



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS SOBRAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

IRAN MESQUITA BRAGA JÚNIOR

**ALOCAÇÃO DE RECURSOS NA FREQUÊNCIA E POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO
PARA SISTEMAS SC-FDMA COM SATISFAÇÃO DE QOS**

SOBRAL

2017

IRAN MESQUITA BRAGA JÚNIOR

ALOCAÇÃO DE RECURSOS NA FREQUÊNCIA E POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO PARA
SISTEMAS SC-FDMA COM SATISFAÇÃO DE QOS

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

Orientador: Prof. Dr. Francisco Rafael Marques Lima

SOBRAL

2017

IRAN MESQUITA BRAGA JÚNIOR

ALOCAÇÃO DE RECURSOS NA FREQUÊNCIA E POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO PARA
SISTEMAS SC-FDMA COM SATISFAÇÃO DE QOS

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

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Carlos Alexandre Rolim
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

À Deus, por me dar força e coragem durante essa longa jornada e à toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus que permitiu concluir mais uma fase importante na minha vida.

Agradeço de forma especial ao meu pai Iran Mesquita Braga e à minha mãe Maria Clertinha Braga, por não medirem esforços para que eu pudesse levar meus estudos adiante, aos meus irmãos por estarem sempre ao meu lado e entenderem minha ausência nos momentos de dedicação aos estudos, aos meus avós, pelo carinho e conselhos e aos meus tios e tias que, na medida do possível, também ajudaram ao longo dessa jornada.

Ao meu orientador Rafael Lima, pela paciência, organização e apoio no desenvolvimento deste trabalho e de tantos outros. Não poderia deixar também de agradecer aos demais professores pelos ensinamentos e incentivos durante todo esse tempo, em especial aos professores Iális Cavalcante e Luis Eduardo, os quais foram meus tutores no Programa de Educação Tutorial.

Agradeço aos meus amigos Francisco Wilson, Thiago Resende, Kennedy Abreu, Victor Pereira e Juno Saraiva pelos momentos de descontração e incentivo. A todos os meus colegas do Programa de Educação Tutorial, em especial ao Weskley Vinícius, a Brena Lima, o Syllas Rangel e a Eloise de Carvalho que me ajudaram em diversas vezes, não só apenas no desenvolvimento deste trabalho.

A esta universidade e todo seu corpo docente, além da direção e a administração, que realizam seu trabalho com tanto amor e dedicação, trabalhando incansavelmente para que nós, alunos, possamos contar com um ensino de extrema qualidade.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“Cada sonho que você deixa pra trás, é um pedaço do seu futuro que deixa de existir.”

(Steve Jobs)

RESUMO

Este trabalho propõe uma solução ótima para o problema de alocação de recursos em termos de frequência e potência de transmissão empregando a técnica de múltiplo acesso por divisão de frequência com portadora única SC-FDMA (do inglês, *Single Carrier-Frequency Division Multiple Access*) no enlace reverso do sistema LTE (do inglês, *Long Term Evolution*). O principal objetivo desse trabalho consiste em minimizar a potência total transmitida de um sistema celular com múltiplos serviços e restrições que assegurem um percentual mínimo de usuários satisfeitos para cada serviço. Através de manipulações algébricas, convertemos um problema inteiro não linear em um problema inteiro e linear a fim de obter a solução ótima. Os resultados obtidos através de simulações computacionais mostram a importância da alocação adaptativa de potência no contexto de redes celulares sem fio.

ABSTRACT

This work proposes an optimal solution to frequency and power resource allocation employing Single Carrier - Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) in the uplink of Long Term Evolution (LTE). The main objective is to minimize the total transmitted power in a cellular and multiservice system with constraints on the percentage of users that should be satisfied per service. Through algebraic manipulations we were able to convert an integer nonlinear optimization problem in an Integer Linear Problem (ILP) so as to obtain the optimal solution. Results of computer simulations show the importance of adaptive power allocation in the context of wireless cellular networks.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama do esquema SC-FDMA. Adaptada de (WIKIPEDIA, 2008)	15
Figura 2 – Taxa de <i>outage</i> para as soluções URM, CRM e para a solução proposta nos cenários 1, 2 e 3.	32
Figura 3 – Taxa de <i>outage</i> para as soluções URM, CRM e para a solução proposta nos cenários 4, 5 e 6.	33
Figura 4 – Taxa de <i>outage</i> para as soluções URM, CRM e para a solução proposta nos cenários 7, 8 e 9.	34
Figura 5 – Taxa de dados média para as soluções URM, CRM e para a solução proposta nos cenários 1, 2 e 3.	35
Figura 6 – Taxa de dados média para as soluções URM, CRM e para a solução proposta nos cenários 4, 5 e 6.	36
Figura 7 – Taxa de dados média para as soluções URM, CRM e para a solução proposta nos cenários 7, 8 e 9.	36
Figura 8 – Percentual de potencial utilizada pelas soluções URM, CRM e para a solução proposta nos cenários 1, 2 e 3.	37
Figura 9 – Percentual de potencial utilizada pelas soluções URM, CRM e para a solução proposta nos cenários 4, 5 e 6.	38
Figura 10 – Percentual de potencial utilizada pelas soluções URM, CRM e para a solução proposta nos cenários 7, 8 e 9.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Mapeamento entre taxa de dados e SNR.	23
Tabela 2 – Principais Parâmetros para Simulação	31
Tabela 3 – Parâmetros dos cenários considerados.	31

LISTA DE ABREVIATURAS

3GPP	do inglês, <i>3rd Generation Partnership Project</i>
BB	do inglês, <i>Branch and Bound</i>
CRM	do inglês, <i>Constrained Rate Maximization</i>
DFT	do inglês, <i>Discrete Fourier Transform</i>
ERB	Estação Rádio Base
FDM	do inglês, <i>Frequency Division Multiplexing</i>
FTP	do inglês, <i>File Transfer Protocol</i>
IDFT	do inglês, <i>Inverse Discrete Fourier Transform</i>
ILP	do inglês, <i>Integer Linear Programming</i>
IP	do inglês, <i>Internet Protocol</i>
ISI	do inglês, <i>Intersymbol Interference</i>
LTE	do inglês, <i>Long Term Evolution</i>
MCS	do inglês, <i>Modulation and Coding Scheme</i>
MMSE	do inglês, <i>Minimum Mean Square Error</i>
OFDM	do inglês, <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	do inglês, <i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PAPR	do inglês, <i>Peak-to-Average Power Ratio</i>
QoE	do inglês, <i>Quality of Experience</i>
QoS	do inglês, <i>Quality of Service</i>
RB	do inglês, <i>Resource Block</i>
RRA	do inglês, <i>Radio Resource Allocation</i>
SC-FDMA	do inglês, <i>Single Carrier-Frequency Division Multiple Access</i>
SNR	do inglês, <i>Signal to Noise Ratio</i>
TDMA	do inglês, <i>Time Division Multiple Access</i>
TTI	do inglês, <i>Transmission Time Interval</i>
URM	do inglês, <i>Unconstrained Rate Maximization</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Motivação	12
1.2	Fundamentação Teórica	13
1.2.1	<i>Sistemas OFDM e OFDMA</i>	13
1.2.2	<i>SC-FDMA</i>	14
1.2.3	<i>Alocação de Recursos de Rádio</i>	15
1.2.4	<i>Qualidade de Serviço (QoS)</i>	16
1.3	Estado da Arte	17
1.4	Objetivos e Contribuições	19
1.4.1	<i>Objetivos Gerais</i>	19
1.4.2	<i>Objetivos Específicos</i>	20
1.4.3	<i>Produção Científica</i>	20
2	MODELAGEM DO SISTEMA, FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E SOLUÇÃO ÓTIMA	21
2.1	Considerações Gerais do Sistema	21
2.2	Formulação do Problema	24
2.3	Caracterização da Solução Ótima	25
3	ANÁLISE DE DESEMPENHO	30
3.1	Caracterização da Simulação	30
3.2	Resultados	32
4	CONCLUSÕES	40
	REFERÊNCIAS	41
	APÊNDICES	44
	APÊNDICE A – Complexidade computacional	44
A.1	Complexidade Computacional da Solução Ótima do Problema URM	44
A.2	Complexidade Computacional da Solução Ótima do Problema CRM	44
A.3	Complexidade Computacional da Solução Ótima do Problema Proposto	45

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os estudos e técnicas matemáticas que servem de base para o entendimento do trabalho. A Seção 1.1 apresenta o contexto e as características do problema que motivam o desenvolvimento do trabalho. A Seção 1.2 está dividida em quatro subseções que têm por finalidade descrever o contexto do problema abordado bem como as técnicas e tecnologias a ele associado. Na Seção 1.3 são revisados os trabalhos e resultados encontrados na literatura científica relacionados a área de estudo. Por fim, os objetivos gerais e específicos são descritos na Seção 1.4.

1.1 Motivação

A utilização em massa de dispositivos móveis com alta capacidade de transmissão de dados, como *smatphones*, *tablets* e *notebooks*, proporcionou um aumento considerável na demanda por altas taxas de dados em rede móveis, além disso, em um futuro próximo, espera-se que outros objetos do dia a dia, tais como geladeiras, televisores e outras máquinas, possam se conectar a *internet*. Diante disso, a busca por uma maior eficiência tanto em termos energético como espectral, juntamente com a necessidade de prover uma qualidade de serviço sustentável, tem se tornado um dos principais desafios para toda a indústria de telecomunicações.

Ao longo dos anos, vários esforços têm sido realizados para melhorar a estrutura das redes a fim de encarar tais desafios. Dentre as melhorias alcançadas na rede de acesso a rádio, temos a adoção do esquema de múltiplo acesso por divisão de frequências com portadora única ou SC-FDMA (do inglês, *Single Carrier-Frequency Division Multiple Access*) no enlace reverso do sistema LTE (do inglês, *Long Term Evolution*). A adoção desse esquema ocorre em virtude do esquema de múltiplo acesso por divisão de frequência ortogonal ou OFDMA (do inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) apresentar uma alta PAPR (do inglês, *Peak-to-Average Power Ratio*), ocasionada pelas fortes variações da envoltória temporal do sinal transmitido. Sinais com alta PAPR colocam uma grande sobrecarga nos terminais móveis, tornando necessário o uso de amplificadores de potência altamente lineares para evitar distorções excessivas do sinal. Comparado ao OFDMA, o SC-FDMA possui uma baixa PAPR (MYUNG *et al.*, 2006).

Além do mais, a escassez de recursos disponíveis aos usuários do sistema é outro problema a ser encarado mediante o aumento da demanda por maiores taxas de dados e um

menor consumo de energia. Dessa forma, a alocação de recursos de rádio ou RRA (do inglês, *Radio Resource Allocation*) é outra funcionalidade a qual destacamos como fundamental para enfrentar esses desafios, visto que os algoritmos de RRA são responsáveis por gerenciar os recursos do sistema que em geral são limitados, como a potência e o espectro de frequência.

As funcionalidades de RRA são capazes de melhorar tanto a eficiência energética quanto a eficiência espectral por uma atribuição adequada de tais recursos, além disso, em cenários de multiserviços os algoritmos de RRA podem ser utilizados para satisfazer os requisitos de QoS (do inglês, *Quality of Service*) dos terminais conectados que, em geral, têm exigências heterogêneas e diferentes estados de qualidade de canal (LIMA, 2012). Nesse cenário, o presente trabalho lida com o problema de alocação de potência em um sistema SC-FDMA juntamente com assinalamento de subportadoras e restrição de QoS.

1.2 Fundamentação Teórica

Nas seções seguintes serão abordados aspectos importantes sobre OFDM (do inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), OFDMA, SC-FDMA, RRA e QoS.

1.2.1 Sistemas OFDM e OFDMA

A multiplexação por divisão de frequência ortogonal ou OFDM é uma técnica de modulação multiportadoras que consiste em dividir o fluxo de dados em um conjunto de subportadoras e em seguida transmiti-las simultaneamente, ou seja, o OFDM tem como ideia fundamental dividir o fluxo de dados de banda larga em um certo número de fluxos de banda estreita. Para gerar as subportadoras, utilizamos uma técnica matemática denominada IDFT (do inglês, *Inverse Discrete Fourier Transform*). As subportadoras geradas são ortogonais duas-a-duas e por isso podem ter seus espectros sobrepostos, evitando o uso de banda de guarda como ocorre na multiplexação por divisão de frequência ou FDM (do inglês, *Frequency Division Multiplexing*) (SILVA, 2013).

O OFDM oferece uma série de vantagens, entre elas podemos citar a alta eficiência espectral resultante da ortogonalidade das subportadoras e o fato de sofisticadas estruturas de equalização serem desnecessárias devido as subportadoras possuírem largura de banda estreita. Outra importante vantagem do OFDM ocorre em virtude das taxas de dados transmitidas em cada subportadora serem baixas, portanto os símbolos modulados são maiores que o espalhamento

de atrasos. Logo, o OFDM é robusto quanto à interferência intersimbólica ou ISI (do inglês, *Intersymbol Interference*), entretanto, umas das principais desvantagens do OFDM é sua alta PAPR provocada pelas fortes flutuações da envoltória dos sinais.

O OFDMA é um esquema de múltiplo acesso baseado no OFDM (DAHLMAN *et al.*, 2010). O múltiplo acesso é alcançado por meio do assinalamento aos usuários de um ou mais blocos de recursos, que denominamos por RB (do inglês, *Resource Block*), permitindo a transmissão do tráfego de diferentes usuários simultaneamente. Um RB é composto por um grupo de uma ou mais subportadoras adjacentes no domínio da frequência e um número consecutivo de símbolos OFDM, sendo este, o recurso mínimo a qual pode ser alocado a um determinado usuário. Vale ressaltar que a quantidade de subportadoras e símbolos OFDM em um RB depende do projeto do sistema, assim como das características do canal.

Com relação a RRA o sistema OFDMA impõe que um determinado RB não pode ser reutilizado em uma mesma célula, ou seja, não pode ser compartilhado por diferentes usuários em uma mesma célula. Tal restrição, a qual chamaremos de **exclusividade**, é necessária para não gerar interferência intracelular em um sistema de comunicações sem fio.

1.2.2 SC-FDMA

Como visto na Seção 1.2.1, o OFDMA resume-se basicamente na transmissão paralela de dados sobre um conjunto de subportadoras. O SC-FDMA consiste em uma versão modificada do OFDMA (MYUNG *et al.*, 2006). No SC-FDMA, assim como no OFDMA, os fluxos de dados são divididos sobre um conjunto de subportadoras, porém, diferentemente do OFDMA, a transmissão dos dados ocorre de forma sequencial. Esse novo arranjo pode ser alcançado por meio da aplicação de uma DFT (do inglês, *Discrete Fourier Transform*) aos símbolos de dados, passando os mesmos para o domínio da frequência, antes que estes passem pela modulação OFDMA, além do mais, esse arranjo reduz consideravelmente as variações sofridas pela envoltória temporal do sinal transmitido, o que acarreta em uma baixa PAPR quando comparada ao OFDMA. Na Figura 1, apresentamos um diagrama do esquema SC-FDMA, note que os blocos pretos formam o esquema OFDMA e que os blocos amarelos representam as diferenças entre os esquemas OFDMA e SC-FDMA.

Sinais com alta PAPR colocam uma grande carga sobre os terminais móveis devido à necessidade de se utilizar amplificadores de potência altamente lineares. Por esse motivo, o 3GPP (do inglês, *3rd Generation Partnership Project*) definiu o SC-FDMA como a técnica de

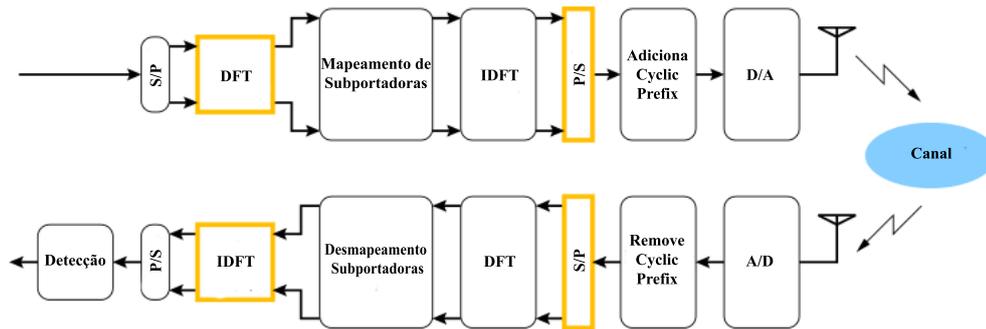


Figura 1 – Diagrama do esquema SC-FDMA. Adaptada de (WIKIPEDIA, 2008)

múltiplo acesso adotada no enlace reverso das redes LTE.

Além disso, uma das grandes dificuldades encontradas para se obter altas taxas de dados em sistemas sem fio é a dispersão temporal causada pela propagação multipercursos. Em um sistema celular onde a propagação multipercursos está fortemente presente, os sinais SC-FDMA chegam na ERB (Estação Rádio Base) com valores de ISI consideráveis. Diante disso, o SC-FDMA necessita de um equalizador adaptativo no domínio da frequência na ERB, de forma a minimizar a ISI.

Em resumo, SC-FDMA reduz os requisitos de amplificadores de potência linear nos terminais móveis, porém, necessita de equalização no domínio da frequência na estação base (MYUNG *et al.*, 2006). Note que essa característica é perfeitamente adequada para o enlace reverso de uma sistema celular, já que reduz a carga sobre o dispositivo móvel, proporcionando uma maior economia da bateria e colocando toda a complexidade para ERB.

Por fim, o SC-FDMA impõe as seguintes restrições sobre RRA:

- **Exclusividade:** Um RB não pode ser compartilhado por dois ou mais usuários diferentes dentro de uma célula, assim como ocorre em sistemas OFDMA.
- **Adjacência:** De forma a viabilizar os benefícios em termos de PAPR, os RBs atribuídos a um determinado terminal móvel devem ser adjacentes uns aos outros. Note que esta restrição é exclusiva do SC-FDMA, e que a mesma não aparece no OFDMA.

1.2.3 Alocação de Recursos de Rádio

Os números de usuários dos sistemas de comunicação celulares tem aumentado de forma exponencial nos últimos anos, no entanto, esses sistemas sofrem com limitações de recursos tais como potência e o espectro de frequência. Portanto, existe a necessidade de gerenciar o acesso dos usuários conectados aos recursos de rádio disponíveis na rede de acesso

de rádio e o RRA é a funcionalidade do sistema responsável por fazer isso. Desse modo, quando o gargalo do sistema está na rede de acesso de rádio, em vez do núcleo da rede, algoritmos eficientes de RRA podem ditar o desempenho do sistema global (LIMA, 2012). Assim, os algoritmos de RRA podem ser utilizados para maximizar a capacidade do sistema fazendo um uso eficiente dos recursos.

Conforme mencionado antes, a técnica SC-FDMA foi adotada no enlace reverso do sistema LTE, onde o problema de alocação consiste em maximizar a transmissão de dados por meio do assinalamento de subportadoras, assim como numa alocação ótima da potência. Todavia, essa tarefa é árdua, pois diversos fatores podem influenciar na alocação desses recursos, como por exemplo as condições do canal.

Dependo do objetivo a ser atingido, o projeto pode ter diferentes alvos além daqueles impostos pela restrições de recursos. Melhorar a eficiência espectral, ou assegurar justiça aos usuários conectados são alguns dos exemplos. Ademais, dependendo do tipo de cenário, os algoritmos que apresentam a solução ótima para a alocação dos recursos de rádio são inviáveis, forçando os projetistas desses sistemas a trabalhar com soluções sub-ótimas (SILVA *et al.*, 2012).

1.2.4 Qualidade de Serviço (QoS)

Atualmente os vários serviços de dados que exigem troca de diferentes informações multimídia, que outrora era algo exclusivo apenas das redes fixas devido as elevadas taxas de dados, passaram a ser utilizados por dispositivos móveis graças ao desenvolvimento das redes móveis. Ademais, os dispositivos móveis no decorrer dos anos obtiveram uma grande melhoria de processamento, o que vem contribuindo com a popularidade dos serviços de dados em redes móveis.

Todavia, diferentemente dos sistemas cabeados, os sistemas sem fios sofrem com a escassez de recursos, além da natureza aleatória dos canais de transmissão. Também, do ponto de vista do operador de rede móvel, é crucial que os serviços sejam fornecidos com uma qualidade sustentável. Assim, pode-se considerar que em um sistema de telefonia celular o nível de QoS (LIMA *et al.*, 2012) percebido pelos usuários está relacionado com a eficiência da técnica de alocação de canais utilizada e com a potência atribuída a cada usuário.

Diante do exposto, é exigido dos operadores de redes móveis a aplicação de métodos de controle dos parâmetros que impactam sobre a forma como o sistema é percebido. Dentre tais parâmetros podemos citar (PESSOA, 2015):

- Vazão: é uma medida de transmissão de dados, que mede a quantidade de tráfego total de informação que é transportada de um ponto a outro em uma rede sem fio, em um determinado intervalo de tempo. Portanto, a vazão indica a capacidade de transmissão da rede e consiste em um dos parâmetros mais básicos de QoS.
- Taxa de perda de pacotes: é um índice que indica o percentual de pacotes que são perdidos durante a transmissão entre dois elementos da rede sem fio, ou seja, a razão entre os pacotes transmitidos e os pacotes que não foram recebidos. Este parâmetro pode ser utilizado para medir a taxa de sucesso na transmissão de pacotes da rede.
- Taxa de erro: é a razão entre o número de pacotes cujo os conteúdos (sequência bits) apresentam algum erro e o número total de pacotes recebidos. Os principais causadores desses erros, geralmente, são erros de hardware ou condições desfavoráveis que influenciam na qualidade do canal. Este parâmetro é crucial no desenvolvimento de redes sem fios, visto sua forte relação com a taxa de dados útil que tráfega pela rede.
- Latência: é o tempo que um pacote leva para se deslocar-se de um ponto a outro em uma rede sem fio. Em geral, podemos entender a latência como a soma total dos atrasos impostos pela rede como a propagação do sinal de rádio, que faz parte do sistema e independe das técnicas utilizadas na transmissão de dados e nos equipamentos utilizados na comunicação, por exemplo, o tempo de processamento do sinal nos equipamentos pode sofrer variações significativas dependendo do *hardware* utilizado.
- *Jitters*: é a diferença entre a latência máxima e mínima percebida pela rede. Logo, podemos entendê-la como um parâmetro complementar à latência, visto que enquanto a latência informa o atraso total na transmissão de dados, o *jitter* nos diz a máxima variação da latência.

1.3 Estado da Arte

Os estudos de RRA em sistemas OFDMA são bem difundidos na literatura e têm sido estudados na forma de otimização com diferentes restrições e objetivos. Para o leitor que deseja aprofundar-se mais sobre esse tópico, destacamos o trabalho apresentado em (CAPOZZI *et al.*, 2013). Diferentemente do OFDMA, os estudos de RRA sobre os sistemas SC-FDMA são mais recentes. Assim, geralmente os trabalhos de RRA em sistemas SC-FDMA têm focado na solução de problemas previamente estudados para o OFDMA no enlace direto da rede, considerando as novas restrições impostas pelo SC-FDMA no enlace reverso da rede.

Na literatura, um dos problemas mais comuns é a maximização da taxa de dados. Este problema consiste em encontrar a alocação de recurso que maximiza a taxa de dados total transmitida pelo sistema. Em (LIM *et al.*, 2006) temos um problema de maximização da taxa de dados sem considerar os aspectos de QoS. Todavia, os autores desconsideraram a restrição de adjacência necessária para assegurar uma baixa PAPR. Em (NWAMADI *et al.*, 2008), os autores consideraram a restrição de adjacência, no entanto, assumiu-se que cada usuário exigia o mesmo número de recursos de frequência. Na prática, os usuários têm diferentes requisitos de taxa de dados, assim como qualidades de canais distintas levando a diferentes demandas quanto ao número de recursos de frequência.

Recentemente, os estudos voltados para eficiência energética vem ganhando espaço em RRA, motivados pela crescente demanda por maior eficiência no uso dos recursos energéticos em redes móveis. O trabalho proposto em (WONG *et al.*, 1999) foi um dos pioneiros a trabalhar nessa direção, a qual consiste em minimizar a potência total transmitida sujeito as restrições de QoS para sistemas OFDMA. Estudos envolvendo eficiência energética em sistemas SC-FDMA foram considerados por outros trabalhos (AHMAD; ASSAAD, 2011; TRIANTAFYLLOPOULOU *et al.*, 2015). Em (AHMAD; ASSAAD, 2011), um problema de otimização binária inteiro é apresentado com o objetivo de minimizar a potência total transmitida em sistemas SC-FDMA. Embora os autores tenham considerado a restrição de adjacência, os requisitos de QoS foram desconsiderados no trabalho. Em (TRIANAFYLLOPOULOU *et al.*, 2015), os autores consideraram os efeitos de QoS sobre a eficiência energética com o objetivo de minimizar o consumo de energia por bit transmitido em sistemas SC-FDMA. Embora as restrições de adjacência, assim como os aspectos de QoS tenham sido considerados pelos autores, eles não utilizaram alocação de potência adaptativa e ignoraram as restrições de satisfação mínima de QoS por serviço.

Em geral, o comportamento do tráfego e os requisitos de QoS de algumas aplicações multimídia possuem características semelhantes que motivam a definição de diferentes tipos de serviços. Como exemplo, podemos mencionar a navegação na *web*, FTP (do inglês, *File Transfer Protocol*) e serviços de *streaming* de vídeo. A fim de assegurar uma oferta aceitável dos diferentes serviços, os operadores de sistemas poderiam garantir que uma percentagem mínima das conexões de cada serviço tenham seu QoS cumprido, ou seja, estas conexões devem ser satisfeitas. As garantias de satisfação mínima foram propostas como métricas em nível de sistema em (FURUSKÄR, 2003) e usadas em muitas outras obras, como (LIMA *et al.*, 2010; RODRIGUES *et al.*, 2008).

Em (LIMA *et al.*, 2016), dois problemas distintos de RRA em sistemas SC-FDMA foram considerados: problema URM (do inglês, *Unconstrained Rate Maximization*), que consiste na maximização da taxa de dados sem considerar os aspectos de QoS e o problema CRM (do inglês, *Constrained Rate Maximization*), que consiste em maximizar a taxa de dados total do sistema sujeito aos requisitos de satisfação mínima em um cenário multisserviço. Em ambos os problemas a restrição de adjacência foi modelada, no entanto, os autores consideraram que os terminais móveis transmitiam com toda potência disponível, não considerando portanto, alocação adaptativa de potência. Essa consideração permite que o sistema alcance altos valores de taxas de dados, porém ineficiente quanto ao consumo de energia. Além disso, o mapeamento contínuo entre taxa de dados e SNR (do inglês, *Signal to Noise Ratio*) foi considerado em ambos os problemas. Apesar de trazer benefícios teóricos por simplificar a estrutura do problema de RRA, esta última hipótese perde apelo prático uma vez que a adaptação entre taxa de dados e SNR é regida por esquemas finitos e discretos de modulação e codificação ou MCS (do inglês, *Modulation and Coding Scheme*).

Diante do que foi exposto nesta seção, este trabalho lida com a otimização dos recursos energéticos considerando as restrições de adjacência e QoS apresentadas em (LIMA *et al.*, 2016). Entretanto, diferentemente de (LIMA *et al.*, 2016), neste trabalho, visando alcançar um menor consumo de energia, assumimos alocação adaptativa de potência. Além disso, consideramos níveis de MCS discretos, isto é, o mapeamento entre taxa de dados e SNR é modelado como sendo discreto, retratando mais fielmente os sistemas de comunicações atuais, todavia, o problema torna-se combinatorial e técnicas baseada na convexidade das funções de funções e uso de Lagrangeano (BAZARAA *et al.*, 2013) não podem ser aplicadas nesse caso.

1.4 Objetivos e Contribuições

1.4.1 Objetivos Gerais

Realizar um estudo voltado para alocação de recursos de rádio tais como potência e subportadoras no enlace reverso de um sistema sistema de comunicação celular utilizando o método de acesso SC-FDMA.

1.4.2 *Objetivos Específicos*

- Generalizar a formulação do problema proposto em (LIMA *et al.*, 2016) utilizando alocação de potência adaptativa.
- Resolver, de forma ótima, o problema estudado utilizando-se de técnicas analíticas e/ou numéricas.
- Mensurar os ganhos (se for o caso) do uso de alocação de potência adaptativa comparada ao caso em que a potência não é adaptada.
- Ganhar conhecimento sobre modelagem computacional de redes celulares, alocação de recursos e problemas de otimização.

1.4.3 *Produção Científica*

Os conteúdos e as contribuições deste trabalho foram publicadas com as seguintes informações:

- ▶ **BRAGA JUNIOR, I. M.**; LIMA, F. R. M.; MACIEL, T. F.; CAVALCANTI, F. R. P., Otimização de Recursos Energéticos em Sistemas SC-FDMA com Garantias de QoS e Satisfação, em XXXV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2017, Belém-PA.

Em paralelo ao desenvolvimento desta dissertação, outros trabalhos foram publicados tendo como base de estudo a alocação de recursos de rádio em redes celulares sem fio utilizando o sistema SC-FDMA, são eles:

- ▶ **BRAGA JUNIOR, I. M.**; PAIVA, L.; LIMA, F. R. M.; MACIEL, T. F.; CAVALCANTI, F. R. P., Solução de Baixa Complexidade para Otimização de Recursos Energéticos em Sistemas SC-FDMA, em XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2017, São Pedro - SP.
- ▶ PAIVA, L.; **BRAGA JUNIOR, I. M.**; LIMA, F. R. M.; MACIEL, T. F.; CAVALCANTI, F. R. P., Seleção de Relays para o Enlace Reverso de Redes Cooperativas Utilizando SC-FDMA com Restrições de Adjacência, em XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2017, São Pedro - SP.

2 MODELAGEM DO SISTEMA, FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E SOLUÇÃO ÓTIMA

Este capítulo é dedicado à modelagem do problema e à formulação do problema de minimização da potência total transmitida em um sistema SC-FDMA considerando o assinalamento de subportadoras e alocação de potência adaptativa. A Seção 2.1 aborda a modelagem do problema, definindo o cenário estudado e fazendo as devidas considerações. A formulação do problema é demonstrada na Seção 2.2. Por fim, a Seção 2.3 é dedicada ao estudo da solução ótima.

2.1 Considerações Gerais do Sistema

O cenário consiste de um sistema celular composto por um número de células setorizadas. Para um dado setor da célula, existe um grupo de terminais móveis conectados à ERB. Para este trabalho iremos considerar um problema no enlace reverso da rede. Diante disso, utilizaremos a combinação SC-FDMA e TDMA (do inglês, *Time Division Multiple Access*). Definimos RB, o mínimo recurso alocável a um determinado usuário, como um grupo de uma ou mais subportadoras adjacentes e um número de símbolos OFDM consecutivos, que representam um intervalo de tempo de transmissão ou TTI (do inglês, *Transmission Time Interval*). Diferentes RBs podem ser assinalados a um usuário de um mesmo setor sem que haja interferência intracelular entre os usuário do mesmo setor.

Apesar da interferência intracelular ser controlada em virtude do esquema de múltiplo acesso escolhido, os usuários ainda podem experimentar interferência intercelular a partir de outros setores que reutilizam a mesma banda de frequência no sistema. Todavia, o gerenciamento de interferência está fora do escopo desse trabalho, dessa forma, assumiremos que a interferência intercelular é modelada por uma variável aleatória Gaussiana e que a mesma faz parte do ruído térmico na expressão da SNR. Destacamos que essa suposição se torna cada vez mais válida à medida que a carga do setor e o número de células no sistema aumentam (SEOL; CHEUN, 2009).

Para um dado TTI, consideramos que J usuários são candidatos a receberem recursos. Admitimos que existam um total de N RBs disponíveis. Além disso, \mathcal{J} e \mathcal{N} são os conjuntos de usuários ativos e RBs disponíveis, respectivamente. Como estamos lidando com um cenário multiserviço, assumimos \mathcal{S} como o conjunto de todos os serviços disponibilizados pelo sistema e S o número de serviços oferecidos pela operadora do sistema. Como exemplo de serviços temos

web browsing, download/upload de arquivos e Voz sobre IP (do inglês, *Internet Protocol*). Todo usuário que utilizar um serviço $s \in \mathcal{S}$ está contido no conjunto \mathcal{J}_s e o número de usuários do serviço s é dado por $|\mathcal{J}_s| = J_s$, em que $|\cdot|$ é a cardinalidade do conjunto.

Consideramos que o canal permanece constante durante um TTI e que, no atual TTI, um usuário j possui requisitos de taxas de t_j . Uma observação importante é que requisitos de taxa de longo ou médio prazo podem ser mapeados em requisitos instantâneos conforme mostrado em (JANG; LEE, 2003). O parâmetro k_s representa o número mínimo de usuários que devem ser satisfeitos com seu QoS para cada serviço s .

Destacamos que nos trabalhos (LIMA, 2012; LIMA *et al.*, 2016) considera-se uma distribuição de potência igualitária entre os RBs dada por P_{T_j}/N , onde P_{T_j} é a máxima potência disponível no terminal móvel j , todavia, neste trabalho exploraremos a otimização dos recursos através da alocação adaptativa de potência, diferentemente do que ocorre em (LIMA, 2012; LIMA *et al.*, 2016).

De acordo com a Seção 1.2.2 do capítulo 1 o SC-FDMA impõe duas restrições sobre RRA:

- **Exclusividade:** O mesmo RB não pode ser reutilizado dentro de uma célula;
- **Adjacência:** Os RBs assinalados para cada usuário devem ser adjacentes uns aos outros no domínio da frequência.

Definimos padrão de assinalamento como um conjunto dos RBs que podem ser assinalados a um determinado usuário. Devido a restrição de adjacência, o número de padrões de assinalamento, P , depende de N , e de acordo com (WONG *et al.*, 2009) é dado por

$$P = \frac{N^2}{2} + \frac{N}{2} + 1. \quad (2.1)$$

Consideramos que o conjunto com os índices de todos os padrões de assinalamento possíveis é dado por $\mathcal{P} = \{1, \dots, P\}$. A restrição de assinalamento pode ser então modelada por uma matriz binária, \mathbf{A} , de ordem $N \times P$, composta por elementos $a_{n,p}$ com $n \in \mathcal{N}$ e $p \in \mathcal{P}$, que assume 1 se o n -ésimo RB pertence ao p -ésimo padrão de assinalamento e 0 caso contrário. Por exemplo, considerando $N = 4$, temos $P = 11$, logo

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

O mapeamento contínuo entre taxa de dados e SNR é realizado pela maioria dos trabalhos na literatura. Matematicamente esta abordagem é vantajosa, pois existem alguns teoremas baseados na continuidade e convexidade das funções objetivos e das restrições que nos possibilitam obter uma solução analítica para estes problemas. Contudo, na prática, a função responsável pelo mapeamento entre taxa de dados e SNR é discreta e pode ser obtida através de simulações de nível de enlace e camada física. Assim, na busca por um cenário mais realista, o mapeamento discreto entre taxas de dados e SNR será considerado neste trabalho.

Tabela 1 – Mapeamento entre taxa de dados e SNR.

Região de SNR	Taxa de dados transmitida
$\gamma^1 \leq \gamma < \gamma^2$	r_1
$\gamma^2 \leq \gamma < \gamma^3$	r_2
\vdots	\vdots
$\gamma^{M-1} \leq \gamma < \gamma^M$	r_{M-1}
$\gamma^M \leq \gamma$	r_M

Neste trabalho assumimos M níveis de MCSs contido no conjunto $\mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$. Definimos r_m como a taxa transmitida quando o m -ésimo nível de MCS é atingido. Para que haja transmissão no m -ésimo nível de MCS, ou seja, para atingir uma taxa de dados igual a r_m , é necessário que a SNR experimentada esteja no intervalo de SNRs $[\gamma^m, \gamma^{m+1}]$, em que $\gamma^m < \gamma^{m+1}$, de acordo com a Tabela 1. Note que para a taxa r_m ser atingida, basta apenas que a menor SNR da região de SNR seja experimentada, ou seja γ^m .

Consideramos o modelo de canal no domínio da frequência. A função de transferência do canal experimentado pelo j -ésimo usuário na z -ésima subportadora do n -ésimo RB é dada por $h_{j,z,n}$. Observe que aqui definimos a função de transferência de canal com a granularidade de subportadoras em vez de RBs, pois isso é preciso para a modelagem do equalizador no domínio da frequência, necessário em sistemas SC-FDMA. A SNR, $\gamma_{j,z,n}$, experimentada pelo usuário j na subportadora z do RB n é dada por

$$\gamma_{j,z,n} = \frac{\left(\frac{P_{j,p,m}}{c \cdot N_p}\right) \cdot \alpha_j \cdot \|h_{j,z,n}\|^2}{(\sigma^{sub})^2} = P_{j,p,m} \cdot \bar{g}_{j,z,n}, \quad (2.3)$$

onde $P_{j,p,m}$ é a mínima potência necessária para o usuário j utilizando o padrão de assinalamento p atingir o nível de MCS m (note que essa potência é aplicada no padrão de assinalamento e, para que ganhos em termos de PAPR sejam obtidos, essa potência é dividida igualmente entre os RBs), c é o número de subportadoras, N_p o número de RBs do padrão de assinalamento p , α_j

representa o efeito conjunto da perda de percurso e somreamento do enlace entre o usuário j e a ERB, $(\sigma^{sub})^2$ é a potência do ruído no receptor na largura de banda de uma subportadora e, finalmente, $\bar{g}_{j,z,n}$ é o ganho de canal total do enlace entre a ERB e o usuário j na z -ésima subportadora do n -ésimo RB normalizado pela potência do ruído térmico. Definimos $\|\cdot\|$ como o operador que retorna o valor absoluto do seu argumento.

Como foi visto da Seção 1.2.2, em sistemas SC-FDMA deve ser utilizado um equalizador no domínio da frequência a fim de eliminar ISI. Neste trabalho utilizaremos um equalizador MMSE (do inglês, *Minimum Mean Square Error*) e, conforme apresentado em (SHI *et al.*, 2004), a SNR efetiva percebida pelo receptor quando os dados são transmitidos pelo usuário j utilizando o padrão de assinalamento p , $\gamma_{j,p}^{MMSE}$, é dada por

$$\gamma_{j,p}^{MMSE} = \left(\left(\frac{1}{c \cdot |\mathcal{N}_p|} \sum_{n \in \mathcal{N}_p} \sum_{z=1}^c \frac{\gamma_{j,z,n}}{\gamma_{j,z,n} + 1} \right)^{-1} - 1 \right)^{-1}, \quad (2.4)$$

onde \mathcal{N}_p é o conjunto de RBs que compõe o padrão de assinalamento p .

Seja $f(\cdot)$ a função responsável por fazer o mapeamento discreto entre taxa de dados e SNR mostrado na Tabela 1. A taxa de dados de transmissão do usuário j utilizando o padrão de assinalamento p quando atinge o nível de MCS m , $r_{j,p,m}$, é dada por

$$r_{j,p,m} = f(\gamma_{j,p}^{MMSE}). \quad (2.5)$$

Assim, substituindo a equação (2.3) em (2.4), e fazendo $\gamma_{j,p}^{MMSE} = \gamma^m$ na equação (2.5), podemos encontrar os valores para $p_{j,p,m}$ através da solução numérica da equação a seguir:

$$\gamma^m = \left(\left(\frac{1}{c \cdot |\mathcal{N}_p|} \sum_{n \in \mathcal{N}_p} \sum_{z=1}^c \frac{p_{j,p,m} \cdot \bar{g}_{j,z,n}}{p_{j,p,m} \cdot \bar{g}_{j,z,n} + 1} \right)^{-1} - 1 \right)^{-1}. \quad (2.6)$$

2.2 Formulação do Problema

O problema considerado neste trabalho consiste em minimizar a potência total transmitida no enlace reverso da rede de um sistema empregando SC-FDMA utilizando as restrições de satisfação mínima de usuários por serviço em um dado TTI. As restrições de QoS utilizadas neste trabalho são apresentadas em (LIMA *et al.*, 2016), onde o principal objetivo foi a maximização da taxa total transmitida. Todavia, diferentemente de (LIMA *et al.*, 2016), neste trabalho buscaremos uma maior eficiência energética através da alocação de potência adaptativa, a qual foi desconsiderada em (LIMA *et al.*, 2016). Contudo, para que os benefícios em termos

de redução de PAPR não sejam perdidos, assumimos que a potência é igualmente distribuída entre os RBs assinalados a cada usuário. Porém, cada usuário pode ajustar o nível de potência transmitida de acordos com seus objetivos.

Assim, seja \mathbf{X} uma matriz binária com elementos $x_{j,p,m}$ que assume valor 1 se o j -ésimo usuário utilizando o p -ésimo padrão de assinalamento atingir o m -ésimo nível de MCS e 0 caso contrário. Note que \mathbf{X} consiste de uma variável de otimização. De acordo com as considerações feitas anteriormente, o problema proposto em (LIMA *et al.*, 2016) pode ser generalizado para o seguinte problema de otimização:

$$\min_{\mathbf{X}} \left(\sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{m \in \mathcal{M}} x_{j,p,m} \cdot P_{j,p,m} \right), \quad (2.7a)$$

sujeito a

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{m \in \mathcal{M}} a_{n,p} \cdot x_{j,p,m} = 1, \quad \forall n \in \mathcal{N}, \quad (2.7b)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{m \in \mathcal{M}} x_{j,p,m} = 1, \quad \forall j \in \mathcal{J}, \quad (2.7c)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{m \in \mathcal{M}} P_{j,p,m} \cdot x_{j,p,m} \leq P_{T_j}, \quad \forall j \in \mathcal{J}, \quad (2.7d)$$

$$x_{j,p,m} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in \mathcal{J}, \quad \forall p \in \mathcal{P} \text{ e } \forall m \in \mathcal{M}, \quad (2.7e)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}_s} u \left(\sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{m \in \mathcal{M}} r_{j,p,m} \cdot x_{j,p,m}, t_j \right) \geq k_s, \quad \forall s \in \mathcal{S}, \quad (2.7f)$$

em que $u(v, w)$ é a função degrau em w que assume o valor 1 se $v \geq w$ e 0 caso contrário.

Temos que a função objetivo mostrada em (2.7a) consiste na potência total transmitida pelos terminais. As restrições (2.7b) e (2.7e) asseguram que os RBs não serão reutilizados dentro da célula. As restrições (2.7c) e (2.7e) garantem que apenas um padrão de assinalamento seja adotado por cada usuário. Já a equação (2.7d) consiste na restrição de potência que assegura que o terminal móvel não use uma potência maior que seu limite disponível. Por fim, a restrição (2.7f) estabelece que um número mínimo de usuários, k_s , deve ser satisfeito para cada serviço.

2.3 Caracterização da Solução Ótima

O problema (2.7) é um problema de otimização combinatorial com a presença da restrição (2.7f) que é não linear. De acordo com (LEE *et al.*, 2009), a simples restrição de adjacência de recurso é suficiente para tornar o problema NP-hard. Portanto, em virtude da não

linearidade do problema, a solução ótima só poderá ser encontrada por busca exaustiva, o que torna sua obtenção impraticável mesmo para valores moderados de J , N , M e S .

Felizmente, de acordo com (LIMA *et al.*, 2016), o problema (2.7) pode ser reformulado para um problema de otimização linear inteiro ou ILP (do inglês, *Integer Linear Programming*) através da adições de novas variáveis de otimização e restrições. Assim, seja ρ_j uma variável de seleção binária que assume 1 se o usuário j é selecionado para ser satisfeito e 0 caso contrário, o problema (2.7) pode ser reformulado substituindo a restrição (2.7f) por duas novas restrições como segue

$$\min_{\mathbf{X}, \boldsymbol{\rho}} \left(\sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{m \in \mathcal{M}} x_{j,p,m} \cdot p_{j,p,m} \right), \quad (2.8a)$$

sujeito a

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{m \in \mathcal{M}} a_{n,p} \cdot x_{j,p,m} = 1, \quad \forall n \in \mathcal{N}, \quad (2.8b)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{m \in \mathcal{M}} x_{j,p,m} = 1, \quad \forall j \in \mathcal{J}, \quad (2.8c)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{m \in \mathcal{M}} p_{j,p,m} \cdot x_{j,p,m} \leq P_{T_j}, \quad \forall j \in \mathcal{J}, \quad (2.8d)$$

$$x_{j,p,m} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in \mathcal{J}, \quad \forall p \in \mathcal{P} \text{ e } \forall m \in \mathcal{M}, \quad (2.8e)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{m \in \mathcal{M}} r_{j,p,m} \cdot x_{j,p,m} \geq \rho_j \cdot t_j, \quad \forall j \in \mathcal{J}, \quad (2.8f)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} \rho_j \geq k_s, \quad \forall s \in \mathcal{S}. \quad (2.8g)$$

Problemas de otimização linear inteiro podem ser resolvidos de forma ótima por algoritmos baseado na técnica BB (do inglês, *Branch and Bound*) (NEMHAUSER; WOLSEY, 1988). Apesar de possuir complexidade exponencial, esses métodos são capazes de reduzir drasticamente o espaço de busca em que a solução ótima esteja contida. Neste trabalho, empregaremos um algoritmo BB a qual foi implementado no *software Matlab*, onde utilizaremos o conjunto de rotinas matemáticas desenvolvidas pela referência (IBM, 2009) e que usa um modelo matricial para trabalhar com dados numéricos.

Baseado nisso, descreveremos como o problema (2.8) será expresso matricialmente. Seja \mathbf{Y} um vetor coluna de dimensões $(JPM + J) \times 1$ e que contém todas as variáveis do problema (2.8):

$$\mathbf{Y} = \left[\underbrace{x_{1,1,1}, x_{1,1,2}, \dots, x_{J,P,M}}_{\mathbf{x}^T}, \underbrace{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_J}_{\boldsymbol{\rho}^T} \right]^T \quad (2.9)$$

em que \mathbf{X} e $\boldsymbol{\rho}$ são subvetores de \mathbf{Y} com dimensões $JPM \times 1$ e $J \times 1$ e correspondem as variáveis $\{x_{j,p,m}\}$ e $\{\rho_j\}$, respectivamente. Assim, existem matrizes de transformações \mathbf{A}_1 e \mathbf{A}_2 , com dimensões $JPM \times JPM + J$ e $J \times JPM + J$, respectivamente, tais que

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}_1 \mathbf{Y} \longrightarrow \mathbf{A}_1 = [\mathbf{I}_{JPM} | \mathbf{0}_{JPM \times J}], \quad (2.10)$$

$$\boldsymbol{\rho} = \mathbf{A}_2 \mathbf{Y} \longrightarrow \mathbf{A}_2 = [\mathbf{0}_{J \times JPM} | \mathbf{I}_J], \quad (2.11)$$

em que \mathbf{I}_u denota a matriz identidade de ordem u e $\mathbf{0}_{u,v}$ denota uma matriz de zeros com dimensões $u \times v$.

Utilizando as equações (2.9)-(2.11), podemos rescrever o problema (2.8) em função do vetor de variáveis \mathbf{Y} fazendo uso de notação matricial, conforme a seguir.

- Função objetivo (2.8a): existe um vetor linha \mathbf{P} , com dimensão $1 \times JPM$, tal que a função objetivo pode ser rescrita como

$$\mathbf{P}\mathbf{X} \longrightarrow \mathbf{P}\mathbf{A}_1\mathbf{Y}, \quad (2.12)$$

$$\mathbf{P} = [p_{1,1,1}, p_{1,1,2}, \dots, p_{J,P,M}]. \quad (2.13)$$

- Restrição (2.8b): existe uma matriz \mathbf{B} , com dimensões $JPM \times N$, tal que a restrição (2.8c) pode ser rescrita como

$$\mathbf{B}\mathbf{X} = \mathbf{1}_{N,1} \longrightarrow \mathbf{B}\mathbf{A}_1\mathbf{Y} = \mathbf{1}_{N,1} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{W} = \left[\overbrace{\text{col}(\mathbf{A}, 1) \cdots \text{col}(\mathbf{A}, 1)}^{M \text{ vezes}} \cdots \overbrace{\text{col}(\mathbf{A}, P) \cdots \text{col}(\mathbf{A}, P)}^{M \text{ vezes}} \right] \quad (2.15)$$

$$\mathbf{B} = \underbrace{[\mathbf{W} \ \mathbf{W} \ \cdots \ \mathbf{W}]}_{J \text{ vezes}} \quad (2.16)$$

onde $\mathbf{1}_{u \times v}$ denota uma matriz de 1s com dimensões u por v e $\text{col}(\mathbf{u}, v)$ retorna a coluna v da matriz \mathbf{u} .

- Restrição (2.8c): existe uma matriz \mathbf{C} , de dimensão $J \times JPM$, tal que a restrição (2.8c) pode ser modelada da seguinte forma

$$\mathbf{C}\mathbf{X} = \mathbf{1}_{J,1} \longrightarrow \mathbf{C}\mathbf{A}_1\mathbf{Y} = \mathbf{1}_{J,1}, \quad (2.17)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{1}_{1,PM} & \mathbf{0}_{1,PM} & \cdots & \mathbf{0}_{1,PM} \\ \mathbf{0}_{1,PM} & \mathbf{1}_{1,PM} & \cdots & \mathbf{0}_{1,PM} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0}_{1,PM} & \mathbf{0}_{1,PM} & \cdots & \mathbf{1}_{1,PM} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

- Restrição (2.8d): existe uma matriz \mathbf{D} , de dimensões $J \times JPM$, tal que a restrição (2.8d) pode ser rescrita como

$$\mathbf{DX} \leq \mathbf{E} \longrightarrow (\mathbf{E} - \mathbf{DA}_1\mathbf{Y}) \geq \mathbf{0}_{J,1}, \quad (2.19)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} p_{1,1,1} \cdots p_{1,P,M} & 0 \cdots 0 & \cdots & 0 \cdots 0 \\ 0 \cdots 0 & p_{2,1,1} \cdots p_{2,P,M} & \cdots & 0 \cdots 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 \cdots 0 & 0 \cdots 0 & \cdots & p_{J,1,1} \cdots p_{J,P,M} \end{bmatrix}, \quad (2.20)$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} P_1^{\text{tot}} & P_2^{\text{tot}} & P_3^{\text{tot}} & \cdots & P_J^{\text{tot}} \end{bmatrix}^T \quad (2.21)$$

- Restrição (2.8f): existem duas matrizes \mathbf{F} e \mathbf{G} , com dimensões $J \times JPM$ e $J \times J$, respectivamente, tais que a restrição (2.8g) pode ser expressada da seguinte forma

$$\mathbf{FX} \geq \mathbf{G}\boldsymbol{\rho} \longrightarrow (\mathbf{FA}_1 - \mathbf{GA}_2)\mathbf{Y} \geq \mathbf{0}_{J \times 1}, \quad (2.22)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} r_{1,1,1} \cdots r_{1,P,M} & 0 \cdots 0 & \cdots & 0 \cdots 0 \\ 0 \cdots 0 & r_{2,1,1} \cdots r_{2,P,M} & \cdots & 0 \cdots 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 \cdots 0 & 0 \cdots 0 & \cdots & r_{J,1,1} \cdots r_{J,P,M} \end{bmatrix}, \quad (2.23)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} t_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & t_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & t_J \end{bmatrix}. \quad (2.24)$$

- Restrição (2.8g): existe uma matriz \mathbf{H} , com dimensões $J \times 1$, tal que a restrição (2.8g) pode ser modelada da seguinte forma

$$\mathbf{H}\boldsymbol{\rho} \geq \mathbf{K} \longrightarrow \mathbf{HA}_2\mathbf{Y} \geq \mathbf{K}, \quad (2.25)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{1}_{J \times 1}, \quad (2.26)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & \cdots & k_S \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Finalmente, utilizando as matrizes definidas entre as equações (2.9) e (2.27), obtemos uma representação matricial para o problema (2.8) conforme a seguir

$$\min_{\mathbf{Y}} - (\mathbf{PA}_1\mathbf{Y}), \quad (2.28a)$$

sujeito a

$$\begin{bmatrix} \mathbf{BA}_1 \\ \mathbf{CA}_1 \end{bmatrix} \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{1}_{N,1} \\ \mathbf{1}_{J,1} \end{bmatrix} \quad (2.28b)$$

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{E} - \mathbf{DA}_1) \\ (\mathbf{FA}_1 - \mathbf{GA}_2) \\ \mathbf{HA}_2 \end{bmatrix} \mathbf{Y} \geq \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2J,1} \\ \mathbf{K} \end{bmatrix} \quad (2.28c)$$

em que a equação (2.28b) é obtida da combinação das equações (2.14) e (2.17), pois estas constituem as equações de igualdades. Já a equação (2.28c) foi obtida a partir da junção das equações (2.19), (2.22) e (2.25), as quais constituem as restrições de desigualdades. Note que na forma matricial a variável de otimização consiste no vetor \mathbf{Y} e que contém $JPM + J$ variáveis e que as equações (2.28b) e (2.28c) constituem ao todo $3J + N + S$ equações.

Para dados de entradas de tamanho moderado, de acordo com resultados práticos da literatura, o algoritmo BB consegue resolver problemas do tipo ILP em tempos aceitáveis (ZHANG; LETAIEF, 2004), entretanto no pior caso, a ordem de complexidade desse algoritmo é exponencial em função do número de usuários, RBs e níveis de MCS.

3 ANÁLISE DE DESEMPENHO

Dedicamos esta seção à análise de desempenho através de simulações computacionais da solução proposta para o novo problema apresentado neste artigo. Na Seção 3.1, apresentamos em detalhes as principais hipóteses, modelos e parâmetros usados nas simulações. Na Seção 3.2, apresentamos e discutimos os resultados obtidos.

3.1 Caracterização da Simulação

Para o desenvolvimento do simulador computacional foram consideradas as principais características de um sistema SC-FDMA no enlace reverso apresentado na Seção 2.1. Assim, assume-se que um RB consiste de 12 subportadoras adjacentes no domínio da frequência e tem 1 ms de comprimento no domínio do tempo conforme consta nas especificações do sistema LTE (3GPP, 2017).

O estado do canal é modelado pelos mecanismos de propagação mais importantes: modelo de perda de percurso dependente da distância, componente de sombreamento log-normal e componente de desvanecimento rápido com distribuição *Rayleigh*. Assumimos que a adaptação de enlace é realizada com base no relatório de 15 indicadores de qualidade de canal discretos ou CQIs (do inglês, *Channel Quality Indicators*) utilizados pelo sistema LTE (3GPP, 2009). Os limiares de SNRs para a comutação dos níveis de MCS foram obtidos por simulações de nível de enlace de (MEHLFÜHRER *et al.*, 2009). A potência total disponível nos terminais é de 24 dBm. A metodologia de simulação consiste em aplicar a solução proposta em diferentes realizações estatísticas (ou *snapshots*), tomando amostras diferentes das variáveis aleatórias que modelam o posicionamento do usuário e o estado do canal. Os principais parâmetros são mostrados na Tabela 2.

Para realizar uma análise comparativa, além da solução do problema proposto por este trabalho na Seção 2.2, a qual será identificada por “Proposta” nas figuras, simulamos a solução do problema CRM apresentado em (LIMA *et al.*, 2016) que consiste no problema de maximização da taxa de dados com a restrição de QoS presente em (2.7f), entretanto, essa solução permite que os terminais móveis transmita com a potência máxima disponível, portanto, desconsidera a alocação de potência adaptativa. Esta solução é identificadas nos gráficos a seguir como CRM. Também comparamos a solução proposta neste trabalho com a solução URM proposta em (LIMA *et al.*, 2016) que consiste no problema de maximização da taxa de dados sem

Tabela 2 – Principais Parâmetros para Simulação

Parâmetro	Valor	Unidade
Raio da célula	334	m
Potência disponível no terminal	24	dBm
Número de RBs	15	-
Número de MCS	15	-
Número de subportadoras por RB	12	-
Desvio padrão sombreamento	8	dB
Perda de percurso	$35.3 + 37.6 \cdot \log_{10} d$	dB
Densidade espectral do ruído	$3.16 \cdot 10^{-20}$	W/Hz
Número de <i>snapshots</i>	3000	–
Número de usuários	Veja a descrição dos cenários	-
Número de Serviços	Veja a descrição dos cenários	-
Número mínimo de usuários satisfeitos	Veja a descrição dos cenários	-
Requisitos de taxa de dados dos usuários	100 a 900	kbps

a restrição de QoS presente em (2.7f). Note que nesse caso os requisitos de taxa de dados e outras variáveis relacionadas a QoS não são críticas para o problema. Essa solução será denominada nas figuras como URM.

Além disso, para analisarmos a solução proposta em diferentes condições, nos resultados apresentamos alguns cenários de simulação em que os principais parâmetros do nosso modelo são alterados. Basicamente, alteramos o número de serviços (S), o número de usuários por serviço (J_s) e o número mínimo de usuários que devem ser satisfeitos em cada serviço (k_s). Na Tabela 3, descrevemos os cenários utilizados por este trabalho.

Tabela 3 – Parâmetros dos cenários considerados.

Cenário	S	J_1	J_2	J_3	k_1	k_2	k_3
1	1	8	-	-	6	-	-
2	1	8	-	-	7	-	-
3	1	8	-	-	8	-	-
4	2	4	4	-	3	3	-
5	2	4	4	-	4	3	-
6	2	4	4	-	4	4	-
7	3	3	3	3	3	2	2
8	3	3	3	3	3	3	2
9	3	3	3	3	3	3	3

Utilizamos o *IBM ILOG CPLEX Optimizer* (IBM, 2009) para resolver os problemas de otimização linear inteiro. Para que haja uma comparação justa entre os algoritmos, as realizações do canal foram as mesmas para todos os algoritmos simulados. A escolha dos valores

para J , P , M e S é limitada pela complexidade computacional para obter as soluções ótimas.

Neste trabalho as principais métricas de desempenho utilizadas para avaliar os algoritmos são o percentual de potência utilizada que consiste na razão entre a soma das potências utilizadas por todos os usuários e a soma das potência máximas disponíveis ($J \cdot P_{T_j}$), a taxa de dados média que é a média ao longo de vários *snapshots* da taxa total transmitida por todos os usuários e a taxa de *outage* definida como a relação entre o número de *snapshots* com eventos de *outage* e o número total de *snapshots*. Um *outage* acontece quando uma solução específica não consegue encontrar uma solução viável que cumpra as restrições do problema (2.8).

3.2 Resultados

Nas figuras seguintes denotamos o i -ésimo cenário como C_i . Na Figura 2 mostramos a taxa de *outage* versus a taxa de dados requisitada por todos os usuários nos cenários 1, 2 e 3 (um serviço) para as soluções URM, CRM e para a solução proposta.

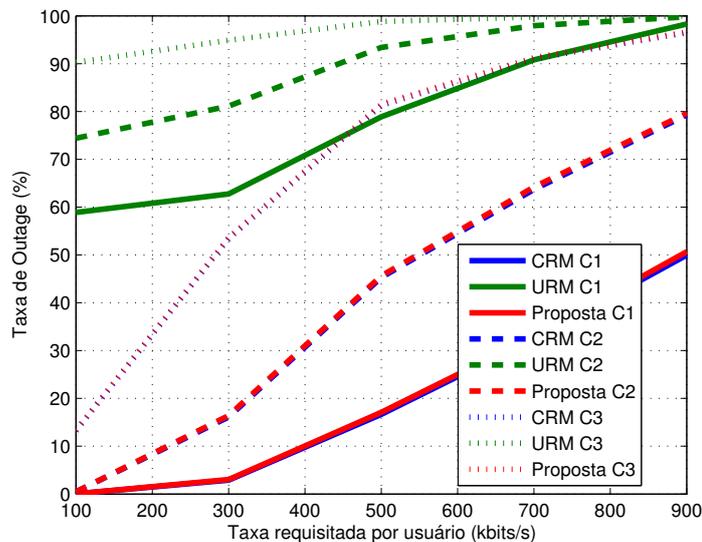


Figura 2 – Taxa de *outage* para as soluções URM, CRM e para a solução proposta nos cenários 1, 2 e 3.

Primeiramente, podemos ver que a taxa de *outage* aumenta conforme incrementamos a taxa de dados requisitadas dos usuários para todas as soluções, como esperado. Este é um comportamento presente em todos os resultados relativos ao desempenho da taxa de *outage*. Além disso, podemos ver que do cenário 1 ao 3 a taxa de *outage* aumenta para uma mesma solução. A razão para isto é a variação do número mínimo de usuários que devem ser satisfeitos, k_s . Enquanto no primeiro cenário, 6 dos 8 usuários devem receber RBs para se tornarem

satisfeitos, no terceiro cenário, todos os usuários devem ter seus requisitos de taxa de dados atendidos. Outra observação geral que estará presente nos demais gráficos de taxa de *outage* é que a solução URM apresenta elevada taxa de *outage* mesmo nos casos em que se assume baixos valores de requisitos de taxas de dados. A razão para esse comportamento é que o problema URM consiste na maximização da taxa de dados sem considerar os aspectos de QoS. Consequentemente, apenas os usuários com as condições de canais mais favoráveis obtêm a maior parte dos recursos, levando a uma quantidade de usuários satisfeitos inferior ao mínimo exigido pelo sistema.

Nas Figuras 3 e 4 apresentamos as taxas de *outage* versus a taxa de dados requisitada por todos os usuários para as soluções URM, CRM e para a solução proposta nos cenários 4, 5 e 6 (dois serviços) e 7, 8 e 9 (três serviços), respectivamente.

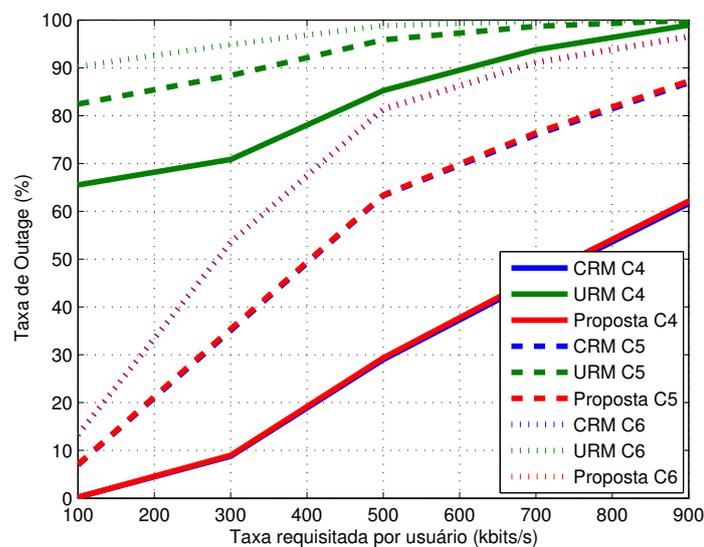


Figura 3 – Taxa de *outage* para as soluções URM, CRM e para a solução proposta nos cenários 4, 5 e 6.

Como nas taxas de *outage* da Figura 2, observamos que nas Figuras 3 e 4 a solução URM apresenta altas taxas de *outage*. Além disso, podemos ver novamente que a taxa de *outage* aumenta à medida que os requisitos sobre o número mínimo de usuários satisfeitos aumentam. Outra importante observação que podemos retirar das Figuras 2 e 3 é o impacto do número de serviços sobre a taxa de *outage*. Nos cenários 2 e 5 o número total de usuários a ser satisfeitos são os mesmos: 7 usuários. Entretanto, ao analisarmos as Figuras 2 e 3 podemos ver que a taxa de *outage* alcançada pela solução proposta não são as mesmas. Apesar das configurações dos cenários serem semelhantes, existe uma diferença entre os dois cenários escolhidos, no cenário 2

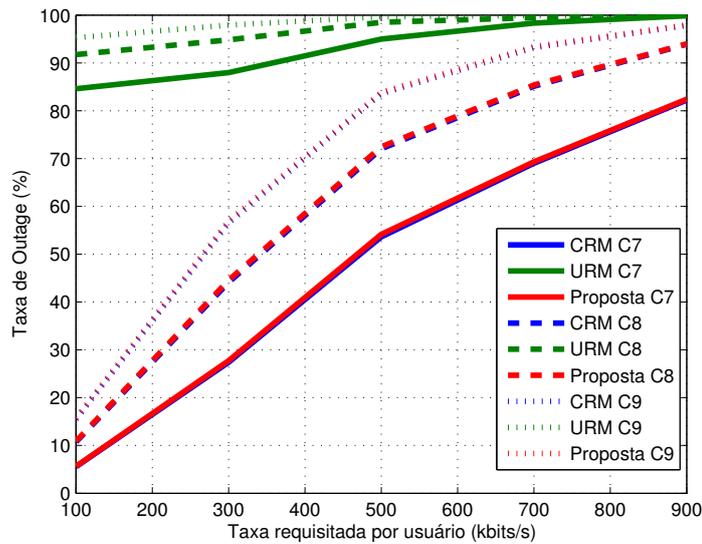


Figura 4 – Taxa de *outage* para as soluções URM, CRM e para a solução proposta nos cenários 7, 8 e 9.

todos os usuários pertencem ao mesmo serviço, enquanto no cenário 5 os usuários são divididos em dois serviços. A partir dessa observação, podemos concluir que existe uma complexidade adicional para resolver o problema estudado à medida que o número de serviços aumenta.

Como último comentário sobre as taxas de *outage* apresentadas nas Figuras 2, 3 e 4, temos a comparação entre o desempenho apresentado pela solução proposta e a solução CRM. Podemos observar que a taxa de *outage* da solução CRM e da solução proposta são iguais para todas as taxas de dados requisitadas. Esse resultado ocorre em virtude da taxa de *outage* ser ditada pela obediência ao conjunto de restrições do problema (2.8), que são as mesmas para os dois problemas. Dessa forma, podemos concluir que a solução proposta consegue atender os requisitos do sistemas da mesma forma que a solução CRM.

Na Figura 5 apresentamos a taxa total de dados média versus a taxa de dados requisitada por todos os usuários nos cenários 1, 2 e 3. Destacamos que para a construção dos gráficos da taxa total de dados média, consideramos apenas as amostras de *snapshots* em que solução CRM e a solução proposta são capazes de encontrar uma solução no cenário com maior requisito de usuários satisfeitos, ou seja não ocorre *outage*. Por exemplo, na Figura 5 apenas as amostras de *snapshots* em que a solução CRM e a solução proposta são capazes de encontrar uma solução no cenário 3 são consideradas.

Analisando a Figura 5, a princípio, podemos observar que a taxa total de dados da solução proposta aumenta conforme incrementamos a taxa de dados requisitadas dos usuários. Tal resultado era esperado visto que a solução proposta visa apenas satisfazer a taxa requisitada

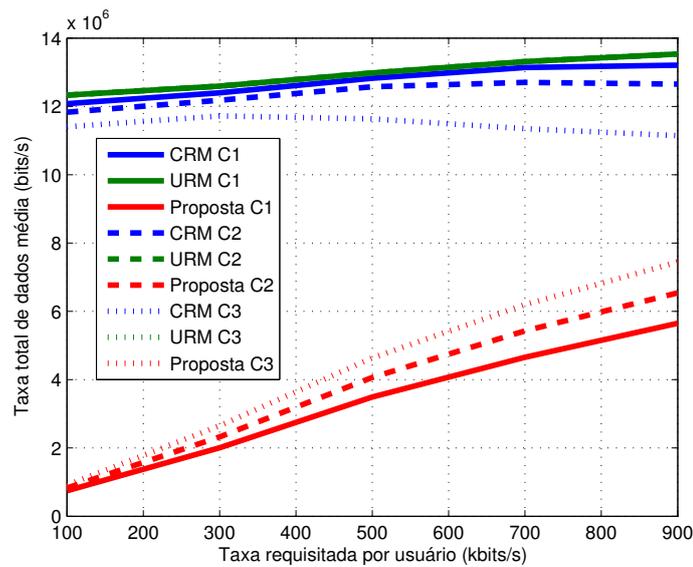


Figura 5 – Taxa de dados média para as soluções URM, CRM e para a solução proposta nos cenários 1, 2 e 3.

de cada usuário de forma a economizar a potência total transmitida. Além disso, a taxa total de dados aumenta do cenário 1 ao cenário 3 para a solução proposta. Esse comportamento está relacionado a variação de k_s , visto que no primeiro cenário apenas 6 dos 8 usuários devem ser satisfeitos, enquanto que no terceiro cenário todos os usuários devem ter seus requisitos de taxa satisfeitos, consequentemente, os requisitos de taxa total do sistema será maior. Na solução CRM o comportamento apresentado é oposto a solução proposta, ou seja a taxa total de dados diminui do cenário 1 ao cenário 3. Tal comportamento ocorre pelo fato da solução CRM não ter total liberdade de escolher os usuários que maximize a taxa total de dados do sistema, uma vez que ele deve atender a um número crescente de usuários satisfeitos quando passamos do cenário 1 para o 3. Já a solução URM tem total liberdade de escolher os usuários com maior ganho de canal por não possuir nenhuma restrição de satisfação. Diante disso, independentemente do cenário, a solução URM apresentará sempre a mesma taxa total de dados.

Nas Figuras 6 e 7 temos a taxa total de dados média versus a taxa de dados requisitada por todos os usuários para as soluções URM, CRM e a solução proposta nos cenários de dois e três serviços, respectivamente.

Assim como na taxa total de dados da Figura 5, podemos observar novamente que a solução proposta aumenta a taxa total de dados conforme a taxa de dados requisitada dos usuários é incrementada. Além do mais, considerando os cenários 5 e 7, em que o número total de usuários a serem satisfeitos são os mesmos, a partir das figuras 6 e 7 podemos verificar que a taxa total de dados para a solução proposta são iguais. Esse comportamento ocorre devido à

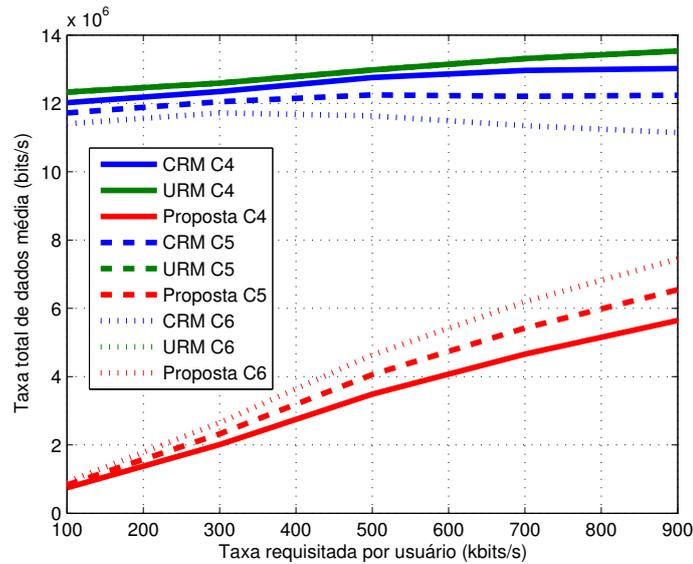


Figura 6 – Taxa de dados média para as soluções URM, CRM e para a solução proposta nos cenários 4, 5 e 6.

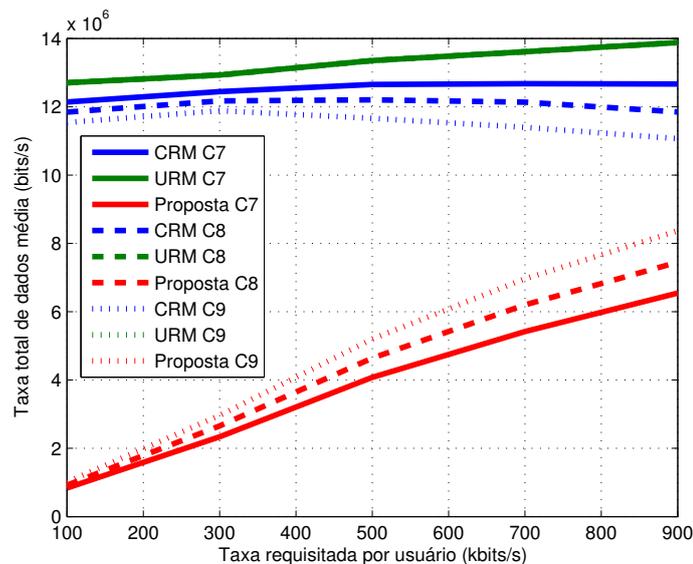


Figura 7 – Taxa de dados média para as soluções URM, CRM e para a solução proposta nos cenários 7, 8 e 9.

solução proposta apenas satisfazer a taxa requisitada de cada usuário, como a taxa requisitada e o número de usuários permaneceram constante era esperado que a taxa fosse a mesma. Logo podemos concluir que o número de serviços não impacta na taxa total de dados da solução proposta. Por fim, ao compararmos as três soluções podemos ver que as soluções URM e CRM apresentam maiores taxas de dados nas Figuras 5, 6 e 7. Este resultado deve-se ao fato do problema URM e CRM terem por objetivos a maximização da taxa total transmitida no sistema.

Os resultados apresentados até aqui podem levar a uma conclusão errônea quanto à relevância da solução proposta neste trabalho. Isso deve-se ao fato da solução CRM obter

baixas taxa de *outage* e ao mesmo tempo altíssimas taxas de transmissão, enquanto que as taxas apresentadas pela solução proposta neste trabalho são mais moderadas. Contudo, os próximos resultados apresentam aspectos importantes a serem considerados nesta análise.

Na Figura 8 apresentamos o percentual de potência utilizada versus a taxa de dados requisitada por todos os usuários nos cenários 1, 2 e 3 para as soluções URM, CRM e para a solução proposta. Assim como nas Figuras 5, 6 e 7, os gráficos de percentual de potência utilizada consideraram apenas as amostras de *snapshots* em que a solução CRM e a solução proposta conseguiram encontrar uma solução no cenário mais restritivo.

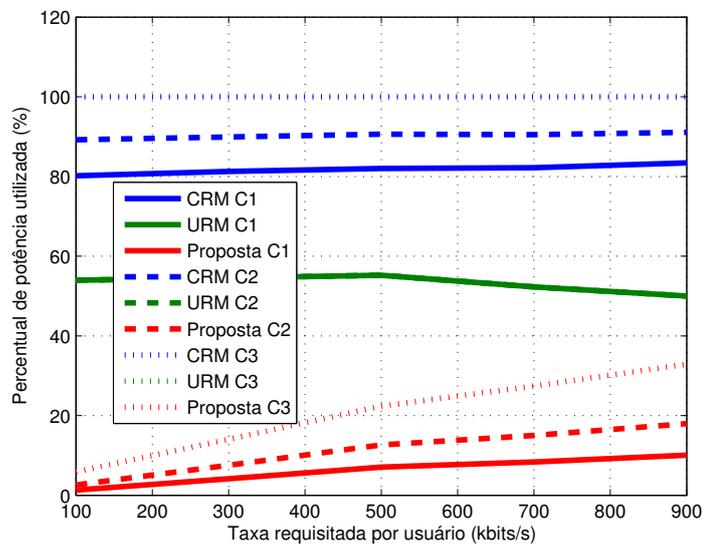


Figura 8 – Percentual de potencial utilizada pelas soluções URM, CRM e para a solução proposta nos cenários 1, 2 e 3.

Primeiramente, podemos observar que o percentual de potência utilizada aumenta conforme incrementamos a taxa requisitada pelos usuários para a solução CRM e a solução proposta. Esse comportamento já era esperado visto que quanto maiores são as demandas dos usuários em termos de QoS, maiores são as dificuldades em satisfazer as restrições do problema estudado, conseqüentemente, uma maior potência de transmissão é requisitada. Além disso, podemos observar que o primeiro cenário, apresenta um menor percentual de potência utilizada do que o segundo e o terceiro cenário para a solução CRM e a solução proposta. Esse comportamento era esperado visto que um número maior de usuários devem ser satisfeitos nos cenários 2 e 3, portanto, uma maior potência será utilizada. A solução URM, entretanto, apresenta um percentual de potência utilizada para os três cenários. Isso ocorre em virtude da mesma não considerar os requisitos de QoS.

Nas figuras 9 e 10 mostramos o percentual de potência utilizada versus a taxa de dados requisitadas por todos os usuários nos cenários de dois e três serviços, respectivamente. Inicialmente, podemos ver que, assim como na Figura 8, o percentual de potência utilizada aumenta conforme incrementamos a taxa de dados requisitadas dos usuários para a solução CRM e a solução proposta. Outra observação a ser feita é a relação entre o número de serviços e o percentual de potência utilizada. Nos cenários 2 e 5, onde um total de 7 usuários devem ter seus requisitos satisfeitos, podemos observar que a solução proposta apresenta um consumo de potência de aproximadamente 13% e 15%, respectivamente, quando assumimos uma taxa de dados requisitada de 500 Kbps. A explicação para esse aumento é que quanto maior for o número de serviços do sistema menor será a liberdade que a solução proposta tem para escolher os usuários com os melhores ganhos de canais. Assim, para satisfazer o número mínimo de usuários em cada serviço, a solução é forçada a selecionar usuários que apresentam uma baixa qualidade de canal e, conseqüentemente, utilizar uma maior quantidade de potência. Diante disso, podemos concluir que ocorrerá um maior consumo de potência conforme ao aumentarmos o número de serviços.

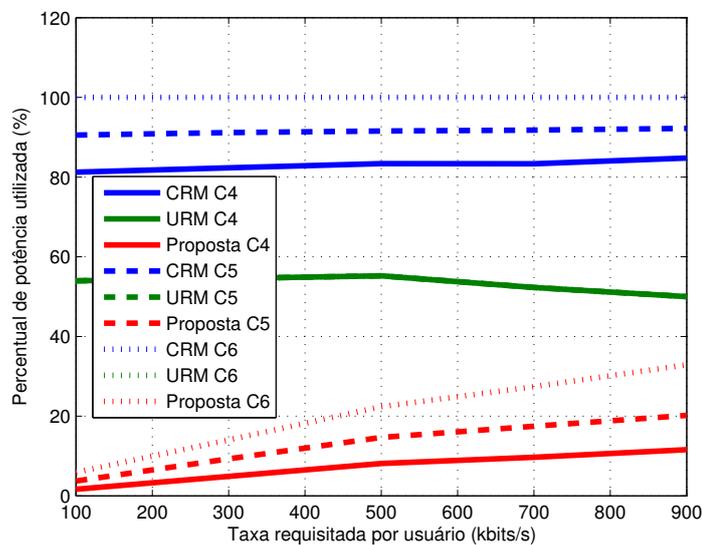


Figura 9 – Percentual de potencial utilizada pelas soluções URM, CRM e para a solução proposta nos cenários 4, 5 e 6.

Fazendo um comparação do desempenho relativos das soluções nas Figuras 8, 9 e 10, podemos observar que a solução URM apresenta uma maior economia de potência quando compara a solução CRM, apesar de ambas as soluções permitirem que a máxima potência de transmissão de seus terminais sejam utilizadas. Essa ganho está relacionado ao fato da solução

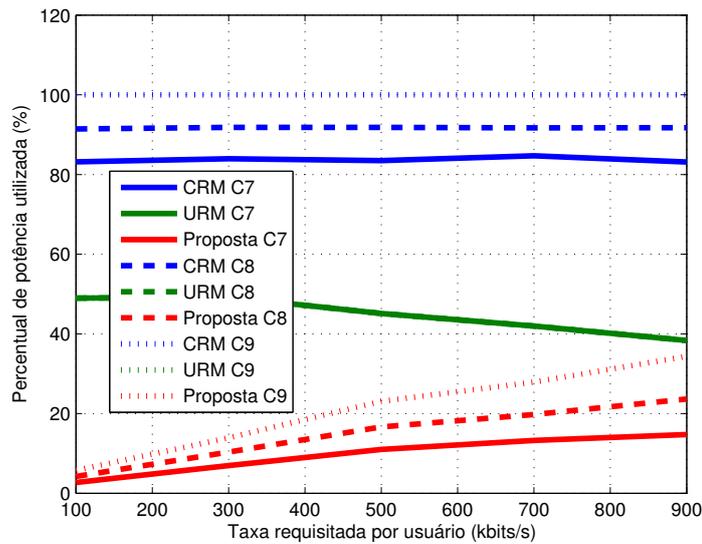


Figura 10 – Percentual de potencial utilizada pelas soluções URM, CRM e para a solução proposta nos cenários 7, 8 e 9.

URM conseguir altas taxas de dados escolhendo usuários de alto ganho de canal e que não precisam de muita potência de transmissão para saturar o uso de MCS. Todavia, conforme visto anteriormente, a solução URM não é capaz de satisfazer os requisitos de QoS dos usuários conforme mostrado nas Figuras 2, 3 e 4. Como resultado mais relevante, ressaltamos a grande economia de potência alcançada pela solução proposta quando comparada a solução CRM. Considerando uma taxa de dados requisitada de 300 kbps para os cenários 1, 5 e 8, podemos ver que a solução proposta apresenta um consumo de aproximadamente de 4%, 9% e 10%, nesta ordem, enquanto que a solução CRM apresenta um consumo de aproximadamente 81%, 91% e 92%, respectivamente.

Finalmente, fazendo uma análise de todos os resultados apresentados, podemos concluir que a solução proposta é capaz de satisfazer o QoS e o número mínimo de usuários satisfeitos com uma quantidade de potência utilizada menor que as demais soluções apresentadas. Ademais, por mais que a solução proposta apresente uma taxa total de transmissão menor que a solução CRM, ressaltamos que essa menor taxa de transmissão não afeta a satisfação dos usuários. Outra observação é que uma quantidade menor de potência transmitida, como pode ser vista nas Figuras 8, 9 e 10, proporciona inúmeras vantagens em sistema celulares em virtude da diminuição drástica da interferência intercelular gerada no sistema. Além disso, consumo de energia racional consiste em um dos pilares no projeto das redes modernas.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho, estudamos o problema de minimização da potência total transmitida sujeito a QoS e restrições de satisfação com alocação de potência adaptativa. Para estudo de caso foi escolhido o enlace reverso do sistema LTE a qual emprega o SC-FDMA como esquema de múltiplo acesso em virtude da alta PAPR sofrida pelo OFDMA. Todavia, para ter benefícios em termos de PAPR o sistema SC-FDMA exige que os RBs assinalados a um determinado usuário sejam contíguos na frequência.

Mostramos que o problema formulado consiste em um problema de otimização não linear. Este tipo de problema apresenta elevada complexidade computacional. Diante disso, convertimos o problema inicial em um problema inteiro linear através da adição de novas variáveis de otimização e restrições. Os resultados obtidos nas simulações computacionais mostram que a solução proposta apresenta resultados bastantes expressivos em termos de eficiência energética quando comparada às demais soluções sem comprometer os requisitos de QoS e satisfação do sistema. Quando comparada a solução CRM, a solução proposta apresentou ganhos de economia de potência superiores a 70% para valores moderados de taxa requisitada.

Por fim, apontamos como perspectivas para estudos futuros, diante os bons resultados obtidos, o desenvolvimento de soluções subótimas com complexidade computacional inferior a solução proposta, assim como considerar outros requisitos de QoS ou QoE (do inglês, *Quality of Experience*) que levam em conta a latência na transmissão de pacotes.

REFERÊNCIAS

- 3GPP. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Layer Procedures*. 2009. Third Generation Partnership Project, Tech. Rep. TR 36.213 V8.6.0, Mar. 2009.
- 3GPP. *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 14)*. 2017. Technical Specification, 36.300 V14.2.0, Mar. 2017.
- AHMAD, A.; ASSAAD, M. Power efficient resource allocation in uplink SC-FDMA systems. In: IEEE. **Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2011 IEEE 22nd International Symposium on**. [S.l.], 2011. p. 1351–1355.
- BAZARAA, M. S.; SHERALI, H. D.; SHETTY, C. M. **Nonlinear programming: theory and algorithms**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.
- CAPOZZI, F.; PIRO, G.; GRIECO, L. A.; BOGGIA, G.; CAMARDA, P. Downlink packet scheduling in lte cellular networks: Key design issues and a survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, IEEE, v. 15, n. 2, p. 678–700, 2013.
- DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKOLD, J.; BEMING, P. **3G evolution: HSPA and LTE for mobile broadband**. [S.l.]: Academic press, 2010.
- FURUSKÄR, A. Radio resource sharing and bearer service allocation for multi-bearer service, multi-access wireless networks. *Signaler, sensorer och system*, 2003.
- IBM. **IBM ILOG CPLEX Optimizer**. 2009. [Http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer](http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer). Acessado em 30 de dezembro de 2016.
- JANG, J.; LEE, K. B. Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems. **IEEE Journal on selected areas in communications**, IEEE, v. 21, n. 2, p. 171–178, 2003.
- LEE, S.-B.; PEFKIANAKIS, I.; MEYERSON, A.; XU, S.; LU, S. Proportional fair frequency-domain packet scheduling for 3GPP LTE uplink. In: IEEE. **INFOCOM 2009, IEEE**. [S.l.], 2009. p. 2611–2615.
- LIM, J.; MYUNG, H. G.; OH, K.; GOODMAN, D. J. Channel-dependent scheduling of uplink single carrier FDMA systems. In: IEEE. **IEEE Vehicular technology conference**. [S.l.], 2006. p. 1–5.
- LIMA, F. R. M. **Maximizing Spectral Efficiency under Minimum Satisfaction Constraints on Multiservice Wireless Networks**. Tese (Doutorado), 2012.
- LIMA, F. R. M.; MACIEL, T. F.; CAVALCANTI, F. R. P. Radio resource allocation in SC-FDMA uplink with resource adjacency constraints. **Journal of Communication and Information Systems**, v. 31, n. 1, 2016.
- LIMA, F. R. M.; MACIEL, T. F.; FREITAS, W. C.; CAVALCANTI, F. R. P. Resource assignment for rate maximization with qos guarantees in multiservice wireless systems. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, IEEE, v. 61, n. 3, p. 1318–1332, 2012.

- LIMA, F. R. M.; WÄNSTEDT, S.; CAVALCANTI, F. R. P.; FREITAS, W. C. Scheduling for improving system capacity in multiservice 3GPP LTE. **Journal of Electrical and Computer Engineering**, Hindawi Publishing Corp., v. 2010, p. 3, 2010.
- MEHLFÜHRER, C.; WRULICH, M.; IKUNO, J. C.; BOSANSKA, D.; RUPP, M. Simulating the long term evolution physical layer. In: IEEE. **Signal Processing Conference, 2009 17th European**. [S.l.], 2009. p. 1471–1478.
- MYUNG, H. G.; LIM, J.; GOODMAN, D. J. Single Carrier FDMA for Uplink Wireless Transmission. **IEEE Vehicular Technology Magazine**, IEEE, v. 1, n. 3, p. 30–38, 2006.
- NEMHAUSER, G. L.; WOLSEY, L. A. Integer programming and combinatorial optimization. **Wiley, Chichester. GL Nemhauser, MWP Savelsbergh, GS Sigismondi (1992). Constraint Classification for Mixed Integer Programming Formulations. COAL Bulletin**, Springer, v. 20, p. 8–12, 1988.
- NWAMADI, O.; ZHU, X.; NANDI, A. Dynamic subcarrier allocation for single carrier-FDMA systems. In: IEEE. **Signal Processing Conference, 2008 16th European**. [S.l.], 2008. p. 1–5.
- PESSOA, A. M. **Alocação de Recursos com Uso de Repetidores para Otimização em Redes Móveis de Última Geração**. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal do Ceará, Sobral-Ce, 2015.
- RODRIGUES, E. B.; CAVALCANTI, F. R. P.; WANSTEDT, S. QoS-driven adaptive congestion control for voice over IP in multiservice wireless cellular networks. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 46, n. 1, p. 100–107, 2008.
- SEOL, C.; CHEUN, K. A statistical inter-cell interference model for downlink cellular OFDMA networks under log-normal shadowing and multipath rayleigh fading. **IEEE Transactions on Communications**, IEEE, v. 57, n. 10, p. 3069–3077, 2009.
- SHI, T.; ZHOU, S.; YAO, Y. Capacity of single carrier systems with frequency-domain equalization. In: IEEE. **Emerging Technologies: Frontiers of Mobile and Wireless Communication, 2004. Proceedings of the IEEE 6th Circuits and Systems Symposium on**. [S.l.], 2004. v. 2, p. 429–432.
- SIERKSMA, G. **Linear and Integer Programming**. New York: Marcel Dekker, 1996.
- SILVA, J. M. da; SILVA, Y. C.; MACIEL, T. F.; CAVALCANTI, F. R.; RODRIGUES, C. D.; NETO, M. B. C. Power allocation schemes for multichannel two-hop relaying systems. In: IEEE. **2012 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)**. [S.l.], 2012. p. 356–360.
- SILVA, S. L. **Cancelamento de Distorções Não Lineares em Sistemas OFDMA com Detecção Multiusuário**. Tese (Tabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal do Ceará, Sobral-Ce, 2013.
- TRIANAFYLLOPOULOU, D.; KOLLIAS, K.; MOESSNER, K. QoS and energy efficient resource allocation in uplink SC-FDMA systems. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, IEEE, v. 14, n. 6, p. 3033–3045, 2015.
- WIKIPEDIA. **Single-carrier FDMA**. 2008. <https://en.wikipedia.org/wiki/Single-carrier_FDMA>. Acessado em: 21 de junho de 2017.

WONG, C. Y.; CHENG, R. S.; LATAIEF, K. B.; MURCH, R. D. Multiuser ofdm with adaptive subcarrier, bit, and power allocation. **IEEE Journal on selected areas in communications**, IEEE, v. 17, n. 10, p. 1747–1758, 1999.

WONG, I. C.; OTERI, O.; MCCOY, W. Optimal resource allocation in uplink SC-FDMA systems. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, IEEE, v. 8, n. 5, p. 2161–2165, 2009.

XU, W.; ZHAO, C.; ZHOU, P.; YANG, Y. Efficient adaptive resource allocation for multiuser ofdm systems with minimum rate constraints. In: **IEEE. Communications, 2007. ICC'07. IEEE International Conference on**. [S.l.], 2007. p. 5126–5131.

ZHANG, Y. J.; LATAIEF, K. B. Multiuser adaptive subcarrier-and-bit allocation with adaptive cell selection for ofdm systems. **IEEE Transactions on wireless communications**, IEEE, v. 3, n. 5, p. 1566–1575, 2004.

APÊNDICE A – COMPLEXIDADE COMPUTACIONAL

Neste apêndice apresentamos a complexidade computacional do pior caso para as soluções URM, CRM proposta em (LIMA *et al.*, 2016) e a solução ótima proposta na Seção 2.2. Nas Seções A.1, A.2 e A.3, nós mostramos a complexidade computacional das soluções URM, CRM e a solução ótima proposta, respectivamente.

Neste trabalho consideramos a complexidade computacional no pior caso, o que nos fornece um limite superior dos recursos computacionais necessários de um algoritmo, na qual é representada pela notação assintótica $\mathcal{O}(\cdot)$. Além disso, assumimos somatórios, multiplicações e comparações como as operações mais relevantes tal qual foi empregado pelo trabalho (XU *et al.*, 2007).

A.1 Complexidade Computacional da Solução Ótima do Problema URM

A solução ótima do problema URM proposto em (LIMA *et al.*, 2016) pode ser obtida utilizando o algoritmo BB. Para um número arbitrário de variáveis inteiras l , o número de subproblemas de programação linear a serem resolvidos é $\sqrt{2}^l$ (ZHANG; LETAIEF, 2004; SIERKSMA,). Entretanto, o número de interações necessárias para resolver um problema de programação linear com m restrições e l variáveis é aproximadamente $2(m - l)$, e cada interação contém $(lm - m)$ multiplicações, $(lm - m)$ somatórios e $(l - m)$ comparações (ZHANG; LETAIEF, 2004; SIERKSMA,). Como no problema URM temos $J \cdot P$ variáveis inteiras e $J + N$ restrições, o número total de operações necessárias é

$$\sqrt{2}^{JP} 2(JP + J + N)(2(JP)(J + N) - 3(J + N) + JP).$$

Mantendo o termo de maior ordem, nós temos que a complexidade computacional no pior caso é $\mathcal{O}(2^{JP})$.

A.2 Complexidade Computacional da Solução Ótima do Problema CRM

A solução ótima do problema CRM proposto em (LIMA *et al.*, 2016), assim como a solução ótima do problema URM, pode ser obtida utilizando o algoritmo BB. Nesse problema existem $JP + J$ variáveis e $2J + N + S$ restrições. Por tanto, o número total de operações necessárias é

$$\sqrt{2}^{JP+J} 2(JP + 3J + N + S)(2(JP + J)(2J + N + S) - 3(2J + N + S) + JP + J).$$

Mantendo o termo de maior ordem, nós temos que a complexidade computacional no pior caso é $\mathcal{O}(2^{JP})$.

A.3 Complexidade Computacional da Solução Ótima do Problema Proposto

A solução ótima do problema proposto neste trabalho em (2.8), assim como as demais soluções, pode ser obtida utilizando o algoritmo BB. Nesse problema existem $JPM + J$ variáveis e $3J + N + S$ restrições. Por tanto, o número total de operações necessárias é

$$\sqrt{2}^{JPM+J} 2^{(JPM + 4J + N + S)(2(JPM + J)(3J + N + S) - 3(3J + N + S) + JPM + J)}.$$

Mantendo o termo de maior ordem, nós temos que a complexidade computacional no pior caso é $\mathcal{O}(2^{JPM})$.