

Otimização de Recursos Energéticos em Sistemas SC-FDMA com Garantias de QoS e Satisfação

Iran M. B. Júnior¹, F. Rafael M. Lima^{1,2}, Tarcisio F. Maciel², F. Rodrigo P. Cavalcanti²

¹Engenharia da Computação, Universidade Federal do Ceará (UFC),
Sobral, Ceará, Brasil

²Grupo de Pesquisa em Telecomunicações Sem Fio (GTEL),
Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil

iranjunior51@hotmail.com, {rafaelm,maciel,rodrigo}@gtel.ufc.br

Abstract. *This paper proposes an optimal solution to the frequency and power resource allocation employing Single Carrier - Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) such as in 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.*

Resumo. *Este trabalho propõe uma solução ótima para alocação de recursos em termos de frequência e potência de transmissão em sistemas SC-FDMA (do inglês, Single Carrier - Frequency Division Multiple Access) tal qual empregado no sistema LTE (do inglês, Long Term Evolution). Estudamos o problema de minimização da potência total transmitida de um sistema celular multisserviços sujeito a restrições que assegurem um percentual mínimo de usuários satisfeitos. 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.*

1. Introdução

O uso de dispositivos sofisticados como *smartphones*, *tablets* e *notebooks* têm proporcionado uma rápida popularidade das novas aplicações móveis e serviços, provocando também um aumento na demanda por altas taxas de dados em rede móveis. Além disso, em um futuro próximo, espera-se que todos os objetos do dia a dia, tais como geladeiras, televisores e outras máquinas, possam se conectar a *internet*. Assim, a busca por um menor consumo de energia juntamente com o aumento de tráfego e a necessidade de prover qualidade de serviço sustentável, surgem como um cenário desafiador para as operadoras dos sistemas e para indústria de telecomunicações. O desenvolvimento de novas estratégias que possam atender a essas novas demandas de tráfego, assim como proporcionar uma melhor eficiência energética, estão de acordo com a evolução das várias gerações das comunicações móveis.

O sistema LTE e LTE-*Advanced* são sistemas capazes de atender a crescente demanda de tráfego em redes móveis. A fim de cumprir essa tarefa com êxito, estes sistemas empregam no enlace direto o esquema de múltiplo acesso ou OFDMA (do inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*). Este esquema de múltiplo acesso proporciona muitas vantagens tais como alta eficiência espectral, granularidade na alocação de recursos e proteção contra os efeitos danosos causados pelo canal de multipercursos tais como a interferência inter-simbólica. No entanto, o esquema OFDMA não é utilizado no enlace reverso por apresentar uma grande variabilidade na relação entre a potência de pico e potência média ou PAPR (do inglês, *Peak-to-Average Power Ratio*), o que torna necessário o uso de amplificadores de potência altamente lineares nos transmissores (terminais móveis). Isso traria problemas quanto ao custo e tamanho dos terminais móveis.

Diante disso, o esquema de múltiplo acesso por divisão de frequência com portadora única ou SC-FDMA foi escolhido como esquema de múltiplo acesso do enlace reverso ou *uplink* dos sistemas LTE/LTE-A. Comparado ao OFDMA, o SC-FDMA possui uma baixa PAPR [Myung et al. 2006]. Porém, sinais SC-FDMA podem apresentar valores consideráveis de interferência intersimbólica ou ISI (do inglês, *Intersymbol Interference*) nas ERBs (Estações de Rádio Base). Desta forma, deve-se empregar um equalizador adaptativo no domínio da frequência na ERB a fim de minimizar a interferência intersimbólica.

Outra diferença crucial entre os esquemas SC-FDMA e OFDMA é a adjacência de recursos na frequência ao alocar recursos aos terminais móveis necessária para garantir baixos valores de PAPR. Diferentemente dos sistemas OFDMA em que diferentes blocos de recursos localizados em diferentes pontos da banda de frequência disponível podem ser alocados livremente para transmissão, em SC-FDMA, os blocos de recursos na frequência devem ser alocados de forma contígua ou adjacente na frequência para cada terminal móvel, o que dificulta a tarefa de alocação de recursos de rádio nestas redes.

Neste artigo, estudamos sistemas SC-FDMA tal qual empregado no enlace reverso dos sistemas LTE/LTE-A sob a ótica de alocação de recursos de rádio com objetivo de minimizar a potência transmitida no enlace reverso e garantir satisfação dos usuários do sistema em termos de QoS (do inglês, *Quality of Service*). O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Na seção 2, revisamos brevemente os trabalhos mais relevantes relacionados ao nosso artigo e apresentamos as principais contribuições deste trabalho. Nas seções 3 e 4, apresentamos os principais pressupostos referentes à modelagem do sistema e também o problema estudado na forma de otimização, respectivamente. Na seção 5 apresentamos métodos para obter a solução ótima do problema estudado. Um estudo de caso é discutido na seção 6, onde demonstramos os ganhos resultantes da gerência de recursos de rádio em sistemas LTE/LTE-A. Finalmente, as principais conclusões e perspectivas estão resumidas na seção 7.

2. Revisão Bibliográfica e Contribuições

Em esquemas OFDMA, os problemas de RRA (do inglês, *Radio Resource Allocation*) têm sido estudados na forma de otimização com diferentes restrições e objetivos. [Capozzi et al. 2013] é uma boa referência para um leitor que deseja se aprofundar um pouco mais sobre este tópico. Diferentemente dos sistemas OFDMA, os estudos de RRA para sistemas SC-FDMA são bem mais recentes.

Na literatura, a *maximização da taxa total de dados* é um dos problemas mais comuns em RRA. Este problema consiste em encontrar a alocação de recurso que maximiza a taxa de dados total transmitida. Para sistemas OFDMA, tal qual o enlace direto dos sistemas LTE/LTE-A, este problema pode ser resolvido de forma ótima utilizando um simples algoritmo de complexidade computacional polinomial proposto em [Jang and Lee 2003]. No entanto, como consequência da restrição de adjacência, a obtenção da solução ótima deste problema apresenta-se como uma tarefa bem mais complexa em sistemas SC-FDMA. Em [Lim et al. 2006] foi considerado o problema de *maximização da taxa total de dados* no cenário SC-FDMA no enlace reverso. Porém, a restrição de adjacência necessária para assegurar uma baixa PAPR foi ignorada pelo trabalho. Em [Nwamadi et al. 2008], os autores consideraram a restrição de adjacência, todavia, assumiu-se que cada usuário exigia uma certa quantidade de recursos de frequência. Na prática, usuários possuem requisitos de QoS distintos que podem ser diferentes taxas de dados requisitadas, por exemplo. Além disso, as qualidades de canal experimentada pelos enlaces de dados dos usuários em geral podem ser consideradas independentes do ponto de vista estatístico. Como o número de recursos em frequência alocados a cada usuário depende tanto dos requisitos de QoS como da qualidade do canal, podemos concluir que a modelagem do artigo [Nwamadi et al. 2008] carece de apelo prático.

Recentemente, um dos problemas que vem ganhando espaço em RRA consiste na maximização da eficiência energética em sistemas sem fio. Este tipo de problema é motivado pela crescente demanda por maior eficiência no uso dos recursos energéticos em rede móvel. De uma forma geral, estes problemas tem por objetivo minimizar a potência total transmitida ou minimizar o consumo de energia por bit transmitido. Um dos primeiros trabalhos nessa direção consistiu na minimização da potência total transmitida sujeita a restrições de QoS para sistemas OFDMA presente no trabalho [Wong et al. 1999]. Já em [Triantafyllopoulou et al. 2015], os autores consideraram os efeitos de QoS sobre a eficiência energética com o objetivo minimizar o consumo de energia por bit transmitido no sistema SC-FDMA. Embora os aspectos de QoS tenha sido considerados no trabalho, os autores não utilizaram alocação de potência adaptativa e ignoraram o cenário multisserviços.

Atualmente, uma gama de serviços são oferecidos para os diversos dispositivos móveis. Os trabalhos [Ruby and Leung 2011] e [Delgado and Jaumard 2010] consideram um cenário multisserviço em que é assumido que os terminais móveis podem estar utilizando diferentes aplicações móveis e portanto, terem requisitos de QoS diferentes. Por exemplo, um terminal móvel pode estar fazendo a transmissão de um arquivo pessoal para um servidor na nuvem, enquanto que outro terminal participa de uma conversa por vídeo-telefonía. O trabalho [Delgado and Jaumard 2010] também aborda um problema de RRA em cenários multisserviço maximizando uma função de utilidade restrita aos requisitos de QoS de diferentes serviços ou classes de tráfego. Os autores propõem dois algoritmos heurísticos para resolver o problema, mas não fornece uma solução ótima ou limitante superior em desempenho.

Embora as questões de QoS para o cenário multisserviço para sistemas SC-FDMA tenham sido abordadas nos trabalhos previamente citados, as garantias de satisfação mínima por serviço foram ignoradas pelos mesmo. Definimos satisfação por serviço como o percentual (ou número) de usuários que utilizam um certo tipo de serviço que

devem ser efetivamente satisfeitos. A operadora móvel pode definir de forma flexível esse percentual de forma a realizar controle de carga e congestionamento. Por exemplo, a operadora móvel pode determinar que o número de usuários satisfeitos em vídeo-telefonia seja maior que o número de usuários satisfeitos que fazem *upload* de arquivos na nuvem, por entender que o primeiro serviço é mais prioritário. As garantias de satisfação mínima foram propostas como métricas de nível sistêmico em [Furuskär 2003] e usadas em muitas outros trabalhos, como [Lima et al. 2010] e [Maurício et al. 2014].

Em [Lima et al. 2016], dois problemas distintos de RRA em sistemas SC-FDMA foram considerados: *maximização da taxa de dados* ou problema URM (do inglês, *Unconstrained Rate Maximization*) e *maximização da taxa de dados sujeito aos requisitos de satisfação mínima* em um cenário multisserviço ou problema CRM (do inglês, *Constrained Rate Maximization*). 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, no entanto, se torna 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. Esta última hipótese traz benefícios teóricos por simplificar a estrutura do problema de RRA, contudo, 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, as principais contribuições deste artigo são:

- Formulação de um novo de problema de otimização dos recursos energéticos considerando as restrições de adjacência e de QoS presente em [Lima et al. 2016].
- Proposta de solução ótima para o novo problema após uma reformulação que transformou um problema combinatorial não linear em ILP (do inglês, *Integer Linear Problem*).
- Análise de desempenho da solução para o novo problema proposto considerando como cenário de estudo de caso o enlace reverso do sistema LTE. Em particular, enfatizamos o impacto e potenciais ganhos em termos energéticos no problema de RRA apresentado em [Lima et al. 2016].

3. Modelagem do Sistema

Assumimos que a alocação de recursos deve ser realizada em um setor da célula de um sistema celular com uma ERB que serve os terminais conectados. Ambos terminais móveis e ERB empregam transceptores de antena única. Para este trabalho iremos considerar um problema no enlace reverso da rede ou *uplink*. Utilizaremos a combinação SC-FDMA e TDMA para controlar a interferência intracelular entre o usuários do mesmo setor. Definimos um bloco de recurso ou RB (do inglês, *Resource Block*), como o mínimo recurso alocável a um determinado usuário, que é composto por um grupo de uma ou mais subportadoras OFDM adjacentes e um número de símbolos OFDM consecutivos, que representam um intervalo de tempo de transmissão ou TTI (do inglês, *Transmission Time Interval*). Supomos que a interferência intercelular, ou seja a interferência causada pelo reuso da mesma banda de frequência em outros setores, é modelada como uma variável Gaussiana e que a mesma faz parte do ruído térmico na expressão da SNR. Ressaltamos

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 et al. 2010].

Nosso foco neste artigo é sobre um problema de atribuição de recurso instantâneo que consiste em determinar em um determinado TTI, quais recursos devem ser atribuídos aos terminais conectados a fim de cumprir objetivos e restrições específicas (definidos mais adiante na seção 4). Observe que a solução sequencial do problema de atribuição de recursos ao longo de vários TTIs é equivalente a um problema de escalonamento de pacotes. Portanto, consideramos que J usuários são candidatos a receber recursos e que existe um total de N RBs disponíveis. Além disso, \mathcal{J} e \mathcal{N} são os conjuntos de usuários ativos e RBs, respectivamente.

Assumimos que o operador do sistema fornece diferentes serviços aos usuários ativos, tais como *web browsing*, *download/upload* de arquivos ou VoIP (do inglês, *Voice over Internet Protocol*). Assumimos que existe um total de S serviços no sistema e \mathcal{S} representa o conjunto de todos os serviços disponibilizados pela operadora móvel. Consideramos que existem J_s usuários utilizando o serviço $s \in \mathcal{S}$ e \mathcal{J}_s consiste no conjunto de usuários que utilizam o serviço s . Assumimos também que, $\cup_{s \in \mathcal{S}} \mathcal{J}_s = \mathcal{J}$ e $\sum_{s \in \mathcal{S}} J_s = J$.

Consideramos que os coeficientes do canal rádio móvel permanecem aproximadamente constantes durante um TTI e que no TTI atual, o usuário j possui um requisito de taxa igual a t_j . Uma observação importante é que, requisitos de taxa de longo ou médio prazo podem ser mapeados em requisitos instantâneos conforme mostrado em [Lima et al. 2010]. O parâmetro k_s representa o número mínimo de usuários que devem ser satisfeitos com seu QoS para cada serviço.

O sistema SC-FDMA impõe duas restrições sobre assinalamento de recursos conforme explicado antes. A primeira, denominada por restrição de exclusividade, garante que um mesmo RB não pode ser reutilizado dentro de uma célula. Note que esta restrição também está presente em sistemas OFDMA. A segunda consiste na restrição de adjacência, a qual determina que os RBs atribuídos a um dado usuário devem ser adjacentes uns aos outros no domínio da frequência. Esta restrição é própria do SC-FDMA e necessária para obter benefícios em termos de PAPR.

O número de possíveis assinalamentos do sistema é limitado em virtude da restrição de adjacência. De acordo com o trabalho [Wong et al. 2009], o número de padrões de assinalamentos, P , que podem ser formados com N RBs é dado por

$$P = N^2/2 + N/2 + 1. \quad (1)$$

Como exemplo, considerando $N = 4$, temos $P = 11$ e os possíveis grupos de RBs ou padrões de assinalamentos são $\{1\}$, $\{2\}$, $\{3\}$, $\{4\}$, $\{1, 2\}$, $\{2, 3\}$, $\{3, 4\}$, $\{1, 2, 3\}$, $\{2, 3, 4\}$, $\{1, 2, 3, 4\}$ e $\{\emptyset\}$. Assumimos \mathcal{P} como o conjunto com todos os índices de todos os padrões de assinalamentos de recursos. De acordo com isto, ao invés de modelarmos a atribuição de um RB específico ao usuário, consideramos neste trabalho o assinalamento de um padrão de recursos a um terminal. Podemos, então, modelar a restrição de adjacência por uma matriz binária \mathbf{A} com elementos $a_{n,p}$, com $n \in \mathcal{N}$ e $p \in \mathcal{P}$, que assume 1 se o RB n pertence ao padrão de assinalamento p e 0 caso contrário.

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

É comum na literatura considerar o mapeamento contínuo entre taxa de dados e SNR. Em geral, essas funções apresentam a propriedade de convexidade. 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 de um cenário mais realista, o mapeamento discreto será considerado neste trabalho.

Consideramos M níveis de MCSs contidos no conjunto $\mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$. Para que um determinado usuário atinja o nível de MCS m e portanto transmita com taxa de dados r_m , é necessário que a SNR experimentada esteja no intervalo de SNR $[\gamma^m, \gamma^{m+1}]$, em que $\gamma^m < \gamma^{m+1}$, conforme a Tabela 1. Assumimos que a máxima potência disponível no terminal j para transmissão é P_{T_j} .

A SNR experimentada pelo enlace entre a ERB e o usuário j quando transmite sobre a z -ésima subportadora do RB n , $\gamma_{j,z,n}$, é dada por

$$\gamma_{j,z,n} = ((p_{j,p,m}/(c \cdot N_p)) \cdot \alpha_j \cdot \|h_{j,z,n}\|^2)/\sigma^2 = p_{j,p,m} \cdot \bar{g}_{j,z,n}, \quad (2)$$

em que $p_{j,p,m}$ é a potência necessária para o usuário j utilizando o padrão de assinalamento p atingir o nível de MCS m , c é o número de subportadoras em um RB, N_p o número de RBs do padrão de assinalamento p , α_j representa o efeito conjunto da perda de percurso e sombreamento do enlace entre o usuário j e a ERB, σ^2 é a potência do ruído no receptor na largura de banda de uma subportadora, $h_{j,z,n}$ é a resposta complexa em frequência do canal entre a ERB e o usuário j sobre a z -ésima subportadora do RB n 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 RB n normalizado pela potência do ruído térmico. Definimos $\|\cdot\|$ como o operador que retorna o valor absoluto do seu argumento.

Como visto anteriormente, o sistema SC-FDMA necessita de equalizador no domínio da frequência na ERB para combater a ISI. Para este trabalho, utilizaremos o equalizador MMSE (do inglês, *Minimum Mean Square Error*), e de acordo com [Shi et al. 2004], a SNR efetiva experimentada pelo receptor quando os dados são transmitidos pelo usuário j utilizando o padrão de assinalamento p , $\gamma_{j,p}^{MMSE}$, é dada por

$$\gamma_{j,p}^{MMSE} = \left(\left(\frac{1}{c \cdot |\mathcal{N}_p|} \sum_{n \in \mathcal{N}_p} \sum_{z=1}^c \frac{\gamma_{j,z,n}}{\gamma_{j,z,n} + 1} \right)^{-1} - 1 \right)^{-1}, \quad (3)$$

em que \mathcal{N}_p é o conjunto de RBs que compõem o padrão de assinalamento p e $|\cdot|$ denota a cardinalidade de um conjunto.

Assuma $f(\cdot)$ correspondente a função responsável pelo mapeamento discreto apresentado na Tabela 1. A taxa transmitida quando o usuário j utilizando o padrão de assinalamento p atinge o nível de MCS m , é dada por $r_{j,p,m} = f(\gamma_{j,p}^{MMSE})$.

Substituindo a equação (2) em (3), e fazendo $\gamma_{j,p}^{MMSE} = \gamma^m$, podemos encontrar os valores para $p_{j,p,m}$ através da solução numérica da equação a seguir:

$$\gamma^m = \left(\left(\frac{1}{c \cdot |\mathcal{N}_p|} \sum_{n \in \mathcal{N}_p} \sum_{z=1}^c \frac{p_{j,p,m} \cdot \bar{g}_{j,z,n}}{p_{j,p,m} \cdot \bar{g}_{j,z,n} + 1} \right)^{-1} - 1 \right)^{-1}. \quad (4)$$

4. Formulação do Problema

O problema formulado nesse trabalho consiste em minimizar a potência total transmitida no enlace reverso de um sistema empregando SC-FDMA utilizando as restrições de satisfação mínima de usuários por serviço em um dado TTI. As restrições de QoS são apresentadas em [Lima et al. 2016], onde o principal objetivo foi a maximização da taxa total transmitida. Assim diferentemente de [Lima et al. 2016], neste artigo buscaremos uma maior eficiência energética através da alocação de potência adaptativa, a qual foi desconsiderada em [Lima et al. 2016]. Contudo, assumimos que a potência é igualmente distribuída entre os RBs assinalados a cada usuário. Essa consideração se faz necessária para que os os benefícios em termos de redução de PAPR não sejam perdidos. No entanto, usuários diferentes podem ajustar o nível de potência transmitida de acordo com seus objetivos.

Assim, assumamos \mathbf{X} como uma matriz binária com elementos $x_{j,p,m}$ que assume 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 na variável de otimização. De acordo com as considerações feitas anteriormente, o problema proposto é apresentado a seguir

$$\min_{\mathbf{X}} \left(\sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{m \in \mathcal{M}} x_{j,p,m} \cdot p_{j,p,m} \right), \quad (5a)$$

sujeito a

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{m \in \mathcal{M}} a_{n,p} \cdot x_{j,p,m} = 1, \quad \forall n \in \mathcal{N}, \quad (5b)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{m \in \mathcal{M}} x_{j,p,m} = 1, \quad \forall j \in \mathcal{J}, \quad (5c)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{m \in \mathcal{M}} p_{j,p,m} \cdot x_{j,p,m} \leq P_{T_j}, \quad \forall j \in \mathcal{J}, \quad (5d)$$

$$x_{j,p,m} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in \mathcal{J}, \quad \forall p \in \mathcal{P} \text{ e } \forall m \in \mathcal{M}, \quad (5e)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}_s} u \left(\sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{m \in \mathcal{M}} r_{j,p,m} \cdot x_{j,p,m}, t_j \right) \geq k_s, \quad \forall s \in \mathcal{S}. \quad (5f)$$

Temos que a função objetivo mostrada em (5a) consiste na potência total transmitida pelos terminais. As restrições (5b) e (5e) asseguram que os RBs não serão reutilizados dentro da célula. As restrições (5c) e (5e) garantem que apenas um padrão de assinalamento seja adotado por cada usuário. Além disso, a restrição (5d) assegura que a potência usada por cada terminal j não exceda a máxima disponível. Por fim, a restrição (5f) estabelece que um número mínimo de usuários, k_s , deve ser satisfeito para cada serviço.

5. Caracterização da Solução Ótima

O problema (5) consiste em um problema de otimização combinatorial não linear devido a restrição (5f). Por conta da não linearidade do problema, a solução ótima só poderá ser encontrada por busca exaustiva, o que a torna sua obtenção impraticável mesmo para valores moderados de J , N , M e S .

De acordo com [Lima et al. 2016], o problema (5) pode ser reformulado para um problema de otimização linear inteiro, através da adição de novas variáveis de otimização e restrições. Assim, assumamos ρ_j uma variável de seleção binária que assume 1 se o usuário j é selecionado para ser satisfeito e 0 caso contrário. Considerando essa nova variável, o problema (5) pode ser reformulado substituindo a restrição (5f) por duas novas restrições como segue

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{m \in \mathcal{M}} r_{j,p,m} \cdot x_{j,p,m} \geq \rho_j \cdot t_j, \forall j \in \mathcal{J}. \quad (6a)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} \rho_j \geq k_s, \forall s \in \mathcal{S}. \quad (6b)$$

Ao transformar o problema 5 em um problema ILP, podemos utilizar para sua resolução diversos *softwares* disponíveis no mercado que utilizam principalmente algoritmos baseados no método BB (do inglês, *Branch and Bound*) [Nemhauser and Wolsey 1988].

6. Estudo de Caso - Avaliação de Desempenho para Enlace Reverso do Sistema LTE

Esta seção é dedicada a análise de desempenho através de simulações computacionais da solução proposta para o novo problema apresentado neste artigo. Na seção 6.1, apresentamos em detalhes as principais hipóteses, modelos e parâmetros usados nas simulações. Na seção 6.2, apresentamos e discutimos os resultados obtidos.

6.1. Considerações para Simulação

Os principais aspectos de um sistema SC-FDMA no enlace reverso apresentado na seção 3 foram considerados no simulador computacional. 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

Tabela 2. Principais Parâmetros para Simulação

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

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 avaliar o desempenho da solução proposta para o problema aqui estudado consideramos um cenário em que o sistema disponibiliza dois serviços, ou seja $S = 2$, o qual tem um total de oito usuários ativos, $J = 8$, distribuídos igualmente entre os serviços, $J_1 = 4$ e $J_2 = 4$. Assumimos também, que quatro usuários devem ser satisfeitos para o serviço 1, $k_1 = 4$, e 3 usuários satisfeitos para o serviço 2, $k_2 = 3$. Além disso, assumimos diferentes requisitos de taxa de dados dos usuários, t_j , conforme apresentado na Tabela 2.

Os algoritmos simulados nesse trabalho são:

- A solução do problema proposto por este trabalho na seção 5. Nas figuras, essa solução será identificada por Proposta.
- A solução do problema URM apresentado em [Lima et al. 2016] que consiste no problema de maximização da taxa de dados sem a restrição de QoS presente em (5f). Note que nesse caso os requisitos de taxa de dados e outras variáveis relacionadas a QoS não são críticas para o problema. A solução será identificada nas figuras como URM OPT.
- A solução do problema CRM apresentado em [Lima et al. 2016] que não utiliza alocação adaptativa de potência. Essa solução será denominada nas figuras como CRM OPT.

Utilizamos o *IBM ILOG CPLEX Optimizer* [ILOG 2014] 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:

- Potência total transmitida: Essa métrica está relacionada à função objetivo do problema (5). A potência total é a soma das potências transmitidas por todos os terminais em um dado TTI ou *snapshot*. O percentual de potência utilizada consiste na razão entre a soma das potências utilizadas por todos terminais móveis e a soma das potências máximas que poderiam ser transmitidas por todos terminais móveis, isto é, $J \cdot P_{T_j}$. O número de *snapshots* realizados nas simulações foi suficiente para assegurar um baixo desvio padrão nas estatísticas coletadas que ficaram entre 0.06% e 1.7%.
- Taxa de *outage*: Esta métrica está relacionada com as restrições mínimas de satisfação do problema (5). A taxa de *outage* é 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, isto é, o algoritmo não encontra uma solução que cumpra as restrições do problema (5). A taxa de *outage* mostra a capacidade dos algoritmos em encontrar uma solução viável para o problema CRM.
- Taxa de dados média: Esta métrica está associada com as restrições mínimas de satisfação do problema (5). A taxa total de dados é a soma da taxa de dados de todos os terminais em um dado *snapshot*. A taxa de dados média é a razão entre a soma da taxa total de dados e o número de *snapshots* que não ocorre *outage*. As simulações realizaram um número de *snapshots* suficiente para garantir um baixo desvio padrão nas estatísticas coletadas que ficaram entre 2.39 e 89.02 kbits/s.

6.2. Resultados

Na Figura 1 temos a taxa de *outage* versus a taxa de dados requisitada por todos os usuários para a solução CRM OPT, URM OPT e para a solução proposta. Inicialmente, podemos observar que a taxa de *outage* aumenta à medida que a taxa de dados requisitada aumenta para todas as soluções. Isso já é algo esperado visto que o aumento da taxa requisitada torna a obtenção da satisfação do número mínimo de usuários mais difícil. Outra observação, também já esperada, consiste no fato da solução URM OPT apresentar altas taxas de *outage* mesmo nos casos em que se assume baixos valores de requisitos de taxas de dados. A razão para esse comportamento é que a solução URM OPT 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. Além disso, também observamos que a taxa de *outage* da solução CRM OPT e da solução proposta são iguais para todas as taxas de dados requisitadas. Isso nos mostra que a solução proposta consegue atender os requisitos do sistema da mesma forma que a solução CRM OPT.

Na Figura 2 temos a taxa total de dados média versus a taxa de dados requisitada por cada terminal para as soluções CRM OPT, URM OPT e para a solução proposta. A princípio, podemos ver que a taxa total de dados da solução proposta aumenta à medida

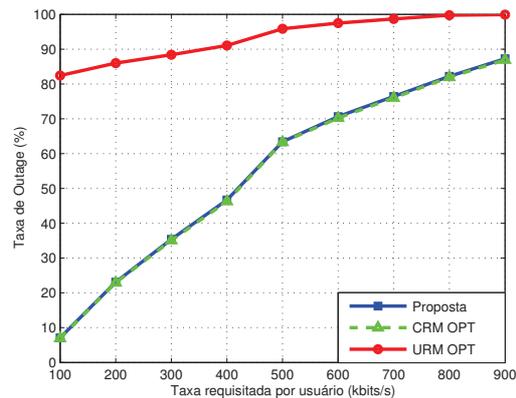


Figura 1. Taxa de *outage* para a solução CRM OPT, URM OPT e para a solução proposta.

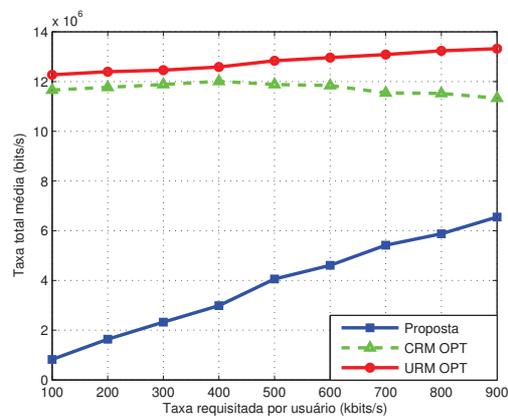


Figura 2. Taxa total de dados média para a solução CRM OPT, URM OPT e para a solução proposta.

que a taxa de dados requisitada aumenta. A razão para esse comportamento já era esperada visto que a solução proposta busca apenas satisfazer a taxa requisitada de cada usuário de forma a economizar a potência total transmitida. Ainda de acordo com a Figura 2, ao compararmos os três algoritmos podemos observar que a solução URM OPT e a solução CRM OPT apresentam as maiores taxas de dados. Este resultado deve-se ao fato destes algoritmos terem por objetivo a maximização da taxa total transmitida no sistema.

Uma análise descompromissada dos resultados apresentados nas Figuras 1 e 2 podem levar a uma conclusão errônea quanto a relevância da solução proposta neste artigo. Isso deve-se ao fato da solução CRM OPT obter baixas taxas de outage e ao mesmo tempo altíssimas taxas de transmissão, enquanto que as taxas apresentadas pela solução proposta neste artigo são mais moderadas. Contudo, a análise da Figura 3 mostra um aspecto importante a ser considerado nesta análise. Na Figura 3 apresentamos o percentual de potência utilizada versus a taxa de dados requisitada por cada usuário das soluções CRM OPT, URM OPT e da solução proposta. Primeiramente, podemos observar que o percentual de potência utilizada aumenta conforme aumentamos a taxa de dados requisitadas pelos usuários para a solução proposta. Isto é esperado visto que quanto maiores

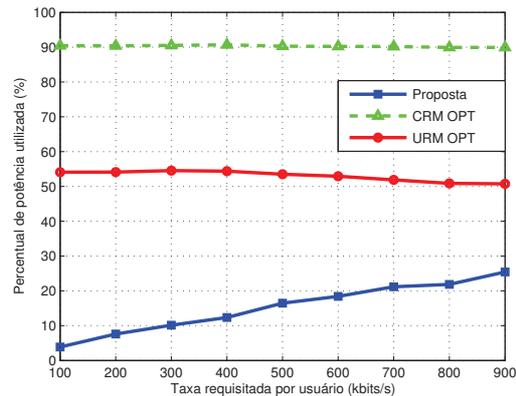


Figura 3. Percentual de potência utilizada pela solução CRM OPT, URM OPT e pela solução proposta.

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. As soluções URM OPT e CRM OPT em geral permitem que seus terminais utilizem a máxima potência de transmissão, P_{T_j} . Além disso, comparando o desempenho relativo dos algoritmos na Figura 3 observamos que a solução URM OPT apresenta uma maior economia em termos de potência quando comparada a solução CRM OPT. Porém, conforme visto anteriormente, a solução URM OPT não é capaz de satisfazer o QoS dos usuários conforme visto na Figura 1. Como resultado mais importante, destacamos a grande economia de potência realizada pela solução proposta comparada a solução CRM OPT. Considerando uma taxa de dados requisitada de 500 kbps, podemos ver que a solução proposta apresenta um consumo de aproximadamente 16% da potência total disponível, enquanto as soluções CRM OPT e URM OPT apresentam um consumo de aproximadamente 90% e 53%, respectivamente.

Uma análise conjunta das Figuras 1, 2 e 3 nos permite concluir que a solução proposta é capaz de satisfazer o QoS e o número mínimo de usuários satisfeitos com uma quantidade de potência utilizada bem menor que a utilizada pelas outras soluções. Apesar da solução proposta apresentar uma menor taxa total transmitida quando comparada a solução CRM OPT na Figura 2, essa menor taxa total transmitida não compromete a satisfação dos usuários. Uma menor quantidade de potência transmitida conforme mostrada na Figura 3, traz uma série de vantagens em sistemas celulares devido a diminuição drástica da interferência intercelular gerada no sistema. Além disso, consumo de energia racional consiste em um dos pilares no projeto das redes modernas.

7. Conclusões e Perspectivas Futuras

Neste trabalho, estudamos o problema de minimização da potência total transmitida sujeito a restrições de satisfação de QoS e com alocação de potência adaptativa no enlace reverso do sistema LTE empregando SC-FDMA. O sistema SC-FDMA exige que os RBs atribuídos a um determinado usuário sejam adjacentes uns aos outros a fim de assegurar uma baixa PAPR.

Mostramos que o problema formulado consiste em um problema de otimização combinatorial não linear. Em virtude da alta complexidades desses tipos de proble-

mas, convertemos o mesmo em um problema inteiro linear por meio da adição de novas variáveis de otimização e restrições. Esse tipo de problema, apesar da complexidade exponencial, pode ser resolvidos por técnicas convencionais. Os resultados das simulações computacionais mostram que a solução proposta obteve resultados expressivos em termos de eficiência energética quando comparada as demais soluções sem comprometer a satisfação com o QoS requisitado pelos usuários. Os ganhos de economia de potência são superiores a 70% quando comparado a solução CRM OPT.

Por fim, diante dos bons resultados obtidos, como perspectivas deste trabalho, podemos mencionar o desenvolvimento de soluções subótimas com menor complexidade do que 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, por exemplo.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo Centro de Inovação da Ericsson Telecomunicações S.A., Brasil, sob o contrato de cooperação técnico EDB/UFC.43. O estudante Iran M. B. Júnior agradece a Coordenação de Acompanhamento de Discente (CAD) da UFC pelo suporte financeiro concedido por meio do Programa de Educação Tutorial (PET) e F. Rafael M. Lima agradece a Fundação Cearense de Apoio a Pesquisa (FUNCAP) pelo apoio financeiro em forma de bolsa de produtividade em pesquisa.

Referências

- 3GPP (2009). Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); physical layer procedures. Third Generation Partnership Project, Tech. Rep. TR 36.213 V8.6.0, Mar. 2009.
- 3GPP (2017). 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). Technical Specification, 36.300 V14.2.0, Mar. 2017.
- Capozzi, F., Piro, G., Grieco, L. A., Boggia, G., and Camarda, P. (2013). Downlink packet scheduling in LTE cellular networks: Key design issues and a survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(2):678–700.
- Delgado, O. and Jaumard, B. (2010). Scheduling and resource allocation for multiclass services in LTE uplink systems. In *2010 IEEE 6th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, pages 355–360. IEEE.
- Furuskär, A. (2003). Radio resource sharing and bearer service allocation for multi-bearer service, multi-access wireless networks.
- ILOG, I. (2014). Cplex optimization studio. URL: <http://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer>.
- Jang, J. and Lee, K. B. (2003). Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 21(2):171–178.
- Lim, J., Myung, H. G., Oh, K., and Goodman, D. J. (2006). Channel-dependent scheduling of uplink single carrier FDMA systems. In *IEEE Vehicular technology conference*, pages 1–5. IEEE.

- Lima, F. R. M., Maciel, T. F., and Cavalcanti, F. R. P. (2016). Radio resource allocation in SC-FDMA uplink with resource adjacency constraints. *Journal of Communication and Information Systems*, 31(1).
- Lima, F. R. M., Wänstedt, S., Cavalcanti, F. R. P., and Freitas, W. C. (2010). Scheduling for improving system capacity in multiservice 3GPP LTE. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2010:3.
- Maurício, W. V., Lima, F. R. M., Maciel, T. F., and Cavalcanti, F. R. P. (2014). Spectral and energy efficiency with satisfaction constraints. In *Telecommunications Symposium (ITS), 2014 International*, pages 1–5. IEEE.
- Mehlführer, C., Wrulich, M., Ikuno, J. C., Bosanska, D., and Rupp, M. (2009). Simulating the long term evolution physical layer. In *Signal Processing Conference, 2009 17th European*, pages 1471–1478. IEEE.
- Myung, H. G., Lim, J., and Goodman, D. J. (2006). Single carrier FDMA for uplink wireless transmission. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 1(3):30–38.
- Nemhauser, G. L. and Wolsey, L. A. (1988). Integer programming and combinatorial optimization. Wiley, Chichester. *GL Nemhauser, MWP Savelsbergh, GS Sigismondi (1992). Constraint Classification for Mixed Integer Programming Formulations. COAL Bulletin*, 20:8–12.
- Nwamadi, O., Zhu, X., and Nandi, A. (2008). Dynamic subcarrier allocation for single carrier-FDMA systems. In *Signal Processing Conference, 2008 16th European*, pages 1–5. IEEE.
- Ruby, R. and Leung, V. (2011). Towards QoS assurance with revenue maximization of LTE uplink scheduling. In *Communication Networks and Services Research Conference (CNSR), 2011 Ninth Annual*, pages 202–209. IEEE.
- Seol, C., Cheun, K., and Hong, S. (2010). A statistical inter-cell interference model for downlink cellular OFDMA networks under log-normal shadowing with rician fading. *IEEE Communications Letters*, 14(11):1011–1013.
- Shi, T., Zhou, S., and Yao, Y. (2004). Capacity of single carrier systems with frequency-domain equalization. In *Emerging Technologies: Frontiers of Mobile and Wireless Communication, 2004. Proceedings of the IEEE 6th Circuits and Systems Symposium on*, volume 2, pages 429–432. IEEE.
- Triantafyllopoulou, D., Kollias, K., and Moessner, K. (2015). QoS and energy efficient resource allocation in uplink SC-FDMA systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 14(6):3033–3045.
- Wong, C. Y., Cheng, R. S., Letaief, K. B., and Murch, R. D. (1999). Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 17(10):1747–1758.
- Wong, I. C., Oteri, O., and McCoy, W. (2009). Optimal resource allocation in uplink SC-FDMA systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8(5):2161–2165.
- Wu, G., Yang, C., Li, S., and Li, G. Y. (2015). Recent advances in energy-efficient networks and their application in 5G systems. *IEEE Wireless Communications*, 22(2):145–151.