



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CAMPUS DE SOBRAL

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO**

MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

JHENIFER DE OLIVEIRA MELO

**ALOCAÇÃO DE RECURSOS DE RÁDIO PARA WPCN COM NOMA BASEADO EM
RÁDIO COGNITIVO SOB SIC IMPERFEITO**

SOBRAL

2023

JHENIFER DE OLIVEIRA MELO

ALOCAÇÃO DE RECURSOS DE RÁDIO PARA WPCN COM NOMA BASEADO EM
RÁDIO COGNITIVO SOB SIC IMPERFEITO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica e de Computação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação do Campus de Sobral da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica e de Computação. Área de Concentração: Sistemas de Informação

Orientador: Prof. Dr. Francisco Rafael Marques Lima

SOBRAL

2023

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)

M485a Melo, Jhenifer de Oliveira.

Alocação de recursos de rádio para WPCN com NOMA baseado em rádio cognitivo sob SIC imperfeito / Jhenifer de Oliveira Melo. – 2023.
102 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Sobral, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Rafael Marques Lima.

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

CDD 621.3

JHENIFER DE OLIVEIRA MELO

ALOCAÇÃO DE RECURSOS DE RÁDIO PARA WPCN COM NOMA BASEADO EM
RÁDIO COGNITIVO SOB SIC IMPERFEITO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica e de Computação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação do Campus de Sobral da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica e de Computação. Área de Concentração: Sistemas de Informação

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Victor Farias Monteiro
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Arthur Sousa de Sena
Universidade de Oulu

Dedico este trabalho à minha mãe, Elisângela;
ao meu irmão, Jhonatan; e à minha avó, Irian.

AGRADECIMENTOS

À minha família, por todo o amor, cuidado e ensinamentos que tem me proporcionado desde sempre. Agradeço à minha mãe, que já na minha infância contribuiu para o despertar da minha curiosidade e busca por conhecimento. Se hoje tenho interesse por pesquisa e ciência, é porque tenho uma mãe incrível. Da mesma forma, sou grata por todo o apoio e aconselhamento do meu irmão mais velho, que também é uma das pessoas mais importantes da minha vida. Sou grata, também, pela vida da minha avó Irian, uma pessoa amorosa, que fez da casa dela o meu lar, o lugar onde cresci.

Ao professor Rafael Lima, meu orientador de iniciação científica, graduação e mestrado. Obrigada por sua atenção, paciência e cordialidade ao me orientar durante todos esses anos. Tenho muito respeito e admiração pelo senhor, que além de ser um excelente professor e pesquisador, é um exemplo de pessoa íntegra.

A todas as pessoas queridas, amigos e colegas que me desejam o bem. Em especial, meus agradecimentos a Ana Kétylla, Joaquim Osterwald, Tonny Sousa e Mariana Lima. Obrigada por torcerem pelo meu sucesso. Sou grata por todo o incentivo e carinho que recebo de vocês.

Aos meus bichinhos de estimação: Miúcho, Apollo e Kiamo. Amo muito esses seres inocentes que, com toda simplicidade e amor incondicional, tornam os meus dias mais alegres e me dão forças nos momentos mais difíceis.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUN-CAP), por minha bolsa de mestrado entre os anos 2020 e 2022.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), minha *alma mater*, por todo o conhecimento que pude adquirir durante a graduação e o mestrado. Sou grata pelas boas amizades que conheci na instituição e por todos os bons momentos que vivenciei no *Campus* de Sobral.

“Se você tem conhecimento, deixe os outros acenderem as suas velas nele.”

(Margaret Fuller)

RESUMO

Esta dissertação estuda estratégias de alocação de recursos de rádio em um modelo de rede do tipo WPCN (*Wireless Powered Communication Network*) com a utilização de NOMA (*Non-Orthogonal Multiple Access*) baseado em rádio cognitivo, ou simplesmente CR-NOMA (*Cognitive Radio Inspired NOMA*). O SIC (*Successive Interference Cancellation*) é utilizado para a decodificação dos sinais dos usuários no ponto de acesso. Para um modelo de sistema mais realista, o SIC imperfeito é considerado no estudo. Além disso, há um usuário de alta prioridade, sensível ao atraso de transmissão de informação, enquanto os demais usuários têm prioridade secundária mas possuem um maior requisito de taxa de transferência de dados. Foram formulados problemas de otimização para a melhoria de desempenho do sistema em termos de aumento de taxas de transferência de dados e redução de probabilidades de *outage*. O primeiro problema de otimização consiste na maximização da taxa de transferência de dados dos usuários secundários, sendo respeitado o critério de QoS (*Quality of Service*) do usuário prioritário. O segundo problema de otimização é semelhante ao primeiro, mas inclui a possibilidade de controle de potência. O terceiro problema de otimização incorpora características que não estão presentes nos cenários anteriores, como o uso de múltiplas subportadoras, e consiste na maximização da mínima taxa de transferência de dados dos usuários secundários, o que configura um problema de maximização da justiça no sistema. Neste trabalho, heurísticas são propostas para os problemas de otimização apresentados. Simulações computacionais foram realizadas para comparação de desempenho de cada solução. Por fim, pelos resultados das simulações, é possível ver que as heurísticas propostas alcançam resultados próximos das respectivas soluções ótimas, com o benefício do custo computacional reduzido.

Palavras-chave: Otimização, NOMA, WPCN, SIC Imperfeito, QoS.

ABSTRACT

This master's thesis studies radio resource allocation strategies in a WPCN (Wireless Powered Communication Network) system using NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) inspired on cognitive radio, that is, CR-NOMA (Cognitive Radio Inspired NOMA). SIC (Successive Interference Cancellation) is used to decode user signals at the access point. For a more realistic system model, the imperfect SIC is considered in the study. Furthermore, there is a high-priority user, which is sensitive to information transmission delay, while the rest of the users have secondary priority but have a higher data transfer rate requirement. Optimization problems were formulated to improve system performance in terms of increasing data transfer rates and reducing interruption probabilities. The first optimization problem consists of maximizing the data transfer rate of secondary users, respecting the QoS (Quality of Service) criterion of the priority user. The second optimization problem is similar to the first one, but includes the possibility of power control. The third optimization problem incorporates features that are not present in the previous scenarios, such as the use of multiple subcarriers, and consists of maximizing the minimum data transfer rate of secondary users, which sets up a fairness maximization problem in the system. In this work, heuristics are proposed for the presented optimization problems. Computer simulations were performed to compare the performance of each solution. Finally, from the simulation results, it is possible to see that the proposed heuristics achieve results close to the respective optimal solutions, with the benefit of reduced computational cost.

Keywords: Optimization, NOMA, WPCN, Imperfect SIC, QoS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – <i>Uplink e downlink</i>	26
Figura 2 – Sistema de telefonia celular: geometria hexagonal.	27
Figura 3 – Formação de <i>clusters</i> com tamanho $N = 3$	28
Figura 4 – Formação de <i>clusters</i> com tamanho $N = 7$	29
Figura 5 – Formação de <i>clusters</i> com tamanho $N=7$	30
Figura 6 – Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência (FDMA).	31
Figura 7 – Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA).	32
Figura 8 – Acesso Múltiplo por Divisão de Código (CDMA).	33
Figura 9 – Gerações de telefonia móvel do 1G ao 5G.	38
Figura 10 – Acesso Múltiplo Não-Ortogonal (NOMA).	40
Figura 11 – <i>Non-Orthogonal Multiple Access</i> (NOMA) de domínio de potência.	42
Figura 12 – <i>Successive Interference Cancellation</i> (SIC) no <i>downlink</i>	43
Figura 13 – SIC no <i>uplink</i>	44
Figura 14 – Uma divisão de esquemas de acesso múltiplo, com destaque para NOMA.	48
Figura 15 – Fluxograma genérico do processo de colheita de energia.	50
Figura 16 – Uso de WPT/EH para aplicações de <i>Internet of Things</i> (IoT).	51
Figura 17 – Uso de <i>Energy Harvesting</i> (EH) solar e EH de fonte artificial em uma rede de sensores sem fio.	51
Figura 18 – <i>Wireless Powered Communication Network</i> (WPCN) com ponto de acesso híbrido.	52
Figura 19 – WPCN com nó de energia.	53
Figura 20 – Célula circular com um ponto de acesso central. O tempo de <i>frame</i> é dividido em duas etapas: transferência de energia e transmissão de dados por <i>uplink</i> usando NOMA.	55
Figura 21 – Probabilidade de <i>outage</i> do usuário secundário admitido em função do fator de erro residual (<i>Residual Error Factor</i> (REF)).	65
Figura 22 – Probabilidade de <i>outage</i> do usuário primário em função do fator de erro residual (REF).	66
Figura 23 – Taxa de dados do usuário secundário admitido em função do fator de erro residual (REF).	67
Figura 24 – Probabilidade de escolha de técnica na solução ótima em função do REF.	76

Figura 25 – Probabilidade de <i>outage</i> do usuário secundário admitido em função do REF.	77
Figura 26 – Probabilidade de <i>outage</i> do usuário primário em função do REF.	78
Figura 27 – Taxa de dados do usuário secundário admitido em função do REF.	79
Figura 28 – Média de mínima taxa de dados e máxima taxa de dados dos usuários secundários em função de REF com $R_0 = 200$ kbits/s.	89
Figura 29 – Probabiliddade de <i>outage</i> do usuário primário em função de REF com $R_0 = 200$ kbits/s.	90
Figura 30 – Probabiliddade de <i>outage</i> do usuário primário em função de R_0 com REF = 0.	91
Figura 31 – Média de mínima taxa de dados e máxima taxa de dados dos usuários secundários em função de R_0 com REF = 0.	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CR-NOMA	<i>Cognitive Radio Inspired Non-Orthogonal Multiple Access</i>
CSI	<i>Channel State Information</i>
EH	<i>Energy Harvesting</i>
HSIC	<i>Hybrid Successive Interference Cancellation</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
NOMA	<i>Non-Orthogonal Multiple Access</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>
OMA	<i>Orthogonal Multiple Access</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
REF	<i>Residual Error Factor</i>
SIC	<i>Successive Interference Cancellation</i>
WPCN	<i>Wireless Powered Communication Network</i>
WPT	<i>Wireless Power Transfer</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Revisão literária de artigos relacionados	17
1.2	Contribuições deste trabalho	20
1.3	Métodos e materiais utilizados na pesquisa	21
1.4	Estrutura do documento	21
1.5	Produções científicas	23
2	TELEFONIA MÓVEL E SISTEMAS CELULARES	24
2.1	Histórico das comunicações sem fio	24
2.2	Sistemas celulares	25
2.2.1	<i>Simplex, half-duplex e duplex</i>	25
2.2.2	<i>Downlink e uplink</i>	26
2.2.3	<i>Geometria hexagonal</i>	26
2.2.4	<i>Reutilização de frequência</i>	27
2.2.5	<i>Interferência</i>	28
2.2.6	<i>Taxa de dados</i>	29
2.2.7	<i>Handoff e roaming</i>	30
2.3	Técnicas convencionais de acesso múltiplo	31
2.3.1	<i>Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência (FDMA)</i>	31
2.3.2	<i>Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA)</i>	32
2.3.3	<i>Acesso Múltiplo por Divisão de Código (CDMA)</i>	32
2.4	Evolução dos sistemas celulares e telefonia móvel	33
2.4.1	<i>Primeira geração: 1G</i>	34
2.4.2	<i>Segunda geração: 2G</i>	34
2.4.3	<i>Terceira geração: 3G</i>	35
2.4.4	<i>Quarta geração: 4G</i>	35
2.4.5	<i>Quinta geração: 5G</i>	36
2.4.6	<i>Resumo: do 1G ao 5G</i>	37
2.5	Expectativas para o futuro das comunicações móveis	37
3	NOMA: ACESSO MÚLTIPLO NÃO-ORTOGONAL	39
3.1	Comparativo de NOMA e <i>Orthogonal Multiple Access</i> (OMA)	40

3.2	NOMA de domínio de potência	41
3.2.1	<i>SIC: Cancelamento Sucessivo de Interferência</i>	42
3.2.2	<i>SIC Imperfeito</i>	45
3.3	CR-NOMA: NOMA baseado em rádio cognitivo	46
3.4	NOMA com múltiplas subportadoras	47
3.5	NOMA de domínio de código e outras variantes	47
4	TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO	49
4.1	EH: Colheita de energia	49
4.2	WPT: Transferência de energia sem fio	50
4.3	WPCN	52
5	MODELO WPCN COM NOMA BASEADO EM RÁDIO COGNITIVO	54
5.1	SIC-CSI	56
5.2	SIC-QoS	56
5.3	A solução <i>Hybrid Successive Interference Cancellation</i> (HSIC) no sistema WPCN	57
5.4	Considerações para os capítulos seguintes	58
6	MAXIMIZAÇÃO DA TAXA DE DADOS DO USUÁRIO SECUNDÁRIO ADMITIDO	59
6.1	Formulação do problema de otimização	59
6.2	Detalhes para implementação computacional	60
6.3	Heurística proposta: HSIC adaptado ao cenário de SIC imperfeito . . .	62
6.4	Resultados e discussões	63
6.5	Conclusões deste capítulo	67
7	MAXIMIZAÇÃO DA TAXA DE DADOS DO USUÁRIO SECUNDÁRIO ADMITIDO COM CONTROLE DE POTÊNCIA	68
7.1	HSIC com controle de potência no contexto WPCN	68
7.1.1	<i>SIC-QoS com controle de potência</i>	70
7.1.2	<i>SIC-CSI com controle de potência</i>	70
7.2	Formulação do problema de otimização com controle de potência	71
7.3	Heurística proposta: HSIC adaptado ao cenário de SIC imperfeito com controle de potência	73

7.4	Resultados e discussões	75
7.5	Conclusões deste capítulo	79
8	MAXIMIZAÇÃO DA JUSTIÇA DOS USUÁRIOS SECUNDÁRIOS COM MÚLTIPLAS SUBPORTADORAS	80
8.1	Características do sistema	80
8.2	Formulação do problema de otimização	81
8.3	Detalhes para implementação computacional	83
8.4	Heurística proposta	84
8.4.1	<i>O algoritmo</i>	<i>85</i>
8.4.2	<i>Possíveis variações do algoritmo</i>	<i>87</i>
8.5	Resultados	88
8.6	Conclusões deste capítulo	92
9	CONCLUSÕES GERAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS	93
	REFERÊNCIAS	95

1 INTRODUÇÃO

De acordo com JONSSON *et al.* (2022), está previsto que em 2028 o número de assinaturas móveis 5G (5ª geração das comunicações móveis) deve alcançar a marca de 5 bilhões. Além disso, está previsto que cerca de 80% do tráfego global na rede móvel será composto por vídeo, demandando alta qualidade das conexões. Em um relatório mais recente, foi divulgado que o total de assinaturas 5G já deve ultrapassar a marca de 1,5 bilhão até o fim de 2023 (JONSSON *et al.*, 2023). A elevada procura por serviços de comunicações móveis, que se tem observado ao longo dos últimos anos, tem apresentado uma série de desafios. A necessidade de suportar conectividade massiva, a satisfação de critérios de qualidade de serviço cada vez mais altos, a eficiência energética de sistemas mais sofisticados, entre outras questões, são exemplos de metas a serem cumpridas. As aplicações de IoT, ou Internet das Coisas, são um exemplo de onde esses desafios estão presentes. Nesse contexto, novas estratégias de acesso múltiplo têm sido propostas para alcançar a conectividade massiva, como o acesso múltiplo de divisão de taxa (RSMA, do inglês, *Rate Splitting Multiple Access*), acesso múltiplo por código esparsos (SCMA, do inglês, *Sparse Code Multiple Access*), espalhamento de baixa densidade (LDS, do inglês, *Low-Density Spreading*), acesso múltiplo não-ortogonal (NOMA, do inglês, *Non-Orthogonal Multiple Access*) de domínio de potência, entre outras (DAI LINGLONG; WANG, 2018).

NOMA é uma forma de acesso múltiplo que permite que dois ou mais usuários compartilhem um mesmo recurso de tempo-frequência, separando os sinais dos usuários em um domínio diferente. O NOMA é comumente dividido em duas categorias básicas: NOMA de domínio de potência e NOMA de domínio de código (BALASUBRAMANYA *et al.*, 2019). No NOMA de domínio de potência, os sinais são transmitidos com diferentes níveis de potência, enquanto no receptor geralmente o cancelamento sucessivo de interferência (técnica SIC, do inglês, *Successive Interference Cancellation*), é executada para decodificar a informação (ISLAM *et al.*, 2017). O NOMA de domínio de código engloba algumas das técnicas mencionadas anteriormente, tais como SCMA e LDS (SHUKLA *et al.*, 2021). Apesar de haver sido bastante estudado e discutido para ser implementado já em redes 5G, o NOMA inicialmente não foi incluído nos padrões do 5G definidos pelo 3GPP (*The 3rd Generation Partnership Project*). Alguns pesquisadores apontam que o NOMA não se mostra viável para os cenários 5G existentes atualmente, e que deve ser implementado após o 5G, ou seja, em redes B5G (*Beyond 5G*) (AL-DULAIMI *et al.*, 2023).

No NOMA, o SIC pode ser executado considerando-se diferentes ordens de decodifi-

cação, de acordo com as condições de canal (CSI, do inglês, *Channel State Information*) ou de acordo com critérios de qualidade de serviço (QoS, do inglês, *Quality of Service*) dos usuários. A ordem de decodificação SIC é relevante especialmente quando usuários sensíveis ao atraso e usuários tolerantes ao atraso estão presentes na rede, ou quando os usuários possuem condições de canal e requisitos de *Quality of Service* (QoS) com diferenças significativas. Além disso, em cenários práticos, o cancelamento de interferência por parte do SIC não é ideal, ou seja, não ocorre perfeitamente. Quando se trata de um cenário realista, é necessário que o fator de erro residual (REF, do inglês, *Residual Error Factor*) seja levado em conta, representando uma fração de interferência residual que não é anulada no SIC. O estudo do impacto da interferência residual no SIC é de grande importância para a implementação dessa técnica na prática.

Tendo-se em vista o aumento do número de dispositivos conectados, um requisito de grande importância é a eficiência energética. Para atender a essa demanda, a tecnologia da colheita de energia (EH, do inglês *Energy Harvesting*) tem atraído o interesse de muitos pesquisadores nos últimos anos (BI *et al.*, 2016a). A ideia é basicamente que os dispositivos móveis tenham suas baterias carregadas em alguma medida por ondas eletromagnéticas às quais estiverem expostos; dessa forma, as baterias dos dispositivos permanecem carregadas por mais tempo, e a necessidade de carregá-los diminui. Existem diferentes formas de colheita/transferência de energia, que podem ser de fontes naturais e/ou artificiais. A energia solar é um exemplo de fonte natural de energia, enquanto as ondas de radiofrequência emitidas por estações rádio base são um exemplo de fonte artificial.

Um paradigma relativamente novo onde se emprega uma forma de EH com fontes artificiais é o das comunicações com alimentação sem fio (WPC, do inglês, *Wireless Powered Communications*), que tem se mostrado uma alternativa promissora para a implantação de aplicações IoT. Neste tipo de comunicação, um nó de energia ou ponto de acesso híbrido fornece energia aos dispositivos/usuários por ondas eletromagnéticas, de modo que uma fonte de energia estável e constante é garantida aos dispositivos. Essa transferência de energia sem fio é conhecida na literatura como *Wireless Power Transfer* (WPT) (*Wireless Power Transfer*). As redes de comunicação com alimentação sem fio (WPCNs, do inglês, *Wireless Powered Communication Networks*) conexão mais sustentável e menos dependente do carregamento convencional de baterias pode ser implantada, pois há um aproveitamento de energia das ondas de radiofrequência que perpassam o meio (BI *et al.*, 2016a).

1.1 Revisão literária de artigos relacionados

Em uma WPCN, o tempo de *frame* é dividido em duas etapas, sendo a primeira a transferência de energia de uma fonte para os dispositivos (WPT), e o *uplink* de informação a segunda etapa. Diferentes esquemas de acesso múltiplo podem ser utilizados na segunda etapa, baseados em OMA ou em NOMA (GUO *et al.*, 2016; BI *et al.*, 2016a; DIAMANTOULAKIS *et al.*, 2016; ISLAM *et al.*, 2017; MANGLAYEV *et al.*, 2017; DAI LINGLONG; WANG, 2018).

No âmbito da otimização, GUO *et al.* (2016) realizaram um estudo de alocação de potência e tempo em uma WPCN com foco na maximização da justiça de usuários, porém o NOMA não é abordado. Três tipos de justiça são explorados: máximo-mínimo, proporcional e harmônica. Nesse trabalho, os autores apresentam a formulação de problemas de otimização para cada objetivo de justiça, que originalmente são não-convexos, e aplicam transformações para torná-los convexos.

DIAMANTOULAKIS *et al.* (2016) estudaram o problema da maximização da taxa de dados total em um sistema NOMA-WPT no *uplink* com duas abordagens distintas de SIC, focando na otimização da duração da etapa de WPT. Primeiramente, os autores consideram a configuração em que a ordem de decodificação é fixa no SIC. Depois, os autores também estudam o princípio de compartilhamento de tempo (*time-sharing*) aplicado no SIC, de modo que a ordem de decodificação dos usuários é alterada em frações específicas de tempo. Dentro do estudo do problema de maximização da taxa de dados total, além da otimização da duração do tempo da etapa de WPT, os autores também trabalharam com a otimização do compartilhamento de tempo para a decodificação SIC assumindo que os terminais têm o mesmo requisito de taxa de dados no *uplink* (taxas de dados homogêneas). Observa-se que no NOMA com compartilhamento de tempo vários comprimentos de tempo compartilhado e ordens de decodificação SIC devem ser atribuídos aos terminais dentro de um único *frame*, o que pode conduzir a uma alta sinalização e aumento da complexidade computacional. Em seguida, os autores ainda estudaram o problema da maximização da justiça entre os usuários do sistema, tanto com a ordem de decodificação fixa quanto com o compartilhamento de tempo. Para a resolução dos problemas apresentados, os autores utilizaram métodos como a função W de Lambert e o método de decomposição dupla de Lagrange, e propõem um algoritmo guloso.

Para aumento de capacidade ergódica, MIANDOAB e TAZEHKAND (2020) propuseram um esquema de pareamento híbrido de três usuários no NOMA: um próximo da estação base, um próximo da borda da célula, e outro a uma distância intermediária da estação base.

O algoritmo de pareamento toma uma decisão com base em um indicador de qualidade de canal que cada usuário possui, que indica a distância do usuário à estação base. MIANDOAB e TAZEHKAND (2020) mostraram que, convencionalmente, quando o pareamento é feito com dois usuários que possuem ganhos de canal parecidos, o impacto do SIC imperfeito na redução da capacidade ergódica do sistema é maior. No fim, os autores mostraram em seu trabalho que o esquema de pareamento inteligente com três usuários proporciona o aumento da capacidade ergódica e a redução do impacto do SIC imperfeito no sistema de comunicação.

DING *et al.* (2020a) trouxeram um cenário NOMA baseado em rádio cognitivo (*Cognitive Radio Inspired Non-Orthogonal Multiple Access (CR-NOMA)*) onde um usuário tem alta prioridade e solicita uma taxa de transferência de dados relativamente baixa, enquanto os demais usuários do sistema têm uma prioridade secundária e solicitam uma taxa de transferência de dados relativamente alta. Um usuário secundário deve ser admitido para fazer um pareamento com o usuário primário, ou seja, compartilhar o mesmo bloco de recurso de tempo e frequência de modo não-ortogonal. Entende-se que pode haver um número maior que um de usuários admitidos; no entanto, como mencionado anteriormente, um grande número de usuários pareados não é recomendável no NOMA. DING *et al.* (2020a) propuseram um novo esquema para decodificação chamado SIC híbrido (HSIC, do inglês, *Hybrid SIC*). Observações foram feitas em termos de taxa de *outage* e ganho de taxa de dados com o uso do HSIC em detrimento dos métodos convencionais de SIC, baseados em QoS e em *Channel State Information (CSI)*. O HSIC é um algoritmo que consiste em uma junção dessas duas técnicas convencionais de SIC tendo como principal critério de decisão para o pareamento uma comparação dos ganhos de canal dos usuários do sistema com um limiar de canal calculado. Em uma continuação, os autores exemplificaram a aplicação do HSIC no NOMA com *Mobile Edge Computing (MEC)*, isto é, computação de borda móvel DING *et al.* (2020b), e apontaram direções para estudos futuros.

Um comparativo de desempenho de sistemas NOMA-WPT e NOMA-BAC (NOMA com comunicação de retrodifusão) foi apresentado por DING (2021). Os autores mostraram que para sistemas NOMA-WPT o uso do HSIC proposto originalmente no trabalho anterior (DING *et al.*, 2020a) proporciona eliminação do piso de interrupção nos gráficos da taxa de interrupção em função da potência de transmissão quando o REF não é considerado. O trabalho não mostra o que acontece quando o SIC é imperfeito.

Com base no estudo de DING *et al.* (2020a), os autores SUN *et al.* (2021) propuseram um novo algoritmo de HSIC para a melhoria da robustez da transmissão de dados no *uplink* do

NOMA. A solução proposta é uma adaptação do HSIC original onde se considera a possibilidade do controle de potência dos usuários secundários. O algoritmo incorpora as duas técnicas presentes no HSIC, adicionando uma terceira, na qual o usuário secundário admitido transmite no *uplink* com uma fração de sua potência total a fim de não provocar o *outage* do usuário primário. Os autores mostram que em altos valores de SNR, esta solução promove uma diminuição do piso de probabilidade de *outage* (erro) independentemente das escolhas de QoS (taxas de dados requisitadas) dos usuários.

Os autores CHEN e LIU (2021) apresentaram uma proposta de chaveamento dinâmico da ordem de decodificação no SIC com base na potência de recepção e taxas de dados requisitadas para a escolha da ordem de decodificação, considerando a imperfeição no cancelamento de interferência (SIC imperfeito). Em seu trabalho, CHEN e LIU (2021) mostraram que o método de SIC dinâmico proposto proporciona uma diminuição do piso de probabilidade de *outage*. Neste trabalho os autores não abordam um cenário de CR-NOMA, como no trabalho de DING *et al.* (2020a), nem WPT ou EH.

Em um trabalho mais recente sobre SIC híbrido, YANG *et al.* (2023) apresentaram um estudo sobre WPCN-NOMA considerando modelos de EH linear e não-linear. É proposta uma solução de SIC híbrido na qual dispositivos de IoT sem restrição de energia podem ajustar adaptativamente a potência de transmissão no *uplink* de acordo com o ganho de desvanecimento de canal. Para o modelo não-linear de colheita de energia, os autores observaram que o esquema proposto apresenta um piso de *outage* em altos valores de SNR. Porém, esse piso de *outage* vai para zero quando o número de dispositivos tende a infinito. Esse trabalho não considera o SIC imperfeito.

Alguns trabalhos que abordam alocação de recursos em sistemas NOMA com múltiplas subportadoras também foram considerados nesta revisão bibliográfica. No trabalho de ZENG *et al.* (2019), os autores estudam a maximização de *sum-rate* (soma das taxas de dados em agrupamentos ou pareamento de usuários) e a maximização da eficiência energética no *uplink* de um sistema NOMA com múltiplas subportadoras, porém a justiça de usuários não é abordada. Sob outra perspectiva, além da otimização da eficiência energética, MUHAMMED *et al.* (2019) estudaram a otimização da justiça de usuários no *downlink*. Já em uma publicação mais recente, REZVANI *et al.* (2022) realizaram um estudo de alocação de potência para maximização de *sum-rate* e a maximização da eficiência energética de um sistema NOMA com múltiplas subportadoras no *downlink*. Dentre muitos assuntos abordados no trabalho, os autores abordaram

de maneira secundária a questão da justiça de usuários, chegando a propor um esquema para este fim. Na revisão bibliográfica, foi percebida uma lacuna de estudos sobre maximização da justiça de usuários no *uplink* em sistemas NOMA com múltiplas subportadoras.

1.2 Contribuições deste trabalho

Esta dissertação tem como principal objetivo apresentar estudos de alocação de recursos de rádio em um sistema NOMA-WPT baseado em rádio cognitivo, contando com algumas suposições até então não exploradas em trabalhos publicados neste campo de estudo. O modelo de sistema estudado se baseia na configuração WPCN, com uma divisão do *frame* em um número inteiro de *slots* de tempo, e CR-NOMA sob as condições do SIC imperfeito. Essa combinação de características não foi explorada em trabalhos anteriores. Então, a partir desse modelo, três problemas de otimização foram formulados:

- Maximização da taxa de dados do usuário secundário admitido;
- Maximização da taxa de dados do usuário secundário admitido com controle de potência;
- Maximização da justiça dos usuários secundários com múltiplas subportadoras.

No problema da **maximização da taxa de dados do usuário admitido**, considera-se que um dos usuários de prioridade secundária em um sistema CR-NOMA é admitido para utilizar um mesmo recurso de tempo-frequência ocupado pelo usuário primário/prioritário (usuário sensível ao atraso). Então, o usuário secundário a ser selecionado deve ser aquele que deve obter a maior taxa de dados como usuário secundário admitido. A solução ótima do problema, além de apontar para qual usuário secundário deve ser selecionado, indica os valores de outras variáveis importantes, conforme será mostrado mais adiante. As maiores contribuições deste estudo são a abordagem explicativa da otimização, o estudo do impacto do SIC imperfeito no SIC híbrido e a proposta de um novo algoritmo, que se adapta ao cenário de SIC imperfeito.

Em seguida, como uma continuação do primeiro estudo, o problema da **maximização da taxa de dados do usuário admitido com controle de potência** traz uma configuração semelhante ao problema de otimização anterior, mas acrescenta uma camada de complexidade, pois considera a possibilidade do controle de potência dos usuários secundários. Também para este caso, um novo algoritmo de SIC com controle de potência adaptado ao cenário de SIC imperfeito é proposto no presente trabalho.

Por outro lado, o problema da **maximização da justiça dos usuários secundários**

com múltiplas subportadoras, além de apresentar um objetivo diferente, possui mudanças significativas em relação aos dois problemas anteriores, tais como a inclusão de múltiplas subportadoras e a preocupação com a satisfação de QoS de todos os usuários (primário e secundários). Este problema consiste na maximização da taxa de dados mínima dos usuários secundários, ou maximização de QoS dos usuários secundários. Devido ao uso de múltiplas subportadoras, este problema de otimização apresenta um maior nível de complexidade se comparado aos problemas de otimização anteriores. Um algoritmo de baixa complexidade é proposto para a resolução do problema da justiça de usuários.

1.3 Métodos e materiais utilizados na pesquisa

Neste trabalho, foram realizadas simulações computacionais no software MATLAB com a biblioteca de otimização CPLEX, da IBM (IBM, [s.d.]). Os principais métodos deste trabalho consistem em modelagem matemática, formulação de problemas de otimização, desenvolvimento de heurísticas de custo computacional reduzido e análise de resultados obtidos em simulações computacionais. Não foram realizados experimentos práticos em laboratório.

1.4 Estrutura do documento

O capítulo 1 deste documento contém uma breve introdução sobre os principais assuntos que serviram de base para esta pesquisa, revisão literária, objetivos e contribuições do trabalho, métodos e materiais utilizados na durante a pesquisa e, na presente seção, uma visão geral do que é abordado no restante do documento. Ainda neste capítulo, na seção 1.5, constam as informações bibliográficas dos artigos relacionados a esta dissertação.

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica básica para o leitor que precisa relembrar conceitos de telefonia móvel e sistemas celulares, e também para aqueles que não possuem afinidade com esse campo de estudo mas possuem interesse na leitura desta dissertação. No capítulo 2, traz-se uma revisão do histórico das comunicações sem fio, fundamentos dos sistemas celulares, gerações de telefonia móvel, do 1G ao 5G, além de perspectivas futuras para o B5G ou pós-5G.

Como fundamentação teórica específica, nos capítulos 3 e 4 são apresentadas as tecnologias diretamente ligadas à pesquisa. No capítulo 3, apresenta-se uma visão geral sobre NOMA, funcionamento do SIC ideal e o que muda no cenário do SIC imperfeito. No capítulo 4,

os conceitos de WPCN, EH e WPT são explicados.

O conteúdo principal deste trabalho começa a ser introduzido no capítulo 5, onde se apresenta o modelo de sistema estudado, o qual incorpora WPCN e NOMA baseado em rádio cognitivo sob SIC imperfeito, que são apresentados na fundamentação teórica específica. No capítulo 5, são apresentadas as definições matemáticas e equações que regem o modelo, sendo a base dos capítulos seguintes.

No capítulo 6, o método HSIC, de DING *et al.* (2020a), que serviu de base para este estudo, é explicado, e em seguida, a formulação do problema de maximização da taxa de dados do usuário admitido é apresentada. Uma solução foi desenvolvida para a resolução do problema e os resultados obtidos em simulações computacionais são mostrados nesse capítulo. O desempenho da solução proposta se mostra ótimo nos resultados observados.

No capítulo 7, o problema de maximização da taxa de dados do usuário admitido também é abordado, porém com o diferencial da possibilidade de controle de potência no cenário. O método HSIC com controle de potência proposto por SUN *et al.* (2021), que serviu de base para essa parte do estudo, é abordado no capítulo. O problema de otimização anterior sofre algumas alterações nesse novo cenário. Uma heurística também foi desenvolvida para o problema de otimização formulado, e os resultados referentes a esse estudo são apresentados no capítulo 7.

No capítulo 8, ainda tendo como base o modelo de sistema WPCN com NOMA e SIC imperfeito introduzido no capítulo 5, um outro problema de otimização é estudado. O foco nesse capítulo é o problema de maximização da justiça entre os usuários secundários, tendo o uso de múltiplas subportadoras como o principal diferencial em relação aos estudos dos capítulos 6 e 7. Uma heurística foi proposta para a resolução do problema de otimização em questão. Os resultados obtidos nesse estudo são apresentados e discutidos no capítulo 8.

Por fim, no capítulo 9, são apresentadas as conclusões gerais do trabalho e considerações finais acerca dos três estudos apresentados, os quais em certa medida são independentes entre si, porém possuem muitas características em comum, tendo todos como base o modelo apresentado no capítulo 5. Então, o capítulo 9 finaliza com perspectivas de pesquisas futuras na área.

1.5 Produções científicas

Estudos relacionados ao conteúdo desta dissertação foram publicados nos seguintes trabalhos:

ARAGÃO, H. Victor B.; CASTRO, P. Victor M.; LIMA, Cibelly A. de. A.; LIMA, F. Rafael M.; MELO, Jhenifer de O. *Impacto de SIC imperfeito em sistemas WPCN-NOMA com garantias de QoS*. XXXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2021), Fortaleza, 2021. LIMA, F. Rafael M.; BASTOS, Josefran de O.; MELO, Jhenifer de O. *Optimal SIC Decoding Order and WPT Time Length for WPCN With Imperfect SIC*. IEEE Wireless Communications Letters, vol. 10, n. 10, 2021.

MELO, Jhenifer de O.; LIMA, F. Rafael M. *Hybrid SIC with Residual Error Factor in Wireless Powered Communications*. 2022 IEEE 27th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD 2022), Paris, 2022.

2 TELEFONIA MÓVEL E SISTEMAS CELULARES

Este capítulo apresenta uma breve revisão do histórico das comunicações sem fio e da telefonia móvel, além de trazer uma visão geral sobre sistemas celulares e alguns de seus fundamentos, bem como as gerações de telefonia móvel, do 1G ao 5G, e expectativas para o B5G (*Beyond 5G*) ou pós-5G. Caso o leitor já tenha afinidade com os conceitos básicos apresentados neste capítulo, é possível pular esta leitura sem prejuízo do entendimento da pesquisa.

2.1 Histórico das comunicações sem fio

Cientistas começaram a apresentar tecnologias de comunicação sem fio ainda no século XIX, como por exemplo o fotofone, dispositivo capaz de enviar sinais de voz por meio de um feixe de luz solar, criado por Alexandre Graham Bell e Charles Sumner Tainter em 1880 (BELLIS, 2023; DRULLIS, 2023). Outro marco importante na história das comunicações sem fio foi a invenção do telégrafo sem fio, com base nos estudos de James Clerk Maxwell, Heinrich Rudolf Hertz e Nikola Tesla, tendo sido patenteado por Guglielmo Marconi no final do século XIX (WYMORE, 2021; VOSS *et al.*, 2021). No anos seguintes, novas ideias e tecnologias no campo das comunicações sem fio foram desenvolvidas; no entanto, este capítulo se concentra na telefonia móvel celular via rádio.

Na década de 1940, a empresa AT&T lançou sistemas de telefonia móvel em algumas cidades dos EUA (BERGAMO, 2014; LOPES, [s.d]). Em 1947, o conceito de telefonia celular foi criado na Bell Labs, setor de pesquisa e desenvolvimento da AT&T; porém, na época a implantação não foi possível devido a questões de regulamentação do espectro de frequências por parte da FCC (*Federal Communications Commission*), tendo apenas sido colocado em prática muitos anos depois (BERGAMO, 2014; MADRIGAL, 2011). Na década de 1970, houve o desenvolvimento de *hardwares* de radiofrequência eficientes, fruto da revolução da eletrônica moderna, o que impulsionou o campo das comunicações móveis via rádio. Nas décadas de 1960 e 1970, a Bell Labs desenvolveu o conceito de sistemas celulares (RAPPAPORT, 2008), o qual é explanado na seção 2.2.

Apesar do conceito de telefonia celular ter surgido na Bell Labs da AT&T, a Motorola entrou na disputa pela criação do primeiro telefone móvel celular. A Motorola, que na época era uma empresa pequena em comparação com a gigante das telecomunicações AT&T, venceu a tal disputa. Em 1973, ocorreu a primeira ligação de um telefone móvel celular por Martin

Cooper, engenheiro da Motorola, para o rival Joel Engel, da Bell Labs da AT&T. O aparelho utilizado foi um protótipo do modelo Motorola DynaTAC 8000x, que tinha 1,1 kg e cerca de 33 cm de comprimento. O engenheiro Martin Cooper é considerado o inventor do telefone celular (MOSCHEN, 2023; HIDALGO, 2020; RODRIGUES, 2023; MARIN, 2023; HELDER, 2023).

De acordo com RAPPAPORT (2008), os principais desafios no futuro das comunicações móveis estão relacionados a alocação de recursos de rádio, decisões regulamentadoras, o avanço de tecnologias e as necessidades dos usuários. A seção 2.4 aborda com maiores detalhes o histórico dos sistemas celulares e da telefonia móvel, e a seção 2.5 apresenta perspectivas para o futuro das comunicações móveis.

2.2 Sistemas celulares

De acordo com RAPPAPORT (2008), historicamente são considerados dispositivos móveis todos os terminais de rádio que podem ser operados em movimento. No entanto, também existe a definição de dispositivo móvel como um terminal de rádio ligado a uma plataforma móvel de alta velocidade, como um telefone celular sendo utilizado em um veículo em movimento, por exemplo. Em contrapartida, dispositivos portáteis seriam aqueles que o usuário pode utilizar caminhando, como por exemplo um telefone fixo sem fio. Em todo caso, é bastante comum que se pense em telefonia celular quando o assunto é comunicação móvel.

O sistema de telefonia celular, utilizado globalmente, é um tipo de sistema de comunicação sem fio no qual a área total de cobertura da rede de comunicação é dividida em áreas menores, denominadas células, cada uma contando com um ponto de acesso ou Estação Rádio Base (ERB), em inglês *Base Transceiver Station* (BTS), como ponto de acesso dos terminais móveis da rede. Cada ERB é ligada à Central de Comutação e Controle (CCC), em inglês *Mobile Switch Center* (MSC), onde se concentra o gerenciamento da rede móvel (LOPES, [s.d.]; CUNHA, 2017). A seguir são apresentadas algumas características básicas de sistemas de comunicações sem fio, e mais especificamente sobre telefonia móvel e sistemas celulares.

2.2.1 *Simplex, half-duplex e duplex*

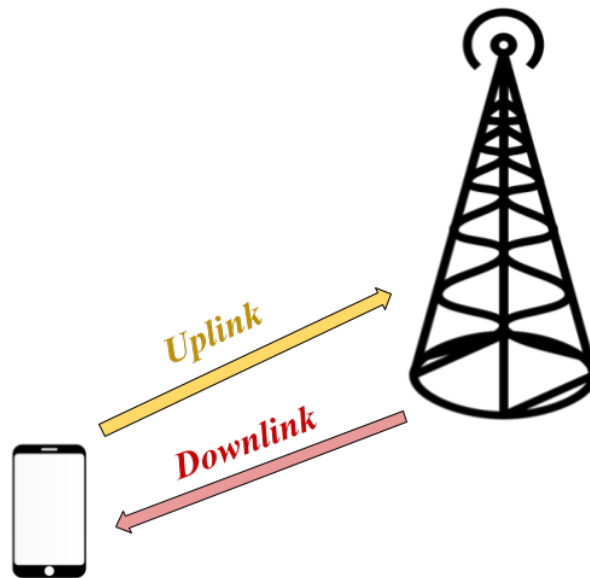
Na comunicação *simplex*, a transmissão é unilateral, apenas um lado transmite sinal, e o outro lado recebe. Exemplos de uso do modo *simplex* são as transmissões de TV e rádio. Na comunicação *half-duplex* ou semiduplex, apenas um lado transmite por vez, enquanto o

outro lado do *link* recebe o sinal. O fluxo de dados pode seguir dois sentidos, mas não há transmissão em ambos os lados de forma simultânea. Um exemplo de dispositivo que utiliza o modo *half-duplex* é o *walkie talkie*. Já no modo *duplex*, ambos os lados da comunicação podem transmitir de modo simultâneo. Na telefonia celular, em *chats* e em chamadas de vídeo na internet, entre outros serviços, a comunicação ocorre no modo *duplex* (RAPPAPORT, 2008; FOROUZAN, 2008).

2.2.2 Downlink e uplink

Quando o dispositivo móvel recebe o sinal emitido pelo ponto de acesso, isto se trata do *downlink*, ou *link/canal* direto. Por outro lado, o *uplink* consiste no *link/canal* reverso, quando é o ponto de acesso que recebe o sinal enviado pelo dispositivo. A Figura 1 traz uma ilustração dos conceitos de *downlink* e *uplink* (PIVARO, 2008; RAPPAPORT, 2008).

Figura 1 – Uplink e downlink.



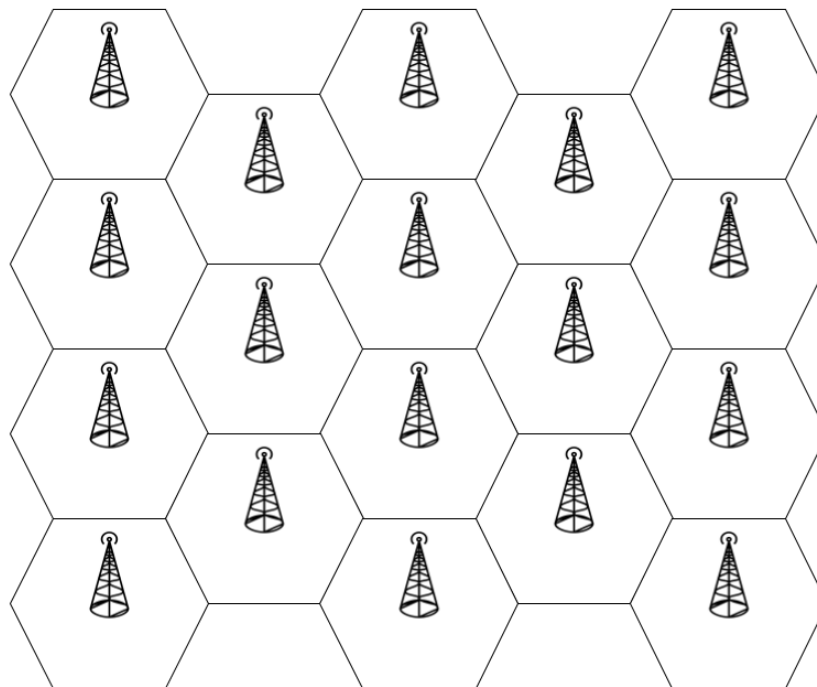
Fonte: Autoral.

2.2.3 Geometria hexagonal

Na Figura 2, mostra-se um modelo de sistema celular com geometria hexagonal, no qual cada célula possui a forma de um hexágono, com um ponto de acesso localizado no centro da célula, cada um representando uma ERB. Na prática, os sistemas celulares reais não possuem células com formato hexagonal, portanto, esta é uma simplificação teórica convencionalmente

adotada para fins didáticos e facilitação de cálculos em projetos. Cada ERB utiliza um grupo de canais de frequência e é responsável por ser o ponto de acesso em sua própria célula, servindo aos usuários daquela área. A área real de cobertura de uma ERB depende de vários fatores, como potência de transmissão, tipo de antena(s) utilizada(s), altura da torre, faixa de frequência utilizada, topografia da área geográfica, etc. (RAPPAPORT, 2008; TELECO, 2008).

Figura 2 – Sistema de telefonia celular: geometria hexagonal.



Fonte: Autoral.

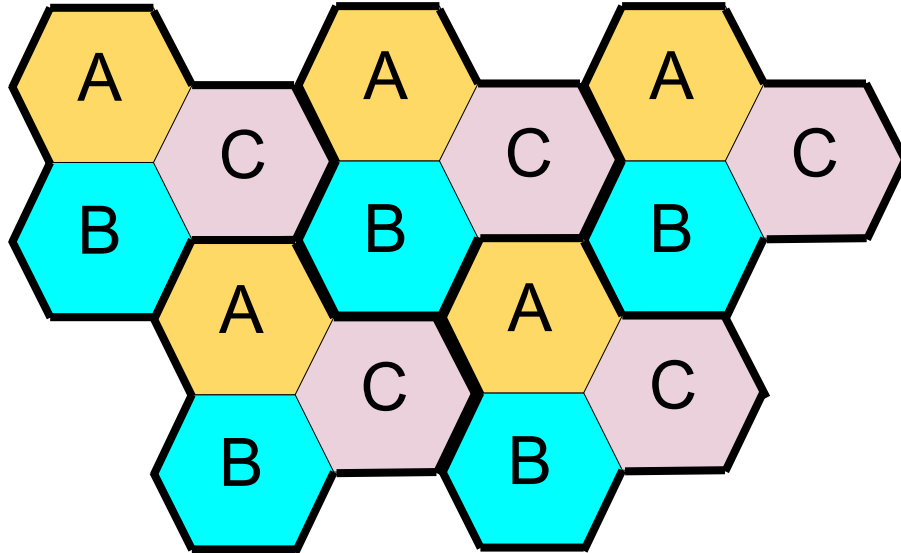
2.2.4 Reutilização de frequência

O espectro de frequências nas comunicações é um recurso escasso, pois existe uma grande quantidade de sistemas de comunicações em uso na atualidade, sendo que para cada um são alocadas porções de frequência estrategicamente. A ideia de reutilização de frequência em sistemas celulares é uma maneira eficiente de aproveitamento do espectro, baseando-se no agrupamento de células formando o que se conhece por *cluster*, em que cada célula possui um grupo distinto de canais de frequência (RAPPAPORT, 2008).

Define-se como tamanho de *cluster* o número que este possui de células. A Figura 3 mostra um sistema com tamanho de *cluster* $N = 3$, com cada letra representando um grupo distinto de canais. As células que possuem as mesmas frequências sofrem interferência co-canal;

por exemplo, cada célula com um grupo de canais A sofre interferência das demais células que utilizam as frequências A nos outros *clusters* (RAPPAPORT, 2008).

Figura 3 – Formação de *clusters* com tamanho $N = 3$.



Fonte: Autoral.

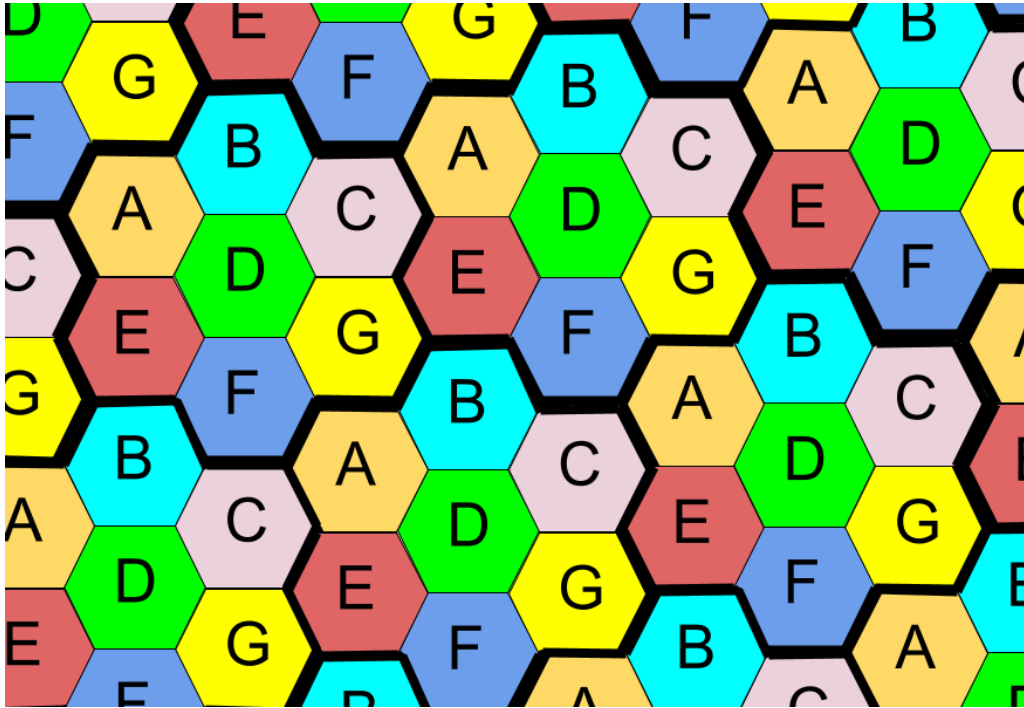
O tamanho de *cluster* é uma característica de projeto dos sistemas celulares, podendo variar. Na Figura 4, o tamanho de *cluster* é $N = 7$. A distância entre as células é uma medida importante para o cálculo de interferência co-canal, contudo, o assunto não será aprofundado aqui. Para maiores detalhes sobre a geometria hexagonal e características de projeto de sistemas celulares, a leitura da obra de RAPPAPORT (2008) é recomendada.

Considerando que cada célula possui k canais, o total de canais utilizados em um *cluster* é $S = kN$. Se o *cluster* é replicado M vezes, o número total de canais utilizados no sistema é $C = MS$ (RAPPAPORT, 2008). Em um sistema real, se em vez da divisão por células houvesse um único ponto de acesso para cobrir a mesma área, além da necessidade de uma altíssima potência de transmissão da ERB e dos dispositivos móveis, a ocupação do espectro seria muito maior. Dessa forma, é evidente a vantagem do conceito celular.

2.2.5 Interferência

A interferência ocorre quando a comunicação é prejudicada devido a um sinal externo. Em um sistema celular convencional, existem duas interferências básicas: a de co-canal e a de canal adjacente. Mesmo em células que não utilizam as mesmas frequências, devido à imperfeição de filtros de transmissão e recepção, existe a interferência das frequências adjacentes.

Figura 4 – Formação de *clusters* com tamanho $N = 7$.



Fonte: Autoral.

A interferência de co-canal, por sua vez, deve-se à reutilização de frequência, como dito na subseção . A qualidade de um enlace que experimenta interferência é mensurada por meio da SIR (*Signal-to-Interference Ratio*), a razão entre a potência P do sinal do usuário e a potência I do sinal interferente, ou seja, P/I . (RAPPAPORT, 2008).

2.2.6 Taxa de dados

Em um sistema de comunicação, a taxa de dados alcançável ou velocidade máxima de transmissão de dados pode ser estimada com base na equação da capacidade de Shannon, que define a capacidade C de um canal de comunicação como

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P}{N} \right), \quad (2.1)$$

em que B é a largura de banda do canal, P é a potência do sinal, e N é a potência do ruído experimentado pelo canal. No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade da capacidade C é bits/s ou bps (bits por segundo) (FOROUZAN, 2008). Acrescentando o fator da interferência, nas comunicações móveis, a taxa de dados alcançável, r , de um usuário que sofre uma interferência I de um ou mais usuários e utiliza um canal com ruído N é dada por

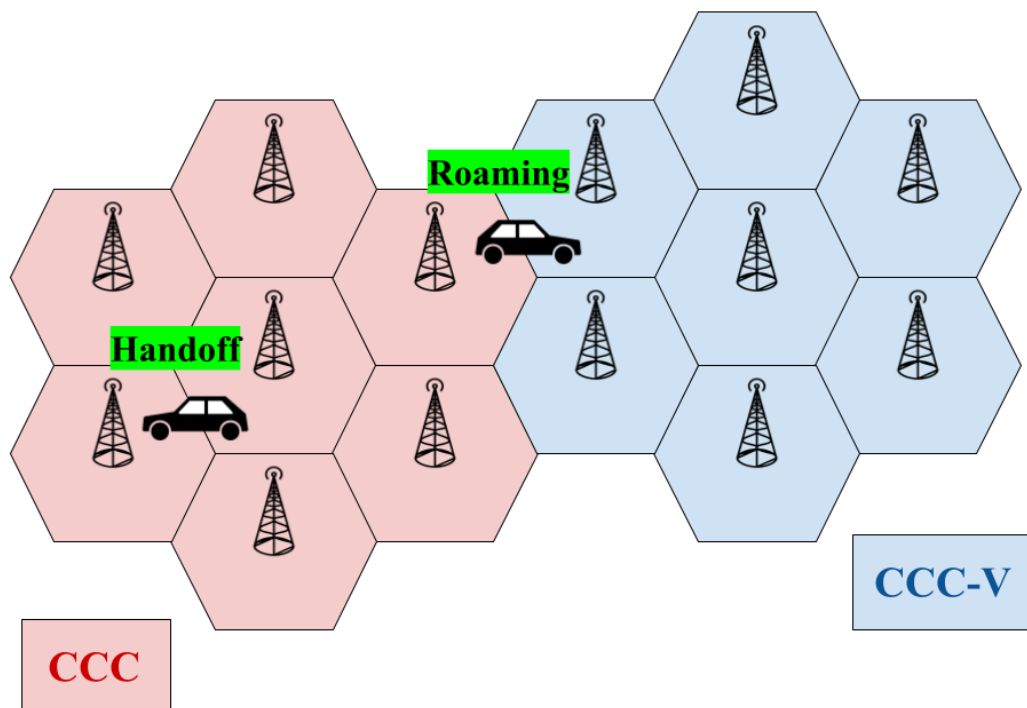
$$r = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P}{I+N} \right). \quad (2.2)$$

A razão entre potência do sinal e potência de ruído, P/N , presente na equação (2.1), é conhecida como SNR (*Signal-to-Noise Ratio*), assim como a razão entre a potência do sinal e a potência do sinal interferente, P/I , é denominada SIR, como explicado anteriormente. Já a razão $P/(I+N)$, presente na equação (2.2), que soma interferência e ruído no denominador, é denominada SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*). Essas medidas são comumente expressas em dB (decibéis) na literatura.

2.2.7 Handoff e roaming

O *handoff* ocorre quando um usuário passa de uma célula para outra. Como cada célula é atendida por uma ERB distinta, a conexão do usuário é transferida de uma ERB para outra durante o *handoff*. O *roaming* é a situação em que um usuário está fora da área de cobertura em que foi cadastrado, porém se conecta a uma CCC visitada ou CCC-V (RAPPAPORT, 2008). Na Figura 5, o *handoff* e o *roaming* estão ilustrados.

Figura 5 – Formação de *clusters* com tamanho $N=7$.



Fonte: Autoral.

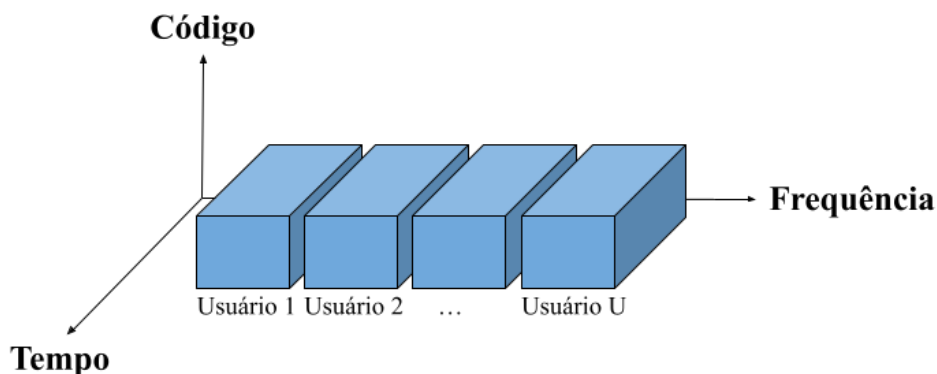
2.3 Técnicas convencionais de acesso múltiplo

Para que seja possível a conexão de vários dispositivos simultaneamente, existem as técnicas de acesso múltiplo, que permitem que os sinais (ou informação) de diversos usuários sejam transmitidos em conjunto de modo estratégico para não ocorrer perda ou distorção de informação. Entre as técnicas de acesso múltiplo baseados em OMA, que em português significa Acesso Múltiplo Ortogonal, as três principais são FDMA, TDMA e CDMA (RAPPAPORT, 2008). Nesta seção, é chamado circuito de comunicação um serviço requisitado no sistema de comunicação, como uma chamada de voz, por exemplo.

2.3.1 Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência (FDMA)

Como será mostrado na seção 2.4, os sistemas de primeira geração da telefonia celular (1G) eram analógicos e utilizavam FDMA. No esquema FDMA, cada usuário utiliza um canal de frequência exclusivo, ou seja, a divisão de canais para U usuários ocorre no domínio da frequência, conforme ilustrado na Figura 6. A banda total disponível é dividida em subportadoras, que são distribuídas aos usuários (RAPPAPORT, 2008; HAYKIN; MOHER, 2008; CASTRO, [s.d]). Durante uma chamada de voz entre duas pessoas, uma faixa de frequência é dedicada exclusivamente para tal serviço. Na tentativa de atender a um elevado número de usuários, é necessário estabelecer uma largura de banda estreita para cada um. Por essa razão, a largura de banda reservada para cada circuito de comunicação normalmente é estreita em sistemas FDMA (RAPPAPORT, 2008).

Figura 6 – Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência (FDMA).

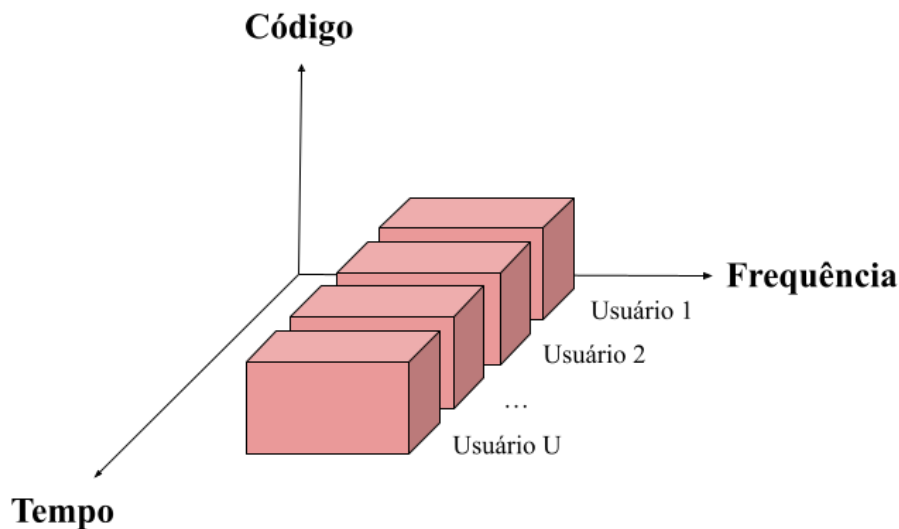


Fonte: Autoral.

2.3.2 Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA)

No TDMA, a divisão de canais ocorre no domínio do tempo, como ilustrado na Figura 7, sendo U o número de usuários compartilhando uma portadora (ou subportadora). Em geral, os sistemas que utilizam o TDMA são mais sofisticados e oferecem maior capacidade do que os sistemas FDMA, pois uma mesma faixa de frequência pode ser utilizada para mais de um circuito de comunicação, aumentando a capacidade. Diferentemente do FDMA, que é analógico, o TDMA é digital e incorpora a divisão do tempo em quadros ou *frames* periódicos, que são subdivididos em *slots* de tempo. Cada *slot* de tempo é utilizado para um circuito de comunicação. Dessa forma, a transmissão em qualquer circuito de comunicação não é contínua, porém, essa descontinuidade não é percebida pelo usuário pelo fato de ocorrer em frações de segundos (RAPPAPORT, 2008; HAYKIN; MOHER, 2008; CASTRO, [s.d]).

Figura 7 – Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA).



Fonte: Autoral.

2.3.3 Acesso Múltiplo por Divisão de Código (CDMA)

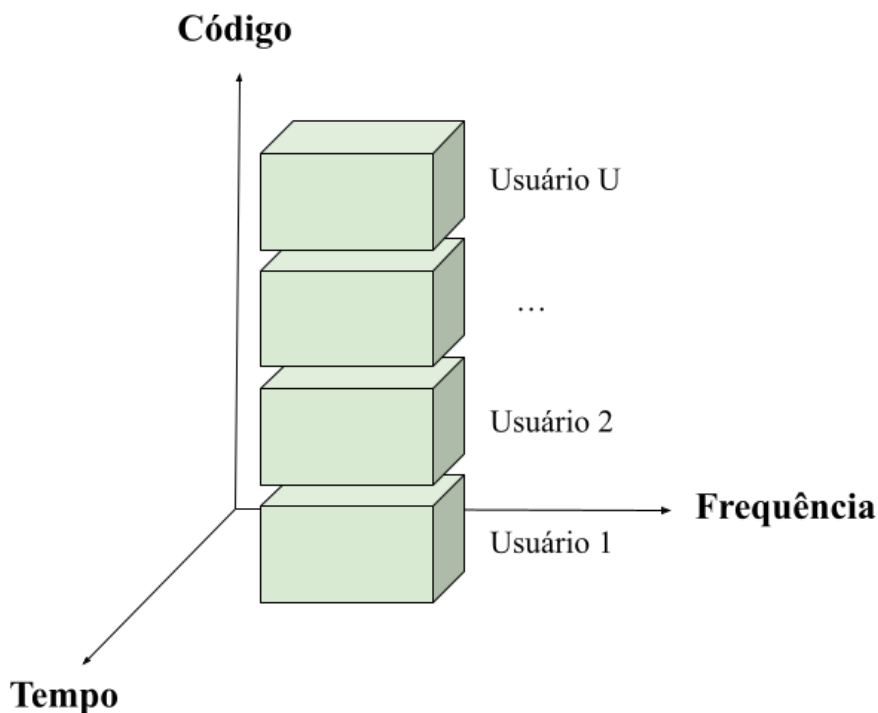
No CDMA convencional, a separação de canais para os U usuários ocorre em um domínio de códigos ortogonais, havendo compartilhamento de recursos de tempo e frequência, como ilustrado na Figura 8. No CDMA, cada sinal de usuário é multiplicado por um sinal de código particular de banda muito grande, resultando em espalhamento espectral. O sinal de espalhamento é uma sequência de código pseudo-aleatória atribuída para cada usuário (RAPPAPORT,

2008; HAYKIN; MOHER, 2008; CASTRO,[s.d]).

O receptor, que deve conhecer cada código, faz a separação dos sinais dos usuários por meio de correlação de tempo, detectando apenas o sinal desejado e tratando os demais como ruído. Uma das grandes vantagens do CDMA em relação ao FDMA e o TDMA é a maior segurança devido ao uso de códigos, reduzindo-se a probabilidade de interceptação das comunicações dos usuários (RAPPAPORT, 2008; CASTRO,[s.d]).

O CDMA convencional não é considerado uma técnica NOMA porque os códigos são ortogonais, diferentemente da proposta do NOMA (Acesso Múltiplo Não-Ortogonal). O NOMA possui técnicas de acesso múltiplo nos domínios da potência e de código, porém, o que o diferencia é o fator da não-ortogonalidade. Portanto, o CDMA tradicional é uma técnica baseada em OMA (DING *et al.*, 2017; AL-DULAIMI *et al.*, 2023).

Figura 8 – Acesso Múltiplo por Divisão de Código (CDMA).



Fonte: Autoral.

2.4 Evolução dos sistemas celulares e telefonia móvel

Nesta seção, apresenta-se o histórico das gerações de sistemas celulares, do 1G ao 5G. De antemão, uma observação importante é que as informações sobre taxas de dados alcançáveis

em cada geração de telefonia móvel costumam divergir de fonte para fonte. Diferentes autores costumam apresentar diferentes valores de taxas de dados, dependendo da localidade, da data, das características da rede observada, se está sendo considerada a experiência de um usuário estacionário, em movimento ou em um veículo, entre outros possíveis fatores. Por essa razão, a abordagem direta de valores de taxas de dados nesta seção é evitada para não causar confusões. No entanto, é importante esclarecer que, a partir do 3G, a ITU passou a definir um conjunto de especificações técnicas que cada geração deve atender, inclusive de taxas de dados, nos padrões IMT. Por exemplo, a ITU definiu o IMT-2000 para o 3G, o IMT *Advanced* para o 4G, e o IMT 2020 para o 5G (CHEN *et al.*, 2023).

2.4.1 Primeira geração: 1G

Por volta do início da década de 1980, foram lançadas as redes de comunicações móveis 1G por meio dos sistemas NTT (*Nippon Telephone and Telegraph*), AMPS (*Advanced Mobile Phone System*), NMT (*Nordic Mobile Telephone*), TACS (*Total Access Communications Systems*), entre outros. Os sistemas da primeira geração de telefonia móvel eram analógicos e, além de possuírem uma capacidade limitada, contavam apenas com serviço de voz, não sendo possível o envio de mensagens de texto. Por não haver um padrão global no 1G, havia problemas de interoperabilidade ou compatibilidade entre os sistemas (GALAZZO, 2020; VINHAL, 2020; MAGALHÃES, 2021; FERREIRA; CORREIA, 2018; KUMAR; SUMIT, 2021; SANTOS, 2008). O acesso múltiplo ocorria por FDMA (*Frequency-Division Multiple Access*), então, cada usuário utilizava uma faixa de frequência dedicada. Sabe-se que o espectro de frequências nas comunicações é um recurso limitado. Então, apenas um número pequeno de chamadas simultâneas era possível nos sistemas 1G, já que cada usuário requisitava uma faixa de frequência exclusiva (GALAZZO, 2020; VINHAL, 2020; MAGALHÃES, 2021; FERREIRA; CORREIA, 2018; KUMAR; SUMIT, 2021; SANTOS, 2008).

2.4.2 Segunda geração: 2G

No início da década de 1990, a segunda geração das comunicações móveis (2G) surgiu com o padrão GSM (*Global System for Mobile Communications*), desenvolvido na Europa e lançado inicialmente na Finlândia em 1991 (GALAZZO, 2020). A ideia de se estabelecer um padrão global foi um marco importante para a interoperabilidade dos sistemas, possibilitando

roaming global. Além disso, o 2G trouxe outras vantagens significativas em relação à geração anterior, como maior capacidade de rede, maior cobertura, a migração do formato analógico para o digital, a possibilidade de envio de mensagens por SMS (*Short Message Service*) e, depois, MMS (*Multimedia Message System*), etc. (SANTOS, 2008; SILVA, 2016). No 2G, uma mesma faixa de frequência pode ser utilizada por mais de um usuário por meio das técnicas TDMA e CDMA. (VINHAL, 2020; KUMAR; SUMIT, 2021). Com o GSM foi introduzido o cartão SIM (*Subscriber Identity Module*), conhecido no Brasil como *chip* de celular. A transição entre as gerações 2G e 3G, marcada pelas tecnologias HSCSD (*High Speed Circuit Switched Data*), GPRS (*General Purpose Radio Services*) e EDGE (*Enhanced Data Rates for Global Evolution*), é por vezes chamada de 2,5G de forma não oficial (ALECRIM, 2012; MAGALHÃES, 2021).

2.4.3 Terceira geração: 3G

A terceira geração de telefonia móvel foi lançada em 2001, inicialmente no Japão pela empresa NTT DoCoMo (EZHILARASAN; DINAKARAN, 2017; GALAZZO, 2020). O 3G foi a geração de telefonia celular que popularizou a internet móvel. O padrão adotado no 3G é o UMTS (*Universal Mobile Telecommunications Service*), que é uma evolução do GSM, padrão do 2G. O grande diferencial do 3G em relação à geração anterior é a ampliação do acesso à internet móvel com o aumento das taxas de dados (velocidade da conexão), proporcionando maior acesso a páginas *web* pelo aparelho celular, além da melhoria no serviço de e-mails, a possibilidade de acesso a TV, realização de videoconferências, comunicação VoIP (*Voice over Internet Protocol*), *streaming* de vídeo e música por dispositivos móveis (VINHAL, 2020; MAGALHÃES, 2021).

O 3G é marcado pela utilização do W-CDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*), também conhecido em português como Acesso Múltiplo por Divisão de Código em Banda Larga (KUMAR; SUMIT, 2021). Com o tempo, a terceira geração de telefonia celular passou a alcançar maiores taxas de dados com a implantação das tecnologias HSPA (*High Speed Packet Access*) e HSPA+, que consistem em melhorias para o W-CDMA (VINHAL, 2020; MAGALHÃES, 2021).

2.4.4 Quarta geração: 4G

O lançamento comercial do 4G ocorreu entre 2009 e 2010. Com maior capacidade de tráfego de rede e maior velocidade no fluxo de dados, o 4G melhorou o que havia no 3G,

possibilitando *streaming* de vídeos em alta definição (HD, *High Definition*), carregamento mais rápido de páginas *web*, jogos *online*, entre outros serviços que demandam altas taxas de dados (GALAZZO, 2020). Para o acesso múltiplo, o 4G utiliza OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) combinado a outras técnicas, como SC-FDMA (*Single-Carrier FDMA*) e MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) (VINHAL, 2020).

Os padrões LTE e Mobile WiMAX foram comercialmente lançados como 4G, apesar de não atenderem aos requisitos da ITU (*International Telecommunication Union*) para o 4G. Por essa razão, muitas pessoas consideram que o 4G ainda não havia sido lançado de fato, até que surgiram os padrões LTE-A (*Long Term Evolution Advanced*) e o Mobile WiMAX Advanced, satisfazendo os critérios da ITU para o 4G (VINHAL, 2020; SILVA, 2016). Na prática, não há um consenso quanto a considerar o LTE como 4G ou não: algumas fontes consideram, enquanto outras não o fazem. Por fim, como uma evolução do LTE-A, surgiu o LTE Advanced-Pro, comercialmente chamado 4,5G, que é uma versão melhorada do 4G tradicional (MAGALHÃES, 2021).

2.4.5 Quinta geração: 5G

O 5G foi lançado comercialmente entre 2019 e 2020, tendo sido oferecido pela primeira vez na Coreia do Sul. A quinta geração de telefonia móvel é a mais recente em vigor e continua em desenvolvimento. Assim como as gerações anteriores, o 5G deve receber melhorias nos próximos anos, portanto, ainda não chegou em seu potencial máximo. O padrão de interface aérea (sistema de rádio) do 5G é o 5G NR (*New Radio*) e o padrão de *backbone* (rede central) é o 5GC (*5G Core*) (SULTAN, 2022; ANATEL, 2022; ERICSSON, [s.d]). A multiplexação ocorre por OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) (QUALCOMM), e as técnicas de acesso múltiplo utilizadas no 5G NR são uma continuação das técnicas já empregadas no 4G, como OFDMA e SC-FDMA (TELECO, 2022; VU, 2022; TERVO *et al.*, 2020; CISCO, [s.d]).

As larguras de banda do 5G são maiores, compreendendo frequências sub 6 GHz (abaixo de 6 GHz) e frequências mais altas até então não exploradas em gerações anteriores, que são as frequências das ondas milimétricas (*mmWave*, em inglês), de 30 GHz a 300 GHz, o que torna possível a conectividade massiva de usuários e dispositivos inteligentes. Uma das expectativas sobre o 5G é a implantação massiva de IoT, que requisita elevado tráfego de dados e baixa latência (GALAZZO, 2020). O 5G é projetado para oferecer uma capacidade de tráfego e uma eficiência de rede 100 vezes maior, além de uma latência 10 vezes menor em comparação

com o LTE (COSTA, 2020; QUALCOMM).

2.4.6 Resumo: do 1G ao 5G

Na Figura 9, são destacadas algumas características de cada geração de telefonia móvel, do 1G ao 5G, de acordo com o que foi trazido nesta seção. A primeira geração possuía vários padrões interoperáveis entre si, com o AMPS sendo o principal, era analógica e contava apenas com serviço de voz. No 2G, houve uma mudança de paradigma, com a transição do analógico para o digital, a adoção de um padrão universal, o GSM, e o surgimento de novos serviços, como o envio de mensagens de texto. No 3G, os serviços que já eram oferecidos no 2G foram aprimorados, além da adição de novos serviços, e a internet móvel foi popularizada. No 4G, a internet móvel passou a ter maior velocidade, houve um aumento na capacidade de tráfego e menor latência. No 5G, além de um significativo aumento de velocidade da internet, da capacidade e eficiência das redes, o número de dispositivos suportados é consideravelmente maior, viabilizando a implantação de IoT.

2.5 Expectativas para o futuro das comunicações móveis

O 5G ainda não atingiu seu potencial máximo e, semelhantemente às gerações de telefonia móvel anteriores, deve passar por melhorias ao longo dos próximos anos. Assim como ocorreu no 4G, com a evolução do LTE para *LTE Advanced*, a próxima etapa na evolução do 5G é o lançamento do *5G-Advanced*, conforme descrito no *Release 18* do 3GPP (3GPP, 2021). As melhorias previstas com a chegada do *5G-Advanced* incluem o uso de Inteligência Artificial e *Machine Learning* (Aprendizado de Máquina) para automação das rede, alocação dinâmica de recursos, maior capacidade de rede, maior eficiência energética, além de maior suporte para aplicações como metaversos, sistemas de tempo real críticos e tecnologias de localização/posicionamento precisas (ERICSSON, [s.d]; NOKIA, [s.d]).

O desenvolvimento do *5G-Advanced* abre caminho para a próxima geração, o 6G, que deve ser lançado comercialmente em 2030 (ERICSSON, [s.d]). Uma das previsões mais ambiciosas para o 6G é a possibilidade de implantação da Internet dos Sentidos, com metaversos altamente imersivos, gêmeos digitais e internet onipresente, segura e estável. Além do aumento de velocidade da internet em relação ao 5G, a capacidade das redes de comunicação no futuro deve aumentar bastante para suportar serviços cada vez mais sofisticados. Apesar do 5G não ter

Figura 9 – Gerações de telefonia móvel do 1G ao 5G.

1G	<p>Lançamento: Final da década de 1970 e início de 1980</p> <p>Padrões: AMPS, TACS, NMT, entre outros (incompatíveis entre si).</p> <p>Serviços: Voz</p> <p>Acesso múltiplo: FDMA</p> <p>Tipo de sistema: Analógico</p>
2G	<p>Lançamento: 1991</p> <p>Padrão: GSM</p> <p>Serviços: Voz, SMS, MMS e, após atualizações, o início da internet móvel</p> <p>Acesso múltiplo: TDMA e CDMA</p> <p>Tipo de sistema: Digital</p>
3G	<p>Lançamento: 2001</p> <p>Padrão: W-CDMA</p> <p>Serviços: VoIP, acesso a páginas <i>web</i>, TV, chamadas de vídeo, etc.</p> <p>Acesso múltiplo: CDMA</p> <p>Tipo de sistema: Digital</p>
4G	<p>Lançamento: Entre 2009 e 2010</p> <p>Padrões: LTE e WiMax (pré-4G), e LTE-A e WiMax Advanced (verdadeiro 4G)</p> <p>Serviços: Internet rápida, <i>streaming</i> de vídeo em HD, jogos online, etc.</p> <p>Acesso múltiplo: OFDMA e SC-FDMA</p> <p>Tipo de sistema: Digital</p>
5G	<p>Lançamento: Entre 2019 e 2020</p> <p>Padrões: 5G NR (interface aérea) e 5GC (<i>backbone</i>)</p> <p>Serviços: Internet muito mais rápida e aplicações de Internet das Coisas.</p> <p>Acesso múltiplo: OFDMA e SC-FDMA</p> <p>Tipo de sistema: Digital</p>

Fonte: Autoral.

alcançado ainda seu potencial máximo, especialistas apontam que algumas metas não podem ser alcançadas ainda no 5G e, portanto, devem ficar para as próximas gerações das comunicações móveis, como a Internet dos Sentidos, por exemplo. Nas gerações futuras, as redes devem ser de altíssima eficiência energética, de modo que o aumento do tráfego não ocasione um aumento expressivo do consumo energético. Além disso, as redes B5G (pós-5G) devem cumprir requisitos de sustentabilidade (ERICSSON, [s.d]; DAROS, 2023).

3 NOMA: ACESSO MÚLTIPLO NÃO-ORTOGONAL

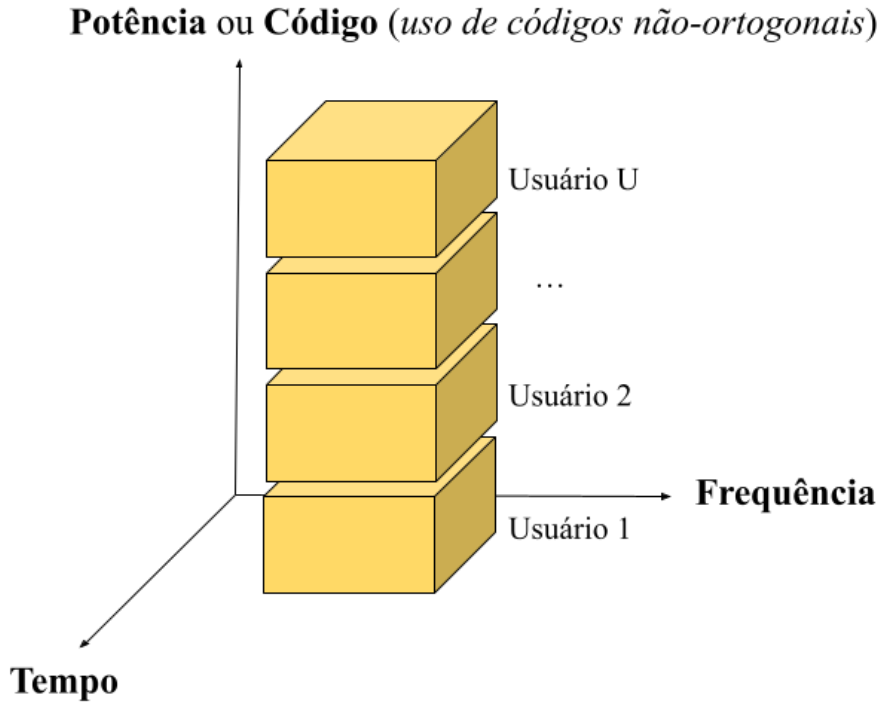
Até o presente momento, as principais técnicas de acesso múltiplo empregadas nos sistemas de comunicação reais são baseadas em OMA (*Orthogonal Multiple Access*), o Acesso Múltiplo Ortogonal. O NOMA (*Non-Orthogonal Multiple Access*), Acesso Múltiplo Não-Ortogonal, é um novo princípio de acesso múltiplo que tem sido amplamente estudado por especialistas nos últimos anos e tem se mostrado promissor para obtenção de maior eficiência espectral, entre outros muitos benefícios, no futuro das comunicações sem fio (DAI LINGLONG; WANG, 2018; DING *et al.*, 2017; DING *et al.*, 2020a).

A ideia principal do NOMA é que seja possível que dois ou mais usuários compartilhem um bloco de recursos de forma não-ortogonal, isto é, um mesmo intervalo de tempo e uma mesma banda de frequência por meio de uma divisão não-ortogonal, seja de domínio de potência ou de domínio de código, ou ainda de outra forma. As duas principais formas de NOMA são: NOMA no domínio de potência e NOMA no domínio de código (DING *et al.*, 2017; DAI LINGLONG; WANG, 2018). A Figura 10 ilustra a ideia do NOMA considerando as duas principais formas, em que U usuários compartilham uma faixa de frequência simultaneamente de forma não-ortogonal. Existem ainda outras técnicas NOMA que não fazem parte do NOMA de domínio de potência ou do NOMA de domínio de código, como variantes de SDMA (*Spatial Division Multiple Access*), PDMA (*Pattern Division Multiple Access*), IGMA (*Interleave-Grid Multiple Access*), BDM (*Bit Division Multiplexing*), entre outras (DAI LINGLONG; WANG, 2018).

Existem diversas aplicações possíveis envolvendo o NOMA, misturando-se outros conceitos e técnicas, tais como NOMA com múltiplas subportadoras, com portadora única, com ondas milimétricas, com múltiplas antenas (MIMO), NOMA cooperativo, NOMA baseado/inspirado em rádio cognitivo, etc (DING *et al.*, 2017). Em diversos trabalhos publicados nos últimos anos, estudiosos apontaram o NOMA como uma importante tecnologia a ser utilizada na era do 5G, porém isso não é uma realidade até o presente momento. De acordo com BJÖRNSSON (2021), é bastante plausível que o NOMA não seja utilizado no 5G e, caso seja utilizado, não assuma um papel de destaque, ficando para gerações futuras das comunicações móveis. No entanto, pode-se dizer que ainda há muito a ser desenvolvido no 5G e vários trabalhos recentes estudam o uso de NOMA nesta geração (HASSAN *et al.*, 2023; GHAFOR *et al.*, 2022; ABD-ELNABY *et al.*, 2022).

Neste capítulo, os principais conceitos de NOMA serão explicados, entre os quais

Figura 10 – Acesso Múltiplo Não-Ortogonal (NOMA).



Fonte: Autoral.

o funcionamento do SIC (*Successive Interference Cancellation*), um importante método de cancelamento sucessivo de interferência, utilizado no receptor para a separação dos sinais dos usuários em sistemas NOMA. O foco deste capítulo é o NOMA de domínio de potência. Como o NOMA de domínio de código é complexo e não faz parte da pesquisa apresentada no presente documento, esse assunto não será apresentado de forma detalhada aqui.

3.1 Comparativo de NOMA e OMA

Uma das principais vantagens do NOMA sobre o OMA é o ganho de eficiência espectral, já que o NOMA se propõe como um paradigma de melhor aproveitamento do espectro. Outras vantagens observadas na literatura são o aumento de capacidade e a baixa latência, além da conectividade massiva (DING *et al.*, 2017; DAI LINGLONG; WANG, 2018; GHAFOR *et al.*, 2022). O principal custo do NOMA em relação ao OMA é o aumento da complexidade no lado do receptor, que precisa realizar o cancelamento de interferência com a técnica SIC (GHAFOR *et al.*, 2022). Dessa forma, a utilização do NOMA, que insere um grau de complexidade maior nas comunicações, precisa ser justificada com ganhos estratégicos na prática. O compromisso entre complexidade do receptor (e do sistema como um todo) e eficiência espectral é uma questão

importante. Como as exigências de desempenho nas comunicações sem fio estão se tornando cada vez mais elevadas, espera-se que o NOMA assuma um papel importante nessa área ao longo dos próximos anos (DING *et al.*, 2017; DAI LINGLONG; WANG, 2018; GHAFOR *et al.*, 2022).

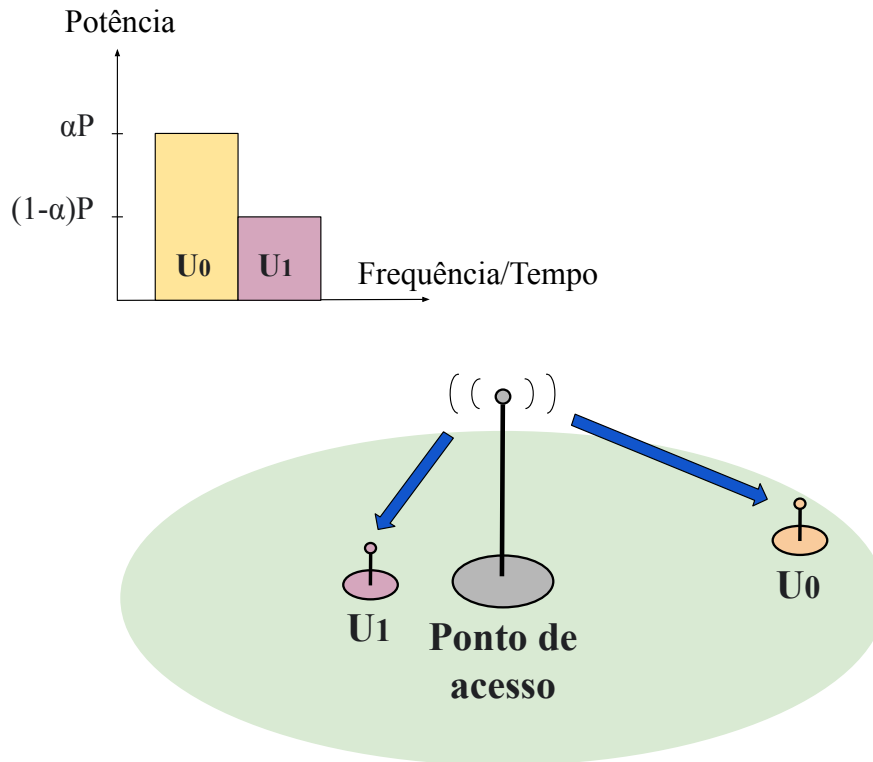
3.2 NOMA de domínio de potência

O NOMA de domínio de potência é a principal forma de NOMA abordada na literatura. No *downlink*, o ponto de acesso estabelece um nível de potência de transmissão para cada usuário, de modo que os sinais dos usuários sejam distinguíveis no domínio de potência. A Figura 11 ilustra essa etapa, assumindo um cenário com dois usuários, onde o usuário U_0 está mais distante do ponto de acesso e o usuário U_1 está próximo do ponto de acesso. Assume-se que $g_0 < g_1$, sendo g_0 e g_1 os ganhos de canal dos usuários U_0 e U_1 , respectivamente. Neste caso, como o sistema é simples e conta com apenas dois usuários sendo pareados, a potência total de transmissão P é dividida em duas partes, sendo a maior parte alocada para U_0 , já que o usuário U_0 possui uma desvantagem de ganho de canal em relação a U_1 . A ideia, neste exemplo, é alocar mais potência para o usuário em pior condição.

A potência do sinal de U_0 é definida como $P_0 = \alpha \cdot P$, e a potência do sinal de U_1 é definida como $P_1 = (1 - \alpha) \cdot P$, sendo que α é um coeficiente de alocação de potência e $\alpha \in (0, 1)$. Na verdade, cada usuário possui um coeficiente de alocação de potência α correspondente, mas como este é um exemplo simples com apenas dois usuários, o coeficiente de alocação de potência de U_1 aqui é tomado como $1 - \alpha$, ou seja, $\alpha_0 = \alpha$ e $\alpha_1 = 1 - \alpha$, sendo α_0 e α_1 os coeficientes de alocação de potência dos usuários U_0 e U_1 , respectivamente. Em um cenário com mais usuários sendo pareados, deve ser definido um conjunto maior de coeficientes α_i , onde i é o índice do i -ésimo usuário, assinalando-se uma fração de potência para cada usuário (DAI LINGLONG; WANG, 2018).

Tendo em vista o cenário apresentado, suponha-se uma situação em que o usuário U_0 tem maior prioridade que o usuário U_1 . Caso o OMA fosse utilizado, um bloco de recursos ortogonal seria alocado exclusivamente para o usuário U_0 , que tem pior ganho de canal. Com o NOMA, é possível que os dois usuários compartilhem o bloco de recursos, aumentando a taxa de dados total do sistema e a eficiência espectral, permitindo que o usuário U_1 também seja beneficiado. Essa situação evidencia a vantagem do NOMA e é frisada nos trabalhos de DAI Linglong; WANG (2018) e DING *et al.* (2020a).

Figura 11 – NOMA de domínio de potência.



Fonte: Autoral.

3.2.1 SIC: Cancelamento Sucessivo de Interferência

No NOMA, o SIC é uma técnica aplicada na etapa de detecção e decodificação dos sinais por parte de um receptor, consistindo no cancelamento/remoção de sinais indesejados para a decodificação do sinal desejado em um receptor. Continuando o exemplo de sistema descrito no início desta seção, de modo simplificado para facilitar a didática, seja S o sinal que carrega a junção de S_0 e S_1 , sinais dos usuários U_0 e U_1 , respectivamente, transmitido pelo ponto de acesso no *downlink*. A situação é ilustrada na Figura 12. Como explicado anteriormente, o ponto de acesso precisa alocar mais potência para U_0 , que está distante, do que para U_1 , que está perto. Neste caso, o usuário U_1 recebe o sinal S_0 mais forte do que seu próprio sinal S_1 , por isso, o SIC deve ser aplicado para cancelar ou subtrair o sinal S_0 , que é indesejado para U_1 , restando o sinal desejado, S_1 . Por outro lado, o usuário U_0 decodifica seu sinal S_0 tratando S_1 como interferência (DAI LINGLONG; WANG, 2018; LV *et al.*, 2018; ISLAM *et al.*, 2017).

A taxa de dados do usuário U_0 , em bits por segundo, é dada por

$$r_0 = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{\alpha \cdot P \cdot g_0}{(1 - \alpha) \cdot P \cdot g_0 + N} \right), \quad (3.1)$$

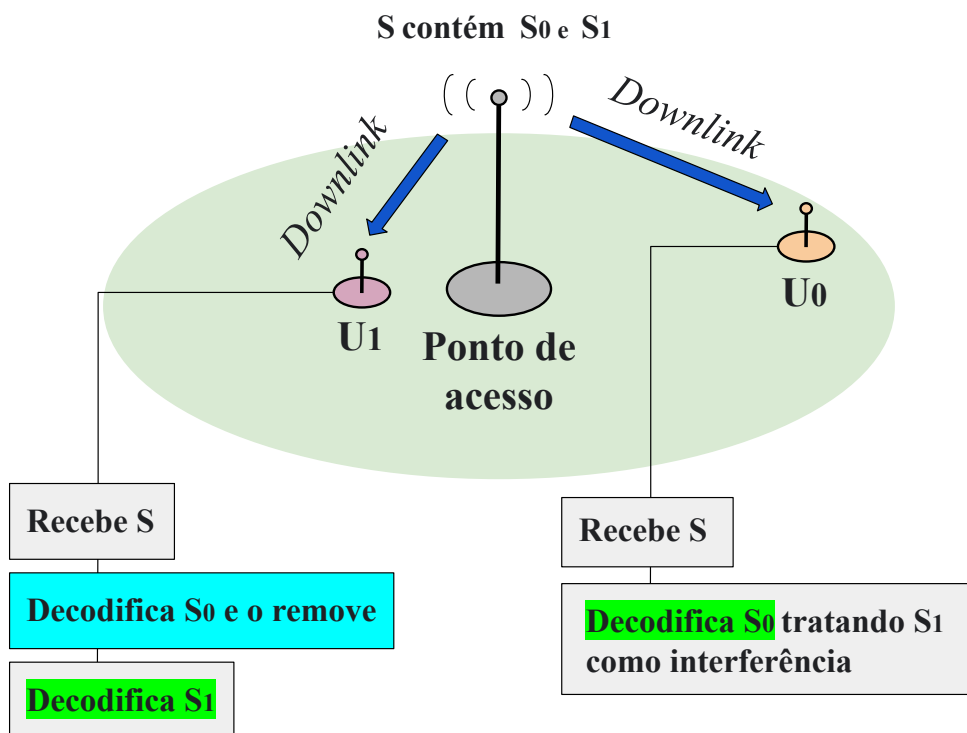
em que B é a largura de banda do canal, P é a potência total de transmissão do ponto de acesso,

α é o coeficiente de alocação de potência, g_0 é o ganho de canal de U_0 , e N é o ruído de comunicação. Se g_1 é o ganho de canal de U_1 , a taxa de dados do usuário U_1 , por sua vez, é dada por

$$r_1 = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{(1 - \alpha) \cdot P \cdot g_1}{N} \right). \quad (3.2)$$

Neste exemplo, o usuário com melhor ganho de canal, U_1 , não sofre interferência do usuário com pior ganho de canal no *downlink*. Em contrapartida, o usuário com pior ganho de canal, U_0 , sofre interferência por parte do usuário com maior ganho de canal. A razão disso é que, no *downlink*, o ponto de acesso atribui mais potência para transmissão do sinal do usuário com pior ganho de canal do que para o sinal do usuário com maior ganho de canal.

Figura 12 – SIC no *downlink*.



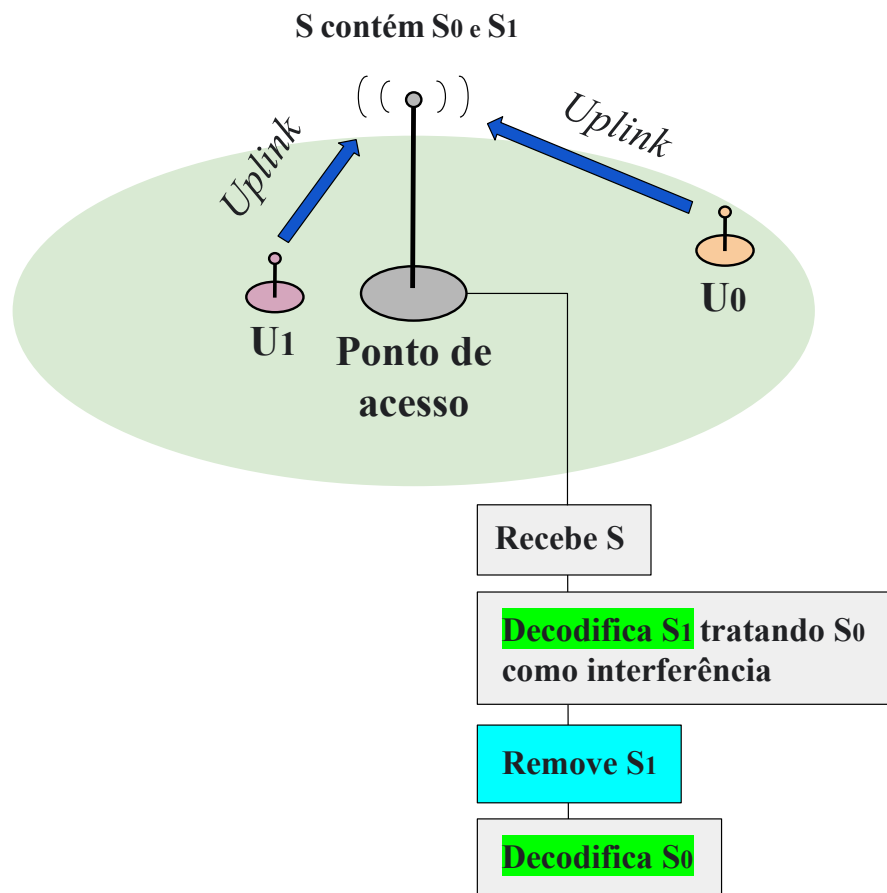
Fonte: Autoral.

Por meio deste exemplo, pode-se perceber no NOMA de domínio de potência convencional, o SIC é utilizado para cancelamento de sinais indesejados que são mais fortes (de maior potência) do que o sinal desejado. Caso os sinais indesejados sejam mais fracos do que o sinal desejado, basta decodificar o sinal desejado tratando os sinais indesejados como interferência. Outra forma de ver isso é que a ordem de decodificação no SIC segue do sinal

mais forte para o sinal mais fraco (KIZILIRMAK, 2016). O exemplo apresentado trata de apenas dois usuários para simplificar a explicação. No entanto, é possível que mais de dois usuários sejam pareados no NOMA. O processo de cancelamento de interferência do SIC ocorre de modo sucessivo de acordo com o número de usuários pareados.

No *uplink*, a situação é diferente, conforme ilustrado na Figura 13, onde S agora é o sinal recebido no ponto de acesso, carregando os sinais dos usuários, S_0 e S_1 . A potência de transmissão dos usuários U_1 e U_0 pode ser uma mesma ou não. Assumindo que os dispositivos transmitam a uma mesma potência, devido à perda de percurso, a potência de S_0 é menor do que a potência de S_1 no receptor. Então, o ponto de acesso detecta e decodifica primeiramente o sinal de maior intensidade, S_1 , tratando S_0 como interferência. Em seguida, o ponto de acesso aplica o SIC para subtrair S_1 de S , restando S_0 , que é decodificado sem a interferência de S_1 . Portanto, no *uplink*, o usuário com pior ganho de canal é que não sofre a interferência devido ao usuário com maior ganho de canal.

Figura 13 – SIC no *uplink*.



Fonte: Autoral.

A taxa de dados do usuário U_0 , em bits por segundo, é dada por

$$r_0 = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_0 \cdot g_0}{N} \right), \quad (3.3)$$

em que P_0 é a potência de transmissão do sinal do usuário U_0 no *uplink*. Enquanto isso, a taxa de dados do usuário U_1 , em bits por segundo, é dada por

$$r_1 = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_1 \cdot g_1}{P_0 \cdot g_0 + N} \right), \quad (3.4)$$

em que P_1 é a potência de transmissão do sinal de U_1 no *uplink*.

Na verdade, a ordem de decodificação dos sinais pode variar de acordo com os requisitos do sistema. O exemplo aqui apresentado é bastante simples e possui finalidade didática. Existem variações do SIC, como se mostrará mais adiante neste documento. O SIC apresentado nesta seção é baseado em CSI (*Channel State Information*), ou seja, tem por base a informação de ganhos de canal dos usuários. Em estudos de maximização de taxas de dados, minimização da probabilidade de interrupção/*outage* e maximização da justiça de usuário é comum que a ordem de decodificação seja variável. Alguns desses estudos são mencionados na revisão literária, apresentada na seção 1.1 do capítulo 1. A melhor utilização do SIC depende da situação e dos objetivos estabelecidos.

3.2.2 SIC Imperfeito

Na prática, o cancelamento de interferência não ocorre de modo perfeito e ideal, devido a questões de estimação imperfeita do canal e/ou limitações de *hardware*. Por essa razão, o SIC imperfeito se apresenta como um modelo mais próximo da realidade (KIZILIRMAK, 2016). Retomando o exemplo de sistema com os usuários U_0 e U_1 , a taxa de dados de U_1 no *downlink*, ilustrado na Figura 12, é igual a

$$r_1 = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{(1 - \alpha) \cdot P \cdot g_1}{\alpha \cdot P \cdot g_0 \cdot \varepsilon + N} \right), \quad (3.5)$$

em que ε é o REF e $0 \leq \varepsilon$. Na equação (3.5), o fator ε determina o grau de interferência residual que o usuário U_1 sofre devido ao sinal do usuário U_0 . É fácil perceber que se o SIC ideal é considerado, basta fazer $\varepsilon = 0$ na equação (3.5), o que leva à equação (3.2). Quanto maior for o valor de ε , maior é a interferência residual, ou seja, maior é o grau de imperfeição do SIC.

No *uplink*, seguindo a ordem de decodificação ilustrada na Figura 13, o usuário U_0 sofre com a interferência residual do usuário U_1 . Deste modo, a taxa de dados do usuário U_0 é

dada por

$$r_0 = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_0 \cdot g_0}{P_1 \cdot g_1 \cdot \varepsilon + N} \right), \quad (3.6)$$

sendo que agora ε determina a intensidade da interferência residual que o usuário U_0 experimenta devido à presença do sinal do usuário U_1 no *uplink*.

3.3 CR-NOMA: NOMA baseado em rádio cognitivo

O CR-NOMA (*Cognitive Radio Inspired NOMA*), que significa NOMA baseado ou inspirado em rádio cognitivo, é uma variação do NOMA de domínio de potência. No NOMA de domínio de potência convencional, como visto, aloca-se mais potência para o usuário com piores condições de canal no *downlink*. No CR-NOMA, há um maior grau de liberdade para alocação dos recursos, levando-se em consideração a prioridade de cada usuário e seus requisitos de QoS (DING *et al.*, 2017).

É dito que um usuário sofre *outage* ou interrupção quando seu requisito de taxa de dados mínima não é cumprido. Se um usuário tem maior prioridade em um sistema, trata-se de um usuário primário, e é necessário que este seja atendido, tendo sua taxa de dados mínima garantida e sua probabilidade de *outage* sendo a menor possível. Os demais usuários do sistema, que possuem menor prioridade, são tratados como usuários secundários. Assim, o usuário primário garantidamente utiliza um bloco de recursos e, se possível, um ou mais usuários secundários são admitidos ao compartilhamento desse bloco com o usuário primário por meio do NOMA.

No CR-NOMA, esses aspectos são levados em consideração, influenciando na alocação de recursos do sistema. É fácil visualizar que em uma rede de IoT se espera que existam dispositivos ou aplicações com diferentes graus de prioridade, havendo eventualmente usuários com maior sensibilidade ao atraso do que outros. Um dispositivo ou usuário que executa um sistema de tempo real crítico, por exemplo, pode ser considerado como de alta prioridade. As redes de rádio cognitivo se tratam justamente de redes que empregam alocação inteligente dos recursos de rádio. Portanto, pode-se dizer que o CR-NOMA acrescenta ao NOMA de domínio de potência uma camada de inteligência na alocação de recursos, levando em consideração as diferentes demandas dos usuários.

3.4 NOMA com múltiplas subportadoras

O NOMA com subportadoras é uma forma de NOMA híbrido, no qual se combina o uso de NOMA e OMA. A técnica *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access* (OFDMA) pode ser combinada com NOMA (DING *et al.*, 2017). É possível que em um bloco ortogonal de recursos dois ou mais usuários sejam pareados com NOMA, porém, não é interessante que esse número seja elevado, porque isso implica em aumento de complexidade do sistema e atraso de decodificação (DING *et al.*, 2017; MELO *et al.*, 2020; DING *et al.*, 2020a). No NOMA convencional, se todos os usuários de um sistema compartilham um mesmo bloco de recursos, durante o SIC, o usuário com o maior ganho de canal precisa decodificar as mensagens de todos os usuários com ganhos de canal menores antes de decodificar sua própria mensagem, o que não é viável na prática (DING *et al.*, 2017).

A ideia por trás do NOMA híbrido, utilizando múltiplas subportadoras, é reduzir a complexidade do sistema de comunicação. Um grupo de usuários é selecionado dinamicamente para compartilhamento de uma subportadora, sendo possível que um ou mais usuários utilizem mais do que uma subportadora, ou seja, a atribuição de subportadoras não precisa ser exclusiva. É possível, por exemplo, que em um cenário de CR-NOMA, um usuário primário utilize todas as subportadoras de um sistema, enquanto os usuários secundários utilizam menos subportadoras. Essa situação é explorada no capítulo 8. Como observado por DING *et al.* (2017), para implementação do NOMA com subportadoras, algoritmos de alocação precisam ser desenvolvidos para um agrupamento eficiente dos usuários e alocação de usuários por subportadora, além da alocação de potência, o que pode ser uma tarefa desafiadora.

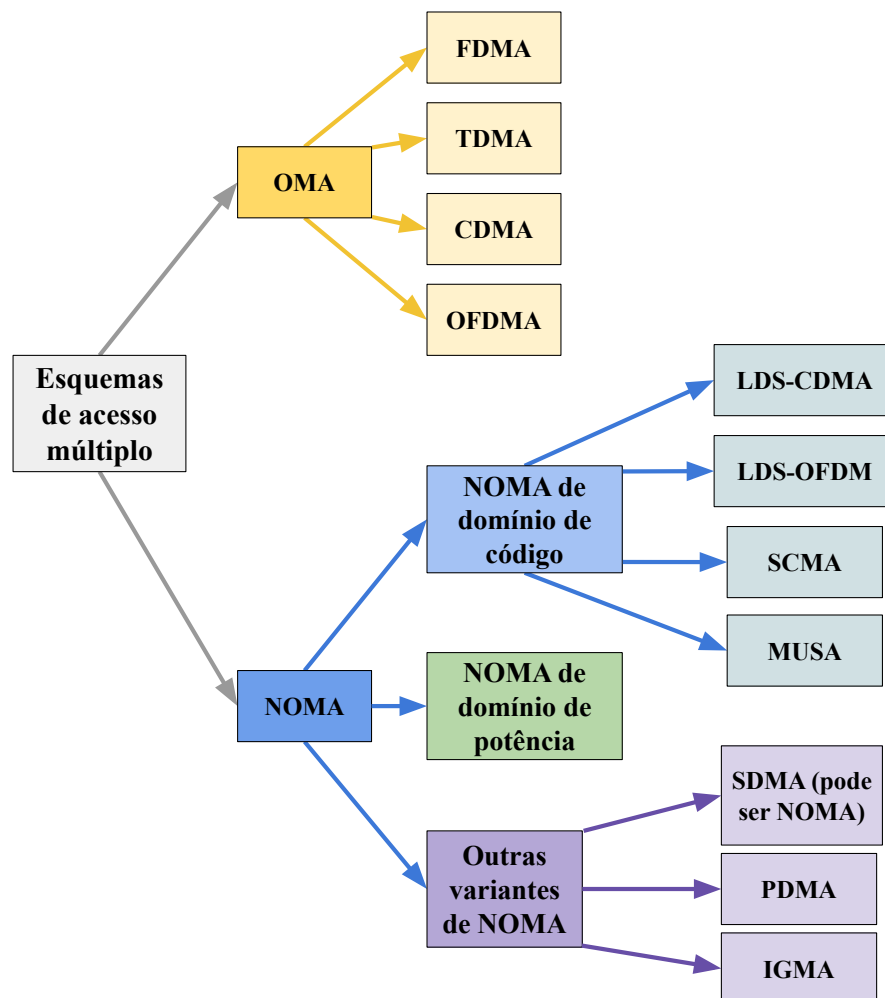
3.5 NOMA de domínio de código e outras variantes

O NOMA de domínio de código é baseado no CDMA convencional e compreende várias técnicas. Voltando às ilustrações anteriores, é possível ver que a Figura 10, que aborda o NOMA, é semelhante à Figura 8 (do capítulo anterior), que aborda o CDMA convencional. No entanto, o NOMA de domínio de código utiliza sequências de código não-ortogonais de baixa correlação cruzada, o que o diferencia do CDMA convencional. Além do NOMA de domínio de potência e de domínio de código, outras formas de NOMA podem ser consideradas. Esta seção traz apenas uma visão geral sobre a existência de diferentes formas de NOMA, portanto, os fundamentos do NOMA de domínio de código e as demais variantes de NOMA não são

aprofundados aqui.

Na Figura 14, apresenta-se uma possível divisão de esquemas de acesso múltiplo para as comunicações sem fio, com destaque para as técnicas NOMA. Algumas técnicas que fazem parte do NOMA de domínio de código são LDS-CDMA (*Low-Density Spreading CDMA*), LDS-OFDM (*Low-Density Spreading Aided OFDM*), SCMA (*Sparse Code Multiple Access*) e MUSA (*Multi-User Shared Access*) (DAI LINGLONG; WANG, 2018). É importante salientar que o SDMA, mencionado na Figura 14, poder ser tanto OMA quanto NOMA, dependendo do tipo de precodificador e estratégia de detecção empregados.

Figura 14 – Uma divisão de esquemas de acesso múltiplo, com destaque para NOMA.



Fonte: Autoral.

4 TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO

A sustentabilidade é um dos principais tópicos de interesse para as próximas gerações de comunicações sem fio. Existe, portanto, uma preocupação com a questão da eficiência energética por parte da comunidade científica, autoridades e empresas competentes. Neste contexto, soluções baseadas em EH e WPT, como SWIPT (*Simultaneous Wireless Information and Power Transfer*) e WPCN têm recebido a atenção da comunidade científica e sido consideradas bastante oportunas para o futuro das comunicações sem fio (ULUKUS *et al.*, 2015; PERERA *et al.*, 2018; BI *et al.*, 2016a; DIAMANTOULAKIS *et al.*, 2016; HAN; HUANG, 2016).

Estudos revelam que tecnologias baseadas em EH e WPT devem permitir que dispositivos de IoT (Internet das Coisas), como *smartphones*, *smartwatches*, veículos autônomos, drones e sensores sem fio tenham suas baterias carregadas utilizando parte da energia que perpassa o ambiente, seja por fontes naturais, como a radiação solar, ou por fontes artificiais, como as ondas de radiofrequência emitidas por torres dos próprios sistemas de comunicação (ULUKUS *et al.*, 2015; BI *et al.*, 2016a; PERERA *et al.*, 2018; DIAMANTOULAKIS *et al.*, 2016). Neste capítulo, apresenta-se uma visão geral sobre colheita ou transferência de energia em sistemas de comunicação sem fio, compreendendo os conceitos de EH e WPT e o paradigma WPCN, essencial para os capítulos seguintes.

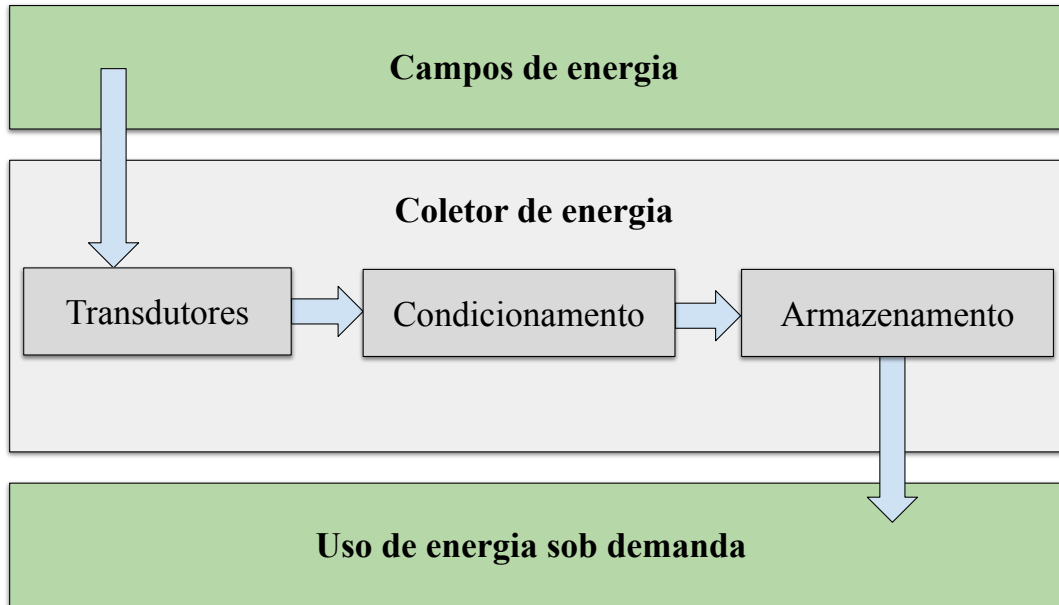
4.1 EH: Colheita de energia

Existem muitos tipos de energia, tais como mecânica, térmica, gravitacional, eletromagnética, química, etc. O termo colheita de energia pode ser utilizado para abranger toda técnica de conversão e armazenamento de energia a partir de uma fonte energética para uso posterior sob demanda, normalmente na forma de energia elétrica (SAGENTIA, 2011). De modo geral, o processo da colheita de energia pode ser resumido pelo fluxograma na Figura 15.

Dentro do sistema de colheita de energia, transdutores convertem a energia a partir de um fonte energética (campos de energia) para energia elétrica, normalmente. O condicionamento é a etapa em que a energia coletada passa por um tratamento para se adequar às necessidades da carga, antes de ir para o armazenamento. Por fim, a energia armazenada pode ser usufruída pela carga (SAGENTIA, 2011).

Em sistemas de comunicação sem fio, existem diferentes tipos de EH. Dependendo do contexto, a energia solar pode ser considerada como fonte de energia para dispositivos sem

Figura 15 – Fluxograma genérico do processo de colheita de energia.



Fonte: Adaptado de Sagentia (2011).

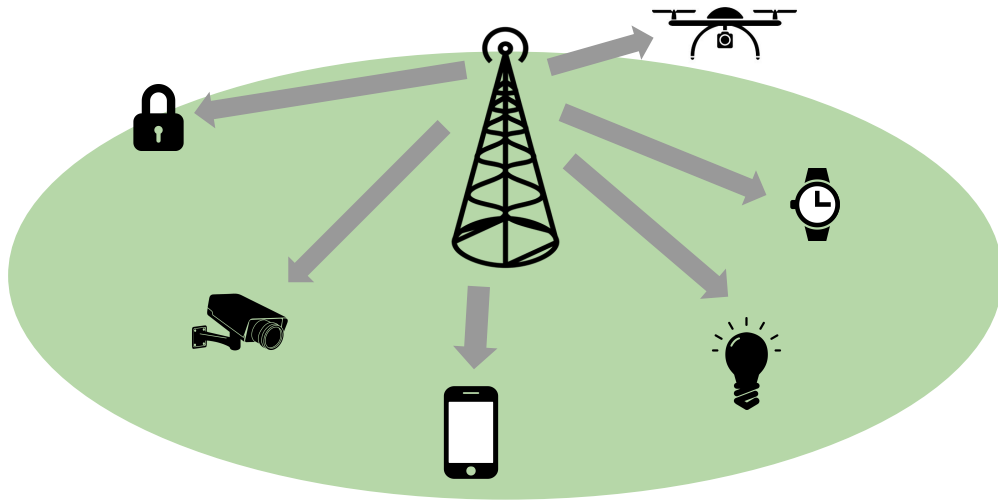
fi. Por outro lado, há cenários em que apenas fontes artificiais de energia são consideradas. O tipo de EH utilizada depende das exigências e restrições de cada sistema (BI *et al.*, 2016b).

4.2 WPT: Transferência de energia sem fio

A sigla WPT (*Wireless Power Transfer*) significa transferência de energia sem fio em português e, mais especificamente, trata-se da transferência de energia por meio de campos eletromagnéticos de uma fonte a um receptor, sem o uso de cabos ou quaisquer outros condutores sólidos. O conceito de WPT foi desenvolvido por Nikola Tesla na década de 1890 (PERERA *et al.*, 2018). No contexto das comunicações sem fio, a EH se baseia no princípio de WPT. Na literatura da área, as menções a WPT normalmente implicam em um tipo de EH, em que um receptor coleta energia de uma fonte via ondas eletromagnéticas. Na Figura 16, por meio de WPT, uma ERB opera como fonte energética para diferentes perfis de usuários em um cenário de IoT.

Para as redes de sensores sem fio, o uso de WPT se mostra vantajoso. Sensores sem fio em muitas das vezes são instalados em localizações remotas, de difícil acesso para manutenção. Com o uso de WPT/EH, reduz-se a necessidade de troca ou carregamento convencional das baterias (BI *et al.*, 2016a). Além disso, sabe-se que os sensores correspondem a um dos principais componentes da IoT. Para um pleno funcionamento do conceito de IoT, cujo cerne é a conexão de dispositivos de todo o tipo à internet, o uso massivo de sensores sem fio é necessário. A Figura

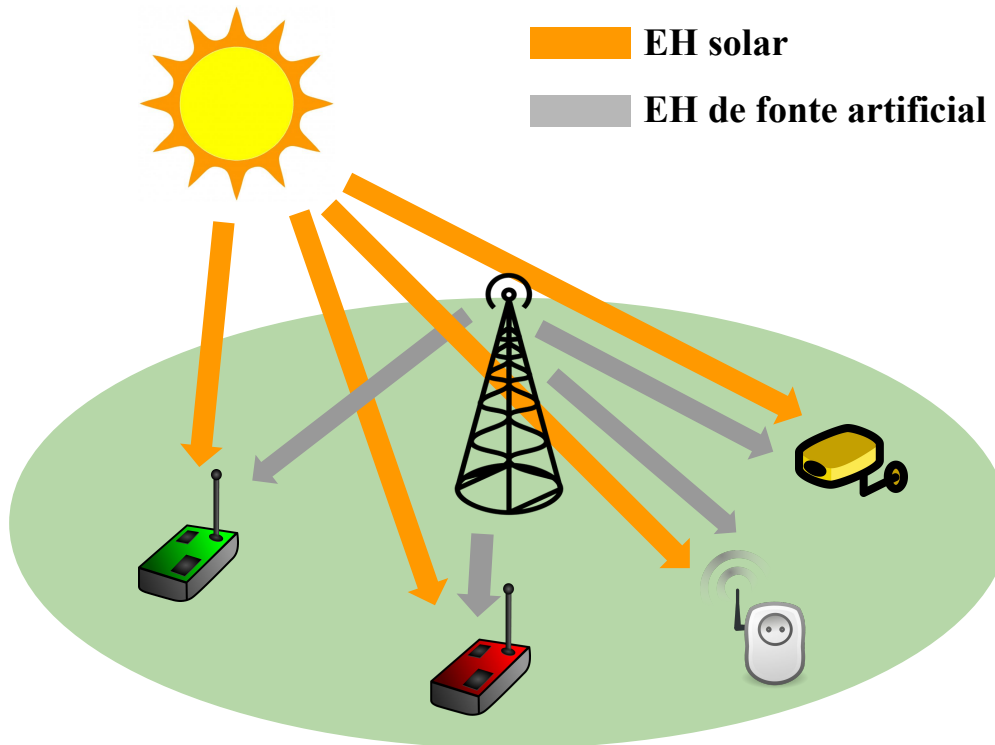
Figura 16 – Uso de WPT/EH para aplicações de IoT.



Fonte: Autoral.

17 ilustra uma rede de sensores sem fio de diferentes tipos tendo os dispositivos alimentados por meio sem fio, incluindo-se o sol como uma fonte de energia. Neste exemplo, duas fontes para EH são consideradas, uma natural e a outra artificial.

Figura 17 – Uso de EH solar e EH de fonte artificial em uma rede de sensores sem fio.

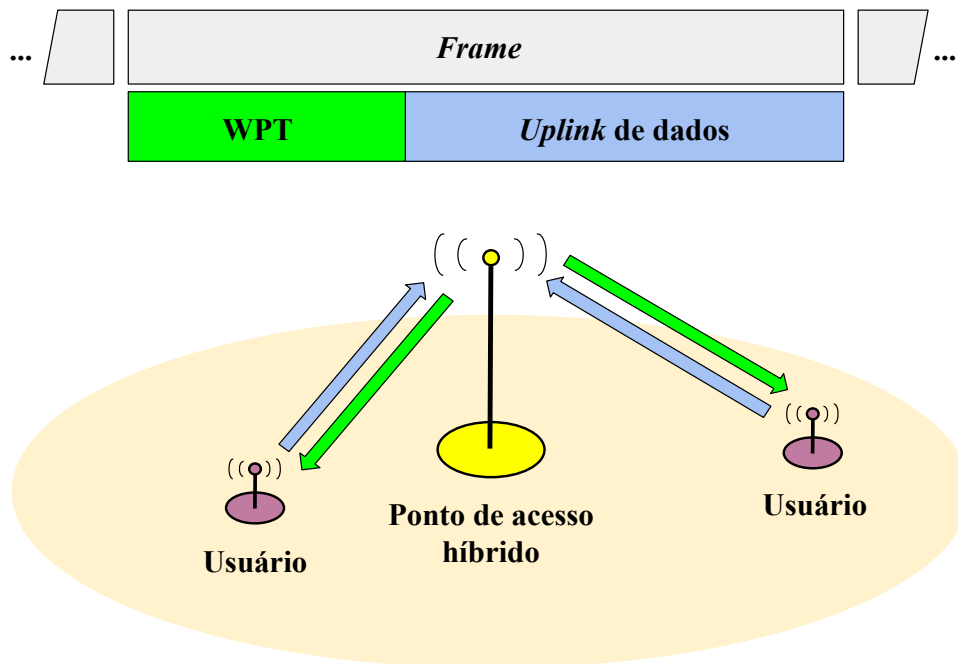


Fonte: Autoral.

4.3 WPCN

Um tipo de sistema estudado nas comunicações sem fio, conhecido por empregar WPT, é o WPCN, no qual os dispositivos sem fio recebem energia de uma fonte por meio de WPT e, em seguida, realizam *uplink* para um ponto de acesso com a energia coletada. O nó que transmite a energia pode ser um ponto de acesso híbrido ou uma fonte dedicada de energia, como ilustrado na Figuras 18 e 19. Na Figura 18, um mesmo nó é utilizado tanto como fonte de energia quanto ponto de acesso, ou seja, trata-se de um ponto de acesso híbrido. Na Figura 19, apresenta-se um nó dedicado para o fornecimento de energia. Essas duas configurações representam modelos básicos de WPCN (BI *et al.*, 2016a).

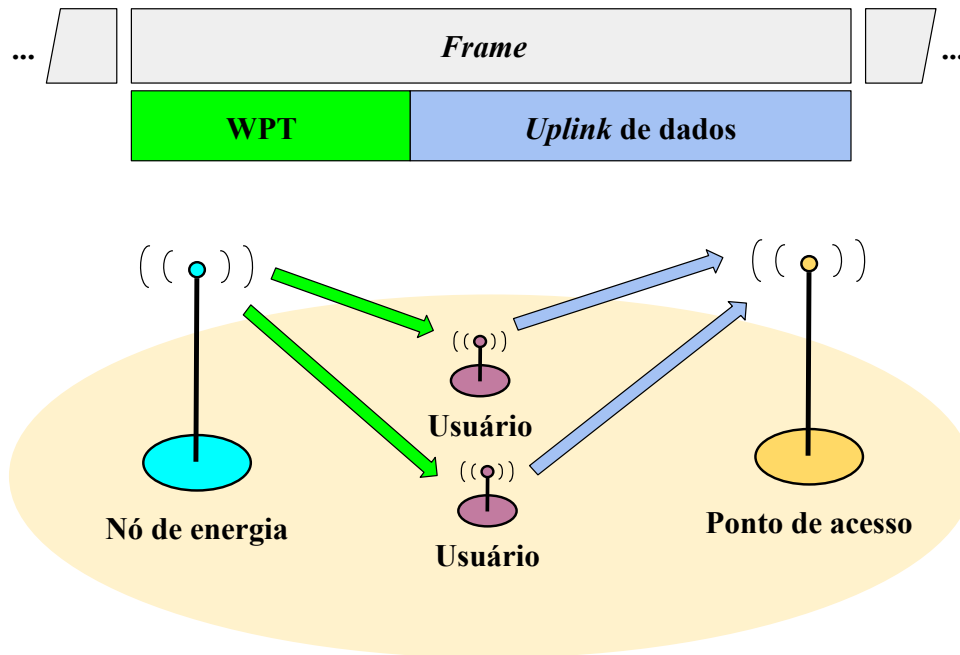
Figura 18 – WPCN com ponto de acesso híbrido.



Fonte: Autoral.

De um modo simples, nos sistemas digitais de comunicação modernos, o tempo de um *link* é dividido em vários subintervalos de tempo denominados *frames*, de forma periódica. O WPCN é caracterizado pelo uso de um protocolo *harvest-then-transmit* (HTT), no qual o *frame* é dividido em duas etapas, como mostrado: colheita ou transferência de energia e, depois, transmissão de informação no *uplink* com a energia coletada na primeira etapa (DIAMANTOULAKIS *et al.*, 2016).

Figura 19 – WPCN com nó de energia.



Fonte: Autoral.

A principal diferença do sistema WPCN em relação a um sistema SWIPT é que, no WPCN, a etapa de colheita de energia não inclui o *downlink* de informação para os usuários, sendo estes tratados como processos isolados (MISHRA; DE, 2017). Na técnica SWIPT, ocorrem WPT e *downlink* de dados simultaneamente (PERERA *et al.*, 2018). Em diversos trabalhos, os pesquisadores têm explorado o uso de NOMA em sistemas que empregam WPT, entre os quais, WPCN e SWIPT. O foco deste trabalho, conforme será mostrado nos capítulos seguintes, está em um modelo WPCN com configuração semelhante à representada na Figura 18, ou seja, com um ponto de acesso híbrido envolvido tanto na etapa de WPT quanto na etapa do *uplink*, mas o estudo também poderia ser aproveitado para a etapa de *uplink* em um cenário com SWIPT.

5 MODELO WPCN COM NOMA BASEADO EM RÁDIO COGNITIVO

Neste estudo, considera-se um sistema do tipo WPCN que consiste em uma célula circular onde os usuários são distribuídos uniformemente em torno de um ponto de acesso híbrido central, incorporando-se o CR-NOMA e o SIC imperfeito no modelo. Como explicado no capítulo 4, o *frame* ou quadro é um intervalo de tempo periódico que neste tipo de sistema é dividido em dois estágios: colheita de energia e *uplink* de dados. Na primeira etapa, os usuários têm suas baterias recarregadas por ondas de radiofrequência provenientes do ponto de acesso central. Na segunda etapa, os usuários enviam seus dados para o ponto de acesso utilizando a energia coletada na primeira etapa. O NOMA é empregado para o acesso múltiplo na segunda etapa, sendo o SIC, portanto, utilizado para a separação dos sinais dos usuários.

O *frame* periódico é composto por um número inteiro de *slots* de tempo, N . Na etapa de colheita ou transferência de energia, são utilizados n^e *slots* de tempo, enquanto os *slots* de tempo restantes, ou seja, $N - n^e$, são utilizados para transmissão de dados dos usuários no *uplink*. Cada *slot* tem um comprimento de tempo igual a T^s , e o comprimento de tempo de um *frame* ou quadro é $T^f = N \cdot T^s$.

Na célula, existem $M + 1$ usuários no total, entre os quais há um usuário primário U_0 que solicita uma taxa de dados R_0 e possui requisitos de atraso rígidos, ou seja, é sensível ao atraso. Os outros usuários, U_i , com $1 < i < M$, requerem uma taxa de dados R_S , maior do que R_0 , com menor sensibilidade ao atraso e, portanto, são tratados como usuários secundários. Sem perda de generalidade, assume-se que os ganhos de canal entre os usuários secundários e o ponto de acesso são classificados em ordem crescente, ou seja, $g_1 < g_2 < \dots < g_M$. O sistema é ilustrado na Figura 20.

Considerando qualquer dos $M + 1$ usuários existentes no sistema, isto é, usuário primário e todos os usuários secundários, a energia coletada por qualquer usuário deste sistema é dada por

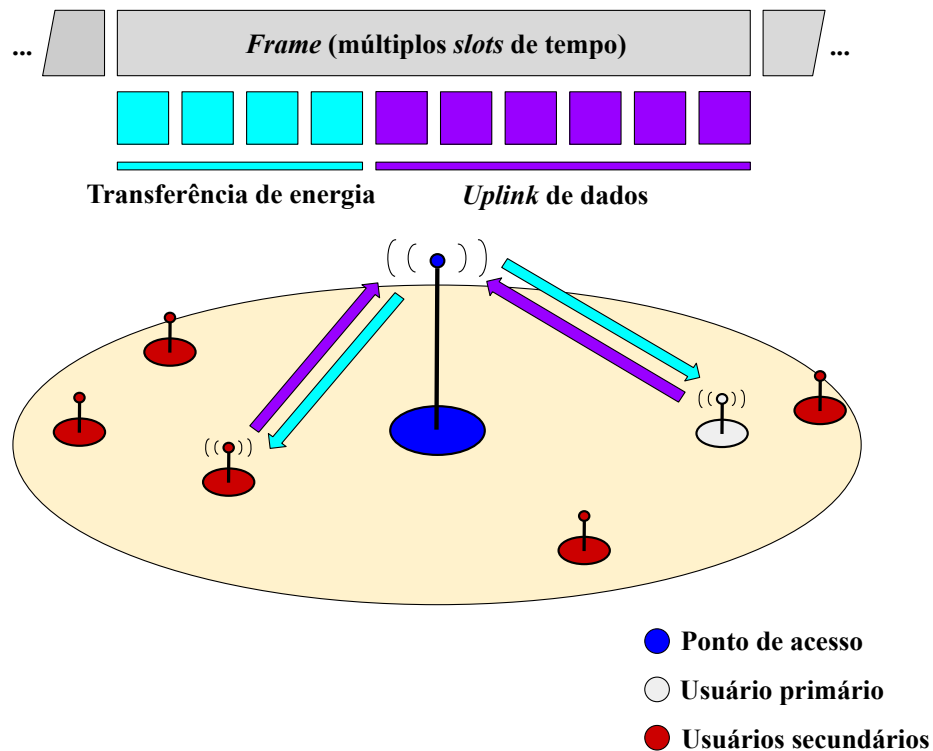
$$E_{j,n^e} = P \cdot \eta \cdot g_j \cdot n^e \cdot T^s, \quad (5.1)$$

onde j é o índice do usuário em questão, P é a potência de transmissão do ponto de acesso no estágio 1, $0 \leq \eta \leq 1$ é a eficiência de coleta de energia que assume 1 para eficiência máxima e 0 para nenhuma capacidade de coleta de energia e g_j é o ganho de canal entre o j -ésimo usuário e o ponto de acesso. Com a reciprocidade de canal sendo assumida, o ganho de canal entre o j -ésimo usuário e o ponto de acesso é o mesmo para *downlink* e *uplink*. Assumindo-se que na

etapa 2 os usuários utilizam toda a energia coletada na etapa 1, a potência de transmissão do j -ésimo usuário na etapa 2 é $P_{j,n^e} = (E_{j,n^e}) / (T^s \cdot (N - n^e))$, que resulta em

$$P_{j,n^e} = P \cdot \eta \cdot g_j \cdot \frac{n^e}{N - n^e}. \quad (5.2)$$

Figura 20 – Célula circular com um ponto de acesso central. O tempo de *frame* é dividido em duas etapas: transferência de energia e transmissão de dados por *uplink* usando NOMA.



Fonte: Autoral.

Em um sistema OMA, apenas um usuário pode ser atribuído em um determinado bloco ortogonal de recursos. No NOMA, é possível que dois ou mais usuários compartilhem um mesmo bloco de recursos ortogonal. Na prática, não é interessante que o número de usuários utilizando um mesmo bloco de recursos ortogonal seja elevado, pois isso eleva a complexidade do sistema, aumenta o atraso de decodificação dos usuários que tiverem seus sinais decodificados por último e a interferência sofrida pelos usuários que forem os primeiros da ordem de decodificação (DING *et al.*, 2017; DING *et al.*, 2020a). Inicialmente, para simplificação, suponha-se que apenas um usuário secundário é admitido para o pareamento com o usuário primário. Então, se $M+1$ é o número total de usuários dentro da célula, existem M possibilidades de pareamento entre o usuário primário e os usuários secundários.

A ordem de decodificação no SIC é importante, pois determina quais usuários sofrerão mais interferência, o que influencia na probabilidade de *outage* dos usuários. Portanto, a ordem de decodificação mais adequada costuma variar conforme a situação em questão. Neste caso, há duas variantes básicas de SIC que possuem ordens de decodificação distintas, que são o SIC baseado em CSI (SIC-CSI) e o SIC baseado em QoS (SIC-QoS), descritos nas seções a seguir.

5.1 SIC-CSI

No SIC-CSI, a princípio, a ideia é que um usuário secundário U_i com elevado ganho de canal tenha seu sinal decodificado primeiramente no ponto de acesso (DING *et al.*, 2020a). Espera-se que a boa condição de canal diminua a probabilidade do usuário secundário admitido sofrer *outage* devido à interferência do usuário primário U_0 . Como o SIC imperfeito está sendo considerado no estudo, mesmo tendo seu sinal decodificado por último no SIC-CSI, o sinal do usuário primário U_0 sofre interferência residual do sinal do usuário secundário admitido U_i . Portanto, a taxa de dados alcançável obtida pelo usuário U_0 , em bits/s, é definida como

$$r_{0,n^e}^{\text{CSI}} = \frac{B \cdot (N - n^e)}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{0,n^e} \cdot g_0}{P_{i,n^e} \cdot g_i \cdot \varepsilon + \sigma^2} \right), \quad (5.3)$$

onde B é a largura de banda do canal, ε é o fator de erro residual (REF), sendo que $0 \leq \varepsilon \leq 1$, e σ^2 é a potência do ruído térmico. Por sua vez, a taxa de dados alcançável do usuário secundário U_i , em bits/s, é dada por

$$r_{i,n^e}^{\text{CSI}} = \frac{B \cdot (N - n^e)}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{i,n^e} \cdot g_i}{P_{0,n^e} \cdot g_0 + \sigma^2} \right), \quad (5.4)$$

de onde pode-se observar que, por ser o primeiro da ordem de decodificação, o usuário secundário U_i sofre com a interferência completa por parte do usuário primário U_0 .

5.2 SIC-QoS

Diferentes ordens de decodificação implicam em diferentes taxas de dados do usuário primário U_0 e do usuário secundário admitido U_i , pois as interferências sofridas por cada usuário mudam. No SIC-QoS, o usuário primário U_0 tem sua mensagem decodificada primeiramente no ponto de acesso, sofrendo a interferência completa do usuário admitido U_i . A taxa de dados alcançável do usuário primário U_0 , em bits/s, é dada por

$$r_{0,n^e}^{\text{QoS}} = \frac{B \cdot (N - n^e)}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{0,n^e} \cdot g_0}{P_{i,n^e} \cdot g_i + \sigma^2} \right). \quad (5.5)$$

Como o usuário primário U_0 sofre interferência do usuário admitido U_i , existe um risco de que o usuário primário U_0 sofra *outage* devido a uma má escolha de pareamento. Para que o *outage* seja evitado, é necessário que a taxa de dados alcançável do usuário primário, calculada pela equação (5.5), seja maior ou igual à sua taxa de dados requisitada, ou seja, $r_{0,n^e}^{\text{QoS}} \geq R_0$. Dessa forma, para reduzir as chances de ocorrência de *outage* do usuário primário, não se pode escolher um usuário secundário com grande ganho de canal para o pareamento. Uma possibilidade é selecionar o usuário com o menor ganho de canal entre todos os M usuários secundários, de modo que o usuário primário sofra a menor interferência entre as opções disponíveis. No entanto, essa seria apenas uma solução mais simples, e não necessariamente a melhor, dependendo do objetivo. De todo modo, a taxa de dados alcançável do usuário secundário admitido U_i , em bits/s, é igual a

$$r_{i,n^e}^{\text{QoS}} = \frac{B \cdot (N - n^e)}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{i,n^e} \cdot g_i}{P_{0,n^e} \cdot g_0 \cdot \varepsilon + \sigma^2} \right). \quad (5.6)$$

Assim, o usuário admitido U_i sofre interferência residual por parte do usuário primário U_0 , já que o SIC imperfeito é considerado no modelo.

5.3 A solução HSIC no sistema WPCN

DING *et al.* (2020a) propuseram um método de SIC híbrido, aqui referido como HSIC, cuja ideia principal é proteger o QoS do usuário primário enquanto maximiza a taxa de dados do usuário secundário admitido assumindo SIC ideal. O HSIC apresenta vantagem em relação aos esquemas SIC-CSI e SIC-QoS.

Os usuários secundários são divididos em dois grupos, de acordo com os valores de ganhos de canal em relação a um limiar, $\tau^{\text{QoS}}(n^e)$. Este limiar corresponde ao ganho máximo de canal que o usuário secundário admitido pode ter sem que o usuário primário sofra interrupção quando o SIC-QoS é aplicado. O limiar é dado por

$$\tau^{\text{QoS}}(n^e) = \max \left(0, \sqrt{\frac{\frac{g_0^2}{\left(\frac{R_0 \cdot N}{B(N - n^e)}\right) - 1} - \frac{\sigma^2 \cdot (N - n^e)}{P \cdot \eta \cdot n^e}}{2}} \right). \quad (5.7)$$

A expressão de limiar é obtida ao se fazer o r_{0,n^e}^{QoS} da equação (5.5) maior ou igual a R_0 , isolando o ganho de canal g_i do usuário secundário. Com base no limiar $\tau^{\text{QoS}}(n^e)$, dois grupos G_1 e G_2 são formados. O grupo G_1 contém usuários secundários que possuem um ganho

de canal maior que $\tau^{QoS}(n^e)$. O grupo G_2 , por sua vez, contém usuários que possuem ganho de canal menor ou igual a $\tau^{QoS}(n^e)$. Assim, se um usuário de G_1 é admitido, o SIC-CSI é executado e a taxa de dados do usuário admitido é dada pela equação (5.4). Por outro lado, se um usuário de G_2 é admitido, um esquema SIC-QoS é empregado. Neste caso, a taxa de dados do usuário admitido é dada pela equação (5.6); porém, em vez de ser selecionado o usuário com menor ganho de canal, o usuário secundário admitido é aquele com maior ganho de canal no grupo G_2 . A ideia é que o usuário primário suportará a interferência desse usuário. No trabalho de DING *et al.* (2020a), o SIC ideal é considerado na modelagem, ou seja, $\varepsilon = 0$.

5.4 Considerações para os capítulos seguintes

Partindo deste modelo, três abordagens com problemas de otimização e premissas diferentes são trazidas neste trabalho, as quais são detalhadas nos três próximos capítulos. Primeiramente, no capítulo 6, considera-se o uso de CR-NOMA com apenas uma portadora, sendo que o usuário primário compartilha recursos com apenas um usuário secundário. No contexto seguinte, do capítulo 7, semelhante ao anterior, adiciona-se a possibilidade de controle de potência no SIC. Por fim, no capítulo 8, onde não se inclui o controle de potência, considera-se que, além do usuário primário, todos os usuários secundários podem ser atendidos por meio do uso de múltiplas subportadoras, ou seja, o usuário primário compartilha recursos com todos os usuários secundários em vez de apenas um.

6 MAXIMIZAÇÃO DA TAXA DE DADOS DO USUÁRIO SECUNDÁRIO ADMITIDO

Com base no modelo apresentado no capítulo 5, considera-se uma situação em que o usuário primário deve compartilhar um mesmo bloco de recursos ortogonal com apenas um usuário secundário durante o *uplink*. Um requisito importante nesta situação é que o usuário primário não pode sofrer *outage* devido a esse pareamento. Caso o OMA fosse utilizado, por ter alta prioridade, o usuário primário ocuparia individualmente um bloco de recursos. Com o uso do NOMA, esse bloco pode ser aproveitado para o *uplink* de dados de um usuário adicional. Nesta situação, o uso do NOMA apresenta uma vantagem em termos de taxa de dados sobre o OMA, e essa vantagem ou ganho pode ser vista como a taxa de dados do usuário secundário admitido (DING *et al.*, 2020a). Dessa forma, fica clara a vantagem do NOMA em um cenário de rádio cognitivo como o apresentado, assim como anteriormente explicado na seção 3.3 do capítulo 3.

Neste capítulo, uma heurística baseada no SIC híbrido de DING *et al.* (2020a) é proposta para o cenário WPCN quando se considera o SIC imperfeito. Na seção 6.1, apresenta-se a formulação de um problema de otimização cujo objetivo é a maximização da taxa de dados do usuário secundário admitido, considerando que apenas um usuário secundário é admitido para o pareamento com o usuário primário. Em seguida, os resultados e discussões deste estudo são apresentados.

6.1 Formulação do problema de otimização

Embora não mostrado explicitamente por (DING *et al.*, 2020a), o HSIC proposto pelos autores corresponde a uma solução ótima para o problema de maximização da taxa de dados do usuário admitido quando o SIC ideal é considerado, ou seja, quando $\varepsilon = 0$. Considerando o modelo apresentado no capítulo 5, este problema de otimização é definido como

$$\max_{x_{i,p,n^e}} \left\{ \sum_{i=1}^M \sum_{p=1}^2 \sum_{n^e=1}^{N-1} (r_{i,p,n^e} \cdot x_{i,p,n^e}) \right\}, \quad (6.1a)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^M \sum_{p=1}^2 \sum_{n^e=1}^{N-1} (r_{0,i,p,n^e} \cdot x_{i,p,n^e}) \geq R_0, \quad (6.1b)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{p=1}^2 \sum_{n^e=1}^{N-1} x_{i,p,n^e} = 1, \quad (6.1c)$$

onde x_{i,p,n^e} é a variável de decisão, e $p \in \{1, 2\}$ é um índice que indica a ordem de decodificação SIC (ou técnica empregada) no *uplink*. Se $p = 1$, o SIC-CSI é aplicado e, então, o sinal do usuário

secundário admitido U_i é decodificado primeiramente; caso contrário, se $p = 2$, o SIC-QoS é aplicado e, assim, o sinal do usuário secundário admitido U_i é decodificado após o sinal do usuário primário U_0 . Nos somatórios, n^e assume no máximo o valor $N-1$ porque os *slots* de tempo não podem ser utilizados apenas para colheita de energia. A variável r_{i,p,n^e} representa a taxa de dados alcançável do i -ésimo usuário secundário, supondo que este seja selecionado para o pareamento, quando a ordem de decodificação p é escolhida e um número n^e de *slots* de tempo para a etapa 1 é usado. Essa variável é dada por

$$r_{i,p,n^e} = \begin{cases} B \frac{N-n^e}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{i,n^e} g_i}{P_{0,n^e} g_0 + \sigma^2} \right), & \text{se } p = 1, \\ B \frac{N-n^e}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{i,n^e} g_i}{P_{0,n^e} g_0 \varepsilon + \sigma^2} \right), & \text{se } p = 2, \end{cases} \quad (6.2)$$

onde P_{i,n^e} é a potência de transmissão do i -ésimo usuário quando n^e *slots* de energia são usados na etapa 1.

Da mesma forma, r_{i,p,n^e}^0 representa a taxa de dados alcançável pelo usuário primário quando pareado com o i -ésimo usuário secundário, quando a ordem de decodificação é a permutação p e são utilizados n^e *slots* de energia na etapa 1. A variável r_{i,p,n^e}^0 é definida da seguinte forma:

$$r_{i,p,n^e}^0 = \begin{cases} B \frac{N-n^e}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{0,n^e} g_0}{P_{i,n^e} g_i \varepsilon + \sigma^2} \right), & \text{se } p = 1, \\ B \frac{N-n^e}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{0,n^e} g_0}{P_{i,n^e} g_i + \sigma^2} \right), & \text{se } p = 2. \end{cases} \quad (6.3)$$

Por fim, a função objetivo (6.1a) representa a taxa de dados do usuário secundário admitido a ser maximizada. A restrição (6.1b) representa o cumprimento do requisito de QoS do usuário primário U_0 . Na restrição (6.1c) é garantido que apenas um usuário secundário U_i seja admitido, assim como apenas um número de *slots* de tempo n^e na etapa 1 e apenas uma ordem de decodificação p devem ser selecionados; ou seja, x_{i,p,n^e} é uma variável de decisão binária, que em uma única instância é igual a 1, e nas demais assume valor nulo. O problema descrito pertence à classe de problemas de otimização combinatória, que em geral são difíceis de se resolver. A solução ótima pode ser obtida computacionalmente com um *solver* de programação linear inteira.

6.2 Detalhes para implementação computacional

O problema de otimização precisa ser passado para a forma matricial para ser processado computacionalmente na função *cplexbilp*, do CPLEX, que foi utilizada com o

MATLAB para as simulações deste capítulo. De acordo com a descrição da *cplexbilp*, detalhada por IBM (2019a), a função é utilizada para resolução de problemas de programação linear inteira binária e encontra o mínimo de um problema de otimização especificado da seguinte forma:

$$\min f^T \cdot x, \quad (6.4a)$$

$$\text{s.t. } A_{ineq} \cdot x \leq b_{ineq}, \quad (6.4b)$$

$$A_{eq} \cdot x = b_{eq}, \quad (6.4c)$$

onde f^T é o transposto do vetor coluna f , que contém os valores que multiplicam a variável de decisão binária x , A_{ineq} é uma matriz e b_{ineq} é um vetor coluna que fazem parte das restrições de desigualdade, A_{eq} é uma matriz e b_{eq} é um vetor coluna que fazem parte das restrições de igualdade. Os principais valores retornados pela *cplexbilp* são x , o vetor que contém os valores da variável de decisão em cada instância, $fval$, o valor da função objetivo na solução indicada por x , e $exitflag$, que indica o motivo de parada do algoritmo, seja por sucesso ou erro (IBM, 2019a).

Para inserir um problema de maximização no formato de entrada da *cplexbilp*, é necessário multiplicar o vetor f da equação (6.4a) por -1. Dessa forma, colocando-se o problema de otimização (6.1) neste formato, tem-se que o vetor f é formado por valores de r_{i,p,n^e} em todas as instâncias delimitadas pelos somatórios. De modo semelhante, as restrições (6.1b) e (6.1c) devem ser devidamente colocadas nos formatos de (6.4b) e (6.4c), respectivamente. No caso da restrição (6.1b), é necessário multiplicar a inequação por -1 para que fique no formato adotado pela *cplexbilp*, ou seja, $A_{ineq} \cdot x \geq b_{ineq} \Rightarrow -A_{ineq} \cdot x \leq -b_{ineq}$.

Portanto, para ser colocada no *solver*, a restrição (6.1b) fica disposta da seguinte maneira na forma matricial:

$$- \begin{bmatrix} r_{0,1,1,1} & r_{0,1,1,2} & \cdots & r_{0,M,2,N-1} \end{bmatrix}_{1 \times M \cdot 2 \cdot (N-1)} \times \begin{bmatrix} x_{1,1,1} \\ x_{1,1,2} \\ \vdots \\ x_{M,2,N-1} \end{bmatrix}_{M \cdot 2 \cdot (N-1) \times 1} \leq - \begin{bmatrix} R_0 \end{bmatrix}_{1 \times 1}.$$

A restrição (6.1c), na forma matricial fica da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{1 \times M \cdot 2 \cdot (N-1)} \times \begin{bmatrix} x_{1,1,1} \\ x_{1,1,2} \\ \vdots \\ x_{M,2,N-1} \end{bmatrix}_{M \cdot 2 \cdot (N-1) \times 1} = \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix}_{1 \times 1}.$$

Como dito anteriormente, o método HSIC descrito na seção 5.3, do capítulo 5, apresenta a solução ótima deste problema quando o SIC ideal é considerado, ou seja, quando o fator de erro residual (REF), representado nas equações por ε , é nulo. O HSIC não representa uma solução ótima quando o SIC imperfeito é assumido no modelo. Essas afirmações são comprovadas pelos resultados das simulações apresentados no final deste capítulo.

6.3 Heurística proposta: HSIC adaptado ao cenário de SIC imperfeito

O limiar definido na equação (5.7), do capítulo 5, é calculado para que não ocorra *outage* na comunicação do usuário primário quando o SIC-QoS é aplicado. No SIC ideal, onde $\varepsilon = 0$, assume-se que no SIC-CSI o usuário primário não sofre nenhuma interferência do usuário secundário admitido (ver equação (5.3)). Contudo, no SIC imperfeito, o SIC-CSI também apresenta risco de *outage* do usuário primário, já que este sofrerá interferência residual por parte do usuário secundário admitido. Então, sabendo que r_{0,n^e}^{CSI} deve ser maior ou igual a R_0 , e isolando g_i , o seguinte limiar de canal surge:

$$\tau^{\text{CSI}}(n^e) = \max \left(0, \sqrt{\left(\frac{g_0^2 \varepsilon^{-1}}{\left(\frac{R_0 N}{B(N-n^e)} \right) - 1} - \frac{\sigma^2(N-n^e)}{P \varepsilon \eta n^e} \right)} \right). \quad (6.5)$$

A divisão dos grupos de usuários conforme seus respectivos canais agora ocorre de um modo diferente. O primeiro grupo, Z_1 , é composto pelos usuários secundários que possuem um ganho de canal menor que o limiar $\tau^{\text{QoS}}(n^e)$, apresentado na seção 5.3, do capítulo 5; e o segundo grupo, Z_2 , é composto pelos usuários que possuem ganho de canal menor que o limiar $\tau^{\text{CSI}}(n^e)$. Se um usuário de Z_1 for selecionado, o SIC-QoS será executado. Por outro lado, se for selecionado um usuário de Z_2 que não pertença simultaneamente a Z_1 , o SIC-CSI será executado. Os usuários cujos ganhos de canal são maiores que ambos os limiares $\tau^{\text{QoS}}(n^e)$ e $\tau^{\text{CSI}}(n^e)$ não são elegíveis para o pareamento com o usuário primário. O usuário admitido deve ser aquele que atinge a maior taxa de dados.

No HSIC apresentado por DING *et al.* (2020a), que não abrange o SIC imperfeito, existe apenas o limiar $\tau^{\text{QoS}}(n^e)$, pois para o caso ideal, o usuário primário sofre interferência apenas no SIC-QoS. No entanto, no SIC imperfeito, a presença do REF introduz a possibilidade de *outage* para o usuário primário também no SIC-CSI. Assim, é necessário um novo limiar para o caso do SIC-CSI. A heurística de HSIC híbrido adaptado é descrita no Algoritmo 1.

Algoritmo 1: HSIC adaptado ao cenário de SIC imperfeito

Seja $R(n^e)$ a taxa de dados de um usuário secundário quando um número inteiro n^e é utilizado para colheita de energia

$$R(0) = 0$$

for $n^e = 1 : N - 1$ **do**

 Calcular $\tau^{\text{QoS}}(n^e)$ de acordo com a equação (5.7)

 Calcular $\tau^{\text{CSI}}(n^e)$ de acordo com a equação (6.5)

Z_1 agrupa os usuários com ganho de canal menor que $\tau^{\text{QoS}}(n^e)$

Z_2 agrupa os usuários com ganho de canal menor do que $\tau^{\text{CSI}}(n^e)$

h_1^* é igual ao maior ganho de canal dos usuários do grupo Z_1

h_2^* é igual ao maior ganho de canal dos usuários do grupo Z_2

 Calcular a taxa de dados, $R_*^{\text{QoS}}(n^e)$, do usuário secundário de ganho de canal h_1^* considerando o SIC-QoS, de acordo com a equação (5.6)

 Calcular a taxa de dados, $R_*^{\text{CSI}}(n^e)$, do usuário secundário de ganho de canal h_2^* considerando o SIC-CSI, de acordo com a equação (5.4)

$$R(n^e) = \max(R_*^{\text{QoS}}, R_*^{\text{CSI}})$$

if $R(n^e) > R(n^e - 1)$ **then**

 Continuar o laço de repetição

else

 Parar o laço de repetição

end

end

end

A solução será o maior $R(n^e) \forall n^e$

6.4 Resultados e discussões

O problema da maximização da taxa de dados do usuário secundário admitido, descrito na formulação (6.1), foi avaliado por meio de simulações de Monte Carlo com 5 mil repetições no total para garantir confiança estatística. Alguns dos parâmetros de simulação foram baseados no trabalho de YANG *et al.* (2018). A partir do modelo definido no capítulo 5, assume-se uma célula circular onde os usuários estão distribuídos uniformemente em um disco com raio externo e raio interno iguais a 10 m e 1 m, respectivamente, com o ponto de acesso localizado no centro da circunferência. A largura de banda do canal é de 1 MHz e o número total de *slots* de tempo em um *frame* é de 20 unidades. O número de usuários secundários M , é igual a 5. A potência do ruído é de -104 dBm, e o ganho do canal entre o ponto de acesso e usuários é modelado como $10^{-3} \cdot X \cdot d_j^{-3}$ onde d_j é a distância entre o j -ésimo usuário e o ponto de acesso em metros e X é uma variável aleatória distribuída exponencialmente com média unitária, ou seja, o coeficiente do canal segue a distribuição de Rayleigh. A taxa de dados exigida pelo usuário primário, U_0 , é de 200 kbits/s, enquanto a taxa de dados exigida pelos usuários secundários é de

1 Mbits/s, escolha baseada nas simulações de DING *et al.* (2020a), que considera R_0 como 20% da taxa de dados requisitada pelos usuários secundários. A eficiência de colheita de energia η , é igual 0,5 e o fator de erro residual (REF) é variável. A potência de transmissão do ponto de acesso é assumida como igual a 5 W. Para todas as soluções, o valor de n^e é obtido por busca exaustiva, como no Algoritmo 1.

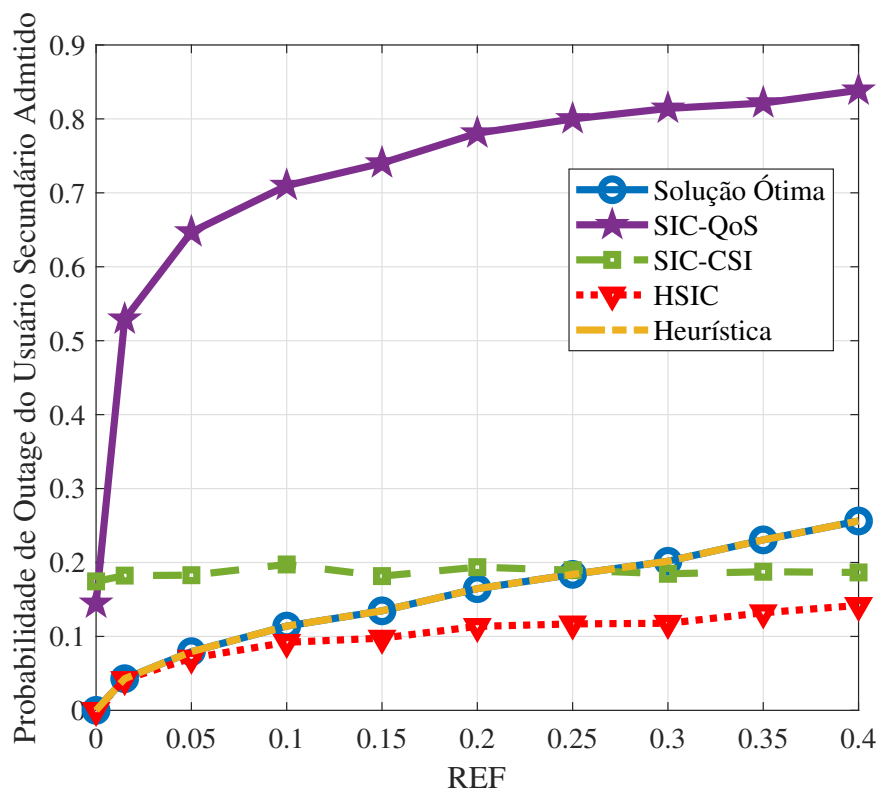
A heurística proposta neste capítulo (HSIC adaptado) é comparada com algumas soluções da literatura por meio de simulações computacionais. A solução ótima foi obtida pela resolução do problema de otimização (6.1) com a função *cplexbilp*, do pacote CPLEX, no MATLAB. O HSIC é a solução proposta por DING *et al.* (2020a), que é apresentada na seção 5.3. As soluções restantes são o SIC-CSI e o SIC-QoS, descritas nas seções 5.1 e 5.2 do capítulo 5 e também no trabalho de DING *et al.* (2020a). É importante destacar que o algoritmo SIC-QoS que aparece neste comparativo seleciona o usuário secundário com o menor ganho de canal para parear com o usuário primário, ou seja, é uma solução simples, sem a ideia de cálculo de limiares.

O desempenho das soluções é medido em termos de probabilidade de *outage* do usuário primário, probabilidade de *outage* do usuário admitido e taxa de dados do usuário secundário admitido. A probabilidade de *outage* do usuário primário é calculada como a razão entre o número de amostras de Monte Carlo em que o usuário primário sofre *outage* e o número total de amostras. A probabilidade de *outage* do usuário secundário admitido é calculada de forma semelhante. Finalmente, neste trabalho, considera-se que a taxa de dados do usuário secundário admitido, apresentada graficamente, é a média da taxa de dados alcançada pelo usuário secundário admitido nas amostras em que nenhum *outage* ocorre.

Na Figura 21, apresenta-se a probabilidade de *outage* do usuário admitido em função do REF para cada solução. Primeiramente, observa-se que todos os algoritmos apresentam uma degradação de desempenho em termos de probabilidade de *outage* à medida que REF aumenta, com exceção do SIC-CSI, que é a única solução onde o usuário secundário admitido é sempre o primeiro a ter seu sinal decodificado primeiro e, portanto, seu desempenho não depende do REF no resultado observado. A solução SIC-QoS apresenta o pior desempenho à medida que REF aumenta, uma vez que a taxa de dados do usuário secundário admitido depende fortemente de REF, o que pode ser visto na equação (5.5). Observa-se uma aparente vantagem do HSIC em relação à heurística proposta e à solução ótima. Na verdade, isso ocorre porque o HSIC tende a beneficiar o usuário secundário em detrimento do usuário primário, por ser uma solução que não

possui uma consciência da interferência residual que o usuário primário pode sofrer. Em outras palavras, o HSIC apresenta menor probabilidade de *outage* para o usuário secundário admitido às custas de *outage* do usuário primário, o que não é desejável. Inclusive, a vantagem que o SIC-CSI apresenta sobre a solução ótima e a heurística na Figura 21 para altos valores de REF pode ser explicada de modo semelhante. A solução ótima e a heurística proposta priorizam a satisfação de QoS do usuário primário, como mostrado a seguir.

Figura 21 – Probabilidade de *outage* do usuário secundário admitido em função do fator de erro residual (REF).



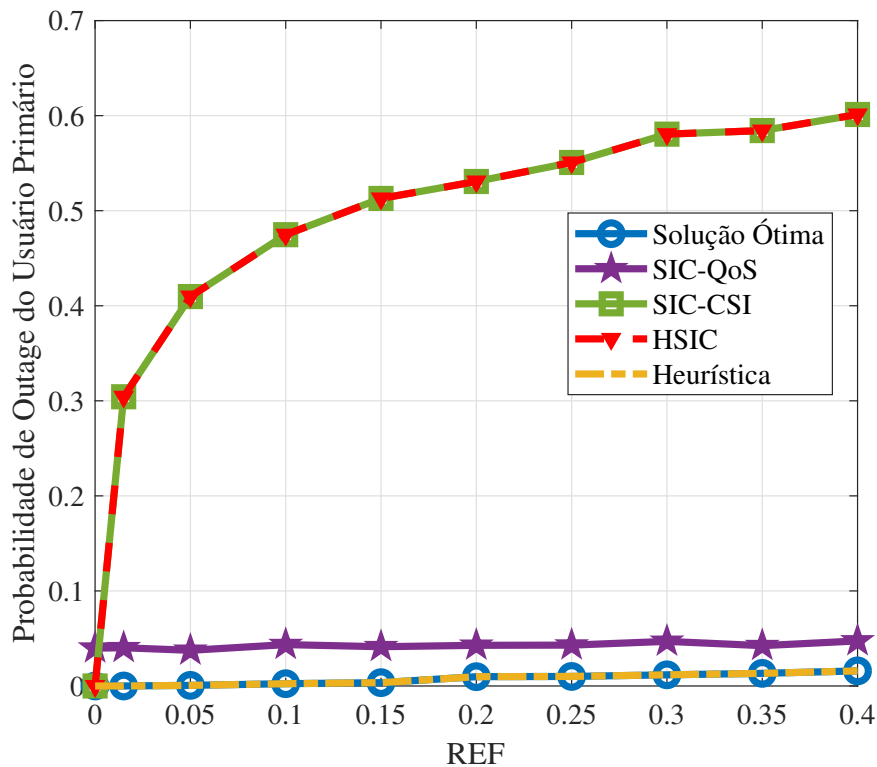
Fonte: Autoral.

Na Figura 22, mostra-se a probabilidade de *outage* do usuário primário em função do REF. Neste caso, pode-se ver que no esquema SIC-QoS o usuário primário é insensível ao REF. Isso ocorre porque, no SIC-QoS, o usuário primário tem seus dados decodificados primeiramente e, assim, sofre interferência total do sinal do usuário secundário admitido, não uma interferência residual como no caso da Figura 21. É por essa razão que os comportamentos das soluções obtidas com SIC-QoS e SIC-CSI se invertem da Figura 21 para a Figura 22.

Outro aspecto importante a se observar na Figura 22 é o mau desempenho do HSIC quando se trata da probabilidade de *outage* do usuário primário, já que esta solução desconhece a decodificação SIC imperfeita e, portanto, não é capaz de proteger o requisito de QoS do

usuário primário ao selecionar o usuário secundário e a ordem de decodificação. Por outro lado, a heurística de HSIC adaptado é capaz de atingir o desempenho ótimo ao selecionar um usuário secundário considerando a presença do REF como um potencial causador de *outage* para o usuário primário. A Figura 22 mostra ainda que a baixa probabilidade de *outage* para usuário admitido com HSIC é alcançada ao custo de alta probabilidade de *outage* para usuário primário. Outro ponto importante é que o HSIC apresenta *outage* nulo para REF igual a zero, o que comprova que esta solução é ótima para o caso de SIC ideal, enquanto a adaptação do HSIC proposta é uma generalização desta solução para o caso de SIC imperfeito.

Figura 22 – Probabilidade de *outage* do usuário primário em função do fator de erro residual (REF).

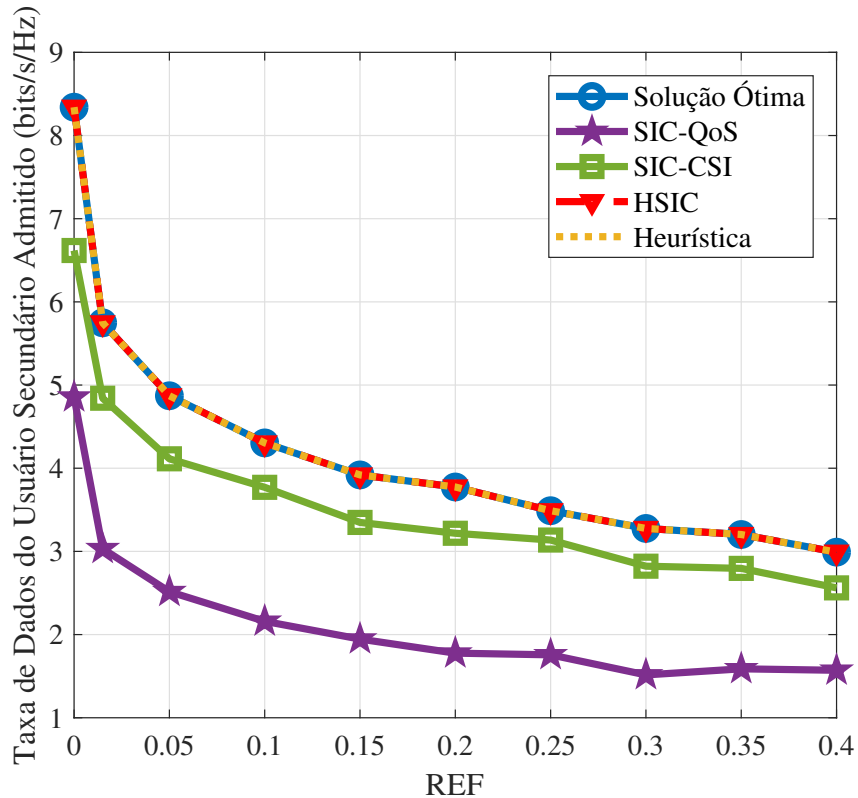


Fonte: Autoral.

Na Figura 23, mostra-se a taxa de dados alcançável do usuário secundário admitido em função do REF. A função *cplexbilp*, que retorna a solução ótima, não entrega valores de taxas de dados do usuário secundário admitido quando ocorre *outage*. Então, para uma comparação justa de desempenho entre as soluções observadas, a média dos valores de taxa de dados do usuário secundário admitido foi calculada com base nas amostras de Monte Carlo onde todas as soluções satisfizeram o QoS do usuário primário e usuário secundário admitido simultaneamente, ou seja, as amostras nas quais ocorreu algum tipo de *outage* estão fora

do gráfico da Figura 23. Como esperado, a taxa de dados diminui à medida que o nível de interferência devido à imperfeição na decodificação SIC aumenta. Além disso, pode-se ver que nas amostras selecionadas, o HSIC e a heurística proposta alcançam os mesmos valores da solução ótima.

Figura 23 – Taxa de dados do usuário secundário admitido em função do fator de erro residual (REF).



Fonte: Autoral.

6.5 Conclusões deste capítulo

Após a análise dos resultados obtidos, pode-se constatar que a heurística proposta apresenta o melhor desempenho geral, pois é capaz de proporcionar baixas probabilidades de *outage* tanto para o usuário primário como para o usuário secundário admitido, ao mesmo tempo em que assegura uma boa taxa de dados para o usuário secundário admitido. Nas situações observadas, a heurística proposta corresponde à solução ótima, o que torna evidente sua vantagem sobre as outras soluções avaliadas.

7 MAXIMIZAÇÃO DA TAXA DE DADOS DO USUÁRIO SECUNDÁRIO ADMITIDO COM CONTROLE DE POTÊNCIA

No presente capítulo, explora-se o uso do HSIC com controle de potência proposto por SUN *et al.* (2021) no modelo de sistema do capítulo 5, tendo-se ainda como objetivo a maximização da taxa de dados do usuário secundário admitido, seguindo a formulação (6.1) apresentada no capítulo 6. Inicialmente, apresenta-se o HSIC com controle de potência no contexto do sistema WPCN com CR-NOMA e SIC imperfeito, apresentado no capítulo 5. Em seguida, as mudanças no problema de otimização (6.1) em relação ao capítulo 6 são apresentadas. Por fim, os resultados de simulações computacionais são observados neste novo contexto. Para um bom entendimento deste capítulo, a leitura dos capítulos 5 e 6 é indispensável.

7.1 HSIC com controle de potência no contexto WPCN

Matematicamente, por meio da multiplicação da potência do usuário secundário P_{i,n^e} por um coeficiente de potência ajustável $\beta \in [0, 1]$, tem-se que a nova potência de transmissão do usuário secundário no *uplink* é $P'_{i,n^e} = \beta \cdot P_{i,n^e}$. Em termos práticos, isso significa um cenário em que o usuário secundário pode transmitir com uma fração de sua potência total P_{i,n^e} . Essa possibilidade é pensada estrategicamente dentro do algoritmo do HSIC com controle de potência proposto por SUN *et al.* (2021).

No trabalho de SUN *et al.* (2021), onde o HSIC controle de potência é inicialmente proposto, a definição do limiar utilizado para a separação dos usuários secundários em dois grupos é diferente da definição apresentada na seção 5.3 do capítulo 5, onde consta a equação (5.7). Na abordagem de SUN *et al.* (2021), pode-se entender que o limiar se trata da máxima potência de interferência que o usuário primário pode sofrer, e não do máximo ganho de canal que um usuário secundário interferente pode ter sem provocar *outage* do usuário primário, como o que foi considerado nos capítulos 5 e 6. Em outras palavras, o limiar, no trabalho de SUN *et al.* (2021), é definido em termos de potência de interferência, e não de ganho de canal, apesar da potência de interferência depender do ganho de canal do usuário interferente. Essa é uma mudança importante que é adotada neste capítulo.

Tendo-se como base o modelo de sistema apresentado no capítulo 5, a taxa de dados do usuário primário U_0 em bits/s é dada por

$$r_{0,n^e} = \frac{B \cdot (N - n^e)}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{0,n^e} \cdot g_0}{\gamma_{n^e} + \sigma^2} \right). \quad (7.1)$$

sendo que γ_{n^e} é a máxima potência de interferência, provocada por um usuário secundário U_i , que o usuário primário U_0 pode suportar sem sofrer *outage* quando n^e slots de tempo são utilizados para WPT na primeira fase do WPCN. Lembrando que o *outage* do usuário primário U_0 ocorre quando $r_{0,n^e} < R_0$.

Quanto maior é o ganho de canal do usuário interferente, maior é a interferência. Uma observação importante é que a equação (7.1) é válida para qualquer ordem de decodificação, seja com SIC-CSI ou SIC-QoS (rever equações (5.3) e (5.5)). Caso o SIC ideal seja considerado, ou seja, se $\varepsilon = 0$, γ_{n^e} se torna nulo se a ordem de decodificação seguir o SIC-CSI. No entanto, quando se considera o SIC imperfeito, sabe-se que mesmo quando a ordem de decodificação segue o SIC-CSI, o usuário primário U_0 pode sofrer *outage* devido à interferência residual do usuário secundário admitido.

Para que o usuário primário U_0 não sofra *outage*, é necessário que a taxa de dados do usuário primário, r_{0,n^e} , seja maior ou igual à sua taxa de dados requisitada R_0 , ou seja, $r_{0,n^e} \geq R_0$. Com isso em mente, a partir da equação (7.1), pode-se definir o limiar de interferência γ_{n^e} como

$$\gamma_{n^e} = \max \left(0, \frac{P_{0,n^e} \cdot g_0}{2 \left(\frac{R_0 \cdot N}{B(N - n^e)} \right) - 1} - \sigma^2 \right). \quad (7.2)$$

Neste caso, percebe-se que essa definição do valor máximo da potência de interferência que o usuário primário pode sofrer serve tanto para o SIC-QoS quanto para o SIC-CSI quando o SIC imperfeito é levado em conta.

No trabalho onde o HSIC com controle de potência é proposto (SUN *et al.*, 2021), os autores continuam com a ideia da divisão dos usuários secundários com base no limiar definido (em caso de dúvidas, rever o funcionamento do HSIC na seção 5.3 do capítulo 5). Neste caso, suponha-se que esses grupos são W_1 e W_2 . Os usuários cuja potência de interferência seja igual ou inferior ao limiar, ou seja, $P_{i,n^e} \cdot g_i \leq \gamma_{n^e}$ são colocados no grupo W_1 ; enquanto os usuários com potência de interferência superior ao limiar, ou seja, $P_{i,n^e} \cdot g_i > \gamma_{n^e}$ são colocados no grupo W_2 . Então, se um usuário secundário do grupo W_1 é selecionado para o pareamento com o usuário primário, o SIC-QoS é executado. Se um usuário secundário do grupo W_2 é selecionado, há duas opções de escolha: pode ser utilizado o SIC-CSI, ou o SIC-QoS com controle de potência. Entre as três opções existentes (SIC-QoS, SIC-CSI e SIC-QoS com controle de potência), o algoritmo do HSIC com controle de potência proposto por SUN *et al.* (2021) seleciona aquela que proporciona a maior taxa de dados para o usuário secundário admitido.

7.1.1 SIC-QoS com controle de potência

Com o controle de potência, considera-se a possibilidade do usuário secundário transmitir no *uplink* apenas com uma fração de sua potência P_{i,n^e} coletada. Utilizando-se o SIC-QoS com controle de potência, no cenário de SIC imperfeito, a taxa de dados do usuário secundário admitido em bits/s é dada por

$$r_{i,n^e}^{\text{QoS-P}} = \frac{B \cdot (N - n^e)}{N} \log_2 \left(1 + \frac{\beta_{n^e}^{\text{QoS}} \cdot P_{i,n^e} \cdot g_i}{P_{0,n^e} \cdot g_0 \cdot \varepsilon + \sigma^2} \right), \quad (7.3)$$

em que $\beta_{n^e}^{\text{QoS}} \in [0, 1]$ é o coeficiente de potência ajustável para este caso. Por sua vez, a taxa de dados do usuário primário em bits/s é dada por

$$r_{0,n^e}^{\text{QoS-P}} = \frac{B \cdot (N - n^e)}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{0,n^e} \cdot g_0}{\beta_{n^e}^{\text{QoS}} \cdot P_{i,n^e} \cdot g_i + \sigma^2} \right). \quad (7.4)$$

Pelas equações (7.1) e (7.3), nota-se que o coeficiente de potência ajustável assume a seguinte forma para o caso do SIC-QoS com controle de potência:

$$\beta_{n^e}^{\text{QoS}} \leq \frac{\gamma_{n^e}}{P_{i,n^e} \cdot g_i}. \quad (7.5)$$

Quando se executa o SIC-QoS, o usuário primário tem seu sinal decodificado primeiramente no ponto de acesso, sofrendo interferência do usuário secundário admitido, como mostra a equação (7.3). Por essa razão, o controle de potência no SIC-QoS se mostra como uma estratégia interessante para reduzir a interferência sofrida pelo usuário primário estrategicamente para que este não sofra *outage*. Pelo fato de SUN *et al.* (2021) considerarem o SIC ideal em seu trabalho ($\varepsilon = 0$), sua proposta de HSIC com controle de potência leva em conta a possibilidade de controle de potência apenas no SIC-QoS.

7.1.2 SIC-CSI com controle de potência

Como o SIC imperfeito faz parte do presente estudo, a possibilidade de controle de potência no SIC-CSI também deve ser levada em conta. Nesta técnica, a taxa de dados do usuário secundário em bits/s é igual a

$$r_{i,n^e}^{\text{CSI-P}} = \frac{B \cdot (N - n^e)}{N} \log_2 \left(1 + \frac{\beta_{n^e}^{\text{CSI}} \cdot P_{i,n^e} \cdot g_i}{P_{0,n^e} \cdot g_0 + \sigma^2} \right), \quad (7.6)$$

em que $\beta_{n^e}^{\text{CSI}} \in [0, 1]$ é o coeficiente de potência ajustável para o caso do SIC-CSI com controle de potência. A taxa de dados do usuário primário em bits/s é calculada por

$$r_{0,n^e}^{\text{CSI-P}} = \frac{B \cdot (N - n^e)}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{0,n^e} \cdot g_0}{\beta_{n^e}^{\text{CSI}} \cdot P_{i,n^e} \cdot g_i \cdot \varepsilon + \sigma^2} \right). \quad (7.7)$$

O coeficiente de potência ajustável, para este caso, é

$$\beta_{n^e}^{\text{CSI}} \leq \frac{\gamma_{n^e}}{P_{i,n^e} \cdot g_i \cdot \varepsilon}, 0 < \varepsilon. \quad (7.8)$$

É importante que fique claro que o valor do coeficiente de potência ajustável jamais pode ultrapassar a unidade, pois isso significaria que o usuário secundário pode transmitir a uma potência superior a P_{i,n^e} , o que não faz sentido. Portanto, $\beta_{n^e}^{\text{CSI}} \in [0, 1]$, e as situações em que essa regra for violada devem ser descartadas. Pela equação (7.8), pode-se observar imediatamente que para o SIC-CSI com controle de potência ser uma opção viável dentro do algoritmo, o fator de erro residual ε jamais pode ser igual a zero, ou seja, esta técnica não é válida para um cenário de SIC ideal.

7.2 Formulação do problema de otimização com controle de potência

Com a inclusão da possibilidade de controle de potência, o problema da maximização da taxa de dados do usuário secundário admitido, definido na formulação (6.1), tem seu espaço de busca aumentado por conta da inclusão do controle de potência no *framework* de otimização. Quando se considera o SIC imperfeito, sabe-se que o usuário primário ainda pode sofrer *outage* mesmo quando o SIC-CSI é executado. Por essa razão, pode-se incluir a possibilidade de controle de potência também no SIC-CSI, de modo que a variável $p \in \{1, 2, 3, 4\}$, que indica a técnica utilizada, é definida assim:

- se $p = 1$, o SIC-CSI é executado;
- se $p = 2$, o SIC-QoS é executado;
- se $p = 3$, o SIC-QoS com controle de potência é executado;
- se $p = 4$, o SIC-CSI com controle de potência é executado.

Nota-se que as possibilidades $p = 1$ e $p = 2$ compreendem o estudo apresentado no capítulo 6, enquanto $p = 3$ e $p = 4$ fazem parte do estudo do uso de controle de potência no SIC, trazido no presente capítulo. Essa expansão do espaço de busca do problema de otimização aumenta também o espaço de soluções ótimas, como poderá se observar nos resultados apresentados na seção 7.4.

Neste caso, o problema de otimização expandido tem a seguinte formulação:

$$\max_{x_{i,p,n^e}} \left\{ \sum_{i=1}^M \sum_{p=1}^4 \sum_{n^e=1}^{N-1} (r_{i,p,n^e} \cdot x_{i,p,n^e}) \right\}, \quad (7.9a)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^M \sum_{p=1}^4 \sum_{n^e=1}^{N-1} (r_{0,i,p,n^e} \cdot x_{i,p,n^e}) \geq R_0, \quad (7.9b)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{p=1}^4 \sum_{n^e=1}^{N-1} x_{i,p,n^e} = 1, \quad (7.9c)$$

em que x_{i,p,n^e} é a variável de decisão, e a taxa de dados r_{i,p,n^e} do i -ésimo usuário secundário U_i é definida como

$$r_{i,p,n^e} = \begin{cases} B \frac{N-n^e}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{i,n^e} g_i}{P_{0,n^e} g_0 + \sigma^2} \right), & \text{se } p = 1, \\ B \frac{N-n^e}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{i,n^e} g_i}{P_{0,n^e} g_0 \varepsilon + \sigma^2} \right), & \text{se } p = 2, \\ B \frac{N-n^e}{N} \log_2 \left(1 + \frac{\beta_{n^e}^{\text{QoS}} \cdot P_{i,n^e} g_i}{P_{0,n^e} g_0 \varepsilon + \sigma^2} \right), & \text{se } p = 3, \\ B \frac{N-n^e}{N} \log_2 \left(1 + \frac{\beta_{n^e}^{\text{CSI}} \cdot P_{i,n^e} g_i}{P_{0,n^e} g_0 + \sigma^2} \right), & \text{se } p = 4; \end{cases} \quad (7.10)$$

e a taxa de dados r_{0,i,p,n^e} do usuário primário U_0 é definida como

$$r_{i,p,n^e}^0 = \begin{cases} B \frac{N-n^e}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{0,n^e} g_0}{P_{i,n^e} g_i \varepsilon + \sigma^2} \right), & \text{se } p = 1, \\ B \frac{N-n^e}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{0,n^e} g_0}{P_{i,n^e} g_i + \sigma^2} \right), & \text{se } p = 2, \\ B \frac{N-n^e}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{0,n^e} g_0}{\beta_{n^e}^{\text{QoS}} \cdot P_{i,n^e} g_i + \sigma^2} \right), & \text{se } p = 3, \\ B \frac{N-n^e}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{0,n^e} g_0}{\beta_{n^e}^{\text{CSI}} \cdot P_{i,n^e} g_i \varepsilon + \sigma^2} \right), & \text{se } p = 4. \end{cases} \quad (7.11)$$

Para obter o problema de otimização (7.9) em sua forma matricial, o processo é semelhante ao que foi mostrado para o caso anterior, na seção 6.2 do capítulo 6. Assim como o problema de otimização apresentado no capítulo anterior, o problema (7.9) corresponde a um problema de programação linear inteira e, nas simulações deste capítulo, também foi resolvido computacionalmente por meio da função *cplexbilp*, da biblioteca CPLEX, para obtenção da solução ótima.

7.3 Heurística proposta: HSIC adaptado ao cenário de SIC imperfeito com controle de potência

Para o cenário com controle de potência, uma heurística foi criada. Nesta proposta, os usuários secundários são divididos em três grupos, S_1 , S_2 e S_3 . O grupo S_1 é composto pelos usuários secundários que provocam ao usuário primário interferência superior ao limiar, $P_{i,n^e} \cdot g_i > \gamma_{n^e}$, e interferência residual menor ou igual ao limiar, $P_{i,n^e} \cdot g_i \cdot \varepsilon \leq \gamma_{n^e}$, simultaneamente. O grupo S_2 é composto por usuários secundários que causam interferência menor ou igual ao limiar, $P_{i,n^e} \cdot g_i \leq \gamma_{n^e}$. O grupo S_3 é composto pelos usuários secundários U_i que causam interferência maior do que o limiar, ou seja, $P_{i,n^e} \cdot g_i > \gamma_{n^e}$.

O SIC-CSI, $p = 1$, é aplicado ao grupo S_1 ; e o SIC-QoS, $p = 2$, é aplicado ao grupo S_2 , calculando-se as taxas de dados do usuários secundários em cada caso. As soluções com controle de potência, $p = 3$ ou $p = 4$ (ver seção 7.2), são aplicadas aos membros do grupo S_3 , calculando-se as taxas de dados dos usuários secundários deste grupo considerando ambas as técnicas. No fim, a técnica escolhida é aquela que proporciona a maior taxa de dados para o usuário secundário admitido, de modo que isto não provoque *outage* ao usuário primário. Neste contexto, pode-se perceber que uma parte do grupo S_1 está dentro do grupo S_3 , onde estão agrupados usuários secundários cuja interferência é maior do que o limiar, $P_{i,n^e} \cdot g_i > \gamma_{n^e}$. Para os usuários secundários que pertencem ao conjunto $S_1 \cap S_3$, a melhor dentre as opções $p = 1$, $p = 3$ e $p = 4$ é escolhida.

De modo geral, a ideia por trás desta heurística segue um raciocínio semelhante ao das soluções de HSIC apresentadas anteriormente, pois o objetivo é a melhor seleção do usuário secundário e da técnica SIC (melhor valor de p) no *uplink* de dados. O passo a passo desta heurística está no Algoritmo 2. Apesar do objetivo ser a obtenção da maior taxa de dados do usuário secundário admitido, ao fim da heurística, é possível saber qual usuário secundário U_i deve ser selecionado para o pareamento, qual a ordem de decodificação ou técnica SIC p a ser utilizada, e qual deve ser o número de *slots* de tempo na etapa de colheita de energia.

No Algoritmo 2, a verificação da condição $R(n^e) > R(n^e - 1)$ colocada no fim do laço de repetição *for* (para), limita o intervalo de busca dos valores de n^e , descartando iterações desnecessárias do laço de repetição. A curva do n^e em função da taxa de dados do usuário é crescente até chegar em um máximo global, depois se torna decrescente (MELO, 2020). Para poupar processamento computacional, o Algoritmo 2 testa valores de n^e até chegar neste máximo global de n^e em relação à taxa de dados, pois após este pico, valores superiores de

n^e não entregam taxas de dados maiores. Essa ideia também foi incorporada no Algoritmo 1, apresentado no capítulo 6.

Algoritmo 2: HSIC com controle de potência adaptado ao cenário de SIC imperfeito

Seja $R(n^e)$ a taxa de dados do usuário secundário admitido quando um número inteiro n^e é utilizado para colheita de energia;

Seja R_0 a taxa de dados requisitada pelo usuário primário;

$R(0) = 0$;

for $n^e = 1 : N - 1$ **do**

 Calcular γ_{n^e} de acordo com a equação (7.2);

S_1 agrupa os usuários U_i que possuem $P_{i,n^e} \cdot g_i > \gamma_{n^e}$ e $P_{i,n^e} \cdot g_i \cdot \varepsilon \leq \gamma_{n^e}$;

S_2 agrupa os usuários U_i que possuem $P_{i,n^e} \cdot g_i \leq \gamma_{n^e}$;

S_3 agrupa os usuários U_i que possuem $P_{i,n^e} \cdot g_i > \gamma_{n^e}$;

 Calcular a taxa de dados, $R_{i^*}^{\text{CSI}}(n^e)$, dos usuários do grupo S_1 considerando $p = 1$, de acordo com a equação (5.4);

 Calcular a taxa de dados, $R_{i^*}^{\text{QoS}}(n^e)$, dos usuários do grupo S_2 considerando o $p = 2$, de acordo com a equação (5.6);

 Calcular $\beta_{n^e}^{\text{QoS}}$ como o máximo da equação (7.5);

 Calcular a taxa de dados, $R_{i^*}^{\text{QoS-P}}(n^e)$, de cada usuário do grupo S_3 considerando $p = 3$, de acordo com a equação (7.3);

 Calcular a taxa de dados do usuário primário $R_{0,i^*}^{\text{QoS-P}}(n^e)$ ao parear com cada usuário secundário U_i do grupo S_3 , considerando $p = 3$, de acordo com a equação (7.4);

if $R_{0,i^*}^{\text{QoS-P}}(n^e) < R_0$ **then**

 | $R_{i^*}^{\text{QoS-P}}(n^e) = 0$;

end

 Calcular $\beta_{n^e}^{\text{CSI}}$ como o máximo permitido na equação (7.8);

 Calcular a taxa de dados, $R_{i^*}^{\text{CSI-P}}(n^e)$, de cada um dos usuários do grupo S_3 considerando $p = 4$, de acordo com a equação (7.6);

 Calcular a taxa de dados do usuário primário $R_{0,i^*}^{\text{CSI-P}}(n^e)$ ao parear com cada usuário secundário U_i do grupo S_3 , considerando $p = 4$, de acordo com a equação (7.7);

if $R_{0,i^*}^{\text{CSI-P}}(n^e) < R_0$ **then**

 | $R_{i^*}^{\text{CSI-P}}(n^e) = 0$;

end

$R(n^e) = \max$

$\left(\max(R_{i^*}^{\text{CSI}}(n^e)), \max(R_{i^*}^{\text{QoS}}(n^e)), \max(R_{i^*}^{\text{QoS-P}}(n^e)), \max(R_{i^*}^{\text{CSI-P}}(n^e)) \right)$

if $R(n^e) > R(n^e - 1)$ **then**

 | Continuar o laço de repetição;

else

 | Parar o laço de repetição;

end

end

end

A solução será o maior $R(n^e) \forall n^e$.

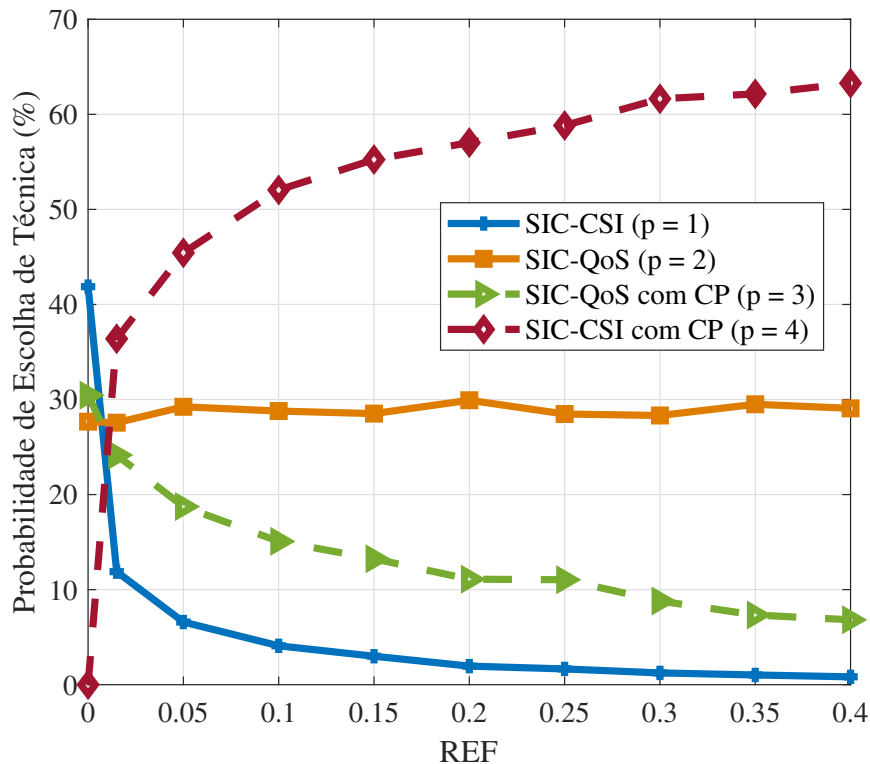
7.4 Resultados e discussões

O problema de otimização descrito na formulação (7.9) foi avaliado por meio de simulações de Monte Carlo com 5 mil amostras no total. As configurações e valores dos parâmetros são os mesmos considerados na seção 6.4, do capítulo 6. Com base no modelo definido no capítulo 5, o sistema conta com uma célula circular onde os usuários são distribuídos uniformemente em um disco com raio externo e raio interno iguais a 10 m e 1 m, respectivamente, com o ponto de acesso localizado no centro da circunferência. A largura de banda do canal é de 1 MHz e o número total de *slots* de tempo em um *frame* é de 20 unidades. O número de usuários secundários M , é igual a 5. A potência do ruído é de -104 dBm, e o ganho do canal entre o ponto de acesso e usuários é modelado como $10^{-3} \cdot X \cdot d_j^{-3}$ onde d_j é a distância entre o j -ésimo usuário e o ponto de acesso em metros e X é uma variável aleatória distribuída exponencialmente com média unitária. A taxa de dados requisitada pelo usuário primário, U_0 , é de 200 kbits/s, e a taxa de dados requisitada pelos usuários secundários é de 1 Mbits/s. A eficiência de colheita de energia η , é igual 0,5 e o REF é incrementado nas simulações. A potência de transmissão do ponto de acesso é igual a 5 W.

Desta vez, os resultados comparados são da solução ótima do problema de otimização (7.9), a solução ótima do problema de otimização anterior (6.1), no qual o controle de potência não é considerado, o HSIC com controle de potência proposto por SUN *et al.* (2021), e a heurística proposta na seção 7.3, a qual leva em consideração o SIC imperfeito. Uma comparação das soluções dos problemas de otimização (6.1) e (7.9), neste contexto, serve para mostrar as vantagens ao se considerar o controle de potência no modelo. Outra comparação importante é a dos resultados obtidos com o HSIC com controle de potência proposto por SUN *et al.* (2021) e da heurística proposta neste capítulo, para reforçar a importância do estudo do SIC imperfeito.

Na Figura 24, mostra-se a probabilidade de escolha de cada técnica dentro da solução ótima do problema de otimização (7.9) em função do REF. Na legenda do gráfico (dentro da figura), CP significa controle de potência. Observa-se que o número de vezes em que o SIC-CSI, $p = 1$, é selecionado experimenta uma grande queda conforme o valor de REF aumenta. O SIC-QoS, por sua vez, $p = 2$, não é afetado pelo REF, e permanece aproximadamente constante no gráfico. O SIC-QoS com controle de potência, $p = 3$, sofre uma queda mais lenta do que o SIC-CSI convencional com o crescimento do REF. Por fim, observa-se que o número de vezes em que o SIC-CSI, $p = 4$, é utilizado cresce com REF, o que inicialmente já confirma a ideia de que no cenário de SIC imperfeito, essa técnica deve ser considerada.

Figura 24 – Probabilidade de escolha de técnica na solução ótima em função do REF.

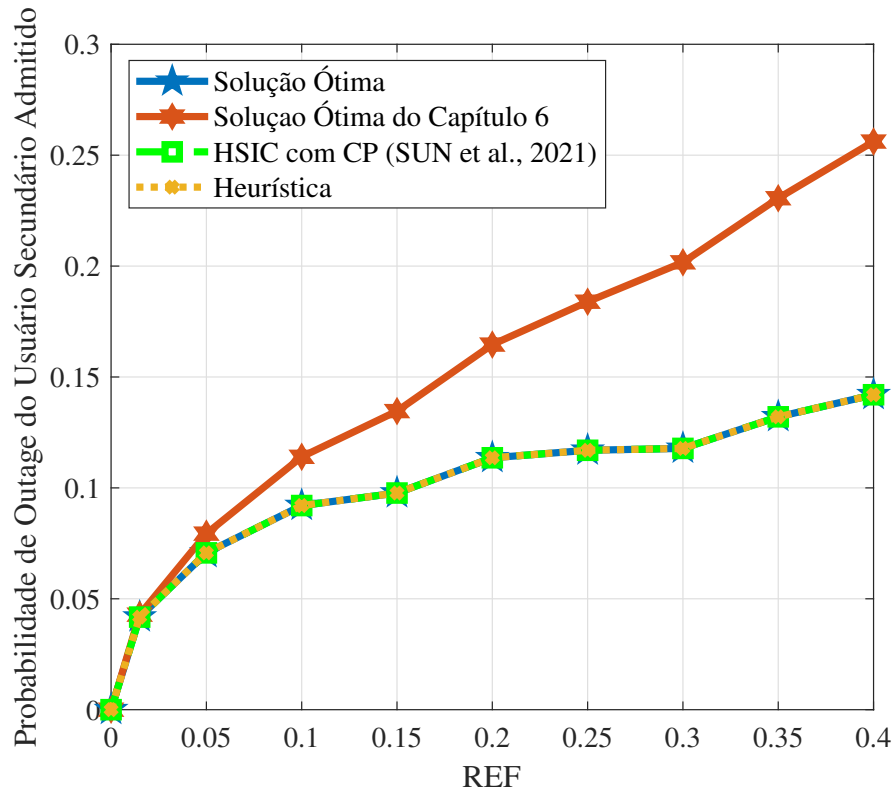


Fonte: Autoral.

Na Figura 25, apresenta-se a probabilidade de *outage* do usuário secundário admitido em função do REF. Para todas as curvas, a probabilidade de *outage* do usuário secundário admitido cresce com o aumento do REF, já que quanto maior é a imperfeição do SIC, mais os usuários sofrem com a interferência, o que diminui suas taxas de dados e, então, pior é o desempenho do sistema. Nota-se que em valores muito pequenos de REF, todas as curvas parecem se sobrepôr. No entanto, a solução ótima do problema de otimização (6.1), do capítulo 6, apresenta um desempenho pior do que as demais soluções que incluem o controle de potência em seu *framework* conforme o valor do REF aumenta. A diferença da curva da solução ótima do capítulo 6 para as curvas das demais soluções aumenta gradualmente. Desta forma, fica nítido que o usuário secundário admitido pode ser beneficiado pelo uso do controle de potência quando se considera o SIC imperfeito. Neste gráfico, as curvas da solução ótima, HSIC com controle de potência de SUN *et al.* (2021) e a heurística proposta neste capítulo estão sobrepostas, o que indica que as três igualmente beneficiam o usuário secundário admitido em termos de redução da probabilidade de *outage*.

Na Figura 26, mostra-se a probabilidade de *outage* do usuário primário em função do

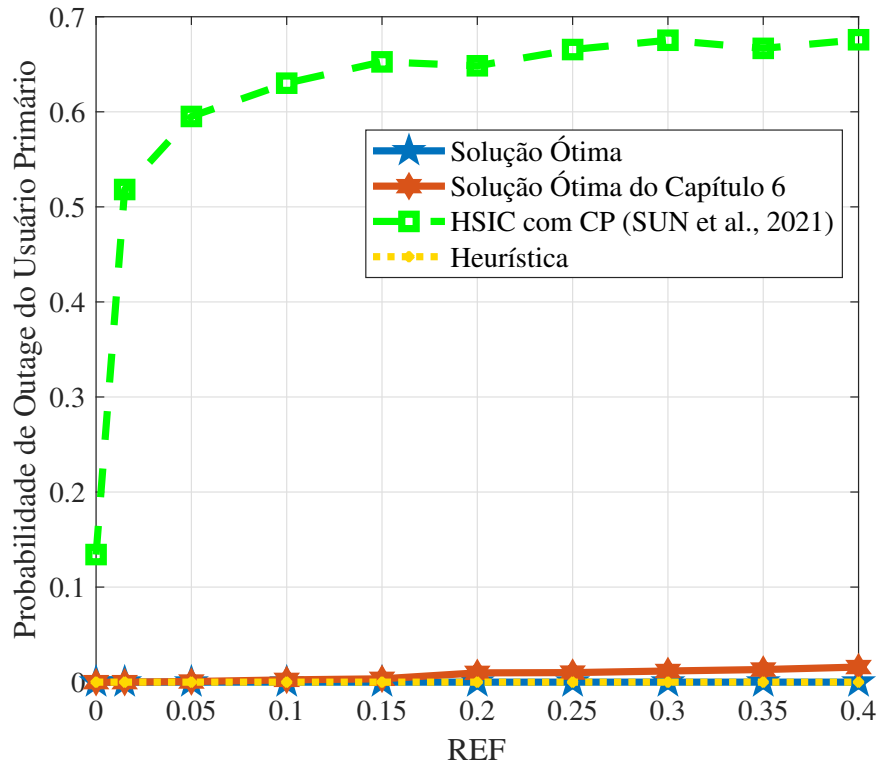
Figura 25 – Probabilidade de *outage* do usuário secundário admitido em função do REF.



Fonte: Autoral.

REF. Desta vez, observa-se o pior desempenho para o HSIC com controle de potência de SUN *et al.* (2021), pois esta solução foi pensada para o caso do SIC ideal, assim não há uma preocupação com o REF. Isso significa que, neste cenário de SIC imperfeito, esta solução está beneficiando o usuário secundário admitido em detrimento do usuário primário, ou seja, assegurando um bom desempenho para o usuário secundário admitido às custas de elevadas probabilidades de *outage* do usuário primário, o que é um comportamento indesejável. É importante destacar que o *outage* do usuário primário é péssimo para o sistema, pois este usuário é o que tem a maior prioridade. Sob outra perspectiva, a solução ótima deste capítulo, a solução ótima do capítulo 6 e a heurística proposta na seção 7.3 apresentam baixas probabilidades de *outage* para o usuário primário, pois estas soluções são pensadas para o caso do SIC imperfeito. Por trás destas três soluções existe a consciência de que a interferência residual em uma situação real pode provocar *outage* do usuário primário. Neste cenário, o principal benefício ao se considerar o SIC imperfeito é o alcance de maior segurança para o usuário primário em uma situação real.

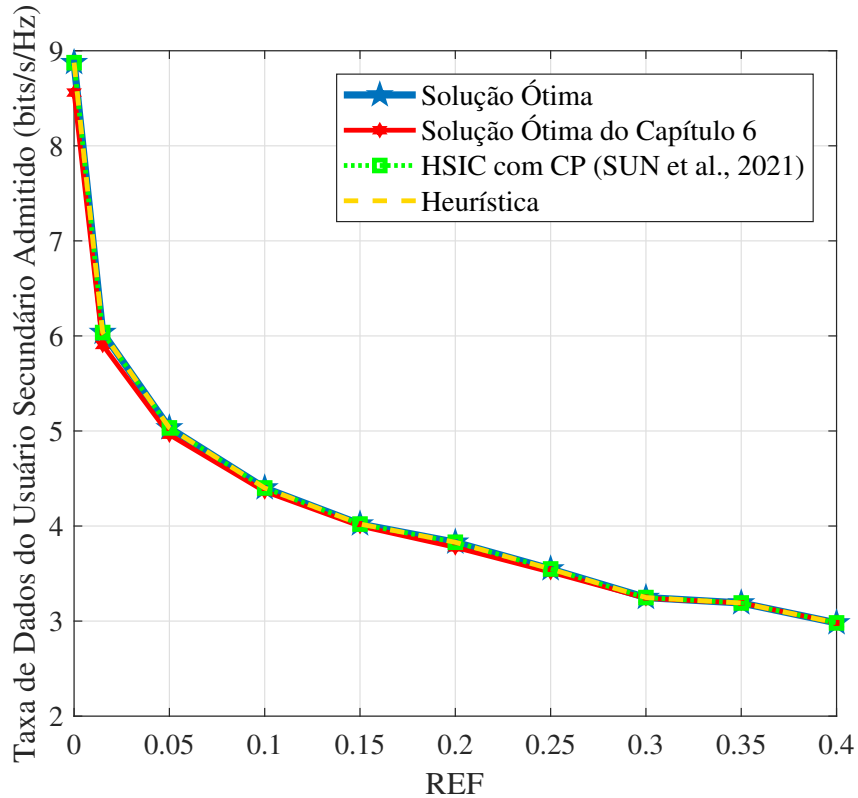
Figura 26 – Probabilidade de *outage* do usuário primário em função do REF.



Fonte: Autoral.

Na Figura 27, apresenta-se a taxa de dados do usuário secundário admitido em função do REF. As curvas foram feitas com linhas mais finas para que seja possível perceber a pequena diferença entre a curva da solução ótima do capítulo 6, que não considera o controle de potência, e as demais soluções. Nota-se uma desvantagem muito pequena para a solução ótima do capítulo 6. Para este gráfico, foram selecionadas apenas as amostras em que os quatro algoritmos apresentam solução válida para o usuário secundário admitido, ou seja, os casos de *outage* do usuário secundário admitido não são contabilizados neste comparativo. Caso as amostras com *outage* do usuário secundário admitido fossem consideradas neste gráfico, seria mostrada uma maior desvantagem da solução ótima do capítulo 6. Entretanto, como a informação do *outage* já é dada na Figura 25, o comparativo de taxas de dados da Figura 27 conta apenas com os melhores resultados de cada solução. Desta forma, a explicação para a ligeira desvantagem da solução ótima do capítulo 6 em relação às demais está no fato de que as outras soluções englobam o controle de potência, o que possibilita em alguns casos a obtenção de maior taxa de dados para o usuário secundário admitido. As curvas da solução ótima, do HSIC com controle de potência proposto por SUN *et al.* (2021) e da heurística proposta na seção 7.3 estão sobrepostas, assim como na Figura 25.

Figura 27 – Taxa de dados do usuário secundário admitido em função do REF.



Fonte: Autoral.

7.5 Conclusões deste capítulo

Por fim, observa-se que a heurística proposta na seção 7.3 corresponde a solução ótima em todos os gráficos observados. Os resultados indicam que a inclusão do controle de potência no estudo adiciona vantagens principalmente na redução da probabilidade de *outage* do usuário secundário admitido. Por outro lado, assim como mostrado no capítulo 6 e reforçado no presente capítulo, as devidas adaptações para o caso do SIC imperfeito são necessárias para a redução da probabilidade de *outage* do usuário primário quando há um REF não nulo no sistema.

8 MAXIMIZAÇÃO DA JUSTIÇA DOS USUÁRIOS SECUNDÁRIOS COM MÚLTIPLAS SUBPORTADORAS

Neste capítulo, tendo como base o modelo definido no capítulo 5, apresenta-se um estudo com objetivo diferente do que se apresentou nos capítulos 6 e 7, os quais consideram que apenas um usuário secundário é admitido ao pareamento com o usuário primário. Neste cenário, todos os usuários secundários são habilitados ao compartilhamento de recursos com o usuário primário por meio do uso de múltiplas subportadoras, sendo que o objetivo agora é a maximização da justiça dos usuários secundários. Por haver múltiplas subportadoras neste contexto, a complexidade do problema de otimização aumenta consideravelmente, o que o torna mais desafiador do que os problemas de otimização apresentados anteriormente. O controle de potência, considerado no capítulo 7, não faz parte deste estudo.

Em um problema de maximização da justiça em sistemas de comunicação sem fio, deseja-se que as taxas de dados obtidas pelos usuários não sejam muito distoantes entre si. Matematicamente, a taxa de dados individual mínima deve ser maximizada. Se a taxa de dados alcançável de um usuário no pior caso possível é maximizada, há um aumento de justiça no sistema. Em um problema de maximização da taxa de dados total, existe uma tendência de que mais recursos sejam alocados aos usuários em melhores condições de canal, de modo que os usuários com piores condições de canal podem ser prejudicados.

8.1 Características do sistema

Nesta nova configuração, existe um total de S subportadoras, sendo que o usuário primário U_0 utiliza todas simultaneamente. Cada subportadora é compartilhada com apenas um usuário secundário U_i . Assim, cada usuário secundário U_i pode utilizar no máximo L subportadoras, sendo $L < S$. É desejável que cada usuário secundário seja atendido com pelo menos uma subportadora, então, se M é o número de usuários secundários e S é o número total de subportadoras disponíveis no sistema, $L = S - M + 1$. Na etapa de WPT, a potência coletada por um usuário j qualquer (primário ou secundário) na subportadora s , utilizando n^e slots para transferência de energia, é definida como

$$P_{j,s,n^e}^{\text{WPT}} = P \cdot \eta \cdot g_{j,s} \cdot \frac{n^e}{N - n^e}, \quad (8.1)$$

em que $g_{j,s}$ é o ganho de canal do usuário j em relação ao ponto de acesso ao utilizar a subportadora s .

A potência total de transmissão do usuário primário U_0 no *uplink* com n^e slots de tempo tendo sido utilizados na primeira etapa, P_{0,n^e}^{total} , é igual à soma das potências P_{0,s,n^e}^{WPT} coletadas em cada subportadora individualmente na primeira etapa. No *uplink*, o usuário primário U_0 transmite em cada subportadora com uma potência P_{0,s,n^e} , que corresponde à potência total coletada P_{0,n^e}^{total} dividida pelo total de subportadoras, ou seja, $P_{0,s,n^e} = P_{0,n^e}^{\text{total}}/S$. Semelhantemente, a potência total de transmissão de um usuário secundário U_i no *uplink*, P_{i,n^e}^{total} , é a soma das potências P_{i,s,n^e}^{WPT} coletadas na primeira etapa. No *uplink*, a potência de transmissão de um usuário secundário U_i por subportadora é igual à potência total coletada dividido pelo número máximo de subportadoras que um usuário secundário pode utilizar, ou seja, $P_{i,s,n^e} = P_{i,n^e}^{\text{total}}/L$.

8.2 Formulação do problema de otimização

Neste cenário, o problema da maximização da justiça dos usuários secundários é definido como

$$\max_{x_{i,s,n^e,p}} \left\{ \min \left(\sum_{s=1}^S \sum_{n^e=1}^{N-1} \sum_{p=1}^2 r_{i,s,n^e,p} \cdot x_{i,s,n^e,p}, \forall i \right) \right\}, \quad (8.2a)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^M \sum_{s=1}^S \sum_{n^e=1}^{N-1} \sum_{p=1}^2 r_{i,s,n^e,p}^0 \cdot x_{i,s,n^e,p} \geq R_0, \quad (8.2b)$$

$$\sum_{s=1}^S \sum_{n^e=1}^{N-1} \sum_{p=1}^2 x_{i,s,n^e,p} \leq L, \forall i, \quad (8.2c)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{n^e=1}^{N-1} \sum_{p=1}^2 x_{i,s,n^e,p} = 1, \forall s, \quad (8.2d)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{n^e=1}^{N-1} \sum_{p=1}^2 n^e \cdot x_{i,s,n^e,p} = \sum_{i=1}^M \sum_{n^e=1}^{N-1} \sum_{p=1}^2 n^e \cdot x_{i,1,n^e,p}, \forall s > 1, \quad (8.2e)$$

onde a taxa de dados alcançável do i -ésimo usuário secundário, em bits/s, na subportadora s , quando n^e slots de tempo são utilizados para a colheita de energia e a técnica p é adotada no SIC, é dada por

$$r_{i,s,n^e,p} = \begin{cases} \frac{B}{S} \frac{(N-n^e)}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{i,s,n^e} \cdot g_{i,s}}{P_{0,s,n^e} \cdot g_{0,s} + \sigma^2} \right), & \text{se } p = 1, \\ \frac{B}{S} \frac{(N-n^e)}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{i,n^e} \cdot g_{i,s}}{P_{0,s,n^e} g_{0,s} \varepsilon + \sigma^2} \right), & \text{se } p = 2, \end{cases} \quad (8.3)$$

e a taxa de dados do usuário primário, em bits/s, na subportadora s , quando pareado com o i -ésimo usuário secundário, n^e slots de tempo são utilizados na colheita de energia e a ordem de

decodificação p é aplicada no SIC, é dada por

$$r_{i,s,n^e,p}^0 = \begin{cases} \frac{B}{S} \frac{(N - n^e)}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{0,s,n^e} \cdot g_{0,s}}{P_{i,s,n^e} g_i \mathcal{E} + \sigma^2} \right), & \text{se } p = 1, \\ \frac{B}{S} \frac{(N - n^e)}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{0,s,n^e} \cdot g_{0,s}}{P_{i,s,n^e} \cdot g_{i,s} + \sigma^2} \right), & \text{se } p = 2. \end{cases} \quad (8.4)$$

O objetivo, definido por (8.2a), é a maximização da mínima taxa de dados dos usuários secundários. Esse valor mínimo não é estático, pois quando um valor mínimo é aumentado, um outro mínimo surge, e assim, de modo dinâmico, a justiça a ser alcançada entre os usuários secundários é aumentada dentro do *framework* do problema de otimização. Em uma situação de justiça perfeita, a mínima taxa de dados é aumentada ao máximo, e as taxas de dados dos usuários secundários são exatamente iguais. No entanto, a solução ótima não necessariamente implica nisso. A solução ótima consiste no melhor resultado possível com base nos recursos envolvidos e nas restrições estabelecidas.

A restrição (8.2b) impõe que o usuário primário tenha seu requisito de QoS satisfeito, ou seja, que sua taxa de dados seja igual ou maior do que sua taxa de dados mínima requisitada R_0 . Na solução do problema de otimização formulado, a variável $x_{i,s,n^e,p}$ indica qual usuário secundário deve utilizar cada subportadora, qual deve ser o número de *slots* de tempo para a transferência de energia e qual é a ordem de decodificação em cada subportadora. Assim, a alocação de recursos entregue na solução deve respeitar a garantia de QoS do usuário primário.

No conjunto de restrições (8.2c), é estabelecido que cada usuário secundário pode alocar um máximo de L subportadoras. Relembrando que, como cada usuário secundário deve ser admitido a utilizar pelo menos uma subportadora, um único usuário secundário não pode utilizar todas as subportadoras. Como o objetivo é a maximização da justiça dos usuários secundários, não faria sentido um usuário secundário ocupar todas as subportadoras, deixando os outros sem nenhuma. Neste sistema, apenas o usuário primário utiliza todas as subportadoras.

As restrições (8.2d) garantem que para cada subportadora sejam atribuídos apenas um usuário secundário U_i , apenas um número de *slots* de tempo para colheita de energia n^e , e apenas uma ordem de decodificação p . No entanto, o número de *slots* de tempo reservado para a etapa de transferência de energia deve ser único para todo o sistema, ou seja, em todas as subportadoras. Por essa razão, as restrições (8.2e) estabelecem um único n^e para todo o sistema. Desta forma, a solução do problema de otimização deve atribuir um mesmo valor de n^e para todas as subportadoras.

Para facilitar a resolução desse problema de otimização, algumas manipulações são

necessárias. A função objetivo (8.2a) também pode ser modelada da seguinte maneira:

$$\max_{x_{i,s,n^e,p};\theta} (\theta), \quad (8.5)$$

em que θ é uma variável auxiliar utilizada para tornar o problema linear e corresponde à mínima taxa de dados dos usuários secundários. Assim, a função objetivo (8.5) é sujeita a

$$\sum_{s=1}^S \sum_{n^e=1}^{N-1} \sum_{p=1}^2 r_{i,s,n^e,p} \cdot x_{i,s,n^e,p} \geq \theta, \forall i, \quad (8.6)$$

e a todas as restrições da formulação (8.2). Dessa forma, inclui-se θ como uma variável a ser otimizada.

No conjunto de restrições (8.6), a variável θ representa a mínima taxa de dados dos usuários secundários. Desta forma, todos os usuários secundários devem ter uma taxa de dados maior ou igual a θ . Assim como $x_{i,s,n^e,p}$, θ também é uma variável a ser otimizada e, portanto, não possui um valor predefinido. Além disso, diferentemente de $x_{i,s,n^e,p}$, que é uma variável binária, θ assume valores contínuos.

8.3 Detalhes para implementação computacional

O problema de otimização (8.2) se trata de um problema de programação linear inteira mista, pois θ assume valores contínuos, enquanto $x_{i,s,n^e,p}$ é uma variável binária, que pode assumir apenas os valores 1 e 0. Para a resolução deste problema no *solver*, a função *cplexmilp*, pertencente à biblioteca CPLEX, foi utilizada IBM (2019b). O funcionamento da função *cplexmilp* é semelhante ao da função *cplexbilp*, utilizada nos problemas de otimização dos capítulos 6 e 7. Assim como na *cplexbilp*, o problema de otimização deve ser colocado na forma matricial na *cplexmilp*.

De acordo com IBM (2019b), a função *cplexmilp* é utilizada para resolução de problemas de programação linear inteira mista e calcula o seguinte:

$$\min f^T \cdot x, \quad (8.7a)$$

$$\text{s.t. } A_{ineq} \cdot x \leq b_{ineq}, \quad (8.7b)$$

$$A_{eq} \cdot x = b_{eq}, \quad (8.7c)$$

$$lb \leq x \leq ub, \quad (8.7d)$$

onde f^T é o transposto do vetor coluna f , e x é um vetor coluna misto, podendo ter valores binários, inteiros, semi-inteiros, contínuos ou semi-contínuos; lb é o vetor de limites inferiores e

ub é o vetor de limites superiores, que são entradas que neste caso podem ser colocadas como vazias na chamada da função.

O processo para colocar o problema de otimização (8.2) na forma matricial é semelhante ao que foi explicado na seção 6.2 do capítulo 6, porém nesta nova configuração algumas manipulações a mais são necessárias. O vetor de decisão x , a ser carregado na função *cplexmilp*, deve compreender uma junção de $x_{i,s,n^e,p}$ e θ , da seguinte forma:

$$x = \begin{bmatrix} x_{1,1,1,1} \\ x_{1,1,1,2} \\ \vdots \\ x_{M,S,N-1,2} \\ \theta \end{bmatrix}_{[M \cdot S \cdot (N-1) \cdot 2 + 1] \times 1} .$$

Dessa forma, o vetor f a ser colocado na função *cplexmilp*, apresenta a seguinte forma:

$$f = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{[M \cdot S \cdot (N-1) \cdot 2 + 1] \times 1} .$$

Por fim, a restrição (8.2e), que apresenta a variável de decisão $x_{i,s,n^e,p}$ em ambos os lados da equação, deve ser modelada de acordo com a lógica $A_1 \cdot x = A_2 \cdot x \Rightarrow (A_1 - A_2) \cdot x = 0$, adequando-se assim ao formato exigido na entrada da *cplexmilp*.

O vetor de decisão x tem um comprimento igual a $M \cdot S \cdot (N - 1) \cdot 2 + 1$. Para um aumento no número de usuários ou subportadoras, o número de instâncias cresce e, consequentemente, também o custo computacional. Uma heurística de custo computacional reduzido foi proposta para a maximização da justiça dos usuários secundários do sistema.

8.4 Heurística proposta

Como o problema de otimização (8.2), estudado neste capítulo, possui uma maior complexidade em comparação aos problemas de otimização apresentados nos capítulos anteriores, nos quais heurísticas obtiveram resultados correspondentes à solução ótima, no presente capítulo, propõe-se uma heurística com desempenho subótimo e baixa complexidade.

8.4.1 O algoritmo

As etapas da solução proposta estão descritas no Algoritmo 3.

Algoritmo 3: Alocação dinâmica de subportadoras para o problema da justiça de usuários

Seja R_0 a taxa de dados requisitada pelo usuário primário;

Seja $R_{\min}(n^e)$ a mínima taxa de dados dos usuários secundários quando um número inteiro n^e é utilizado para colheita de energia;

for $n^e = 1 : N - 1$ **do**

 Calcular as potências coletadas dos usuários secundários, P_{i,n^e}^{total} , com base nas definições da seção 8.1;

 Definir uma fila inicial de prioridades dos usuários secundários, $\{U_1, U_2, \dots, U_M\}$, onde U_1 é o usuário de menor potência coletada e maior prioridade, U_2 é o usuário com a segunda menor potência coletada e a segunda maior prioridade, e assim por diante;

 Seja $S_{disp} = \{1, 2, 3, \dots, S\}$ o conjunto de subportadoras disponíveis para alocação;

for $i=1:M$ **do**

 Para o usuário secundário U_i , alocar a subportadora em que o ganho de canal $g_{i,s}$ é maior e retirar esta subportadora de S_{disp} ;

end

while $S_{disp} \neq \emptyset$ **do**

 Calcular taxas de dados atuais dos usuários secundários, com base na equação (8.3), fazendo $p = 2$;

 Selecionar o usuário secundário com a menor taxa de dados total na instância e alocar do conjunto S_{disp} a subportadora cujo ganho de canal do usuário primário é maior e, em seguida, remover tal subportadora de S_{disp} ;

end

 Com a alocação feita até aqui, calcular a taxa de dados R_0^{inst} instantânea do usuário primário;

if $R_0^{\text{inst}} < R_0$ **then**

 Seja $S_{p=2}$ conjunto de subportadoras em que a ordem de decodificação é $p = 2$;

while $R_0^{\text{inst}} < R_0$ **do**

if $S_{p=2} = \emptyset$ **then**

 Parar laço de repetição;

end

 Selecionar o usuário secundário de maior taxa de dados na última instância, recalculando sua taxa de dados agora considerando $p = 1$ em sua pior subportadora (onde seu ganho de canal é menor) e, em seguida, remover tal subportadora de $S_{p=2}$;

end

end

 Calcular a menor taxa de dados dos usuários secundários, $R_{\min}(n^e)$;

end

A solução será o maior $R_{\min}(n^e) \forall n^e$

Na solução proposta, a ideia é que a mínima taxa de dados individual dos usuários secundários U_i seja calculada e incrementada iterativamente, de modo que no fim, as taxas de dados sejam próximas entre si em alguma medida, respeitando-se a satisfação de QoS do usuário primário U_0 . Inicialmente, assume-se que em todas as subportadoras a ordem de decodificação seja $p = 2$, na qual o usuário primário tem seu sinal decodificado primeiramente e sofre interferência dos usuários secundários que ocupam cada subportadora.

Calculando-se a potência coletada por cada usuário secundário U_i , é definida uma ordem de prioridades iniciais em que, de forma ascendente, o usuário secundário com a menor potência coletada possui maior prioridade, e assim por diante. Como cada usuário secundário precisa utilizar pelo menos uma subportadora, de modo iterativo, seguindo a ordem de prioridades, cada usuário secundário deve ser alocado à sua subportadora de melhor ganho disponível (uma subportadora que ainda não tenha sido alocada). Após esta etapa, restam $S - M$ subportadoras disponíveis para alocação.

Com as primeiras subportadoras alocadas, ao usuário secundário com a menor taxa de dados instantânea calculada deve ser alocada a melhor subportadora do usuário primário disponível. Nesta etapa, a estratégia de alocação de subportadoras é alterada para favorecer o usuário primário U_0 . Vale lembrar que o usuário primário precisa alcançar uma taxa de dados superior ao valor mínimo requisitado, R_0 . O processo de alocação se repete até que todas as subportadoras sejam distribuídas. A cada iteração, a taxa de dados mínima calculada é incrementada com a atribuição de uma nova subportadora ao respectivo usuário secundário selecionado na iteração.

Com todas as subportadoras alocadas, a taxa de dados do usuário primário U_0 é calculada, e se for igual ou superior ao seu valor mínimo exigido, R_0 , o $p = 2$ é mantido em todas as subportadoras. Contudo, se esse critério de QoS do usuário primário não estiver sendo cumprido, inicia-se um processo iterativo de mudança da ordem de decodificação $p = 2$ para $p = 1$ nas subportadoras. Sabe-se que na ordem de decodificação $p = 1$, o usuário primário tem seu sinal decodificado por último e, assim, sofre apenas com a interferência residual do usuário secundário devido ao SIC imperfeito, em vez da interferência completa. Nesta etapa, em cada iteração, é alterada a ordem de decodificação na pior subportadora (de menor ganho de canal) do usuário secundário com maior taxa de dados calculada. Ao fim de cada iteração, a verificação da satisfação de QoS do usuário primário é feita e, se o houver cumprimento desta restrição, a execução sai deste laço de repetição. No pior caso, mesmo que o usuário primário

não alcance a taxa de dados mínima requisitada e a mudança para $p = 1$ tiver sido testada para todas as subportadoras, o laço de repetição interno é encerrado.

Por fim, todas as etapas descritas até aqui ficam dentro de um laço de repetição em que n^e , o número de *slots* para a colheita de energia, é incrementado. Por fim, o n^e escolhido é o que proporciona a maior taxa de dados mínima calculada. Desta forma, a escolha do n^e é feita por busca exaustiva. Na prática, o número de *slots* em um *frame* não é grande o suficiente para provocar um aumento significativo do custo computacional. Assim, a busca exaustiva para a escolha do n^e pode ser aplicada sem grandes dificuldades, assim como nos algoritmos apresentados anteriormente.

8.4.2 Possíveis variações do algoritmo

A estratégia de alocação de subportadoras pode ser alterada dentro da heurística proposta. O Algoritmo 3 possui duas etapas de alocação, sendo que na primeira, o usuário secundário seleciona sua melhor subportadora, sem haver uma preocupação com a interferência que será causada ao usuário primário. Na segunda etapa de alocação de subportadoras, é atribuída a melhor subportadora do usuário primário (dentre as subportadoras ainda não alocadas) ao usuário secundário em pior situação. Portanto, em um primeiro momento é adotada uma estratégia em que não há uma preocupação com o usuário primário e, em seguida, utiliza-se uma estratégia mais cautelosa em relação ao usuário primário.

É possível manter a primeira estratégia nas duas etapas, o que aumenta no algoritmo o efeito de maximização da justiça de usuários secundários sob um custo de maior *outage* do usuário primário. Caso a segunda estratégia seja empregada nas duas etapas, a probabilidade de *outage* do usuário primário deve diminuir, porém, o algoritmo perde desempenho na maximização da justiça de usuários secundários. Como um meio termo entre essas duas abordagens, o Algoritmo 3, pode incorporar as duas estratégias.

8.5 Resultados

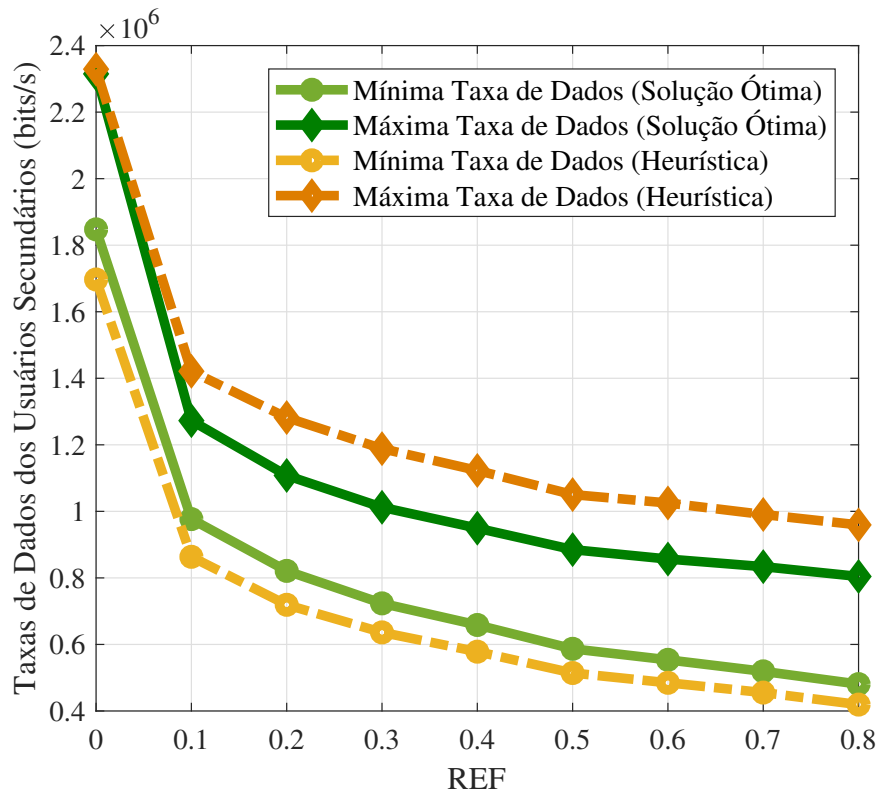
Por meio de simulações computacionais de Monte Carlo com 5 mil amostras no total, soluções para o problema de otimização descrito na formulação (8.2) foram avaliadas. Algumas das configurações básicas e valores de parâmetros são os mesmos dos dois capítulos anteriores. Também com base no modelo definido no capítulo 5, o sistema é formado por uma célula circular onde os usuários são distribuídos uniformemente em um disco com raio externo e raio interno iguais a 10 m e 1 m, respectivamente, com o ponto de acesso localizado no centro da circunferência. A largura de banda do canal é de 1 MHz e o número total de *slots* de tempo em um *frame* é de 20 unidades. Para se evitar um grande custo computacional nas simulações, o número de usuários secundários M é igual a 3, e o número de subportadoras é 6. A potência do ruído é de -104 dBm, e o ganho de canal entre o ponto de acesso e os usuários em cada subportadora é modelado como $10^{-3} \cdot X \cdot d_j^{-3}$, onde d_j é a distância entre o j -ésimo usuário e o ponto de acesso em metros e X é uma variável aleatória distribuída exponencialmente com média unitária. Para cada subportadora é feito um sorteio diferente de X . A eficiência de colheita de energia η , é igual 0,5 e a potência de transmissão do ponto de acesso na etapa da transferência de energia é igual a 5 W.

As duas soluções comparadas nas simulações são a solução ótima obtida com a função *cplexmilp* da biblioteca de otimização CPLEX, conforme explicado na seção 8.3, e a solução subótima proposta na seção 8.4. Primeiramente, o comparativo se baseia na análise da mínima taxa de dados dos usuários secundários, que deve ser maximizada, e da máxima taxa de dados dos usuários secundários em função do REF, considerando $R_0 = 200\text{kbits/s}$. Por meio dessa análise, é possível perceber o nível de justiça alcançado por cada solução. Ademais, avalia-se como o REF influencia na probabilidade de *outage* do usuário primário. Em seguida, verifica-se a probabilidade de *outage* do usuário primário nas duas soluções em função de R_0 , considerando o SIC ideal (REF = 0).

Na Figura 28, mostra-se a média dos valores máximos e mínimos de taxa de dados dos usuários secundários em função de REF para as duas soluções analisadas. Como observação mais importante, este resultado indica que a solução ótima alcança um grau de justiça entre os usuários secundários superior ao alcançado pela heurística, pois suas curvas de mínima taxa de dados e máxima taxa de dados estão mais próximas entre si do que as curvas referentes obtidas com a heurística. Além disso, quanto maior é a maximização da mínima taxa de dados dos usuários secundários, maior é a justiça alcançada, como explicado anteriormente. Apenas pela

observação dos valores mínimos já seria possível concluir que a solução ótima alcança maior justiça. A Figura 28 tem como base as amostras em que ambas as soluções apresentaram um resultado válido para o problema de otimização. Assim, mesmo quando a heurística propõe um solução válida para o problema de otimização (8.2), ou seja, uma alocação de recursos que respeita as restrições do problema de otimização, há uma tendência da justiça alcançada ser inferior ao resultado da solução ótima. Conforme o esperado, a heurística não atinge o desempenho ótimo, porém esta não deixa de ser uma alternativa interessante por se tratar de uma solução relativamente simples.

Figura 28 – Média de mínima taxa de dados e máxima taxa de dados dos usuários secundários em função de REF com $R_0 = 200$ kbits/s.

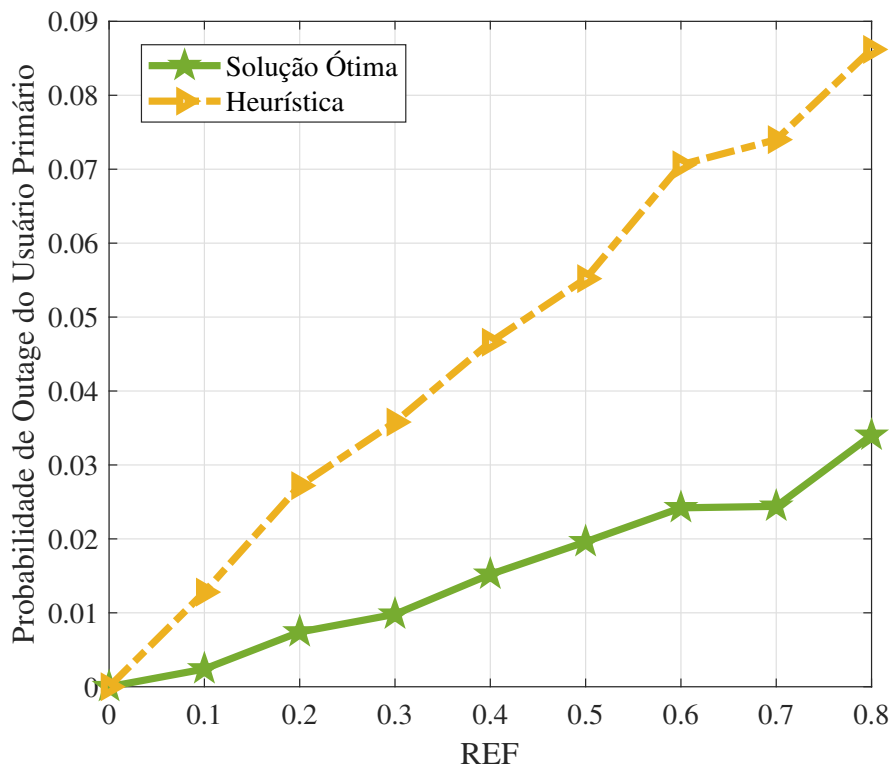


Fonte: Autoral.

Conhecendo a probabilidade de *outage* do usuário primário, é possível inferir a probabilidade de uma solução oferecer um resultado válido para o problema de otimização, isto é, a probabilidade de sucesso. Esta última probabilidade pode ser calculada como $P_r^S = 1 - P_r^O$, onde P_r^O é a probabilidade de *outage* do usuário primário. Na Figura 29, observa-se a probabilidade de *outage* do usuário primário em função do REF. A solução ótima apresenta um crescimento lento na probabilidade de *outage* do usuário primário neste gráfico. Mesmo em valores altíssimos de REF, a solução ótima ainda apresenta uma alta probabilidade de sucesso. A heurística, por

sua vez, demonstra maior sensibilidade ao SIC imperfeito, tendo seu desempenho degradado em maior impacto com o aumento de REF. Contudo, é importante observar que a escala de REF mostrada no gráfico vai até valores muito elevados, simulando péssimas condições de SIC imperfeito. Para valores baixos de REF, a heurística se aproxima da solução ótima.

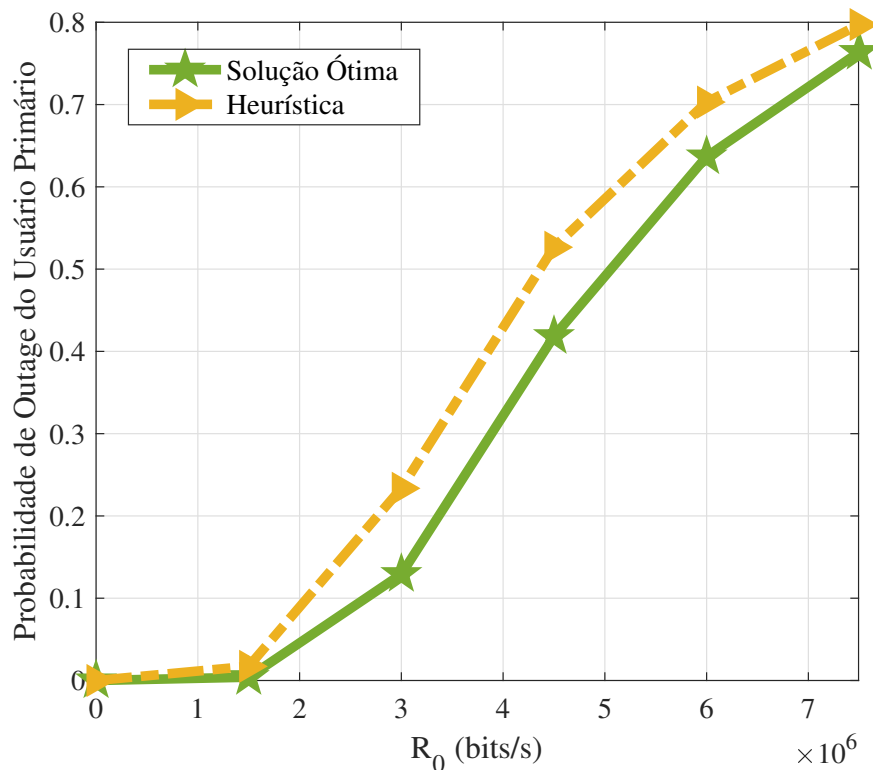
Figura 29 – Probabilidade de *outage* do usuário primário em função de REF com $R_0 = 200$ kbits/s.



Fonte: Autoral.

Para análise do desempenho da heurística no SIC ideal, simulações foram feitas com a taxa de dados requisitada pelo usuário primário, R_0 , no eixo das abscissas. Na Figura 30, mostra-se a probabilidade de *outage* do usuário primário em função de R_0 . Percebe-se que no SIC ideal, o aumento de R_0 causa um impacto semelhante nas duas soluções em termos de probabilidade de *outage* do usuário primário. Assim como os demais resultados apresentados nesta seção, o sistema é levado a situações extremas para que seja possível estimar até que ponto as soluções observadas são viáveis. O aumento extremo de R_0 provoca altíssimas probabilidades de *outage* em ambas as soluções. Diferentemente do que foi observado na situação da Figura 29, onde há uma distância crescente entre as duas soluções, a heurística apresenta um comportamento mais razoável na Figura 30, onde se observa maior conformidade com a solução ótima.

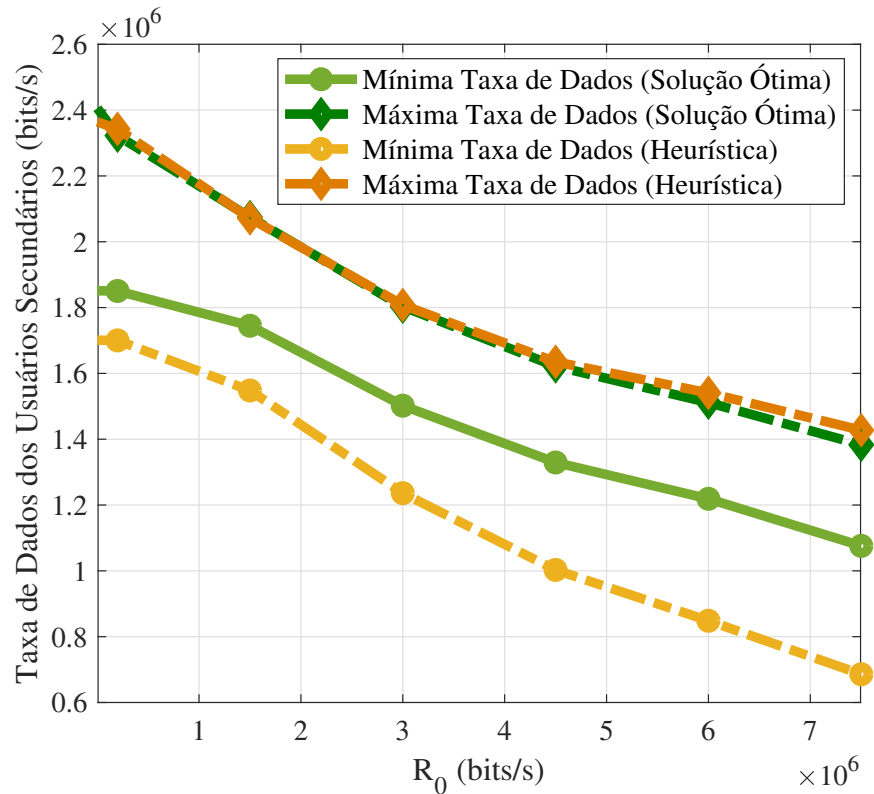
Figura 30 – Probabilidade de *outage* do usuário primário em função de R_0 com REF = 0.



Fonte: Autoral.

A Figura 31 mostra a média da mínima taxa de dados e da máxima taxa de dados dos usuários secundários em função de R_0 , considerando REF = 0. Por esse resultado, é possível notar o quanto cada solução consegue maximizar a justiça entre os usuários secundários nas circunstâncias observadas. Observa-se que os valores de máxima taxa de dados dos usuários secundários obtidos com a heurística e na solução ótima estão próximos em todo o gráfico. Em contrapartida, a heurística apresenta uma nítida desvantagem na mínima taxa de dados do usuário secundário, que se acentua com o aumento de R_0 . É perceptível a degradação do efeito de maximização da justiça de usuários secundários na heurística quando os valores de R_0 são elevados na Figura 31. É importante salientar, no entanto, que os valores de R_0 mostrados no gráfico são elevados. De acordo com o modelo inicialmente definido no capítulo 5, espera-se que R_0 seja pequeno. O intuito por trás destas simulações é observar o comportamento de cada solução em condições adversas, para que fiquem evidentes os limites razoáveis de atuação da heurística.

Figura 31 – Média de mínima taxa de dados e máxima taxa de dados dos usuários secundários em função de R_0 com $REF = 0$.



Fonte: Autoral.

8.6 Conclusões deste capítulo

De acordo com os resultados observados, é possível notar que a heurística proposta na seção 8.4 tem limitações, mas pode ser uma solução subótima vantajosa para baixos valores de REF e R_0 . Se o valor de REF não for muito elevado, pode-se dizer que a heurística proposta tem uma elevada probabilidade de sucesso nas condições observadas, como mostrado na Figura 29 e na Figura 30. Semelhantemente, se R_0 for pequeno, o efeito de maximização da justiça de usuários secundários da heurística é mais eficiente. Além disso, a heurística proposta se trata de uma solução relativamente simples para um problema de alta complexidade. Na prática, a escolha de qual solução utilizar depende de um compromisso entre eficácia e custo da solução. A solução ótima exige um grande processamento computacional, pois quanto maior é o número de usuários e subportadoras no sistema, maior é o número de alocações possíveis de subportadoras por usuário, o que aumenta substancialmente o custo computacional.

9 CONCLUSÕES GERAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

A pesquisa desenvolvida se concentra na alocação de recursos de rádio em um cenário característico de IoT com CR-NOMA, tendo três principais focos de estudo, discutidos nos capítulos 6, 7 e 8, partindo do modelo de sistema WPCN descrito no capítulo 5. Para uma maior compreensão do contexto e da relevância da pesquisa apresentada, os primeiros capítulos desta obra oferecem uma base teórica ao leitor.

O modelo apresentado no capítulo 5 possui características práticas, como a divisão do *frame* em um número inteiro de *slots* de tempo, o SIC imperfeito e a diferença de prioridades de usuários, assumindo-se que há um usuário prioritário que é sensível ao atraso de comunicação e os demais usuários possuem maior tolerância ao atraso. Além do conhecimento matemático e científico, a preocupação com a implementação de soluções na prática é fundamental na engenharia.

No capítulo 6, foi formulado o problema da maximização da taxa de dados do usuário secundário admitido. É visto que o desempenho do algoritmo de SIC híbrido proposto por DING *et al.* (2020a) coincide com a solução ótima para um cenário de SIC ideal. Contudo, esse algoritmo perde qualidade no SIC imperfeito, pois o REF não é levado em conta. Dessa forma, uma heurística foi proposta como uma versão adaptada desse algoritmo para o SIC imperfeito, alcançando a solução ótima.

No capítulo 7, o problema da maximização da taxa de dados do usuário secundário foi expandido com a inclusão da possibilidade de controle de potência dos usuários secundários no *uplink*. Duas variantes de SIC que incluem o controle de potência foram incluídas no *framework* do problema de otimização, expandindo-se o espaço de busca e o espaço de soluções. Uma heurística foi proposta para a resolução desse problema, novamente alcançando o desempenho ótimo. No fim, é mostrado que, no SIC imperfeito, o controle de potência diminui a probabilidade de *outage* do usuário secundário admitido.

No capítulo 8, mostrou-se a formulação do problema da maximização da justiça entre os usuários secundários com o uso de múltiplas subportadoras. Por ser um problema de otimização de maior complexidade, foi desenvolvida uma solução subótima neste estudo. O algoritmo proposto tem desempenho degradado por altos valores de REF e QoS do usuário primário, porém, funciona quando estes valores são pequenos.

Para estudos futuros, outros problemas de otimização podem ser formulados com base no modelo apresentado, como maximização da eficiência energética e da eficiência espectral.

Como uma continuação do que foi mostrado no capítulo 7, seria interessante uma análise sobre o impacto da redução do consumo energético nas técnicas de controle de potência. Um estudo mais aprofundado sobre a duração do tempo de colheita de energia também seria apropriado. Além disso, outras premissas podem ser exploradas no contexto apresentado, tornando-o mais realista, como um modelo de colheita de energia não-linear, entre outros caminhos possíveis.

REFERÊNCIAS

- 3GPP. *Advanced plans for 5G*. 2021. 3rd Generation Partnership Project (3GPP) - The Mobile Broadband Standard. Disponível em: <<https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/advanced-5g>>. Acesso em: 01 de agosto de 2023.
- ABD-ELNABY, M.; SEDHOM, G. G.; EL-RABAIE, E.-S. M.; ELWEKEIL, M. NOMA for 5G and beyond: literature review and novel trends. **Wireless Networks (Springer)**, v. 29, p. 1629—1653, 2022.
- AL-DULAIMI, O. M. K.; AL-DULAIMI, A. M. K.; ALEXANDRA, M. O.; AL-DULAIMI, M. K. H. Strategy for Non-Orthogonal Multiple Access and Performance in 5G and 6G Networks. **Sensors**, fevereiro 2023.
- ALECRIM, E. **Tecnologias 2G e 2,5G: TDMA, CDMA, GSM, GPRS e EDGE**. 2012. Infowester. Disponível em: <<https://www.infowester.com/2g.php>>. Acesso em: 21 de junho de 2023.
- ANATEL. **5G Core (5GC)**. 2022. Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel). Disponível em: <<https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/5G/tecnologia-5g>>. Acesso em: 01 de agosto de 2023.
- BALASUBRAMANYA, N. M.; GUPTA, A.; SELLATHURAI, M. Combining Code-Domain and Power-Domain NOMA for Supporting Higher Number of Users. **2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)**, fevereiro 2019.
- BELLIS, M. **Alexander Graham Bell's Photophone Was An Invention Ahead of Its Time**. 2023. Disponível em: <<https://www.thoughtco.com/alexander-graham-bells-photophone-1992318>>. Acesso em: 21 de junho de 2023.
- BERGAMO, R. T. *Comunicações Móveis*. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), 2014.
- BI, S.; ZENG, Y.; ZHANG, R. Wireless powered communication networks: an overview. **IEEE Wireless Communications**, v. 23, n. 2, p. 10–18, abril 2016.
- BI, S.; ZENG, Y.; ZHANG, R. Wireless Powered Communication Networks: An Overview. **IEEE Wireless Communications**, v. 23, p. 10—18, maio 2016.
- BJÖRNSSON, E. **Is There a Future for NOMA?** 2021. Blog Wireless Future. Disponível em: <<https://ma-mimo.ellintech.se/2021/04/15/is-there-a-future-for-noma/>>. Acesso em: 03 de agosto de 2023.
- CASTRO, M. C. F. **Técnicas de Acesso Múltiplo para Comunicações Wireless**. Capítulo 4 das notas de aula da referida autora para a disciplina de Comunicações Celulares no curso de Engenharia Elétrica da PUCRS. Disponível em: <http://fccdecastro.com.br/pdf/CC_Cap4.pdf>. Acesso em: 30 de julho de 2023.
- CHEN, Y.; ZHU, P.; TONG, W. **ITU-R WP5D Completed the Recommendation Framework for IMT-2030 (Global 6G Vision)**. 2023. Disponível em: <<https://www.huawei.com/br/huaweitech/future-technologies/itu-r-wp5d-completed-recommendation-framework-imt-2030>>. Acesso em: 05 de outubro de 2023.

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.

CISCO. **What Is OFDMA?** Cisco Systems, Inc. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/products/wireless/what-is-ofdma.html>>. Acesso em: 01 de agosto de 2023.

COSTA, E. **The Smart Cities of Tomorrow Enabled by 5G and IoT.** 2020. Canada's Centre of Excellence in Next Generation Networks (CENGN). Disponível em: <<https://www.cengn.ca/information-centre/innovation/timeline-from-1g-to-5g-a-brief-history-on-cell-phones/>>. Acesso em: 04 de julho de 2023.

CUNHA, G. C. Eventos de interrupção: Estudo em Estações Rádio Base (ERB) de uma Operadora de Telefonia Móvel. Universidade Federal da Bahia (UFBA), 2017.

DAI LINGLONG; WANG, B. D. Z. W. Z. C. S. H. L. A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 20, n. 3, p. 2294–2323, terceiro trimestre 2018.

DAROS, G. **Por que indústria planeja 6G para 2030 se não tem 5G em todo o Brasil?** 2023. Canal Tilt do Portal UOL. Disponível em: <<https://www.uol.com.br/tilt/noticias/redacao/2023/03/07/o-que-e-6g-quando-chega-qual-velocidade-nova-rede-no-brasil-melhor-que-5g.htm>>. Acesso em: 01 de agosto de 2023.

DIAMANTOULAKIS, P. D.; PAPPI, K. N.; DING, Z.; KARAGIANNIDIS, G. K. Wireless-Powered Communications With Non-Orthogonal Multiple Access. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 15, n. 12, p. 8423–8425, dezembro 2016.

DING, Z. Harvesting Devices' Heterogeneous Energy Profiles and QoS Requirements in IoT: WPT-NOMA vs BAC-NOMA. **IEEE Transactions on Communications**, v. 69, n. 5, p. 2837–2850, 2021.

DING, Z.; LEI, X.; KARAGIANNIDIS, G. K.; SCHOBBER, R.; YUAN, J.; BHARGAVA, V. A Survey on Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Networks: Research Challenges and Future Trends. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 35, n. 10, p. 2181–2195, 2017.

DING, Z.; SCHOBBER, R.; POOR, V. Unveiling the Importance of SIC in NOMA Systems—Part 1: State of the Art and Recent Findings. **IEEE Communications Letters**, v. 24, n. 11, p. 2373–2377, novembro 2020.

DING, Z.; SCHOBBER, R.; POOR, V. Unveiling the Importance of SIC in NOMA Systems—Part 2: New Results and Future Directions. **IEEE Communications Letters**, v. 24, n. 11, p. 2378–2382, novembro 2020.

DRULLIS, G. **Fotofone, o primeiro dispositivo de comunicação sem fio.** 2023. Disponível em: <<https://www.mobiletime.com.br/museu-movel/02/06/2023/fotofone-o-primeiro-dispositivo-de-comunicacao-sem-fio/>>. Acesso em: 21 de junho de 2023.

ERICSSON. **5G Advanced.** Disponível em: <<https://www.ericsson.com/en/5g/5g-networks/5g-advanced>>. Acesso em: 01 de agosto de 2023.

ERICSSON. **5G Advanced: Evolution towards 6G.** Disponível em: <<https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/5g-advanced-evolution-towards-6g>>. Acesso em: 01 de agosto de 2023.

- ERICSSON. **5G Core (5GC)**. Disponível em: <<https://www.ericsson.com/en/core-network/5g-core>>. Acesso em: 01 de agosto de 2023.
- ERICSSON. **Wha is 6G?** Disponível em: <<https://www.ericsson.com/en/6g>>. Acesso em: 01 de agosto de 2023.
- EZHILARASAN, E.; DINAKARAN, M. A Review on Mobile Technologies: 3G, 4G and 5G. 2017 Second International Conference on Recent Trends and Challenges in Computational Models (ICRTCCM), fevereiro 2017.
- FERREIRA, L. S.; CORREIA, L. M. Evolução e desafios das redes de comunicações móveis. *Kriavit-Tech*, v. 1, n. 1, abril 2018.
- FOROUZAN, B. A. **Comunicação de Dados e Redes de Computadores - 4ª Edição**. [S.l.]: AMGH, 2008. ISBN 8586804886, 978-8576051985.
- GALAZZO, R. **Timeline from 1G to 5G: A Brief History on Cell Phones**. 2020. Canada's Centre of Excellence in Next Generation Networks (CENGN). Disponível em: <<https://www.cengn.ca/information-centre/innovation/timeline-from-1g-to-5g-a-brief-history-on-cell-phones/>>. Acesso em: 19 de junho de 2023.
- GHAFOOR, U.; ALI, M.; KHAN, H. Z.; SIDDIQUI, A. M.; NAEEM, M. NOMA and future 5G B5G wireless networks: A paradigm. **Journal of Network and Computer Applications (ScienceDirect)**, v. 204, agosto 2022.
- GUO, C.; LIAO, B.; HUANG, L.; LI, Q.; LIN, X. Convexity of Fairness-Aware Resource Allocation in Wireless Powered Communication Networks. **IEEE Communications Letters**, v. 20, n. 3, p. 474–477, março 2016.
- HAN, K.; HUANG, K. Wirelessly Powered Backscatter Communication Networks: Modeling, Coverage and Capacity. 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), dezembro 2016.
- HASSAN, M.; SINGH, M.; HAMID, K.; SAEED, R.; ABDELHAQ, M.; ALSAQOUR, R.; ODEH, N. Enhancing NOMA's Spectrum Efficiency in a 5G Network through Cooperative Spectrum Sharing. **Eletronics (MDBI)**, v. 12, n. 4, fevereiro 2023.
- HAYKIN, S.; MOHER, M. **Sistemas Modernos de Comunicações Wireless**. [S.l.]: Bookman, 2008. ISBN 8560031995, 9788560031993.
- HELDER, D. **DynaTAC 8000X: 1ª ligação via celular completa 50 ano hoje**. 2023. Portal g1. Disponível em: <<https://g1.globo.com/tecnologia/noticia/2023/04/03/tijolao-sem-tela-e-carro-conheca-o-primeiro-celular-do-mundo-que-esta-completando-50-anos.ghml>>. Acesso em: 23 de julho de 2023.
- HIDALGO, L. **O extraordinário motivo que acelerou invenção dos telefone celulares**. 2020. BBC News Brasil. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/curiosidades-52976778>>. Acesso em: 23 de julho de 2023.
- IBM. **CPLEX for MATLAB**. Detalhes da biblioteca CPLEX para o MATLAB. Disponível em: <<https://www.ibm.com/docs/en/icos/12.10.0?topic=cplex-matlab>>. Acesso em: 04 de outubro de 2023.

IBM. **cplexbilp**. 2019. Detailed Description. Disponível em: <https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSSA5P_12.9.0/ilog.odms.cplex.help/refmatlabcp/plex/html/cplexbilp-m.html>. Acesso em: 04 de setembro de 2023.

IBM. **cplexmilp**. 2019. Detailed Description. Disponível em: <<https://www.ibm.com/docs/en/icos/12.9.0?topic=functions-cplexmilp>>. Acesso em: 04 de setembro de 2023.

ISLAM, S. M. R.; ARAZOV, N.; DOBRE, O. A.; KWAK, K.-s. Power-Pomain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 19, n. 2, p. 721–742, segundo trimestre 2017.

JONSSON, P.; LUNDVALL, A.; MÖLLER, R.; CARSON, S.; DAVIES, S. Ericsson Mobility Report, November 2022. Ericsson, novembro 2022.

JONSSON, P.; LUNDVALL, A.; MÖLLER, R.; CARSON, S.; DAVIES, S. Ericsson Mobility Report, June 2023. Ericsson, junho 2023.

KIZILIRMAK, R. C. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for 5G Networks. IntechOpen, dezembro 2016. Do livro "Towards 5G Wireless Networks - A Physical Layer Perspective".

KUMAR, P.; SUMIT. Review Paper on Development of Mobile Wireless Technology. International Conference on Recent Trends in Computing (ICRTCE-2021), 2021.

LOPES, G. A. **Composição de u Sistema Móvel Celular**. Arquivos do Grupo de Teleinformática e Automação (GTA) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Disponível em: <<https://www.gta.ufrj.br/grad/goncalo/compos.htm>>. Acesso em: 21 de junho de 2023.

LOPES, G. A. **História da Telefonia Móvel**. Arquivos do Grupo de Teleinformática e Automação (GTA) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Disponível em: <<https://www.gta.ufrj.br/grad/goncalo/historia.htm>>. Acesso em: 23 de julho de 2023.

LV, L.; CHEN, J.; NI, Q.; DING, Z.; JIANG, H. Cognitive Non-Orthogonal Multiple Access with Cooperative Relaying: A New Wireless Frontier for 5G Spectrum Sharing. **IEEE COMMUNICATIONS MAGAZINE**, v. 56, p. 188–195, abril 2018.

MADRIGAL, A. C. **The 1947 Paper That First Described a Cell-Phone Network**. 2011. Disponível em: <<https://www.theatlantic.com/technology/archive/2011/09/the-1947-paper-that-first-described-a-cell-phone-network/245222/>>. Acesso em: 23 de julho de 2023.

MAGALHÃES, A. L. **Quais são as diferenças entre redes 1G, 2G, 3G, 4G, 5G e 6G?** 2021. Portal CanalTech. Disponível em: <<https://canaltech.com.br/internet/diferencas-entre-1g-2g-3g-4g-5g-6g/>>. Acesso em: 21 de junho de 2023.

MANGLAYEV, T.; KIZILIRMAK, R. C.; KHO, Y. H.; BAZHAYEV, N.; LEBEDEV, I. Code domain non-orthogonal multiple access schemes for 5G and beyond communication networks: A review. IEEE EUROCON 2017 -17th International Conference on Smart Technologies, agosto 2017.

MARIN, J. **DynaTAC 8000X: 1ª ligação via celular completa 50 ano hoje**. 2023. TecMundo. Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/dispositivos-moveis/262500-dynatac-8000x-1-ligacao-via-celular-completa-50-anos.htm>>. Acesso em: 23 de julho de 2023.

MELO, J. d. O. Otimização de sistemas de comunicação sem fio com acesso múltiplo não-ortogonal e transferência de energia. Universidade Federal do Ceará (UFC), 2020. Trabalho de Conclusão de Curso publicado pela UFC, Campus de Sobral.

MELO, J. d. O.; SOUSA, R. E. d.; LIMA, F. R. QoS Guarantees in NOMA-based Wireless Powered Communications. **XXXVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2020)**, 2020. Disponível em: <<https://biblioteca.sbrt.org.br/articles/2336>>. Acesso em: 8 de fevereiro de 2022.

MIANDOAB, F. T.; TAZEHKAND, B. M. NOMA performance enhancement-based imperfect SIC minimization using a novel user pairing scenario involving three users in each pair. **Wireless Networks, Springer**, v. 26, p. 3735—3748, 2020.

MISHRA, D.; DE, S. *i*²RES: Integrated Information Relay and Energy Supply Assisted RF Harvesting Communication. **IEEE Transactions on Communications**, v. 65, n. 3, p. 1274–1288, março 2017.

MOSCHEN, V. **Martin Cooper | Quem inventou celular?** 2023. Portal CanalTech. Disponível em: <<https://canaltech.com.br/smartphone/martin-cooper-quem-inventou-o-celular-245354/>>. Acesso em: 23 de julho de 2023.

MUHAMMED, A. J.; MA, Z.; DIAMANTOULAKIS, P. D.; LI, L.; KARAGIANNIDIS, G. K. Energy-Efficient Resource Allocation in Multicarrier NOMA Systems With Fairness. **IEEE Transactions on Communications**, v. 67, n. 12, p. 8639–8654, dezembro 2019.

NOKIA. **What is 5GAdvanced?** Disponível em: <<https://www.nokia.com/networks/5g/5g-advanced/>>. Acesso em: 01 de agosto de 2023.

PERERA, T. D. P.; JAYAKODY, D. N. K.; SHARMA, S. K.; CHATZINOTAS, S.; LI, J. Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT): Recent Advances and Future Challenges. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 20, n. 1, p. 264–302, primeiro trimestre 2018.

PIVARO, G. F. Redução da taxa de queda de chamada em rede celular gsm por meio de ajustes dos parâmetros de cobertura. Universidade de São Paulo (USP), 2008. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18155/tdc-30072008-100317/publico/DissertacaoGabriel_VersaoFinal.pdf>. Acesso em: 22 de julho de 2023.

QUALCOMM. **Everything you need to know about 5G.** Disponível em: <<https://www.qualcomm.com/5g/what-is-5g>>. Acesso em: 04 de julho de 2023.

RAPPAPORT, T. S. **Comunicações Sem Fio: Princípios e Práticas - 2ª Edição.** [S.l.]: Pearson Universidades, 2008. ISBN 8576051982, 9788576051985.

REZVANI, S.; JORSWIECK, E. A.; JODA, R.; YANIKOMEROGLU, H. Optimal Power Allocation in Downlink Multicarrier NOMA Systems: Theory and Fast Algorithms. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 40, n. 4, p. 1162–1189, abril 2022.

RODRIGUES, S. **1º celular do mundo levava horas carregando e pesava quatro iPhones 1 Plus.** 2023. Portal UOL. Disponível em: <<https://www.uol.com.br/tilt/noticias/redacao/2023/05/25/1-celular-do-mundo-levava-10-horas-carregando-e-so-funcionava-30-minutos.htm>>. Acesso em: 23 de julho de 2023.

SAGENTIA. Energy Harvesting. Sagentia, 2011. Disponível em: <<https://www.sagentia.com/files/2015/12/Energy-Harvesting.pdf>>. Acesso em: 14 de agosto de 2023.

SANTOS, R. D. L. **Redes GSM, GPRS, EDGE e UMTS**. 2008. UFRJ. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2008_2/ricardo/index.html>. Acesso em: 03 de julho de 2023.

SHUKLA, A.; KUMAR, M.; DEOLIA, V. K. Code domain non-orthogonal multiple access schemes for 5G and beyond communication networks: A review. **Journal of Engineering Research (JER)**, v. 10, n. 4, p. 132–152, 2021.

SILVA, L. d. C. S. Do 1G ao 5G: Evolução das Redes de Telefonia Móvel. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), 2016.

SULTAN, A. **5G System Overview**. 2022. 3rd Generation Partnership Project (3GPP) - The Mobile Broadband Standard. Disponível em: <<https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview>>. Acesso em: 01 de agosto de 2023.

SUN, Y.; DING, Z.; DAI, X. A New Design of Hybrid SIC for Improving Transmission Robustness in Uplink NOMA. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 70, n. 5, p. 5083–5087, 2021.

TELECO, P. **Rede GSM I: Telefonia Celular. Seção: Tutoriais Telefonia Celular**. 2008. Teleco - Inteligência em Telecomunicações. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialalambcell/pagina_2.asp>. Acesso em: 18 de julho de 2023.

TELECO, P. **5G: 5G NR**. 2022. Teleco - Inteligência em Telecomunicações. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorial5gnr/pagina_5.asp>. Acesso em: 01 de agosto de 2023.

TERVO, O.; LEVANEN, T.; PAJUKOSKI, K.; HULKKONEN, J.; WAINIO, P.; VALKAMA, M. 5G New Radio Evolution Towards Sub-Thz Communications. **2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)**, maio 2020.

ULUKUS, S.; YENER, A.; ERKIP, E.; SIMEONE, O.; ZORZI, M.; GROVER, P.; HUANG, K. Energy Harvesting Wireless Communications: A Review of Recent Advances. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 33, n. 3, p. 360–381, março 2015.

VINHAL, M. P. Evolução da tecnologia móvel celular, cumprimento de leis e análise de modelos de propagação. Universidade Federal de Uberlândia (UFU), setembro 2020.

VOSS, D. S.; POFFENBERGER, L.; LEVINE, A. G.; BENNETT-KARASIK, N. This Month in Physics History - December 17, 1902: First Radio Message to Cross the Atlantic from North America. *APS News*, v. 28, n. 11, dezembro 2021.

WYMORE, K. **Shrinkin the World: Marconi's Revolution in Wireless Telegraphy**. 2021. Disponível em: <<https://www.allaboutcircuits.com/news/shrinking-the-world-marconis-revolution-in-wireless-telegraphy/>>. Acesso em: 21 de junho de 2023.

YANG, Z.; HUSSEIN, J. A.; XU, P.; CHEN, G.; WU, Y.; DING, Z. A Novel Hybrid Successive Interference Cancellation for Uplink Wireless Power Transfer NOMA in Internet of Things. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 72, n. 5, p. 6090–6102, maio 2023.

YANG, Z.; XU, W.; PAN, Y.; PAN, C.; CHEN, M. Optimal Fairness-Aware Time and Power Allocation in Wireless Powered. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 66, n. 7, p. 3122–3135, fevereiro 2018.

ZENG, M.; NGUYEN, N.-P.; DOBRE, O. A.; DING, Z.; POOR, H. V. Spectral- and Energy-Efficient Resource Allocation for Multi-Carrier Uplink NOMA Systems. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 68, n. 9, p. 9293–9296, setembro 2019.