

# Alocação de Potência Adaptativa para Maximização da Eficiência Espectral Sujeita a Restrições de Satisfação

Wesley Vinicius Fernandes Mauricio, Francisco Rafael Marques Lima, Tarcísio Ferreira Maciel e Francisco Rodrigo Porto Cavalcanti

**Resumo**—Neste artigo revisaremos o problema de alocação de recursos de rádio para maximizar a taxa de dados de transmissão total sujeita a garantias de satisfação de Qualidade de Serviço ou *Quality of Service* (QoS). Este problema foi anteriormente estudado na perspectiva da alocação de recursos de frequência (apenas) considerando alocação de potência igualitária. No presente estudo, além de estudar a alocação de recursos de frequência, estudaremos também este problema assumindo alocação adaptativa de potência de transmissão. Como uma das contribuições deste trabalho, temos a elaboração do problema na forma de um problema de otimização não linear inteiro que depois, é simplificado para um problema inteiro e linear após considerarmos algumas suposições razoáveis. Através da obtenção da resposta ótima do problema por meio de simulações computacionais, fazemos uma análise dos benefícios em desempenho que podem ser obtidos através do uso de alocação adaptativa de potência para garantias de QoS.

**Palavras-Chave**—Alocação de Recursos de Rádio, Alocação de Potência e Qualidade de Serviço.

**Abstract**—In this work we revisit the radio resource allocation problem of maximizing the total transmit data rate subject to satisfaction guarantees in terms of QoS. It was previously studied on the perspective of resource block assignment (only) considering equal power allocation and, herein, we study this problem assuming adaptive power allocation. One of the contributions of this work is the formulation of the studied problem as a non-linear integer optimization problem. Then, based on reasonable assumptions and some algebraic operations we were able to convert this problem to an integer and linear optimization problem. Through the analysis of the optimal solution that was obtained by means of computational simulations, we are able to assess the possible performance gains that could be obtained due to the use of adaptive power allocation in terms of QoS guarantees.

**Keywords**—Radio Resource Allocation, Power Allocation and Quality of Service.

## I. INTRODUÇÃO

Atualmente, comunicações móveis têm experimentado um grande desenvolvimento desde a primeira geração de sistemas celulares, que era analógica, até os sistemas atuais. Dentre as razões que motivaram essa evolução podemos mencionar a busca por maior eficiência energética e espectral, assim como a busca por atender os novos requisitos de *Quality of Service* (QoS) [1].

Emails: aluncardx@gmail.com, {rafaelm,maciel,rodrigo}@gtel.ufc.br. Os autores pertencem ao Grupo de Pesquisa em Telecomunicações Sem Fio da Universidade Federal do Ceará. Wesley V. F. Maurício gostaria de agradecer ao PET UFC.

Esforços multidisciplinares envolvendo pesquisa em protocolos de comunicação móvel, processamento de sinais, otimização, entre outros, são responsáveis pelos avanços que as comunicações móveis têm alcançado. Dois exemplos concretos de avanços tanto no núcleo da rede como na parte de acesso de rádio são a convergência da rede de transporte para o *Internet Protocol* (IP) e o uso de transceptores com múltiplas antenas, respectivamente.

Alocação de Recursos de Rádio ou *Radio Resource Allocation* (RRA) é uma funcionalidade muito eficiente para otimizar o desempenho das redes modernas. Os algoritmos de RRA são responsáveis pelo gerenciamento dos escassos recursos de rádio tais como potência, *slots* de tempo, canais espaciais e faixas de frequência [2], [3]. A fim de que os principais objetivos de redes móveis possam ser otimizados tais como QoS e eficiência espectral e energética, devemos ter um uso racional e eficiente dos recursos de rádio.

## II. ESTADO DA ARTE E PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

Em geral, problemas de RRA têm sido estudados na literatura na forma de problemas de otimização. Um problema de otimização é composto de uma função objetivo, restrições e variáveis de decisão [3], [4]. Como exemplos de funções objetivo em comunicação sem fio podemos mencionar o de maximização da taxa total de dados e minimização da potência de transmissão. Restrições de problemas são principalmente usados para modelagem das limitações práticas das redes tais como a escassez de recursos de rádio, assim como requisitos de QoS. Por fim, variáveis de decisão são usadas para modelar a alocação de recursos de rádio tais como recursos de frequência e potência de transmissão.

Em conexões ponto a ponto, o objetivo mais importante é a otimização da potência de transmissão. Uma solução conhecida para alocação de potência chamada de *Water Filling* é capaz de fazer alocação ótima de potência. Basicamente, a solução *Water Filling* pode ser obtida através de análise de otimização convexa e possui como ideia principal alocar mais potência de transmissão para recursos de frequência com melhor ganho de canal, isto é, aquele que pode usar a potência da forma mais eficiente [5]. Uma limitação da solução *Water Filling* é que ela se baseia em um mapeamento logarítmico e contínuo entre qualidade de canal e taxa de dados transmitida. Em sistemas móveis práticos, são usados esquemas de modulação e codificação ou do inglês, *Modulation and*

*Coding Scheme* (MCS) discretos e, portanto, as taxas de dados transmitidas e níveis de potência utilizados assumem níveis discretos. Em conexões ponto a ponto, foi mostrado que o algoritmo de carregamento de bits chamado Hugues-Hartogs é ótimo quando níveis discretos de transmissão são usados [6].

Em conexões ponto-multiponto tais como as do enlace direto de sistemas celulares, não apenas a alocação de potência transmitida é importante mas também a atribuição de recursos de frequência. A alocação ótima de recursos de rádio neste caso pode ser muito difícil de ser obtida. A dificuldade aumenta quando funções não convexas estão presentes no objetivo ou restrições dos problemas de otimização. Nesses casos, uma das formas de obter a solução ótima é usar algoritmos de “força bruta” ou métodos de enumeração completa que consistem em listar sequencialmente todas as possíveis soluções, avaliando sua contribuição para o objetivo e finalmente escolhendo a melhor de todas. O espaço de procura desses problemas em geral aumenta exponencialmente com a entrada do problema. Portanto, o método de “força bruta” não é passível de ser utilizado em casos práticos.

Em [7], nós estudamos um novo problema de RRA de maximização de taxa total de dados sujeita a restrições de satisfação mínima por serviço. Basicamente, nesse problema nós assumimos que as operadoras do sistemas de comunicação necessitam que uma certa fração de usuários conectados a cada serviço seja satisfeita com o QoS requisitado. Em [7], nós consideramos apenas atribuição de recursos de frequência e assumimos que a potência transmitida é igualmente distribuída entre os recursos de frequência. A otimização de transmissão de potência foi deixada para estudos futuros. No presente artigo, nós revisaremos este problema para avaliar os ganhos de desempenho que podem ser alcançados através da alocação conjunta dos recursos de frequência e potência. As principais contribuições desse artigo são:

- Formulação matemática do problema de alocação de recursos de frequência e potência conjuntamente. Anteriormente, o problema havia sido formulado com alocação de potência igualitária e estática;
- Caracterização da solução ótima através da reformulação do problema original para um problema de otimização linear e inteiro ou do inglês, *Integer Linear Program* (ILP);
- Avaliação de desempenho através de simulações computacionais.

### III. MODELAGEM DO SISTEMA

Consideramos que um número de células setorizadas compõe um sistema celular. Para um dado setor de uma célula, existe um grupo de usuários conectados a uma Estação Rádio Base (ERB). O estudo realizado neste artigo é focado no enlace direto. Assumimos que o acesso ao meio é organizado através de uma combinação de *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) e *Time Division Multiple Access* (TDMA). Assim, um bloco de recurso ou *Resource Block* (RB) é composto por um grupo de subportadoras adjacentes e um número de símbolos *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) consecutivos, que representam um intervalo

de tempo de transmissão ou do inglês, *Transmission Time Interval* (TTI). Não existe interferência intracelular visto que um mesmo RB não pode ser alocado a diferentes usuários dentro de um mesmo setor. Assumimos a hipótese simplificadora que a interferência intercelular é adicionada ao ruído térmico na expressão da *Signal-to-Noise Ratio* (SNR). Ressaltamos que essa suposição se torna cada vez mais válida à medida que o número de ERBs no sistema aumenta [8].

Em um dado TTI, consideramos que  $J$  usuários são candidatos a receber recursos de rádio. Admitimos que existam  $N$  RBs disponíveis.  $\mathcal{J}$  e  $\mathcal{N}$  são os conjuntos de usuários e RBs, respectivamente. Consideramos  $\mathcal{S}$  como sendo o conjunto de todos os serviços prestados pela operadora. O conjunto de todos usuários que utilizam o serviço  $s \in \mathcal{S}$  é definido por  $\mathcal{J}_s$  e o número de elementos deste conjunto é dado por  $|\mathcal{J}_s| = J_s$ , em que  $|\cdot|$  é a cardinalidade de um conjunto.

Assumindo que o RB  $n$  é atribuído ao usuário  $j$ , a SNR  $\gamma_{j,n}$  recebida do usuário  $j$  no RB  $n$  é dada por

$$\gamma_{j,n} = \frac{p_n \cdot \alpha_j \cdot \|h_{j,n}\|^2}{\sigma^2}, \quad (1)$$

em que  $\alpha_j$  modela o efeito do ganho de percurso e desvanecimento de longo prazo experimentado no enlace entre a ERB e o terminal  $j$ ,  $h_{j,n}$  é a resposta em frequência de curto prazo do canal sofrido pelo usuário  $j$  no RB  $n$ ,  $\sigma^2$  é a potência média do ruído térmico,  $\|\cdot\|$  representa o valor absoluto e, por fim,  $p_n$  é a potência de transmissão alocada pela ERB ao RB  $n$ . Assumimos que  $P^{\text{tot}}$  é a potência total disponível na ERB.

Através do uso de adaptação de enlace, um transceptor pode transmitir com diferentes taxas de dados de acordo com o estado do canal, potência alocada e ruído/interferência percebida. Assumimos que o mapeamento entre a SNR e a taxa de dados transmitida seja dada por uma função  $f(\cdot)$ . Note que esta função pode ser dada por exemplo pela fórmula da capacidade de Shannon (curva contínua logarítmica), ou até uma função discretizada na forma de “escada” quando MCSs discretas são consideradas. Assumimos que MCSs discretas são empregadas em redes sem fio práticas. A taxa de dados transmitida quando o RB  $n$  é atribuído ao usuário  $j$ ,  $r_{j,n}$ , é dada por

$$r_{j,n} = f(\gamma_{j,n}). \quad (2)$$

Sem perda de generalidade, assumimos uma adaptação de enlace baseada em taxa de erro de bit ou do inglês, *Bit Error Rate* (BER) em que para uma dada SNR, o nível de MCS escolhido é o primeiro com a maior taxa de dados transmitida que assegura uma BER estimada menor que a BER alvo. Consequentemente, dependendo do intervalo da SNR, diferentes taxas de dados podem ser transmitidas. Isto pode ser visto na TABELA I. Note que assumimos que existem  $M$  possíveis níveis de MCSs e portanto,  $M$  não zero possíveis taxas de dados por RB em que  $v^m$  representa a taxa de dados correspondente ao  $m$ -ésimo nível de MCS.  $\mathcal{M} = \{0, 1, 2, \dots, M\}$  é o conjunto de todas as MCSs. Note que o  $m$ -ésimo nível de MCS é empregado quando a SNR estimada está entre  $\gamma^m$  e  $\gamma^{m+1}$  com  $\gamma^m < \gamma^{m+1}$ .

Conforme o modelo apresentado na TABELA I, para transmitir com uma dada MCS é suficiente garantir a menor SNR

TABELA I  
MAPEAMENTO GERAL ENTRE SNR E TAXA DE DADOS TRANSMITIDA POR RB.

Região de SNR	Taxa de dados transmitida por RB
$\gamma_{j,n} < \gamma^1$	0
$\gamma^1 \leq \gamma_{j,n} < \gamma^2$	$v^1$
$\gamma^2 \leq \gamma_{j,n} < \gamma^3$	$v^2$
$\vdots$	$\vdots$
$\gamma^{M-1} \leq \gamma_{j,n} < \gamma^M$	$v^{M-1}$
$\gamma_{j,n} \geq \gamma^M$	$v^M$

dentro da região de SNR correspondente a essa dada MCS. Desta forma, definimos  $\lambda_{j,n,m}$  como a potência de transmissão mínima que pode ser alocada ao usuário  $j$  no RB  $n$  de modo a utilizar a MCS  $m$ . Especificamente,  $\lambda_{j,n,m}$  é dado por

$$\lambda_{j,n,m} = \frac{\gamma^m \sigma^2}{\alpha_j |h_{j,n}|^2}. \quad (3)$$

Definimos a variável de otimização (binária),  $y_{j,n,m}$ , que assume valor 1 se o RB  $n$  está alocado ao usuário  $j$  e a transmissão é configurada com o  $m$ -ésimo nível de MCS, e 0 caso contrário. Neste caso, a potência alocada para o RB  $n$  assinalado ao usuário  $j$  é igual a  $\lambda_{j,n,m}$  dado pela equação (3).

#### IV. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E SOLUÇÃO ÓTIMA

Como descrito na seção II, o problema considerado neste artigo foi primeiramente apresentado em [7]. Este problema tem como objetivo a maximização da taxa de dados de um setor restrito a um número mínimo de usuários satisfeitos por serviço prestado pela operadora em um dado TTI. Em [7], foi considerado apenas alocação dinâmica de RBs, enquanto que alocação de potência estática e igualitária entre os RBs foi assumida. Neste artigo, além de alocação de RB, nós consideramos também alocação dinâmica da potência de transmissão. Definimos esse novo problema por Problema de Alocação de RB e Potência Conjunta (PARPC).

Antes de apresentar o problema PARPC em termos matemáticos, definimos outras variáveis importantes. Assumimos que, no TTI atual, o usuário  $j$  tem uma taxa de dados requisitada igual a  $t_j$ . A restrição de satisfação mínima para cada serviço é representada pelo parâmetro  $k_s$ , que é o número mínimo de usuários do serviço  $s$  que deve ser satisfeito. Assumimos que os índices dos usuários em  $x_{j,n}$ ,  $r_{j,n}$  e em  $t_j$  são sequencialmente dispostos de acordo com o serviço, por exemplo, os usuários de  $j = 1$  até  $j = J_1$  são do serviço 1, usuários do  $j = J_1 + 1$  até  $j = J_1 + J_2$  são do serviço 2, e assim por diante.

A formulação do problema é apresentada a seguir

$$\max_{y_{j,n,m}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{m \in \mathcal{M}} v^m \cdot y_{j,n,m}, \quad (4a)$$

sujeito a

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{m \in \mathcal{M}} y_{j,n,m} \leq 1, \quad \forall n \in \mathcal{N}, \quad (4b)$$

$$y_{j,n,m} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in \mathcal{J}, \forall n \in \mathcal{N} \text{ e } \forall m \in \mathcal{M}, \quad (4c)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{m \in \mathcal{M}} y_{j,n,m} \cdot \lambda_{j,n,m} \leq P^{\text{tot}}, \quad (4d)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}_s} u \left( \sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{m \in \mathcal{M}} v^m \cdot y_{j,n,m}, t_j \right) \geq k_s, \quad \forall s \in \mathcal{S}, \quad (4e)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} y_{j,n,m} \leq 1, \quad \forall j \in \mathcal{J} \text{ e } \forall n \in \mathcal{N}, \quad (4f)$$

em que  $u(x, b)$  é uma função degrau em  $b$  que assume o valor 1 se  $x \geq b$  e 0 de outra forma. A função objetivo mostrada em (4a) é a taxa de dados total no enlace direto. As duas primeiras restrições (4b) e (4c) asseguram que um RB não será alocado a usuários diferentes. A restrição (4d) assegura que a potência total transmitida usada não será maior que a potência total disponível  $P^{\text{tot}}$ . A restrição (4e) condiciona que um número mínimo de usuários devem ser satisfeitos por cada serviço. Por fim, a restrição (4f) modela o fato de que no máximo uma única MCS deve ser escolhida para cada par escolhido usuário-RB.

O problema (4) pertence a classe dos problemas de otimização combinatórios ou inteiros. Note contudo que este problema não é linear devido à restrição (4e). De modo a linearizar a restrição (4e), introduzimos uma nova variável de otimização. Considere  $\rho_j$  como uma variável de seleção binária que assume o valor 1 se o usuário  $j$  é selecionado para ser satisfeito e 0 caso contrário [7]. Dessa forma, o problema (4) pode ser reformulado substituindo a restrição (4e) por três novas restrições dadas a seguir:

$$\sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{m \in \mathcal{M}} v^m \cdot y_{j,n,m} \geq \rho_j t_j, \quad \forall j \in \mathcal{J}, \quad (5a)$$

$$\rho_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in \mathcal{J}, \quad (5b)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}_s} \rho_j \geq k_s, \quad \forall s \in \mathcal{S}. \quad (5c)$$

O problema estudado após a substituição da restrição (4e) pelas restrições presentes em (5), torna-se linear e inteiro ou ILP. Este problema pode ser resolvido por métodos padrões como o algoritmo Branch-and-Bound (BB) [9]. A complexidade computacional média para obter a solução ótima por estes métodos é muito baixa comparada com o método força bruta.

#### V. RESULTADOS

Esta seção é dedicada a avaliação de desempenho da solução ótima do PARPC. Na seção V-A apresentamos as principais suposições do cenário utilizado na simulação enquanto que na seção V-B mostraremos e discutiremos os resultados obtidos.

TABELA II  
PRINCIPAIS PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO.

Parametro	Valor	Unidade
Raio da célula	334	m
Potência total transmitida	5.25	W
Número de subportadoras por RB	12	-
Desvio padrão do 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 repetições	3000	-
Número de serviços	2	-
Número de terminais por serviço	4	-
Número de RBs	15	-
Número mínimo de usuários satisfeitos	Cenário 1: 3 (serviço 1) e 3 (serviço 2) Cenário 2: 4 (serviço 1) e 4 (serviço 2)	-

### A. Caracterização da Simulação

As principais premissas enunciadas na seção III foram implementadas em um simulador computacional. De forma a obter resultados válidos estatisticamente, realizamos diferentes repetições de Monte Carlo. Em cada repetição, os usuários foram uniformemente distribuídos dentro de cada setor celular enquanto que os ganhos de canal foram gerados seguindo suas distribuições estatísticas. Cada RB é composto de 12 subportadoras adjacentes no domínio da frequência e 14 símbolos OFDM consecutivos no domínio do tempo [10].

A propagação rádio-móvel é modelada por uma perda de percurso, uma componente de sombreamento log-normal e uma componente de desvanecimento rápido seguindo distribuição Rayleigh. Consideramos que a adaptação de enlace é feita baseada em 15 indicadores de qualidade de canal ou, do inglês, *Channel Quality Indicators* (CQIs) usado nos sistemas *Long Term Evolution* (LTE) [11]. Os limiares de SNR para a troca de MCS foram obtidos pelas simulações de nível de enlace de [12]. Nós consideramos que os usuários estão divididos em dois serviços. Assumimos também que existem dois cenários com diferentes números de usuários que devem ser satisfeitos. A TABELA II resume os parâmetros de simulação utilizados.

A solução ótima do problema PARPC, identificado nos gráficos por PARPC OPT, é comparada com a solução ótima do mesmo problema mas com alocação de potência igualitária identificada nos gráficos como PAR OPT, em que PAR significa Problema de Alocação de Recurso [7]. As realizações dos canais são as mesmas para todos os algoritmos simulados de forma a termos comparações justas. A fim de resolver os problemas ILP, usamos a biblioteca de resolução numérica de problemas de otimização chamada IBM ILOG CPLEX [13]. A escolha do número de usuários, RBs e serviços dá-se pela limitação da complexidade computacional para obter soluções ótimas.

Quanto às métricas de avaliação, consideramos duas principais: taxa de *outage* ou interrupção, e taxa total de dados. O evento de *outage* acontece quando um algoritmo não consegue encontrar uma solução factível ou viável. Em outras palavras, *outage* ocorre quando o algoritmo não encontra uma solução que satisfaça às restrições do problema (4). Taxa de *outage*

é definida como a relação entre o número de repetições com eventos de *outage* e o número total de repetições simuladas. Portanto, esta métrica de avaliação mostra a capacidade dos algoritmos em achar uma solução factível para o nosso problema. A taxa total de dados é a soma das taxas de dados obtidas por todos os usuários no setor em uma dada repetição. Por fim, incrementos na carga oferecida ao sistema são emulados através do aumento do requisito de taxa dos usuários.

### B. Avaliação de Resultados

Na figura 1 apresentamos a taxa de *outage* versus a taxa de dados requisitada pelos usuários para as soluções PARPC OPT e PAR OPT no cenário 1 (identificado nos gráficos como CE1) e 2 (identificado nos gráficos como CE2). Primeiramente, podemos ver que as taxas de *outage* aumentam com o requisito de taxa de dados dos usuários. Isto é esperado desde que quanto maiores são as demandas dos usuários em termos de QoS, mais difícil é a tarefa de satisfazer as restrições do problema estudado. Outro comportamento esperado é que as taxas de *outage* das soluções PARPC OPT e PAR OPT no cenário 2 são maiores que as do cenário 1. No cenário 2, todos os 8 usuários devem ter suas taxas de dados satisfeitas enquanto que no cenário 1, 3 usuários de 4 devem ser satisfeitos por cada serviço.

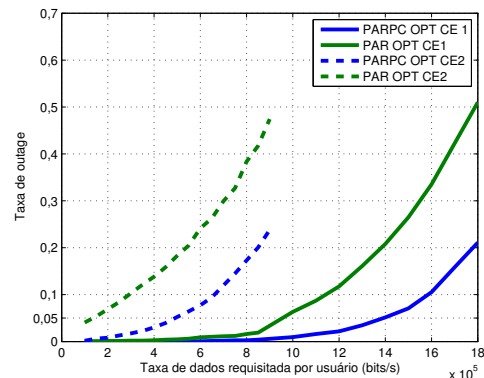


Fig. 1. Taxa de *outage* versus a taxa de dados requisitada por usuário para as soluções PARPC OPT e PAR OPT nos cenários 1 e 2.

Outra observação sobre a figura 1 é que a solução PARPC proporciona um ganho significativo de desempenho em taxa de *outage* quando comparada à solução PAR em ambos os cenários. Diferentemente da conclusão de [14], a alocação de potência adaptativa leva a ganhos significativos de desempenho. A principal diferença nas conclusões entre o nosso trabalho e o considerado em [14] é que o problema de RRA considerado em [14] não considera QoS ou requisitos de satisfação. O problema considerado em [14] é o de maximização total da taxa de dados sem restrição. A solução para este tipo de problema em geral concentra maior parte dos recursos com os usuários em melhores condições de canal. Consequentemente, as transmissões através dos RBs são em geral configuradas com o maior nível de MCS mesmo quando é empregada alocação de potência igualitária. Portanto, não existe margem para otimização de potência nesse cenário. Por outro lado,

quando QoS ou requisitos de satisfação são considerados no problema de maximização de taxa de dados, RBs precisam ser atribuídos a usuários com canais médios ou ruins desde que consigam satisfazer os requisitos do problema. Desta forma, alguns dos RBs alocados serão configurados com MCS baixas ou médias e, nestes casos, existe espaço para se obter ganhos em taxa de transmissão utilizando otimização de potência.

Os ganhos de desempenho da solução PARPC OPT sobre o PAR OPT em termos de taxa de dados requisitada assumindo um limiar de *outage* de 5% são de 45% e 261% nos cenários 1 e 2, respectivamente. A razão para um elevado ganho de desempenho no cenário 2 é o mesmo que apresentado anteriormente: os requisitos de satisfação mais rigorosos no cenário 2 leva a alocação de RBs aos usuários em condição ruim ou média de canal e portanto, a alocação potência tem mais flexibilidade para obter maiores ganhos em taxa de dados.

Na figura 2 apresentamos a função de distribuição acumulada da taxa total de dados para PARPC OPT e PAR OPT no cenário 1 em que a taxa requisitada pelos usuários é de 1.2 Mbps. As vantagens do PARPC OPT sobre PAR OPT podem ser vistas também na taxa total de dados. Considerando o 50º percentil da taxa total de dados temos que o PARPC OPT apresenta um ganho de desempenho de 8% sobre o PAR OPT. À medida que a demanda de taxa de dados aumenta, mais RBs devem ser alocados para satisfazer os usuários com qualidade de canal ruim ou médio. Consequentemente, a alocação de potência é capaz de providenciar ganhos sobre alocação de potência igualitária.

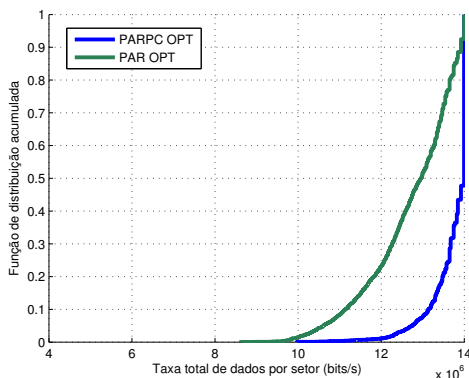


Fig. 2. Função de distribuição acumulada da taxa total de dados para PARPC OPT e PAR OPT no cenário 1 com taxa de dados requisitada pelos usuário de 1,2 Mbps.

Em resumo, os resultados apresentados nesta seção mostram que a alocação conjunta de RBs e potência apresenta um ganho de desempenho considerável sobre a alocação de RB com alocação de potência igualitária para o problema de RRA estudado. Estes resultados mostram que há espaço para soluções de baixa complexidade computacional para alocação de RB e potência que sejam capazes de obter uma degradação reduzida em desempenho em relação a solução ótima (PARPC OPT).

## VI. CONCLUSÕES

Neste artigo estudamos o problema de maximização da taxa de dados total sujeita a requisitos de QoS e satisfação. Este problema foi estudado anteriormente apenas na perspectiva de alocação de RBs. Neste artigo, exploramos o uso conjunto da alocação de RBs e potência de transmissão.

O referido problema foi formulado como um problema de otimização combinatorial não linear. Devido a dificuldade de obter a solução ótima para este problema, o reformulamos como um ILP após assumirmos algumas suposições razoáveis e realizarmos algumas operações algébricas. Esta classe de problemas pode ser resolvida de forma ótima por bibliotecas computacionais especializadas.

Através de simulações computacionais, estudamos os ganhos obtidos devido ao uso de alocação de potência adaptativa. Os resultados mostram que um ganho de desempenho significativo pode ser obtido em termos de taxa de *outage* e de dados. Consequentemente, existe margem para otimização do desempenho do sistema através desta funcionalidade.

## REFERÊNCIAS

- [1] ITU, "Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s)," International Telecommunication Union, Tech. Rep. ITU-R M.2134, 2008.
- [2] F. R. M. Lima, S. Wänstedt, F. R. P. Cavalcanti, and W. C. Freitas, "Scheduling for Improving System Capacity in Multiservice 3GPP LTE," *J. of Electrical and Computer Engineering*, no. 819729, 2010.
- [3] S. Sadr, A. Anpalagan, and K. Raahemifar, "Radio Resource Allocation Algorithms for the Downlink of Multiuser OFDM Communication Systems," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 11, no. 3, pp. 92–106, Apr. 2009.
- [4] M. Bohge, "Dynamic Resource Allocation in Packet-Oriented Multi-Cell OFDMA Systems," Ph.D. dissertation, Berlin Technology University, December 2010.
- [5] T. M. Cover and J. A. Thomas, *Elements of Information Theory*, 2nd ed. Wiley & Sons, 1991.
- [6] D. Hughes-Hartogs, "Ensemble Modem Structure for Imperfect Transmission Media," Patent US 4 833 706, May, 1989.
- [7] F. R. M. Lima, T. F. Maciel, W. C. Freitas, and F. R. P. Cavalcanti, "Resource Assignment for Rate Maximization with QoS Guarantees in Multiservice Wireless Systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 3, pp. 1318–1332, Mar. 2012.
- [8] C. Seol and K. Cheun, "A Statistical Inter-Cell Interference Model for Downlink Cellular OFDMA Networks under Log-Normal Shadowing and Multipath Rayleigh Fading," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, pp. 3069–3077, October 2009. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/TCOMM.2009.10.080152>
- [9] G. Nemhauser and L. Wolsey, *Integer and Combinatorial Optimization*. Wiley & Sons, 1999.
- [10] 3GPP, "Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA)," Third Generation Partnership Project, Tech. Rep. TR 25.814 V7.1.0, Sep. 2006.
- [11] —, "Evolved universal terrestrial radio access (e-utra); physical layer procedures," Third Generation Partnership Project, Tech. Rep. TR 36.213 V8.6.0, Mar. 2009.
- [12] C. Mehlführer, M. Wrulich, J. C. Ikuno, D. Bosanska, and M. Rupp, "Simulating the Long Term Evolution Physical Layer," in *Proc. of the European Signal Processing Conf*, Glasgow, Scotland, Aug. 2009. [Online]. Available: [http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat\\_175708.pdf](http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_175708.pdf)
- [13] IBM, "IBM ILOG CPLEX Optimizer." [Online]. Available: <http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer/>
- [14] J. Jang and K. B. Lee, "Transmit Power Adaptation for Multiuser OFDM Systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 21, no. 2, pp. 171–178, Jan. 2003.