNARDO DE PAIVA

ANÁLISE DE SOLUÇÕES HEURÍSTICAS E ÓTIMAS PARA OTIMIZAÇÃO DE
SISTEMAS WPCN/NOMA COM SIC IMPERFEITO E GARANTIAS QOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica
do Campus de Sobral da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Rafael Marques
Lima (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Yuri Victor de Melo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Victor Farias Monteiro
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Teleinformática (PPGETI/UFC)

À Jesus Cristo, meu senhor e salvador, e minha família. Em especial minha mãe, Renata do Nascimento Bernardo; minha avó, Maria Celeste do Nascimento Bernardo; e meu irmão, Carlos Renan Bernardo Gomes. Vocês foram minha base e motivação para superar cada desafio dessa graduação.

AGRADECIMENTOS

A minha família. Sou grato por todo amor e base que me foi dada e possibilitou que eu pudesse cursar Engenharia Elétrica.

Ao Prof. Dr. Rafael Lima, que me apresentou a área de telecomunicações, me deu a oportunidade de cursar a iniciação científica e me deu todo auxílio para elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso.

A minha namorada Israelly, com quem tenho compartilhado sonhos e angústias, e onde encontrei uma companhia doce.

A minha igreja Refugio da Graça, onde tenho amigos mais chegados que irmãos, e onde fui muito influenciado a procurar uma vida acadêmica, por meio de bons exemplos.

Aos amigos e irmãos da CRU e do GEB, onde também tenho amigos mais chegados que irmão, e onde minha fé foi fortalecida no meio universitário.

Aos meus amigos e colegas de curso, em especial Matheus Garcia, Paulo Ricardo, Tiago Paiva, Vitor Manoel, Alexandre Holanda, Vinicius Freire, Matheus Renan e Sérgio Franco.

Aos meus amigos e colegas de trabalho da Ágil Engenharia, do grupo Alan Araújo, onde cresci profissionalmente e conheci profissionais incríveis, os quais tenho como inspiração.

A todos os outros colegas universitários com os quais pude cooperar e que me agregaram valor ao longo desses anos.

A todos que foram meus professores no curso de Engenharia Elétrica, em especial ao Prof. Dr. Euclimar Passos, pelos ensinamentos de Física e de vida.

A Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUN-CAP), por minha bolsa de iniciação científica nos anos de 2021 e 2022.

A Universidade Federal do Ceará (UFC) Campus Sobral, por todas as condições, oportunidades e conhecimento proporcionado durante meus anos de graduação.

“Pois o Senhor é quem dá sabedoria; de sua boca
procedem o conhecimento e o discernimento.”

(BÍBLIA, Provérbios, 2, 6)

RESUMO

Atualmente o Brasil e algumas partes do mundo vivem a chegada dos sistemas de quinta geração, ou do inglês, *5th Generation* (5G), e muitos esforços têm sido desempenhados para usufruir das capacidades da rede. Neste contexto, o 5G consiste em uma rede habilitadora para implantação de sistemas do conceito de Internet das Coisas, do inglês, *Internet of Things* IoT, onde uma grande quantidade de dispositivos se conectarão à rede por meio sem fio. Assim, o impacto do crescimento da utilização das redes de comunicação sem fio se tornará ainda mais evidente, o que demanda o desenvolvimento de estudos para otimização dos recursos da rede. Este trabalho apresenta um cenário simples de um sistema de comunicação com o objetivo de formular um problema de otimização para maximizar a taxa de dados alcançável no *uplink* em uma rede energizada sem fio, do inglês *Wireless Powered Communication Network* (WPCN) que utiliza acesso múltiplo não ortogonal, do inglês *Non-Orthogonal Multiple Access* NOMA, seguido de Cancelamento Sucessivo de Interferência, do inglês, *Successive Interference Cancellation* (SIC) imperfeito, com requisitos mínimos de taxas heterogêneas para cada usuário do sistema como forma de garantia de qualidade de serviço, do inglês, *Quality of Service* (QoS). O cenário desenvolvido consiste em uma célula de comunicação com uma ERB (Estação Rádio Base) provendo uma área de cobertura circular, estabelecendo enlace com os usuários. O sistema é dividido em duas fases: A primeira ocorre no *downlink* e é efetuado uma colheita de energia, do inglês, *Energy Harvesting* (EH), aplicando conceitos de transferência de energia sem fio, do inglês, *Wireless Power Transfer* (WPT), para recarregar as baterias dos usuários com energia proveniente de ondas eletromagnéticas; A segunda fase ocorre no *uplink* onde o esquema de acesso múltiplo empregado é o NOMA, sendo necessário aplicar o SIC com uma certa ordem de decodificação. Este trabalho estuda a otimização da segunda fase da rede WPCN modelada. Em simulações computacionais realizadas é feita uma análise comparativa dos resultados obtidos na solução ótima com três soluções propostas em artigos de referência, onde alguns parâmetros foram variados. Os resultados mostram que à medida que o requisito mínimo de taxa aumenta, mais soluções inviáveis são encontradas e menor a taxa de dados alcançada pelos usuários.

Palavras-chave: WPCN. NOMA. SIC imperfeito. EH. QoS.

ABSTRACT

Currently, Brazil and some parts of the world are experiencing the arrival of fifth generation systems, more popularly, 5th Generation (5G), and many efforts have been made to take advantage of network resources. In this context, 5G consists of a network enabled for the deployment of IoT systems (Internet of Things), where a large number of devices will connect to the network wirelessly. Thus, the impact of the growth in the use of wireless communication networks becomes even more evident, which demands the development of studies to optimize network resources. This work shows a simple scenario of a communication system with the objective to formulate a optimization problem to maximize the total data rate in uplink in a WPCN (Wireless Powered Communication Network) that use NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) followed by imperfect SIC (Sucessive Interference Cancelation), with minimum requirements of heterogeneous rates for each user of the system as a way to guarantee QoS (Quality of Service). The scenario developed consist in a communication cell with a BS (Base Station) providing a circular coverage area, establishing link with the users. The system is divided in two fases: The first one occurs in downlink and an energy harvesting is carried out applying concepts of wireless power transfer to recharge the users's batteries with energy from electromagnetic waves. The second phase occurs in uplink where the multiple access scheme used is NOMA, being necessary apply the SIC with a certain decoding order. This work studies the optimization of the second phase of the modeled WPCN network. In computational simulations performed, a comparative analysis of the results obtained in the optimal solution with three solutions proposed in reference articles is made, where some parameters were varied. The results show that as the minimum rate requirement increases, more infeasible solutions are found and the lower the data rate achieved by users.

Keywords: WPCN. NOMA. imperfect SIC. EH. QoS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cenário de <i>uplink</i> com NOMA.	17
Figura 2 – Principais formas de EH no WPCN.	19
Figura 3 – Modelo do Sistema WPCN-NOMA.	26
Figura 4 – Taxa de interrupção em função da taxa mínima requisitada para cada usuário, variando o grau de imperfeição do SIC.	35
Figura 5 – Taxa de interrupção em função da taxa mínima requisitada para cada usuário, variando o Desvio da taxas mínima heterogêneas.	35
Figura 6 – Taxa de interrupção em função da taxa mínima requisitada para cada usuário, variando a potência de transmissão P	36
Figura 7 – Taxa total de dados no uplink em função da taxa mínima requisitada para cada usuário, variando o grau de imperfeição do SIC.	37
Figura 8 – Taxa total de dados no uplink em função da taxa mínima requisitada para cada usuário, variando o Desvio da taxas mínima heterogêneas.	38
Figura 9 – Taxa total de dados no uplink em função da taxa mínima requisitada para cada usuário, variando a potência de transmissão P	38
Figura 10 – Número médio de <i>slots</i> de tempo da fase 1 em função da taxa mínima requisitada para cada usuário, variando a potência de transmissão P	40
Figura 11 – Número médio de <i>slots</i> de tempo da fase 1 em função da taxa mínima requisitada para cada usuário, variando a quantidade de usuários no sistema.	40
Figura 12 – Taxa de interrupções em função da taxa mínima requisitada para cada usuário - Curvas da solução ótima e de soluções de referência.	42
Figura 13 – Taxa total de dados no uplink em função da taxa mínima requisitada para cada usuário - Dados da solução ótima e de soluções de referência.	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

5G	<i>5th Generation</i>
6G	<i>6th Generation</i>
D2D	<i>Device-to-Device</i>
EH	<i>Energy Harvesting</i>
ERB	Estação Rádio Base
ILP	<i>Integer Linear Program</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
NOMA	<i>Non-Orthogonal Multiple Access</i>
OMA	<i>Orthogonal Multiple Access</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RB	<i>Resource Blocks</i>
REF	<i>Residual Error Factor</i>
RRA	<i>Radio Resource Allocation</i>
SIC	<i>Successive Interference Cancellation</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
WPCN	<i>Wireless Powered Communication Network</i>
WPT	<i>Wireless Power Transfer</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Contextualização e Motivações	13
1.2	Objetivos Gerais e Específicos	14
1.2.1	<i>Objetivos Gerais</i>	14
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	15
1.3	Estrutura do documento	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	NOMA: Acesso Múltiplo não Ortogonal	16
2.1.1	<i>Uplink NOMA</i>	16
2.1.2	<i>SIC: Cancelamento Sucessivo de Interferência</i>	17
2.2	Colheita de Energia	18
2.2.1	<i>WPCN: Redes de Comunicação Alimentadas Sem Fio</i>	18
2.3	Alocação de Recursos de Rádio	19
2.3.1	<i>Programação Linear</i>	19
3	TRABALHOS RELACIONADOS	21
4	MODELAGEM DO SISTEMA	25
5	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E SOLUÇÕES ANALISADAS	28
5.1	Implementação da solução ótima com o pacote CPLEX	29
5.2	Soluções de baixo custo computacional para otimização da ordem de decodificação SIC	30
6	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E ANÁLISE DE DESEMPENHO	33
6.1	Análise da Solução Ótima	33
6.1.1	<i>Taxa de interrupções vs taxa mínima requisitada para cada usuário do sistema</i>	34
6.1.2	<i>Taxa total de dados no uplink vs taxa mínima requisitada para cada usuário do sistema</i>	36
6.1.3	<i>Número médio de slots na fase 1 vs taxa mínima requisitada para cada usuário do sistema</i>	39
6.2	Análise Comparativa entre as soluções de referência e a Solução Ótima	41
7	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados na seção 1.1 a contextualização e as motivações da pesquisa; em seguida, são apresentados os objetivos gerais e específicos na seção 1.2; e, por último, na seção 1.3 é apresentada a estrutura do desenvolvimento do presente documento.

1.1 Contextualização e Motivações

O mercado das redes de comunicação sem fio é uma das áreas que tem crescido continuamente ao longo das últimas décadas (SAUNDERS, 2007). À medida que surgem novas tecnologias, novos tipos de serviços são oferecidos ao consumidor final e o acesso aos serviços de comunicação sem fio se torna mais democrático. Atualmente, o Brasil e algumas partes do mundo vivem a chegada dos sistemas de quinta geração, mais popularmente conhecido, *5th Generation* (5G), e diversos esforços têm sido desempenhado para usufruir das capacidades da rede. Paralelamente, já existem muitos estudos e projetos no desenvolvimento da sexta geração, ou do inglês, *6th Generation* (6G). O 5G consiste em uma rede habilitadora para a implantação do conceito de Internet das Coisas, do inglês, *Internet of Things* (IoT), onde uma grande quantidade de sensores e dispositivos de monitoramento se comunicarão com rede por meio sem fio. Assim o impacto do crescimento da utilização das redes de comunicação sem fio se tornará ainda mais evidente nos próximos anos. De acordo com (WU *et al.*, 2022), estima-se que o montante de dispositivos IoT ao redor do mundo passará de 13,8 bilhões em 2021 para 30,9 bilhões até 2025.

Deste modo, observa-se que é de grande importância o desenvolvimento de novas tecnologias a fim de suprir o crescimento na demanda por tráfego de dados, garantindo e incrementando a qualidade de serviço, ou do inglês, *Quality of Service* (QoS). Para tanto, estudos relacionados a alocação de recurso de rádio, do inglês, *Radio Resource Allocation* (RRA), podem fornecer estratégias eficientes para garantir eficiência energética e espectral. Os estudos sobre RRA consistem em otimizar a distribuição de recursos de comunicação, tais como energia, faixas de frequência, faixas de tempo, etc.

Uma das mais importante tecnologias neste contexto é a colheita de energia, do inglês, *Energy Harvesting* (EH), que amplia as possibilidade de obtenção de energia para as baterias dos dispositivos. Neste contexto, destacam-se as redes de comunicação alimentadas sem fio, ou do inglês, *Wireless Powered Communication Network* (WPCN), onde os terminais

da rede fazem colheita de energia por meio de Transferência de Potência sem fio, do inglês *Wireless Power Transfer* (WPT), para recarregar os dispositivos, eliminando a necessidade de infraestrutura de cabeamento e garantindo maior vida útil para as baterias dos dispositivos. No entanto, a utilização de WPT tem suas limitações, principalmente relacionadas ao canal sem fio, de modo que as distâncias entre a fonte e o receptor se tornam um fator muito limitante, pois a propagação difusa da energia eletromagnética causa baixa eficiência na transmissão de energia.

Outra importante tecnologia é o Acesso Múltiplo não Ortogonal, do inglês, *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA), que permite atender vários usuários utilizando os mesmos blocos de recursos tempo/frequência (TABASSUM *et al.*, 2017), o que possibilita maior capacidade de conectividade e eficiência espectral. Os princípios do NOMA que garantem suas vantagens, ao mesmo tempo, conferem grandes desafios quanto à sua implantação, pois utilizar os mesmos blocos de recursos tempo/frequência acarreta em grande interferência entre os usuários do sistema. Neste sentido, a principal estratégia para decodificar os sinais que são multiplexados no NOMA é a aplicação de um Cancelamento Sucessivo de Interferência, do inglês, *Successive Interference Cancellation* (SIC), que decodifica os sinais sequencialmente em uma ordem de decodificação, de modo que um sinal só receba interferência dos sinais ainda não decodificados (podendo também receber interferência dos sinais que são decodificados primeiro, em um cenário prático). Por conta disso, o NOMA tem sido reconhecido como potencial tecnologia para as futuras gerações do sistema celular (MELO *et al.*, 2020).

Diante do que foi apresentado, este trabalho abordará o estudo de um sistema WPCN com colheita de energia por WPT no *downlink* e aplicação do NOMA no *uplink* com SIC imperfeito. É formulado um problema de otimização para maximização das taxas de dados dos usuários no *uplink* onde são garantido os requisitos individuais e heterogêneos de QoS. O problema de alocação de recursos no *downlink* e *uplink* é não convexo. Deste modo, a solução ótima e soluções de referências são implementadas, a fim de obter um entendimento geral do sistema e de comparar os resultados das soluções de referência com a solução ótima.

1.2 Objetivos Gerais e Específicos

1.2.1 Objetivos Gerais

Estudar e analisar o desempenho de um modelo de sistema WPCN multiplexado por NOMA no *uplink*, considerando um cenário mais realista de imperfeição do SIC e taxas

mínimas requeridas heterogêneas. O objeto principal de estudo é a maximização da taxa total de transferência de dados no *uplink* com garantias de qualidade de serviço para os usuários. Na metodologia proposta, formula-se um problema de otimização inteiro e linear com o auxílio de *softwares* computacionais. Também são apresentadas soluções propostas de baixo custo computacional em trabalhos relacionados para otimização do SIC.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

- Estabelecer um modelo coerente de sistema WPCN no *downlink* e multiplexação por NOMA com SIC imperfeito no *uplink*;
- Formular matematicamente um problema de otimização, com o objetivo de maximizar as taxas de dados no *uplink* sujeito a restrições de taxas heterogêneas;
- Implementar soluções propostas na literatura;
- Discutir e comparar o desempenho das soluções existentes com a solução ótima do problema formulado;

1.3 **Estrutura do documento**

Neste capítulo apresentamos a contextualização e os principais objetivos do trabalho. No capítulo 2 são apresentados os conceitos bases para o entendimento das tecnologias propostas. O capítulo 3 apresenta as principais referências bibliográficas utilizadas para o desenvolvimento do modelo teórico e computacional da pesquisa; além disso, o capítulo ainda apresenta algumas soluções existentes na literatura para a otimização do SIC. No capítulo 4 são apresentadas as principais características do sistema WPCN e a modelagem do NOMA e do SIC. Em seguida, o capítulo 5 apresenta a modelagem matemática do problema e a construção da técnica de programação linear empregada para solução. O capítulo 6 apresenta as principais métricas avaliadas nas simulações computacionais pelo *software* Matlab; o capítulo também compara as soluções de referência com a solução ótima do *solver* CPLEX. Por fim, o capítulo 7 apresenta as conclusões e considerações finais do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo serão abordados os conceitos mais importantes para o entendimento das tecnologias propostas no presente Trabalho de Conclusão de Curso. Na seção 2.1 é apresentado o conceito e as características do NOMA, assim como um cenário *uplink* com aplicação do NOMA e o conceito de SIC para decodificação do NOMA. Na seção 2.2 é exposto o conceito de EH, e o caso especial do EH em redes de comunicação sem fio, WPCN. Por fim, na seção 2.3 é introduzido o assunto da alocação de recursos e sua importância no contexto atual das redes de comunicação sem fio, e também os principais tópicos sobre programação linear.

2.1 NOMA: Acesso Múltiplo não Ortogonal

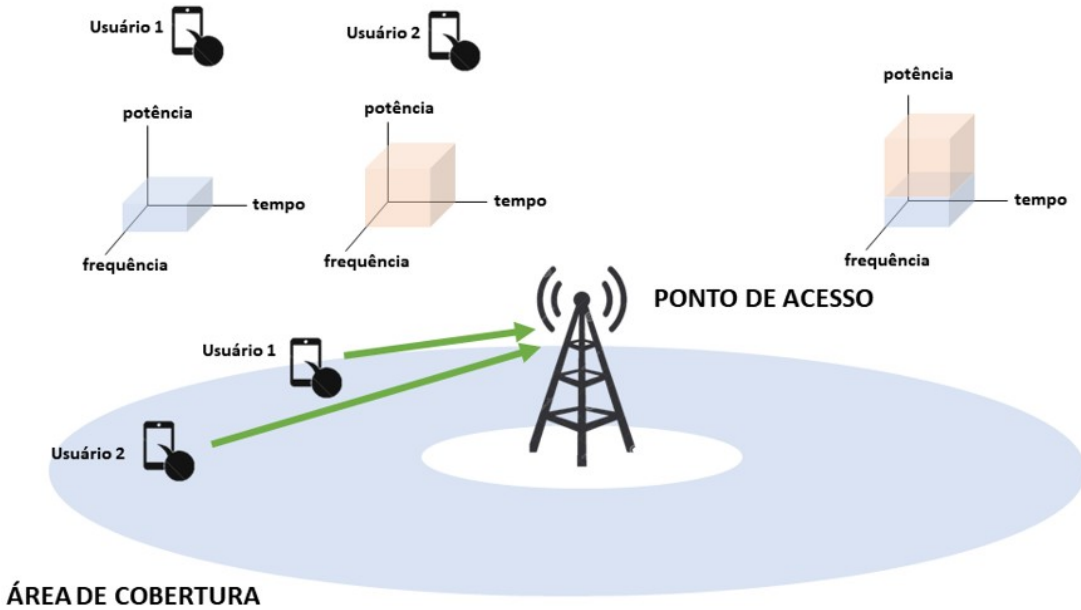
O NOMA serve vários usuários usando o mesmo recurso tempo-frequência (TABASSUM *et al.*, 2017), isto é, os usuários podem transmitir e/ou receber informação da ERB ao mesmo tempo e na mesma frequência. NOMA tem se destacado como tecnologia potencial para as próximas gerações dos sistemas celulares (TABASSUM *et al.*, 2017) devido sua capacidade de apresentar baixa latência de transmissão e baixo custo de sinalização, sendo características atrativas para se trabalhar em redes massivas com recursos de rádio limitados. No entanto, a aplicação do mesmo espectro de recursos acarreta no aumento da interferência entre os usuários do sistema. Para atenuar o efeito da interferência é necessário aplicar o SIC, que será mais detalhado na subseção 2.1.2.

2.1.1 Uplink NOMA

No cenário *uplink* NOMA, usuários transmitem no *uplink* utilizando seus recursos de potência para uma base ou ponto de acesso comum (TABASSUM *et al.*, 2017). A Figura 1 ilustra um cenário de *uplink*, onde a Estação Rádio Base (ERB) recebe o sinal dos usuários aplicando NOMA. Observa-se que ambos os usuários utilizam o mesmo recurso tempo-frequência e diferem na potência dos sinais, de modo que o sinal recebido na ERB é o sinal sobreposto dos usuários.

A equação a seguir expressa o sinal superposto que chega na ERB, para um cenário geral com U usuários, onde x_i é o sinal individual de cada usuário, cuja potência e ganho de canal

Figura 1 – Cenário de *uplink* com NOMA.



Fonte: Autor.

são p_i e h_i , respectivamente, e w é a potência do ruído experimentado na ERB:

$$y = \sum_{i=1}^U \sqrt{p_i} h_i x_i + w \quad (2.1)$$

2.1.2 SIC: Cancelamento Sucessivo de Interferência

O SIC é o método utilizado para decodificar sinais que chegam de forma simultânea em um receptor.

No modelo de *uplink* com aplicação do NOMA, conforme apresentado na seção 2.1.1, cada sinal de mensagem experimenta ganho de canal diferente (TABASSUM *et al.*, 2017), de modo que os sinais dos usuários com canais mais fortes provavelmente serão os sinais mais fortes recebidos na ERB. Assim, em um cenário perfeito, o princípio do SIC consiste em determinar uma ordem de decodificação onde o sinal mais forte é decodificado primeiro, experimentando interferência de todos os demais sinais relativamente mais fracos, e assim por diante, até o sinal mais fraco que é decodificado por último, sem experimentar interferência. Em um cenário mais realista, o SIC ocorre de maneira imperfeita, onde o sinal que está sendo decodificado sofre interferência dos sinais relativamente mais fracos e de uma parcela residual dos sinais que são decodificados primeiro.

A ordem de decodificação do SIC, no entanto, não necessariamente está em função somente da potência recebida na ERB. Os usuários do sistema tem requisitos mínimos de taxas,

e esses requisitos podem ser homogêneos, onde todos os usuários precisam atender a mesma taxa mínima, ou heterogêneas, onde as requisições de taxas podem ser diferentes para cada usuário. Assim, a ordem de decodificação deve ser estratégica, de modo que os usuários sejam posicionados obedecendo seus requisitos mínimos de taxas.

2.2 Colheita de Energia

A colheita de energia (EH), diz respeito ao processo de utilizar energia proveniente de fontes de energia, sejam elas naturais ou artificiais. Métodos de colheita de energia de diversas fontes do ambiente são cada vez mais requisitadas, pois o aumento na necessidade de sistemas com sensores e dispositivos alimentados por baterias demanda soluções dinâmicas (CHALASANI; CONRAD, 2008).

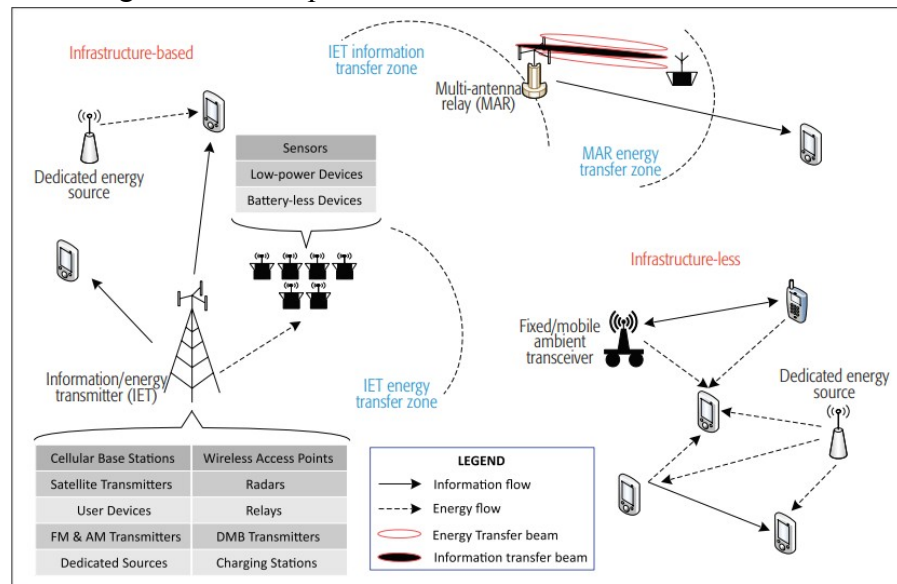
No cenário modelado neste trabalho, a colheita de energia se refere ao processo em que as baterias são recarregadas coletando energia das ondas eletromagnéticas transmitidas no enlace entre os terminais móveis e a ERB. Não serão abordados, no entanto, fontes naturais e os detalhes eletrônicos dos dispositivos coletores de energia.

2.2.1 WPCN: Redes de Comunicação Alimentadas Sem Fio

O WPCN apresenta vantagens em diversos cenários pela facilidade do carregamento dos dispositivos pelo meio sem fio. Tal aspecto simplifica a manutenção e o *design* de novas arquiteturas de dispositivos, dentre outras vantagens (NIYATO *et al.*, 2017), tornando a tecnologia do WPCN muito importante para as atuais e futuras gerações do sistema celular.

As principais formas de colheita de energia no WPCN ocorrem pelas seguintes técnicas: Transferência de Energia por Frequência de Rádio, Acoplamento Indutivo e Acoplamento Ressonante Magnético (NIYATO *et al.*, 2017). A Figura 2 mostra alguns exemplos de implementação do WPCN. O lado esquerdo da Figura 2 ilustra uma implementação baseada em infraestrutura, onde uma ERB pode prover conexão para transferência de dados enquanto fontes de energia dedicadas fornecem enlace de energia. Outra possibilidade é a implementação sem infraestrutura, onde os nós do sistema, sejam usuários, fontes de energia dedicadas, etc, estabelecem enlaces de informação e energia de forma dinâmica, utilizando o conceito de dispositivo a dispositivo, do inglês, *Device-to-Device* (D2D) (NIYATO *et al.*, 2017).

Figura 2 – Principais formas de EH no WPCN.



Fonte: (NIYATO *et al.*, 2017).

2.3 Alocação de Recursos de Rádio

Os recursos de rádio, tais como largura de banda de frequência, potência de transmissão, *slots* de tempo, etc, são limitados e sua utilização para o meio de comunicação sem fio enfrenta três tipos principais de perda: perda de percurso médio, em função da distância entre o emissor e receptor; sombreamento, provocado por obstáculos como prédios e montanhas; e o desvanecimento rápido, devido a interferências construtivas e destrutivas de réplicas do sinal que chegam no receptor por outros meios (SAUNDERS, 2007). Além disso, o atual cenário de crescimento das demandas por tráfego de dados, cobertura móvel, dentre outras, exige das redes sem fio uma série de soluções para suprir as exigências de um grande número de conexões simultâneas com garantias de qualidade de serviço (QoS). Neste contexto, as técnicas de alocação de recursos de rádio consistem em definir a alocação de recursos da rede para os dispositivos conectados à rede e com que duração de tempo esses recursos estarão alocados. Para solucionar tais problemas é necessário aplicar algoritmos de gerenciamento inteligente de recursos de rádio (SADR *et al.*, 2009), onde técnicas de programação podem ser utilizadas na solução de problemas de alocação de recursos.

2.3.1 Programação Linear

A programação linear é uma técnica de programação que presume uma modelagem linear entre as entidades e variáveis do sistema e busca a solução ótima para o problema formulado

(RODRIGUES, 2014). Os elementos essenciais de um problema de programação linear são: variáveis de decisão, função objetivo e restrições.

As variáveis de decisão são as incógnitas que devem ser definidas no problema e devem ter um comportamento linear, não podendo ser multiplicadas entre si, nem exponencializadas, ou qualquer operação que impossibilite um comportamento linear (RODRIGUES, 2014). A função objetivo é a expressão matemática que descreve o comportamento do problema, e a otimização de um problema de programação linear consiste em maximizar ou minimizar uma função objetivo (RODRIGUES, 2014). As restrições são exigências aplicadas às variáveis de decisão, isto é, são limites impostos aos valores que as variáveis de decisão podem assumir (RODRIGUES, 2014).

As equações (2.2a) e (2.2b) mostram um exemplo de problema de programação linear, cujo objetivo pode ser maximizar ou minimizar uma função objetivo implementada pelo vetor \mathbf{f} , dado o vetor de variáveis de decisão \mathbf{x} . Na equação (2.2b) observa-se que a variável de decisão é um valor não-negativo e as restrições podem ser de desigualdades e/ou igualdade, onde \mathbf{b} e \mathbf{A} são, respectivamente, um vetor e uma matriz de coeficientes.

$$\max \text{ ou } \min \quad \mathbf{f}^T \cdot \mathbf{x} \quad (2.2a)$$

Sujeito a

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} (\geq, \leq, =) \mathbf{b} \text{ e } \mathbf{x} \geq 0 \quad (2.2b)$$

As variáveis do problema de otimização podem ser discretas ou contínuas, definidas pela natureza do problema. Quando as variáveis são contínuas o problema é chamado de problema de otimização contínua; já quando as variáveis são discretas o problema é dito de otimização discreta ou combinatória (BECCENERI, 2008).

Neste trabalho, a técnica de programação linear foi utilizada para obter a solução ótima do problema formulado no capítulo 5.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo serão abordadas as principais referências literárias utilizadas como inspiração na modelagem das tecnologias estudadas a partir do capítulo 4 do presente trabalho.

Nos artigos (MELO *et al.*, 2020), (ARAGÃO *et al.*, 2021) e (LIMA *et al.*, 2021) os autores desenvolvem trabalhos semelhantes, cujo objetivo é maximizar a taxa total de dados no *uplink* com NOMA. Os artigos apresentam um cenário onde um ponto de acesso estabelece comunicação com os usuários dentro de sua área de cobertura. A modelagem dos sistemas consistem em duas fases: fase 1 (*downlink*) onde ocorre uma colheita de energia que determinará a potência disponível para os usuários na fase seguinte; e uma fase 2 (*uplink*) onde é aplicado NOMA seguido do SIC para decodificação. Cada fase tem uma duração de tempo expressa em *slots* de tempo discretos, de modo que o problema de programação linear para otimização dos modelos assume uma natureza combinatorial, onde são determinadas a quantidade de *slots* da primeira fase e a ordem de decodificação do SIC.

O modelo do artigo (MELO *et al.*, 2020) considera um SIC perfeito, isto é, na decodificação os sinais experimentam interferência somente dos sinais que ainda não foram decodificados. Além disso, cada usuário tem uma restrição de taxa mínima, e as taxas são heterogêneas, variando com certo desvio em torno de uma taxa central. A existência de restrição de taxas individuais implica no acréscimo de uma restrição no problema de programação linear desenvolvido para solução do problema. Os autores propõem duas heurísticas e comparam seus resultados com a solução ótima e com soluções de *benchmark*. Como resultado, é observado que, à medida que a taxa central aumenta, a quantidade de iterações do algoritmo sem encontrar soluções, isto é, taxa de *outage*, aumenta significativamente. Por outra via, o aumento do desvio em torno da taxa central tem efeito quase insignificante sobre a taxa de *outage*.

Já no modelo do artigo (ARAGÃO *et al.*, 2021) é considerado o SIC imperfeito, onde resquícios dos sinais que já foram decodificados causam interferência na decodificação dos sinais seguintes, e as restrições de taxas de dados dos usuários são homogêneas. Para calcular o impacto dos resquícios dos sinais é utilizado um fator de erro residual, do inglês, *Residual Error Factor* (REF) nos sinais já decodificados. No artigo, os autores analisam os resultados da solução ótima variando a taxa requisitada para os usuários e o valor de REF, onde é possível observar que, à medida que o requisito de taxas aumenta, o valor de *outage* também aumenta, e o mesmo efeito é observado quando o valor de REF aumenta, isto é, quando aumenta a interferência dos sinais já decodificados.

No último dos três artigos, (LIMA *et al.*, 2021), a restrição de taxa mínima para os usuários não é levada em conta. Analogamente à (MELO *et al.*, 2020), os autores propõem uma heurística e comparam os resultados com a solução ótima e com soluções de *benchmark*. Nos resultados os autores fazem uma primeira análise mostrando a taxa total de dados em função do REF, variando do cenário do SIC perfeito até o cenário onde a parte integral dos sinais decodificados interferem na decodificação de um usuário, sendo observado que a taxa decresce a cada aumento no valor de REF. Além disso, também é analisado a taxa total no *uplink* em função da quantidade de usuários no sistema para dois casos de REF, 0,02 e 0,10, onde observa-se que a quantidade de usuários impacta significativamente a taxa total de dados para valores baixos de REF, mas para valores altos a quantidade de usuários é quase irrelevante.

Em (ZHANG *et al.*, 2020), é apresentado um cenário mais sofisticado onde a ERB serve K usuários com requisito de taxa mínima, porém o sistema dispõe de M tempo/frequência/código blocos de recursos, do inglês, *Resource Blocks* (RB), de modo que $M < K$. Assim os usuários são divididos em M grupos, e os usuários pertencentes a um grupo transmitem no mesmo RB, sendo necessário aplicar NOMA, enquanto usuários de RB diferentes efetuam acesso múltiplo ortogonal, do inglês, *Orthogonal Multiple Access* (OMA). Neste cenário, os autores propõem uma solução para determinar a ordem de decodificação SIC, o controle de potência e o agrupamento de usuários. Para definir a ordem de decodificação SIC, calculamos uma métrica de acordo com a equação (3.1) a seguir

$$|h|^2 \left(1 + \frac{1}{\eta_k}\right) \quad (3.1)$$

onde

$$\eta_k = 2^{R_k} + 1 \quad (3.2)$$

e ordenamos de forma decrescente os valores encontrados. Na expressão (3.1), h_k é a resposta em frequência do canal entre a ERB e o k -ésimo usuário, e r_k é a taxa mínima requerida para o k -ésimo usuário. Vale ressaltar que neste artigo os autores normalizam os valores da taxa com a banda do canal. Nos resultados, de (ZHANG *et al.*, 2020) é observado que a proposta dos autores tem resultados muito semelhantes à solução ótima do cenário proposto, onde o somatório de taxas alcançáveis no NOMA aumenta à medida que a quantidade de usuários é incrementada, diferente do OMA, onde o somatório de taxas alcançáveis tem um valor máximo que é dependente da banda utilizada.

Uma outra solução para a ordem de decodificação é proposta em (CHEN; LIU, 2021). Os autores trabalham com um cenário semelhante aos estudos supracitados, onde uma ERB principal serve N usuários aplicando NOMA no *uplink*, seguido de SIC, e cada enlace experimenta desvanecimento plano, ruído branco e perdas de percurso. Para a definição do ordenamento SIC, os autores primeiramente definem a razão sinal-ruído, do inglês, *Signal-to-Noise Ratio* (SNR). Deste modo, os autores propõem a SNR instantânea para cada usuário conforme a equação a seguir

$$\kappa_i = \frac{p_{x_i} |h|^2}{\sigma^2}, \quad (3.3)$$

onde p_{x_i} é a potência de transmissão do i -ésimo usuário, h_k é a resposta em frequência do canal entre o i -ésimo usuário e a ERB, enquanto σ é o ruído branco gaussiano aditivo. Em seguida, os autores propõem a SNR requerida, calculada pela expressão a seguir, que leva em conta a taxa mínima requerida R_k do i -ésimo usuário, que também é normalizada com a banda do canal e é definida como

$$\theta_{x_i} = 2^{R_k} + 1. \quad (3.4)$$

Desta forma, a ordem de decodificação SIC proposta na seção 2 de (CHEN; LIU, 2021) consiste em calcular a razão entre a SNR instantânea e a SNR requerida, para cada usuário, e ordenar os usuários de forma que o primeiro usuário decodificado tenha a maior razão entre as SNR's, o segundo usuário decodificado tenha a segunda maior razão, e assim sucessivamente. Nos resultados os autores avaliam a probabilidade de *outage* em função da SNR, comparando a solução proposta com os cenários do OMA, SIC prefixado e busca exaustiva. A partir dos resultados apresentados, conclue-se que a solução proposta atua melhor que as demais soluções, gerando resultados idênticos à busca exaustiva por um custo computacional menor.

Por fim, em (GAO *et al.*, 2017) o mesmo cenário é utilizado como base para análise do *uplink* com NOMA e uma outra proposta dinâmica de ordenamento do SIC é apresentada. Os autores modelam o sistema de modo que a potência transmitida pelos usuários depende diretamente da perda de percurso, e o ordenamento do SIC, apresentado na seção 2.B, consiste em decodificar primeiro o usuário com a maior potência recebida na ERB. Em seguida, o usuário com a segunda maior potência é decodificado e assim sucessivamente. A potência recebida na ERB é dada pela expressão a seguir

$$p_{r_i} = p_t |h_k|^2 \quad (3.5)$$

onde p_{ti} é a potência de transmissão do i -ésimo usuário. Nas simulações, os autores analisam um cenário com 3 usuários e avaliam a probabilidade de *outage* em função da SNR, comparando o desempenho da solução proposta com um ordenamento fixo do SIC, cuja ordenação $1, 2, \dots, M$ é tal que o usuário M tem a maior perda de caminho. Como resultado, é obtido que a probabilidade de *outage* cai significativamente à medida que a SNR aumenta, em comparação com o ordenamento fixo do SIC. Além disso, para um SIC com ordenamento fixo, é observado que os usuários com maior perda de caminho apresentam um desempenho pior para que os usuários mais próximos da ERB tenham um maior QoS.

Os modelos dos artigos (MELO *et al.*, 2020), (ARAGÃO *et al.*, 2021) e (LIMA *et al.*, 2021) são as principais referências para a modelagem do sistema e formulação do problema apresentado neste trabalho. Já os artigos (ZHANG *et al.*, 2020), (CHEN; LIU, 2021) e (GAO *et al.*, 2017) são as soluções que foram implementadas para análise comparativa com a solução ótima do problema formulado.

4 MODELAGEM DO SISTEMA

Neste capítulo é apresentado o modelo do sistema WPCN-NOMA que será estudado neste trabalho. O cenário é semelhante ao apresentado em (MELO *et al.*, 2020), (ARAGÃO *et al.*, 2021) e (LIMA *et al.*, 2021) com uma diferença que será apresentada no próximo capítulo referente à otimização do problema.

O modelo consiste em uma ERB posicionada no centro de uma célula circular, cuja área de cobertura é em formato de disco, isto é, existe um raio maior e um menor que delimitam a área de cobertura. A ERB estabelece enlace com vários usuários que são uniformemente distribuídos na área de cobertura. O sistema é dividido em duas fases, e o tempo de duração de cada fase é expresso em *slots* de tempo discretos. A primeira fase ocorre no *downlink* entre a ERB e os usuários, onde ocorre a transferência de energia da ERB para os usuários por meio do WPT, conforme apresentado em (MELO *et al.*, 2020). A segunda fase ocorre no *uplink* onde os usuários utilizam a energia coletada para transmitir informações para a ERB. Um *frame* consiste em um ciclo completo das duas fases.

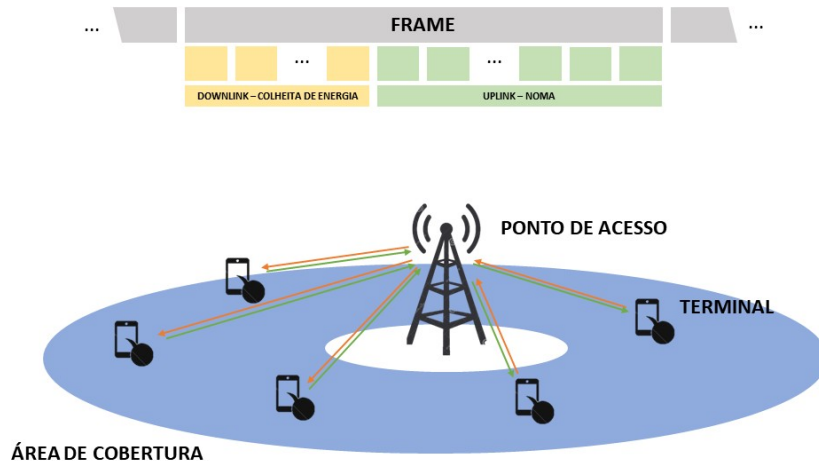
Deste modo, define-se o conjunto de usuários presentes no sistema como $J = \{1, \dots, J\}$ onde J é o número total de usuários. A quantidade de *slots* utilizadas na primeira e na segunda fase são $n^e \in \{1, \dots, N-1\}$ e $n^i \in \{1, \dots, N-1\}$, respectivamente, de modo que $n^e + n^i = N$, sendo N a quantidade total de *slots* de tempo de um *frame*. Note que os valores possíveis dos *slots* para a primeira e segunda fases dentro de um *frame* variam de 1 a $N-1$, porque um *frame* consiste em duas fases, assim o menor valor possível para uma das fases é 1 e o maior é $N-1$. Considera-se que cada *slot* tem um comprimento de tempo de T^n , assim, a duração de um *frame* é de $T^f = T^n \cdot N$.

A energia coletada pelo sistema WPCN na primeira fase é modelada considerando os efeitos prejudiciais do desvanecimento. Neste modelo, considera-se que o efeito do desvanecimento é aproximadamente constante, assim como é considerado em (MELO *et al.*, 2020), (ARAGÃO *et al.*, 2021) e (LIMA *et al.*, 2021). Seja P a potência de transmissão da ERB e g_j o ganho de canal do j -ésimo usuário, tem-se que a energia coletada para este usuário quando são empregados n^e *slots* na primeira fase é

$$E_{j,n^e} = P \cdot \eta \cdot g_j \cdot n^e \cdot T^s \quad (4.1)$$

onde $0 < \eta < 1$ é a eficiência da colheita de energia, sendo 1 para máxima eficiência e 0 para falha na colheita de energia. Assim, tem-se que a potência do j -ésimo usuário para operar na

Figura 3 – Modelo do Sistema WPCN-NOMA.



Fonte: Autor

segunda fase é

$$P_{j,n^e} = \frac{E_{j,n^e}}{T_s \cdot (N - n^e)} \quad (4.2)$$

Na segunda fase é estabelecido o enlace de *uplink* e o esquema de múltiplo acesso empregado é o NOMA. Deste modo, os usuários transmitem seus dados simultaneamente utilizando o mesmo bloco de recursos tempo/frequência, sendo necessário na ERB aplicar o SIC com uma ordem de decodificação adequada. Assim, seja $\pi_p \in \Pi$ a p -ésima permutação dos elementos contidos no conjunto J , que é o conjunto dos terminais móveis do sistema, onde Π é o conjunto de todas as permutações possíveis, cuja quantidade total de permutações dos elementos de J é $M = J!$. Considere também $\pi_{p,i}$ o i -ésimo elemento da permutação p . Para o caso $J = 3$, por exemplo, $M = 3! = 6$, $\Pi = \{(1, 2, 3), (1, 3, 2), (3, 1, 2), (3, 2, 1), (2, 1, 3), (2, 3, 1)\}$ e o $\pi_{3,3} = 2$, que é o usuário 2.

Por fim, define-se a taxa de transferência de dados no *uplink* para o i -ésimo usuário da permutação p quando são empregados n^e slots na primeira fase por

$$r_{\pi_{p,i},n^e,p}(\varepsilon) = \frac{B \cdot n^i}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{\pi_{p,i},n^e} \cdot g_{\pi_{p,i}}}{\varepsilon \sum_{k \leq i-1} P_{\pi_{p,k},n^e} \cdot g_{\pi_{p,k}} + \sum_{k \geq i+1} P_{\pi_{p,k},n^e} \cdot g_{\pi_{p,k}} + \sigma^2} \right), \quad (4.3)$$

onde, B é a banda do canal e σ^2 é a potência do ruído térmico. Conforme abordado em (ARAGÃO *et al.*, 2021) e (LIMA *et al.*, 2021) a equação (4.3) mostra que a taxa de dados do usuário i em uma dada ordem de decodificação sofrerá interferência dos sinais que não foram decodificados,

do ruído térmico e, devido a imperfeição do SIC, de uma parcela residual dos sinais que já foram decodificados.

5 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E SOLUÇÕES ANALISADAS

Neste capítulo é apresentado a formulação do problema de otimização para a maximização da taxa total de dados transmitida no *uplink* do sistema proposto na modelagem do capítulo 4. A técnica utilizada para a otimização é a programação linear, e o desafio é maximizar a taxa total de dados atendendo às restrições de QoS. Além disso, a otimização também deve determinar o número de *slots* empregados na primeira fase e a ordem de decodificação SIC. Para tanto, formula-se o seguinte problema de otimização:

$$\max_{x_{n^e,p}} \left(\sum_{n^e=1}^{N-1} \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J r_{j,n^e,p}(\varepsilon) \cdot x_{n^e,p} \right), \quad (5.1a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{n^e=1}^{N-1} \sum_{p=1}^P r_{j,n^e,p}(\varepsilon) \cdot x_{n^e,p} \geq R_j, \quad \forall j \in \{1, \dots, J\}, \quad (5.1b)$$

$$\sum_{n^e=1}^{N-1} \sum_{p=1}^P x_{n^e,p} = 1. \quad (5.1c)$$

A interpretação do problema consiste em definir a quantidade de *slots* empregados na primeira fase, $n^e \in \{1, \dots, N-1\}$, e a permutação p da ordem de decodificação SIC que maximize a taxa de dados alcançável no *uplink* NOMA atendendo à restrição de taxa mínima aceitável para cada usuário. Por conta disso, a variável de decisão da formulação do problema de programação linear, $x_{n^e,p}$, é binária e sua função é determinar o par (n^e, p) que maximize o somatório das taxas fornecidas pela expressão (4.3) para cada usuário. Ou seja, $x_{n^e,p}$ assume valor 1 para o par (n^e, p) que maximiza a taxa de dados alcançável e 0 para os demais pares (n^e, p) que não atendem ao problema. Na formulação apresentada nesta seção, a expressão (5.1a) é a função objetivo, que modela o somatório das taxas no *uplink*. As expressões (5.1b) e (5.1c) são as restrições do problema. Em (5.1b), tem-se a formulação da restrição de taxa mínima para cada usuário, onde é garantido que cada usuário atinja no mínimo uma certa taxa alvo para cada usuário. Já a expressão (5.1c) garante que somente um par (n^e, p) deve ser escolhido.

Diante da formulação descrita neste capítulo, observa-se que o problema para encontrar o par (n^e, p) é do tipo inteiro e linear, ou do inglês, *Integer Linear Program* (ILP). Neste capítulo são apresentadas quatro abordagens para encontrar a solução do problema. A primeira

proposta é a solução integral do problema ILP onde são utilizados *softwares* especializados para implementação da solução ótima. As demais propostas são divididas em duas etapas: primeiro utiliza-se o problema ILP para encontrar o número de *slots* n^e e em seguida propõe-se uma solução de baixo custo computacional para definir a ordem de decodificação do SIC.

5.1 Implementação da solução ótima com o pacote CPLEX

A implementação do problema ILP é feita com o auxílio do *software* Matlab em conjunto com o pacote CPLEX da IBM (IBM, 2022). Mais especificamente utilizou-se a função *cplexbilp*, cuja formulação exige que o problema seja transcrito em formato matricial, isto é, as expressões (5.1a), (5.1b) e (5.1c) são organizadas em formato matricial, como mostrado abaixo.

A função objetivo é modelada pelo parâmetro \mathbf{f} da função *cplexbilp*, que é um vetor que armazena valores da função linear que formula o problema. A variável de decisão é implementada no parâmetro \mathbf{x} , que também é um vetor e armazena o valor de decisão para cada instância do vetor da função objetivo. De acordo com a modelagem apresentada, portanto, deve ser atribuído à \mathbf{f} os valores das taxas individuais dos usuários para cada configuração do par (n^e, p) . A função *cplexbilp* minimiza a função objetivo, logo, para obter a maximização é necessário multiplicar o vetor \mathbf{f} por -1 . Desta forma a expressão fica $-\mathbf{f} \cdot \mathbf{x}$.

A restrição (5.1b) modela o requisito mínimo de taxa dos usuários, onde a variável de decisão indica que a taxa do j -ésimo usuário para uma dada configuração de n^e *slots* e permutação p é maior que a j -ésima restrição de taxa. Desenvolvendo o somatório para cada $j \in \{1, \dots, J\}$ obtêm-se o seguinte sistema de inequações:

$$\begin{aligned}
 x_{1,1} \cdot r_{1,1,1} + x_{1,2} \cdot r_{1,1,2} + \dots + x_{N-1,P} \cdot r_{1,N-1,P} &\geq R_1 \\
 x_{1,1} \cdot r_{2,1,1} + x_{1,2} \cdot r_{2,1,2} + \dots + x_{N-1,P} \cdot r_{2,N-1,P} &\geq R_2 \\
 &\vdots \\
 x_{1,1} \cdot r_{J,1,1} + x_{1,2} \cdot r_{J,1,2} + \dots + x_{N-1,P} \cdot r_{J,N-1,P} &\geq R_J
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

Assim, o sistema de inequações é transcrito para o formato matricial de forma análoga ao descrito na função objetivo, sendo necessário obedecer o formato exigido na função *cplexbilp*, a saber, $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b}$. Deste modo, \mathbf{A} é uma matriz $J \times (N-1)P$, isto é, a j -ésima linha contém todas as $(N(\text{número total de slots possíveis})-1) \times P(\text{número total de permutações possíveis})$ possibilidades de taxas para o j -ésimo usuário. Já \mathbf{x} é um vetor coluna de dimensão $(N-1)P \times 1$, que é a escolha 0 ou 1 para cada configuração possível de *slots* e permutação para cada usuário. Do outro lado da desigualdade têm-se o vetor \mathbf{b} de dimensão $J \times 1$, que contém as

taxas mínimas de todos os usuários. Para obedecer o formato de entrada da função *cplexbilp* ambos os lados das inequações são multiplicados por -1, invertendo os sinais de desigualdade. Assim, portanto, obtêm-se o seguinte formato matricial do sistema:

$$- \begin{bmatrix} r_{1,1,1} & r_{1,1,2} & r_{1,1,3} & \dots & r_{1,N-1,P} \\ r_{2,1,1} & r_{2,1,2} & r_{2,1,3} & \dots & r_{2,N-1,P} \\ r_{3,1,1} & r_{3,1,2} & r_{3,1,3} & \dots & r_{3,N-1,P} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{J,1,1} & r_{J,1,2} & r_{J,1,3} & \dots & r_{J,N-1,P} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{1,1} \\ x_{1,2} \\ x_{1,3} \\ x_{1,4} \\ \vdots \\ x_{N-1,P} \end{bmatrix} \leq - \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ \vdots \\ R_J \end{bmatrix} \quad (5.1.2)$$

Por fim, a última expressão do problema é a restrição de igualdade. Sua função é garantir que o somatório de todas as variáveis de decisão sejam 1, isto é, somente uma configuração de n^e e p seja escolhida. Desta forma, os parâmetros da restrição de igualdade da função *cplexbilp* devem obedecer $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$. Assim, a matriz \mathbf{A} é modelada como um vetor $1 \times (N-1)P$ e \mathbf{x} é um vetor coluna $(N-1)P \times 1$ cuja multiplicação é um escalar, que deve ser igual $\mathbf{b} = 1$. Assim, obtêm-se a seguinte notação matricial para a restrição de igualdade:

$$\begin{matrix} \text{h} & & & & & & \text{i} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{matrix} \times \begin{bmatrix} x_{1,1} \\ x_{1,2} \\ x_{1,3} \\ x_{1,4} \\ \vdots \\ x_{N-1,P} \end{bmatrix} = 1 \quad (5.1.3)$$

Quando nenhuma solução é encontrada a função retorna uma sinalização, ou *flag*, indicando uma interrupção, isto é, um cenário onde não é possível encontrar uma configuração ótima de n^e slots e permutação p .

5.2 Soluções de baixo custo computacional para otimização da ordem de decodificação SIC

Nesta seção são apresentadas três soluções de baixo custo computacional para estabelecer a ordem de decodificação SIC que será utilizada no *uplink* com NOMA no modelo apresentado no capítulo 4.

As propostas de baixo custo computacional para solução do ordenamento do SIC são apresentadas em (ZHANG *et al.*, 2020), (CHEN; LIU, 2021) e (GAO *et al.*, 2017), conforme abordado no capítulo 3. Deste modo, implementou-se essas soluções adequando-as ao cenário proposto neste trabalho.

A primeira solução é proposta no teorema 1 do artigo (ZHANG *et al.*, 2020), que consiste em ordenar decrescentemente os valores obtidos na expressão (3.1). A segunda solução é proposta na seção 2 do artigo (CHEN; LIU, 2021), e ordena decrescentemente a razão entre as expressões (3.3) e (3.4) para definir a ordem de decodificação dos usuários. Por fim, na seção 2.B do artigo (GAO *et al.*, 2017) é proposto uma ordenação decrescente dos valores de potência recebida na ERB, seguindo a expressão (3.5).

Assim, segue-se o algoritmo para validação das propostas de ordenação do SIC. Para cada uma das soluções, calcula-se a taxa de dados alcançada pelos usuários dentro da ordenação proposta. Em seguida, verifica-se se os usuário atendem aos requisitos mínimos de taxa de dados. Em caso positivo, a proposta de ordenamento é válida e computa-se sucesso para a ordenação proposta. Caso contrário, a solução é inválida e computa-se uma interrupção.

O pseudocódigo mostrado no Algoritmo 1 resume o processo geral de validação das soluções propostas. O código descreve o algoritmo que calcula os valores que definem a ordem de decodificação e o processo de verificação das requisições de taxa. Assim, na linha 3, chama-se de "expressão de controle" a equação que é utilizada para definir a ordem de decodificação. Havendo, portanto, uma expressão de controle para cada proposta. O Algoritmo 1 é implementado para cada uma das três soluções.

Algoritmo 1: Validação das propostas de ordenamento do SIC

Entradas: Quantidade de usuários do sistema J , o vetor de ganho de canal entre a ERB e cada usuário \mathbf{g}_j e o vetor de taxas mínimas requeridas r_j .

- 1. Cálculo da solução ótima do problema ILP:** Resolve o problema ILP formulado em (5.1a) - (5.1c) para obter o valor ótimo de *slots* de tempo da primeira fase, n^e .
- 2. Cálculo das potências:** Calcula o vetor de potências disponível para os usuários na segunda fase conforme a equação (4.2), dado o valor de n^e .
- 3. Cálculo da ordem de decodificação:** Calcula-se a expressão de controle: seguindo as equações (3.1), (3.3) e (3.5). Depois, ordena-se decrescentemente os valores encontrados.
- 4. Cálculo das taxas no uplink** Calcula $r_{\pi_p, i, n^e, p}$ de cada usuário para a permutação proposta, seguindo a equação (4.3).

5. if $r_{j,n^e,p} \geq r_j$ para todo $j \in J$: A proposta encontra uma solução.

6. end.

6 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E ANÁLISE DE DESEMPENHO

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações computacionais do sistema modelado no capítulo 4. As implementações foram feitas utilizando o *software* Matlab com o pacote CPLEX da IBM, com licenças acadêmicas. Ao longo do capítulo são apresentados dez gráficos, com a finalidade de explorar suas características e identificar como os parâmetros do sistema afetam o desempenho das soluções. A seguir, são definidos os valores padrões dos parâmetros do sistema.

Conforme é mostrado na Figura (3), uma ERB é posicionada no centro de uma célula, fornecendo uma área de cobertura em formato de disco, com raio interno de 1 m e raio externo de 10 m. Seguindo os parâmetros apresentados em (MELO *et al.*, 2020), a potência de transmissão da ERB P é igual a 5 W. Considera-se uma eficiência de 50% na colheita de energia, logo η é 0,5. O número total de *slots* de tempo de um *frame* N é 20 e a largura de banda do canal B é de 1 MHz. São dispostos dentro da área de cobertura 5 usuários uniformemente distribuídos. Além disso, considera-se um ruído térmico de potência igual a -104 dBm. O ganho de canal entre a ERB e o j -ésimo usuário é modelado por $10^{-3} \cdot X \cdot d_j^{-3}$, onde d_j é a distância entre a ERB e o j -ésimo usuário e X é uma variável aleatória de distribuição exponencial com média unitária. O grau de imperfeição do SIC é controlado pela variável ref , cujos valores são variados ao longo das simulações entre 0, 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} . Além disso, as taxas mínimas requeridas pelos usuários são heterogêneas, variando em torno de uma média central. As requisições de taxas são dadas por $R_{central} + R_{central} \cdot Dev \cdot Y$, onde Dev é o desvio em relação à taxa média central $R_{central}$ e Y é uma variável aleatória de distribuição uniforme variando de 1 a -1.

Ao longo das simulações os parâmetro ref , Dev e a potência de transmissão P são variados para analisar o comportamento da taxa de interrupções, ou taxa de *outage*, das soluções em análise. Além disso, a taxa de dados alcançada e o número médio de *slots* da primeira fase também são analisados em função dos parâmetros supracitados. Para fins de confiança estatística, os gráficos são obtidos com simulações de Monte Carlo contando 1.000 amostras.

6.1 Análise da Solução Ótima

Nesta seção são apresentados oito gráficos referentes ao comportamento da solução ótima, que mostram a taxa de interrupções (taxa de *outage*) em função da taxa mínima requisitada, a taxa total no *uplink* em função da taxa mínima requisitada e o número médio de *slots*

empregados na primeira fase em função da taxa mínima requisitada.

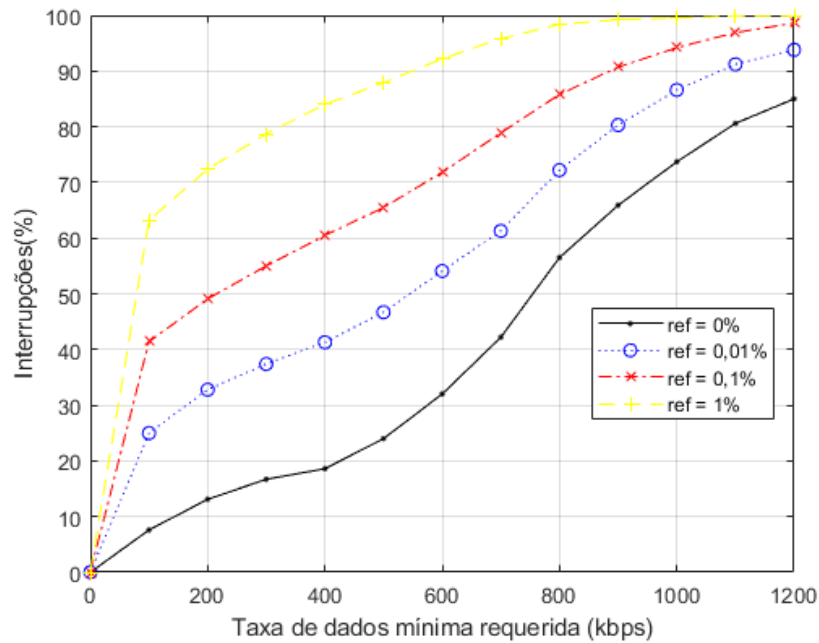
6.1.1 Taxa de interrupções vs taxa mínima requisitada para cada usuário do sistema

Uma interrupção ocorre para uma dada solução quando esta solução não é capaz de encontrar uma solução viável para o problema (5.1a) em uma dada repetição de Monte Carlo. Em alguns artigos de referência este parâmetro é referido como taxa de *outage*. Na Figura 4 apresentamos a probabilidade de interrupção em função da taxa mínima central requisitada para diferentes valores de *ref*. Assim, observa-se na Figura 4 que, de um modo geral, a probabilidade de interrupção aumenta significativamente à medida que a taxa mínima requerida aumenta. Este resultado é esperado, já que aumentar a taxa mínima requerida torna o espaço de procura do problema de otimização estudado mais restrito o que dificulta a tarefa de encontrar uma solução viável. A curva mais inferior mostra o comportamento para um SIC perfeito, onde os sinais já decodificados não interferem na detecção do sinal atual. A partir da segunda curva mais inferior o grau de imperfeição do SIC começa a ser incrementado, e o impacto sobre a taxa de interrupções é nítido para um *ref* de 0,01%. Analogamente, observa-se nas duas curvas superiores, com graus de imperfeição de 0,1% e 1%, que quanto maior o valor de *ref* maior a taxa de interrupção. Este resultado é intuitivo, pois quanto maior o grau de imperfeição do SIC menor é a taxa alcançada pelos usuários e, portanto, maior a probabilidade de não atingir os requisitos mínimos de taxa.

A Figura 5 mostra a taxa de interrupções em função da taxa mínima requerida para cada usuário variando o desvio das taxas mínimas requisitadas. Nesta simulação, o grau de imperfeição do SIC é fixado em 0,1%. Observa-se que as curvas estão muito próximas, logo a variação do desvio das taxas mínimas não impacta tanto a taxa de interrupções como o grau de imperfeição do SIC impacta. Observa-se que a curva com desvio 0,3 apresenta a menor taxa de interrupção para valores de taxa central entre 500 e 800 kbps. No entanto, para os demais cenários, a curva com desvio de 0,6 apresenta a menor taxa de interrupção, que é um resultado intuitivo, já que quanto maior o desvio das taxas mínima, maior a chance de ser requisitado valores baixos de taxas aos usuários, aumentando as chances de se garantir a qualidade de serviço. Deste modo, observa-se certa oscilação estatística na Figura 5. Com um maior número de repetições de Monte Carlo seria possível obter resultados mais precisos. Contudo, com os resultados apresentados é possível obter um entendimento geral do modelo.

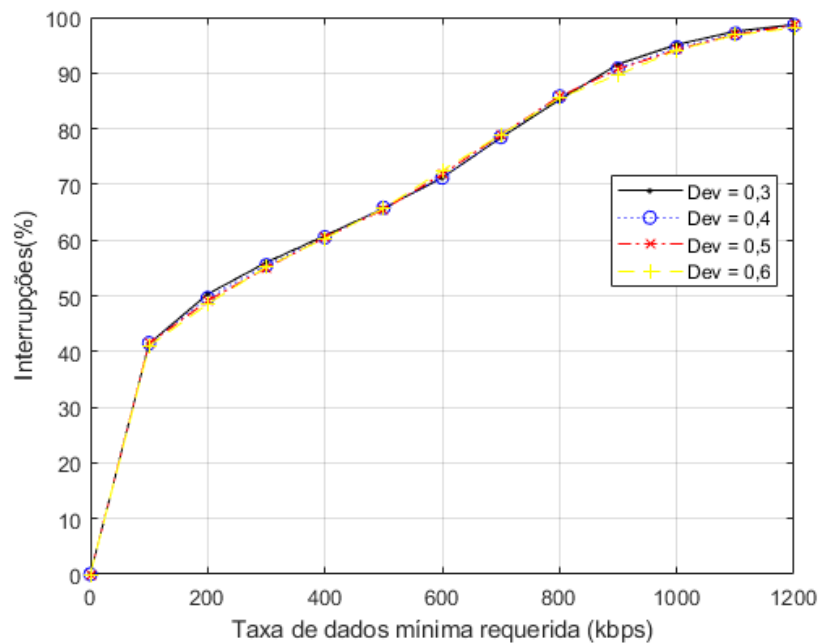
Na Figura 6 o parâmetro variado é a potência de transmissão P , com a qual a ERB estabelece enlace com os usuários na primeira fase, durante o *downlink*. O grau de imperfeição

Figura 4 – Taxa de interrupção em função da taxa mínima requisitada para cada usuário, variando o grau de imperfeição do SIC.



Fonte: Autor

Figura 5 – Taxa de interrupção em função da taxa mínima requisitada para cada usuário, variando o Desvio da taxas mínima heterogêneas.

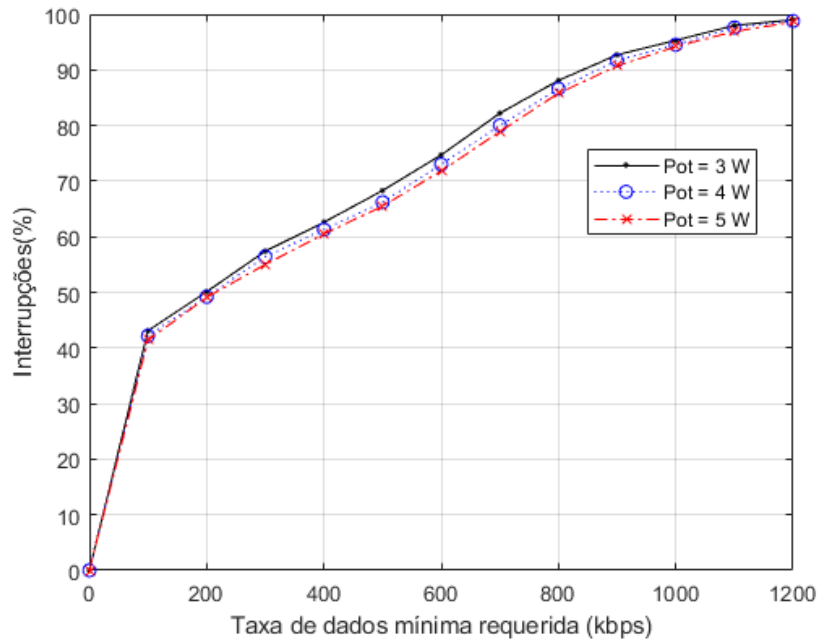


Fonte: Autor

do SIC é fixado para 0,1% e o desvio é fixado em 0,5. Deste modo, observa-se que a taxa de interrupções aumenta à medida que a potência disponível na ERB é reduzida. Este resultado é semelhante ao obtido para o caso do SIC perfeito, explorando em (MELO *et al.*, 2020), e é

decorrente do fato de que quanto maior a potência de transmissão, maior a potência coletada na fase 1 e maior a potência disponível para a fase 2, favorecendo sucesso para a solução.

Figura 6 – Taxa de interrupção em função da taxa mínima requisitada para cada usuário, variando a potência de transmissão P .



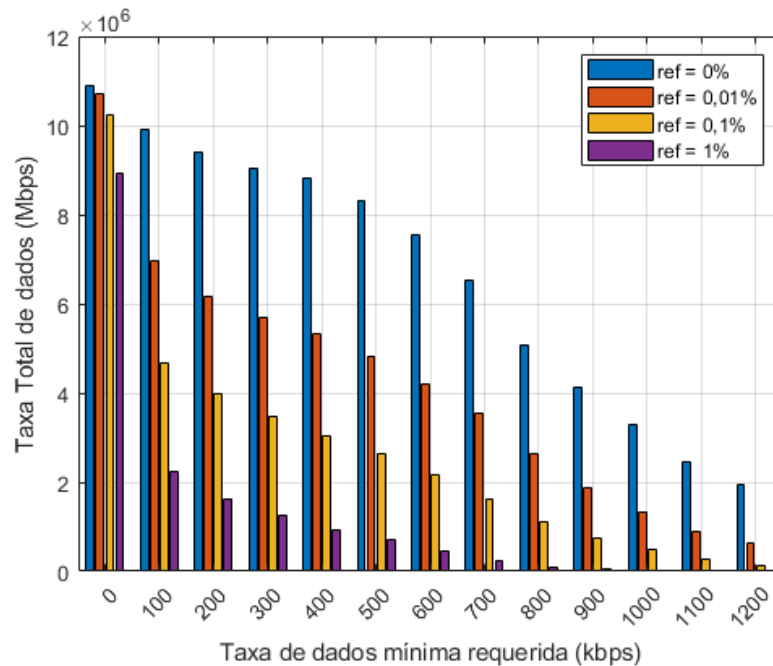
Fonte: Autor

6.1.2 Taxa total de dados no uplink vs taxa mínima requisitada para cada usuário do sistema

A Figura 7 mostra um gráfico de barras da taxa média total de dados alcançadas no *uplink* em função da taxa mínima requerida para cada usuário, variando o grau de imperfeição do SIC. Analisando as barras da esquerda para a direita, na primeira barra o valor de ref é 0%, isto é, um cenário com SIC perfeito. Na segunda barra o valor de ref é 0,01%. Na terceira barra é aplicado um valor de ref igual a 0,1%. Por último, na quarta barra o valor de ref é 1%. Observa-se que, de um modo geral, a taxa total alcançada no *uplink* diminui à medida que a taxa mínima requerida aumenta. Por outro lado, quanto maior o grau de imperfeição do SIC menor a taxa total de dados alcançada no *uplink*. Este resultado decorre do fato de que quanto maior o grau de imperfeição do SIC menor a taxa de dados alcançado pelos usuários, pois experimentam maior interferência.

Na Figura 8 utiliza-se o mesmo raciocínio apresentado na Figura 7, porém a diferença entre as barras é devido a variação no valor do desvio das taxas mínimas requeridas. Na barra mais à esquerda o valor do desvio é 0,3. Na barra seguinte considera-se um desvio de 0,4.

Figura 7 – Taxa total de dados no uplink em função da taxa mínima requisitada para cada usuário, variando o grau de imperfeição do SIC.



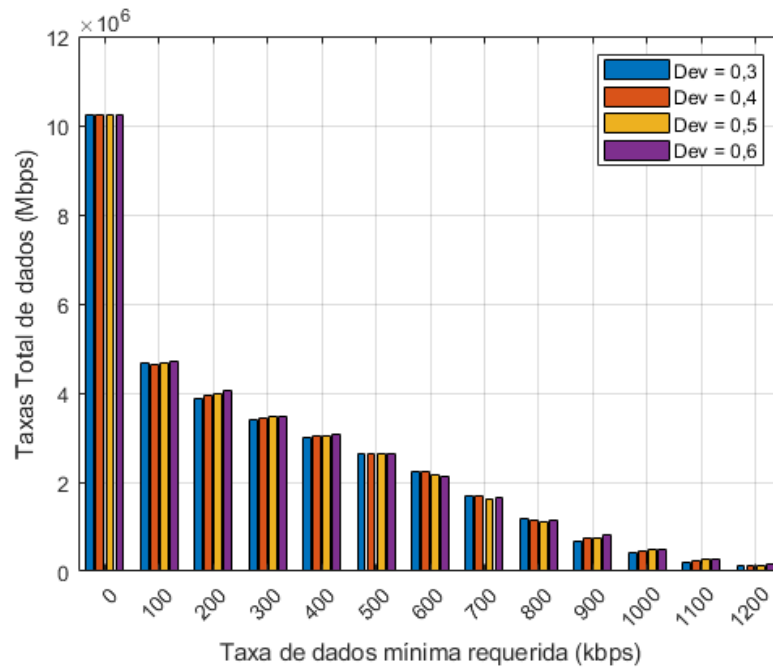
Fonte: Autor

Na terceira barra o desvio é 0,5. Na barra mais a direita o valor do desvio é 0,6. O mesmo comportamento decrescente em função da taxa mínima requerida é observado. Observa-se que quanto maior o desvio das taxas mínimas requeridas maior a chance de um usuário ser atendido com taxas menores, assim as chances de encontrar soluções viáveis para o problema aumentam, e o sistema alcança uma taxa total maior no *uplink*. Este comportamento fica mais evidente à medida que a taxa mínima requerida aumenta, conforme se verifica para as taxas centrais 1.100 kbps e 1.200 kbps.

É importante observar que os resultados mostrados na Figura 8 apresentam certa oscilação estatística. Com um maior número de repetições de Monte Carlo seria possível obter resultados mais precisos. Contudo, o objetivo da seção é entender de uma forma geral o funcionamento do sistema, o que exclui a necessidade de uma precisão estatística maior.

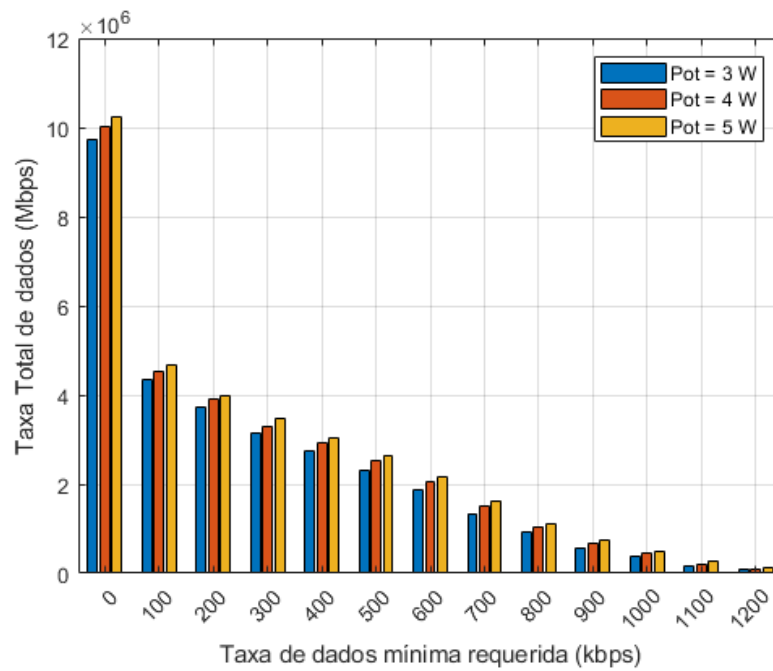
Na Figura 9 a diferença entre as barras é a potência de transmissão. Nas barras com menor taxa total média alcançada no *uplink* a potência de transmissão é de 3 W. Já nas barras com maior taxa total média a potência de transmissão é de 5 W. Nas barras intermediárias a potência de transmissão é de 4 W. Este resultado é coerente com a modelagem do sistema, já que quanto maior a potência do sistema maior a potência colhida na fase 1, havendo, portanto, mais potência para o *uplink*, na fase 2. Assim o sistema alcança uma taxa total maior.

Figura 8 – Taxa total de dados no uplink em função da taxa mínima requisitada para cada usuário, variando o Desvio da taxas mínima heterogêneas.



Fonte: Autor

Figura 9 – Taxa total de dados no uplink em função da taxa mínima requisitada para cada usuário, variando a potência de transmissão P .



Fonte: Autor

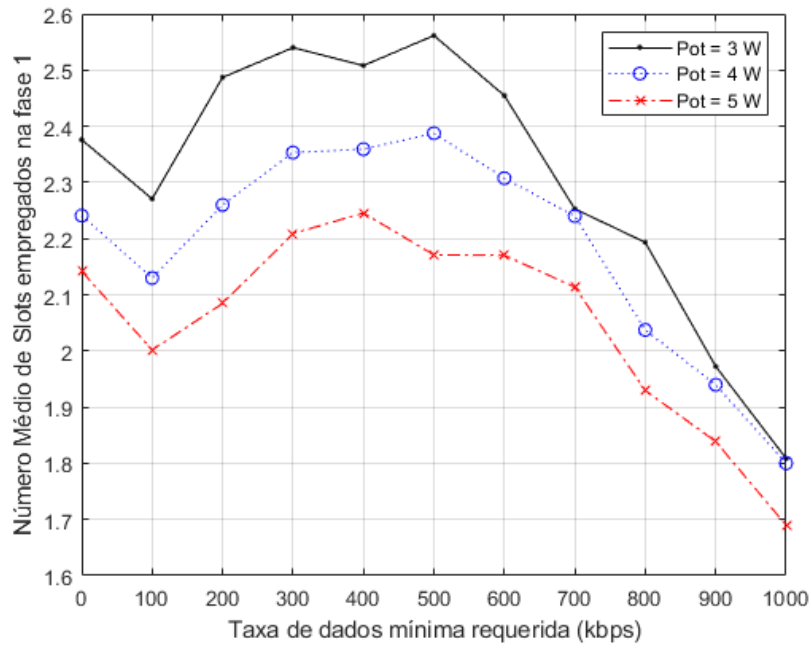
6.1.3 Número médio de slots na fase 1 vs taxa mínima requisitada para cada usuário do sistema

A Figura 10 apresenta o número médio de *slots* de tempo utilizados na fase 1 para colheita de energia no *downlink*, em função da taxa mínima requerida, variando o valor de potência de transmissão P . Observa-se que na curva de maior média a potência de transmissão é de 3 W. Na curva do meio a potência de transmissão é de 4 W. Por fim, na curva de menor média a potência de transmissão é 5 W. Este resultado também é semelhante ao cenário do SIC perfeito apresentado em (MELO *et al.*, 2020). Deste modo, é notório uma relação inversa entre o número de *slots* n^c e a potência de transmissão P . Este resultado pode ser inferido atendendo que a eficiência do sistema, η , é a mesma para os diferentes valores de potência, logo em um mesmo intervalo de tempo, o sistema com maior potência de transmissão colhe mais energia. Assim, quanto maior a potência de transmissão, menor a quantidade de *slots* de tempo necessários na fase 1. Observa-se também que a curva do número médio de *slots* na fase 1 primeiramente cresce até certa faixa de taxa mínima requerida, indicando que o sistema separa mais *slots* de tempo para colher mais energia, e a partir de um certo valor de taxa mínima requisitada o sistema tende a dedicar mais tempo da fase 2, onde é passa a ser mais importante dedicar tempo para a decodificação.

Na Figura 11 as curvas de número médio de *slots* diferem na quantidade de usuários existentes no sistema. Na curva com maior média o número de usuários é 4. Na curva com a segunda maior média o número de usuários é 5. E a curva com menor média tem 6 usuários no sistema. Este resultado também é semelhante ao obtido no cenário com SIC perfeito, explorado em (MELO *et al.*, 2020). Deste modo, pode-se perceber que quanto maior a quantidade de usuários no sistema, menor será a quantidade de *slots* necessários. Isto decorre da necessidade de mais tempo de decodificação na fase 2 quando mais usuários estão presentes no sistema. Assim, menos tempo é alocado para a fase 1.

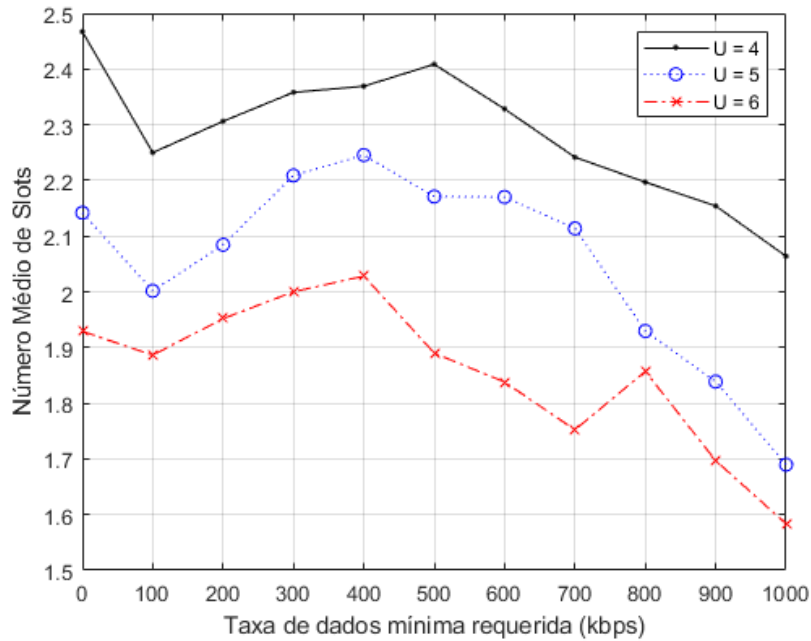
Com base nos resultados apresentados é possível verificar a coerência das implementações. Além disso, pode-se obter um entendimento geral do funcionamento do sistema a partir dos parâmetros da solução ótima, que podem servir de comparação com outras soluções propostas.

Figura 10 – Número médio de *slots* de tempo da fase 1 em função da taxa mínima requisitada para cada usuário, variando a potência de transmissão P .



Fonte: Autor

Figura 11 – Número médio de *slots* de tempo da fase 1 em função da taxa mínima requisitada para cada usuário, variando a quantidade de usuários no sistema.



Fonte: Autor

6.2 Análise Comparativa entre as soluções de referência e a Solução Ótima

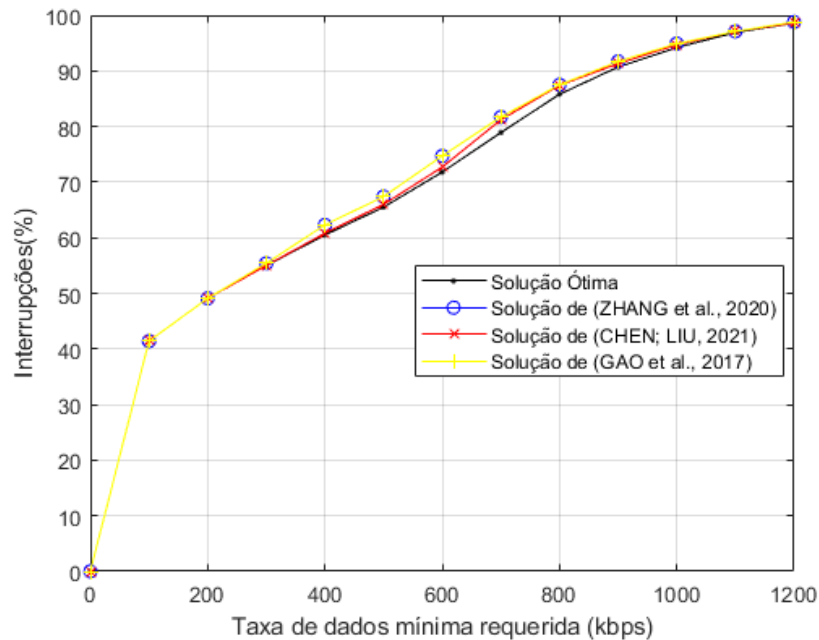
Nesta seção é realizada uma análise comparativa entre os resultados da solução ótima e as soluções de referência apresentadas no capítulo 5. São analisadas as curvas de probabilidade de interrupção e o gráficos de taxa total média alcançada no *uplink*.

A Figura 12 apresenta a curva de probabilidade de interrupção em função da taxa mínima requerida para a solução ótima e as demais soluções de referência apresentadas no capítulo 5. Além disso, o *ref* considerado é 0,1%, o desvio das taxas heterogêneas é 0,5 e a potência de transmissão é 5 W. Como esperado, de um modo geral, a probabilidade de interrupção aumenta à medida que a taxa mínima requerida aumenta. Além disso, as soluções de referência apresentam uma curva próxima à curva da solução ótima. A curva mais inferior é a solução ótima. A segunda melhor curva é da solução proposta em (CHEN; LIU, 2021), pois apresenta uma probabilidade de interrupção menor que as demais. As demais soluções, (ZHANG *et al.*, 2020) e (GAO *et al.*, 2017), apresentam o mesmo comportamento, de modo que suas curvas estão sobrepostas. As soluções de (ZHANG *et al.*, 2020) e (GAO *et al.*, 2017) calculam a ordem de decodificação em função da potência recebida na ERB, o que explica a similaridade em desempenho destas soluções. A solução proposta em (CHEN; LIU, 2021) calcula a ordem de decodificação de um modo mais dinâmico, onde é considerado a SNR alvo, isto é, a taxa mínima requisitada, e o que o autor define como SNR instantânea, que é a taxa alcançada, assim, observa-se que a solução tem uma capacidade maior de se adaptar ao cenário proposto.

A Figura 13 mostra um gráfico de barras da taxa total média de dados alcançadas no *uplink* em função da taxa mínima requerida para cada usuário, em cada taxa central mínima. A primeira barra apresenta o resultado da solução ótima. A segunda, terceira e quarta barra apresentam o resultado das soluções de (ZHANG *et al.*, 2020), (CHEN; LIU, 2021) e (GAO *et al.*, 2017), respectivamente. De um modo geral, as demais soluções no máximo se igualam a solução ótima, o que é esperado já que as demais soluções apresentam um comportamento subótimo, como se verifica nas curvas de interrupções em função das taxas mínima requeridas. Além disso, a solução (CHEN; LIU, 2021) apresenta um comportamento mais próximo com a solução ótima, o que também é esperado, pois a taxa de interrupção de (CHEN; LIU, 2021) é a mais próxima da solução ótima, assim as soluções alcançam taxas semelhantes. Observa-se que as soluções (ZHANG *et al.*, 2020) e (GAO *et al.*, 2017) alcançam taxas semelhantes e inferiores, assim como se observa no comportamentos das curvas de interrupções.

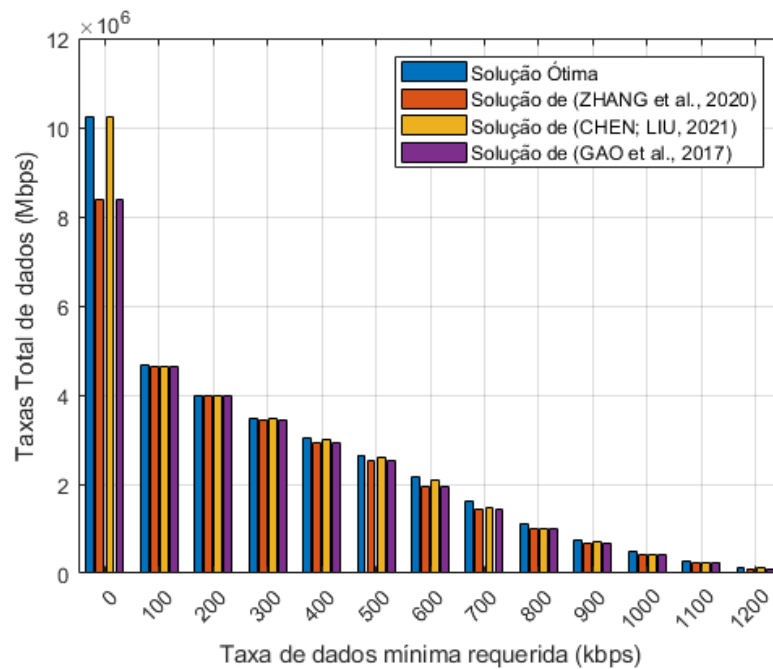
A proximidade entre os resultados das soluções propostas e as soluções de referência

Figura 12 – Taxa de interrupções em função da taxa mínima requisitada para cada usuário - Curvas da solução ótima e de soluções de referência.



Fonte: Autor

Figura 13 – Taxa total de dados no uplink em função da taxa mínima requisitada para cada usuário - Dados da solução ótima e de soluções de referência.



Fonte: Autor

indica que a solução ótima do número de *slots* empregados na fase 1 tem mais impacto do que a ordem de decodificação SIC. Com base nos resultados apresentados nesta seção verifica-se o

desempenho das tecnologias propostas, pois é possível comparar os resultados das soluções com os resultados da solução ótima.

7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho de conclusão de curso foi desenvolvido um estudo de otimização de um sistema WPCN aplicando NOMA no *uplink* seguido de SIC para decodificação dos sinais. O estudo de otimização consistiu na maximização das taxas de dados alcançadas no *uplink* sujeito a garantias de QoS. O cenário foi modelado de modo a abranger aspectos mais realistas, considerando um SIC imperfeito e, como garantia de QoS, considerou-se taxas mínimas requisitadas heterogêneas. O sistema WPCN efetua colheita de energia na fase 1, durante o *downlink*, e emprega o NOMA durante o *uplink*. O tempo de cada fase é medido em *slots* de tempo discretos. As variáveis do sistema a serem decididas são a quantidade de *slots* de tempo na fase 1 e a ordem de decodificação do SIC.

A otimização conjunta do número de *slots* de tempo da primeira fase e a ordem de decodificação SIC é não convexo e possui difícil resolução. Para tanto, utilizou *softwares* especializados em solução de problemas ILP. Outras três propostas são apresentadas em conjunto com a solução do problema ILP. Primeiramente define-se o número de *slots* da primeira fase a partir da solução ótima, em seguida aplica-se uma ordem de decodificação do SIC definida por uma expressão matemática. Cada uma das três soluções propõem uma expressão matemática para o SIC.

A partir dos resultados obtidos nas simulações computacionais é possível identificar que o grau de imperfeição do SIC limita a resolução do problema, de modo que um leve incremento aumenta a taxa de interrupção, e a taxa total do sistema é reduzida. A variação do desvio das taxas heterogêneas não causa impactos significativos sobre a taxa de interrupções. A potência de transmissão é muito importante, de modo que, quanto maior a potência, menor é a taxa de interrupção e maior a taxa de dados alcançada. As soluções de referência propostas para o SIC apresentam uma curva de interrupção e alcançam uma taxa de dados muito semelhante à solução ótima por um custo computacional reduzido e de forma muito menos complexa.

Para trabalhos futuros, considerando o mesmo cenário apresentado, uma estratégia de baixo custo computacional para definir o número de *slots* de tempo empregados na fase 1 poderia ser desenvolvido para que ambos os estágios do sistema fossem resolvidos sem a busca exaustiva.

REFERÊNCIAS

- ARAGÃO, H. V. B.; CASTRO, P. V. M.; LIMA, C. A. A.; LIMA, F. R. M.; MELO, J. d. O. Impacto de sic imperfeito em sistemas wpcn-noma com garantias de qos. In: **SBrT2021**. [S.l.: s.n.], 2021.
- BECCENERI, J. C. **Meta-heurísticas e otimização combinatória: Aplicações em problemas ambientais**. [S.l.]: INPE, 2008. v. 2008.
- CHALASANI, S.; CONRAD, J. M. A survey of energy harvesting sources for embedded systems. In: **IEEE SoutheastCon 2008**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 442–447.
- CHEN, Z.; LIU, B. Switching signal decoding order in uplink noma system with imperfect sic. **IEEE Communications Letters**, v. 25, n. 11, p. 3528–3532, 2021.
- GAO, Y.; XIA, B.; XIAO, K.; CHEN, Z.; LI, X.; ZHANG, S. Theoretical analysis of the dynamic decode ordering sic receiver for uplink noma systems. **IEEE Communications Letters**, v. 21, n. 10, p. 2246–2249, 2017.
- IBM. **IBM CPLEX Optimizer**. 2022. Disponível em: <<https://www.ibm.com/br-pt/analytics/cplex-optimizer>>. Acesso em: 17 mar. 2022.
- LIMA, F. R. M.; BASTOS, J. d. O.; MELO, J. d. O. Optimal sic decoding order and wpt time length for wpcn with imperfect sic. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 10, n. 10, p. 2170–2174, 2021.
- MELO, J. d. O.; SOUSA, R. E.; LIMA, F. R. M. Qos guarantees in noma-based wireless powered mobile communications. In: **SBrT2020**. [S.l.: s.n.], 2020.
- NIYATO, D.; KIM, D. I.; MASO, M.; HAN, Z. Wireless powered communication networks: Research directions and technological approaches. **IEEE Wireless Communications**, v. 24, n. 6, p. 88–97, 2017.
- RODRIGUES, L. H. **Pesquisa Operacional - Programação Linear Passo a Passo**. [S.l.]: Unisinos, 2014. v. 2014.
- SADR, S.; ANPALAGAN, A.; RAAHEMIFAR, K. Radio resource allocation algorithms for the downlink of multiuser ofdm communication systems. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 11, n. 3, p. 92–106, 2009.
- SAUNDERS, S. R. **Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems**. [S.l.]: John-Wiley, 2007. v. 2007.
- TABASSUM, H.; ALI, M. S.; HOSSAIN, E.; HOSSAIN, M. J.; KIM, D. I. Uplink vs. downlink noma in cellular networks: Challenges and research directions. In: **2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–7.
- WU, Q.; GUAN, X.; ZHANG, R. Intelligent reflecting surface-aided wireless energy and information transmission: An overview. **Proceedings of the IEEE**, v. 110, n. 1, p. 150–170, 2022.
- ZHANG, J.; ZHU, L.; XIAO, Z.; CAO, X.; WU, D. O.; XIA, X.-G. Optimal and sub-optimal uplink noma: Joint user grouping, decoding order, and power control. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 9, n. 2, p. 254–257, 2020.