

Aplicação do Algoritmo de Levenberg Marquardt para Modelagem na Alocação de Potência para Usuários LTE na Faixa de 3.5 GHz com Diferentes CQI

Hudson H. S. Lopes, Flávio G. C. Rocha

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
Universidade Federal de Goiás (UFG)
Caixa Postal 74605-010 – Goiânia – GO – Brasil

hudson.hsl@gmail.com, flaviogcr@ufg.br

Abstract. *Using the Levenberg-Marquardt (LM) algorithm for parameter estimation, we present in this article sigmoidal-like utility functions that model the probability of success in the transmission of packets per unit of power consumed by a user. Simulation is proposed in network mobile for users located under the coverage area of the small cells, with the 3.5 GHz band and with different modulation and coding schemes (MCS) standardized in 3rd Generation Partnership Project (3GPP).*

Resumo. *Utilizando o algoritmo de Levenberg-Marquardt (LM) para estimação de parâmetros, apresentamos neste artigo as funções de utilidade sigmoidal que modelam a probabilidade de sucesso por unidade de potência consumida por um usuário. A simulação é proposta em redes móveis para os usuários localizados sob a área de cobertura das pequenas células, com uma faixa de 3,5 GHz e com diferentes Esquemas de Modulação e Codificação (MCS - Modulation and Coding Schemes) padronizados no Projeto de Parceria de Terceira Geração (3GPP - 3rd Generation Partnership Project).*

1. Introdução

A quinta geração de comunicação móvel (5G) surgiu com o intuito de atender diversas exigências oriundas do advento de aplicações sofisticadas que demandam baixa latência, alta taxa de transmissão e um grande número de dispositivos conectados. Essas demandas implicam em mudanças significativas na infraestrutura das redes de telecomunicações. A próxima evolução do (LTE - *Long Term Evolution*), LTE Release 12 e posteriores, conhecida como o LTE-*Broadcast* (LTE-B) suporta esquemas de modulação mais altos até 256- Modulação de Amplitude em Quadratura (QAM- *Quadrature Amplitude Modulation*). Esquemas de modulações mais altos requerem maior potência de transmissão para alcançar uma certa Relação Sinal Ruído (SNR - *Signal to Noise Ratio*) que possa garantir uma probabilidade mínima de sucesso na transmissão de pacotes [Abdelhadi et al 2015].

Os gastos operacionais das Estação Rádio Base (BS - *Base Station*) alimentadas pela rede elétrica chegam a US\$ 3000 por ano, enquanto as BS localizadas em áreas remotas, que funcionam a diesel, podem custar dez vezes mais, entre os tópicos de interesse em *green communications* está a análise da eficiência energética para maximizar a quantidade de informação transmitida e garantir a Qualidade de Serviço (QoS - *Quality*

of Service) mínima exigida pelos Equipamento dos Usuários (UEs - *User Equipments*) [Hasan et al 2011].

Diante dos desafios encontrados diversos projetos de pesquisa têm sido desenvolvidos. Lee [Lee and Kwon 2009], estuda os problemas de alocação de energia em sistemas sem fio através de uma estrutura de maximização da utilidade da rede, no seu trabalho foi considerado quatro tipos de funções de utilidade que podem representar a maioria dos serviços em redes sem fio.

Shajaiah [Shajaiah et al. 2014] em seu trabalho considera o problema da otimização da alocação de recursos em redes celulares para vários usuários, rodando diferentes tipos de aplicações simultaneamente. A cada aplicação do usuário é atribuída uma função de utilidade que representa o tipo de aplicação. O objetivo é alocar os recursos de forma otimizada, sobre uma política de justiça proporcional com prioridade para os usuários de aplicações em tempo real.

Wang [Wang et al 2016] apresenta o resultado de um algoritmo para alocação ótima de potência para usuários LTE com diferentes modulações. Em [Abdelhadi and Clancy 2016] os autores propõem uma arquitetura para redes celulares que combina alocação de recursos com consciência de conteúdo, tempo e localização para sistemas sem fio de banda larga da próxima geração.

Este artigo tem como objetivo estimar os parâmetros de uma função utilidade para diferentes Indicadores de Qualidade do Canal (CQI - *Channel Quality Indicator*) utilizando o algoritmo de Levenberg-Marquardt (LM), as funções representam a probabilidade de sucesso na transmissão de pacotes em função da potência de alocação da BS, podendo assim, utilizar essas funções em um problema de otimização para maximização de eficiência energética.

No desenvolvimento do que é proposto, apresenta-se a seguinte ordem: na seção II, é mostrado o modelo do sistema. Na seção III, apresenta o modelo de transmissão de pacotes e a influência da SNR, taxa de codificação e a probabilidade de erro bit. Na seção IV, é mapeado a probabilidade de sucesso do pacote em função das potências de transmissão e recepção. Na seção V, discorre sobre o ajuste de curvas não linear usando o método de LM. Na seção VI, são apresentados os resultados das simulações. Finalmente, na seção VII, são apresentadas as principais conclusões, bem como possíveis trabalhos futuros a serem desenvolvidos.

2. Modelo do Sistema

O modelo do sistema de comunicação móvel é proposto no sentido *downlink* e consiste em uma pequena célula - *small cell* com uma única BS e 15 UEs, conforme mostra a Figura 1. Cada UE tem um CQI diferente baseado em sua distância da BS. A cada intervalo de tempo de transmissão é realizado a alocação de energia para os UEs.

É considerado a Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais (OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) como a técnica na transmissão LTE *downlink*, que permite a transmissão simultânea de diferentes pacotes de dados, atribuindo diferentes frequências ao usuário. No domínio do tempo, a duração do *frame downlink* é 10ms. Este *frames* são divididos em 10 *sub-frames* que representa um intervalo de tempo de transmissão (TTI - *Transmission Time Interval*) de 1 ms.

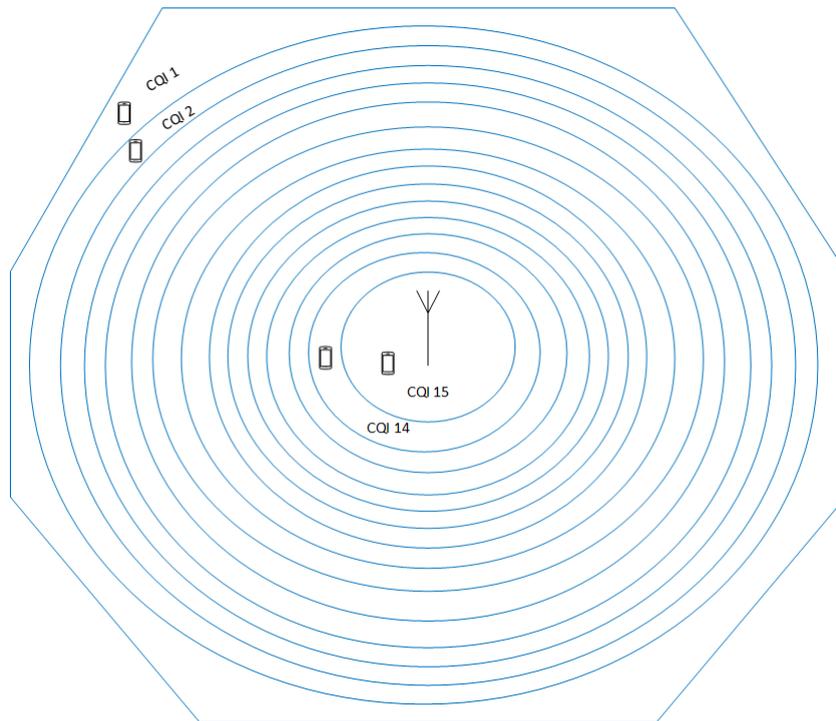


Figura 1. Modelo do sistema de comunicação móvel

2.1. Indicador de Qualidade do Canal (CQI)

CQI é o *feedback* que o UE envia para BS para indicar a taxa de dados que pode ser suportada pelo canal de *downlink*. O CQI é calculado na BS com base nos parâmetros estimado do canal pelo SNR. A BS seleciona um esquema de modulação e codificação apropriado com base nos valores do CQI conforme mostra a Tabela 1 [E-UTRA 2015].

Tabela 1. Indicador de Qualidade do Canal CQI.

Indice	Modulação	Taxa de Código	Eficiência
1	QPSK	0,076	0,152
2	QPSK	0,188	0,388
3	QPSK	0,430	0,877
4	16QAM	0,369	1,476
5	16QAM	0,478	1,914
6	16QAM	0,601	2,406
7	64QAM	0,455	2,730
8	64QAM	0,553	3,322
9	64QAM	0,650	3,902
10	64QAM	0,705	4,523
11	64QAM	0,852	5,115
12	256QAM	0,694	5,554
13	256QAM	0,778	6,226
14	256QAM	0,863	6,907
15	256QAM	0,925	7,406

3. Transmissão de Pacotes Downlink

Em sistemas de comunicações digitais a informação é enviada em pacotes. Se tivermos algum mecanismo de controle e detecção de erros, como no caso da codificação ou códigos detectores de erro, podemos solicitar a retransmissão do pacote caso seja identificado um erro.

Supondo que um pacote contém N_b bits de informação e a codificação do canal aumenta o tamanho do pacote para $L > N_b$ bits, e que os erros ocorram independentemente com probabilidade P_e . A probabilidade de que todos os bits sejam recebidos corretamente P_s é dada por:

$$P_s = (1 - P_e)^{N_b}. \quad (1)$$

A probabilidade de erro de símbolo para uma constelação com M-QAM depende do número de pontos M porque a probabilidade de erro é denominada pela distância mínima entre os pares de ponto de sinal. No caso especial em que a constelação é quadrada, é possível derivar uma expressão para a probabilidade de erro. Para este caso em particular a distância desta constelação é dada pela equação (2) [Proakis 2000].

$$d_{min} = \sqrt{\frac{6 \log_2 M}{M - 1} \epsilon}, \quad (2)$$

onde ϵ é a energia por bit.

Neste trabalho serão utilizadas somente as modulações M-QAM quadradas da Tabela 1, sendo assim, conforme Proakis [Proakis 2000] a probabilidade de ter um bit errado na detecção para esta constelação é dada por:

$$P_e = 4 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) Q \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{(M - 1) N} \epsilon} \right) X \left(1 - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) Q \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{(M - 1) N} \epsilon} \right) \right), \quad (3)$$

onde N é a densidade espectral de potência do ruído e a função $Q(\cdot)$ corresponde à área da cauda de uma Gaussiana de média nula e variância unitária representada pela equação (4).

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right). \quad (4)$$

onde erfc é a função de erro complementar de Gauss e é representado por uma integral numérica.

3.1. Codificação do Canal

A codificação do canal consiste em tornar o canal de comunicação mais robusto, uma vez que quanto mais longe o UE está da BS conforme modelamos, maior será a quantidade de bits de redundâncias e controle de erros inseridos no pacote enviado. Como mostra a Figura 2, $L > N_b$ a cada bit de informação são inseridos 11 bits de paridade, as redundâncias introduzida pelos $N_b - L$ bits de paridade permitem corrigir erros, o que pode conduzir a uma melhoria global do desempenho do sistema.



Figura 2. Codificação com taxa 1/12

A energia de sinal por símbolo ϵ_s é $\epsilon_s = N_b \epsilon$. Para calcular a energia de sinal por símbolo com codificação ϵ_c temos a equação (5).

$$\begin{aligned} L\epsilon_c &= \epsilon_s = N_b \epsilon \\ \epsilon_c &= \frac{N_b}{L} \epsilon, \end{aligned} \quad (5)$$

onde $\frac{N_b}{L}$ é a taxa de código R_c .

Sendo assim, com uso de codificação a energia por símbolo diminui, consequentemente, conforme demonstrado em [Lathi 2012] a probabilidade de erro de bit para o canal codificado é maior e é dado pela equação (6).

$$\begin{aligned} P_{ec} &= \binom{L-1}{t} (P_e)^{(t+1)} (1 - P_e)^{L-(t+1)} \\ &\approx \binom{L-1}{t} (P_e)^{(t+1)} \quad P_e \ll 1, \end{aligned} \quad (6)$$

onde t é o número de erros.

Neste trabalho é considerado o caso ideal, onde o decodificador não tentará corrigir a palavra de código quando houver mais que 1 erro em N_b bits de informação, ou seja, $t = 1$.

4. SNR e Potência

Foi calculado a probabilidade de sucesso no recebimento e envio de pacotes para diferentes valores de SNR. A potência que precisa chegar no receptor é obtida adicionando uma potência de ruído em dBm no receptor de *downlink* conforme a equação (7), que neste trabalho foi considerado uma potência de ruído $P_{ruído}$ de aproximadamente 2×10^{-17} W ou -137 dBm.

$$Pr_i = SNR + P_{ruído}. \quad (7)$$

A Figura 3, mostra a relação entre probabilidade do pacote ser recebido sem erros pela potência no receptor Pr_i (dBm) para o UE_i .

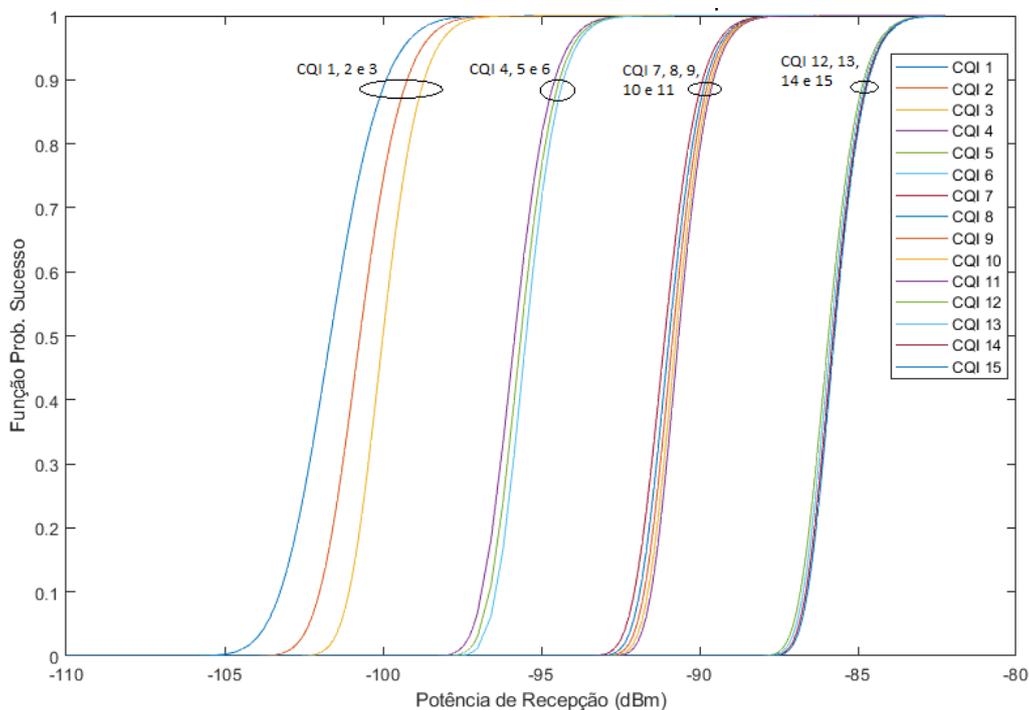


Figura 3. Prob. de sucesso no recebimento de pacote pela potência no receptor

A tabela 2 mostra a potência mínima que deve chegar ao usuário referente a cada CQI para se garantir uma QoS de 95% de sucesso na recepção de pacotes.

Tabela 2. Potência no receptor do UEs e a QoS de 95% para cada CQI

CQI	Potência de Recepção (W)
1	1,17E-13
2	1,33E-13
3	1,49E-13
4	3,99E-13
5	4,19E-13
6	1,13E-12
7	1,15E-12
8	1,17E-12
9	1,19E-12
10	1,21E-12
11	1,23E-12
12	3,61E-12
13	3,65E-12
14	3,69E-12
15	3,71E-12

Para calcular a potência de transmissão em função do SNR denotado pela função $\Phi_i(Pt_i)$ é utilizado o sistema hipotético em [Lee et al 2005], abordagens similares são feitas em [Lee and Kwon 2009], [Abdelhadi et al 2015]. Os parâmetros desse sistema são:

- Pt_i é a potência de alocação para o UE_i ;
- G_i é o ganho do caminho entre a BS e o UE;
- N_i é uma constante (por exemplo, ganho de processamento);
- I_i é o ruído e a interferência entre células;
- A_i é a "goodness" do ambiente de transmissão, que é definido por $\frac{I_i}{G_i}$;
- θ é o fator de ortogonalidade;
- P_{bs} é potência total da BS.

$$\Phi_i(Pt_i) = \frac{N_i G_i Pt_i}{G_i \theta (\sum_{i=1}^J (Pt_i) - Pt_i) + I_i} = \frac{N_i Pt_i}{\theta (P_{bs} - Pt_i) + A_i}. \quad (8)$$

Considerando um pacote de 1024 bits com codificação de canal, conforme em [Lee et al 2005], os parâmetros foram configurados como: $P_{bs} = 10$, $\theta = 1$, $N_i = 16$ e $A_i = 0,7407$.

Assumimos que a probabilidade de sucesso na transmissão de pacotes em uma rede sem fio pode ser representado por uma função sigmoïdal em função da sua potência de alocação. A Figura 4 mostra um exemplo de diversas funções sigmoïdas, cada uma delas construída para cada valor de CQI da Tabela 1 e obtidas a partir de diversos valores de SNR.

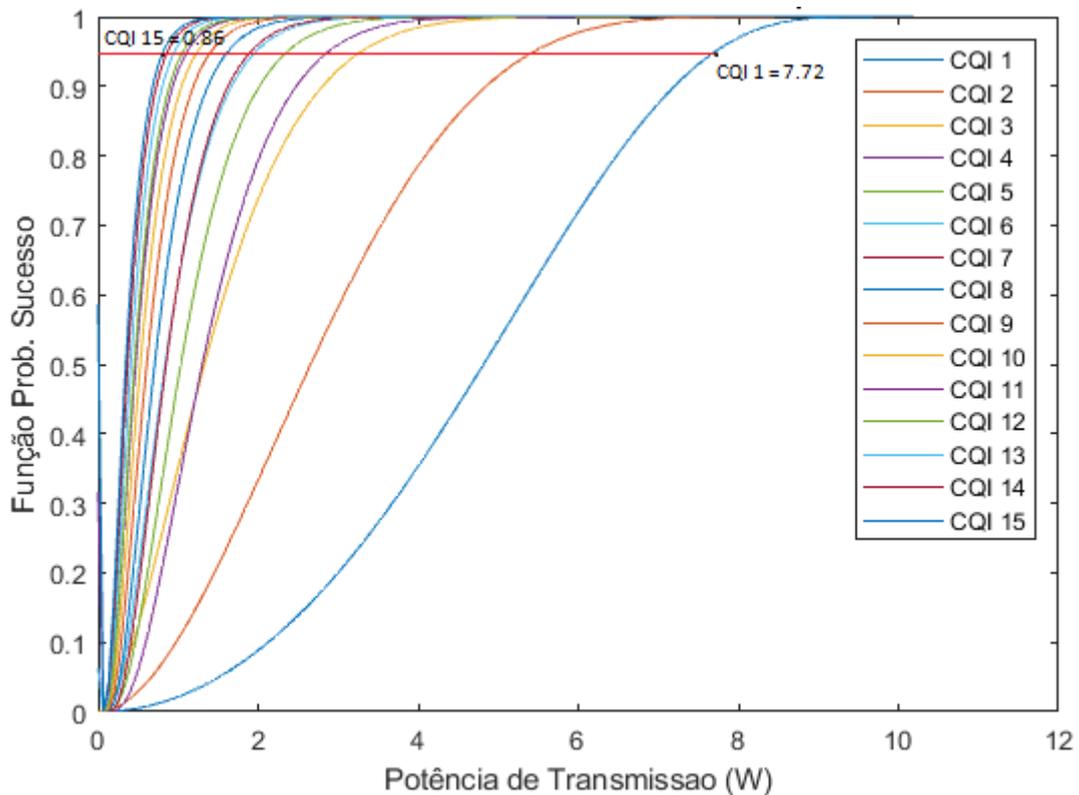


Figura 4. Prob. de sucesso no envio de pacote pela potência de transmissão

A tabela 3 mostra a potência mínima que deve ser alocada para a transmissão referente a cada CQI para se garantir um QoS de 95% de sucesso no envio de pacotes.

Tabela 3. Potência Alocada pela BS e a QoS de 95% para cada CQI

CQI	Potência de Transmissão (W)
1	7,72
2	5,53
3	3,30
4	2,89
5	2,39
6	1,97
7	1,92
8	1,64
9	1,45
10	1,24
11	1,14
12	1,08
13	0,97
14	0,92
15	0,86

5. Algoritmo de Levenberg Marquardt

A função de utilidade pode representar a satisfação ou a qualidade do serviço de um usuário e pode ser utilizada para controlar a eficiência e a imparcialidade na alocação de recursos.

Para modelagem da probabilidade de sucesso no envio de pacotes em função da potência de alocação foi utilizado a função utilidade tipo sigmoideal normalizada, como em [Wang et al 2016], e pode ser representada como:

$$U_i(\Phi_i(Pt_i)) = c_i \left(\frac{1}{1 + e^{-a_i(Pt_i - b_i)}} - d_i \right), \quad (9)$$

onde $c_i = 1 + \frac{1}{e^{a_i \cdot b_i}}$ e $d_i = \frac{1}{1 + e^{a_i \cdot b_i}}$. Assim satisfazendo a seguintes condições $U_i(0) = 0$ e $U_i(\infty) = 1$.

Nesta pesquisa foi utilizado o método de LM, conforme a equação (10), para identificar os parâmetros das funções de utilidade para diferentes CQIs. A matriz Jacobiana de F aplicado em Pt é denotada por $F'(Pt)$, mas se tivermos uma sequência de vetores $\{Pt_k\}$, então J_k é usados em vez de $F'(Pt_k)$ [Moré 1977].

$$(J_k^T(p)J_k(p) + \lambda_k I)d = -J_k^T(p)R_k(p), \quad (10)$$

onde $p = [a_i, b_i]$ e k é o número de pontos.

Seja $F(Pt_i)$ a probabilidade de sucesso em função da Pt e o vetor de resíduos $R(p)$ que representa a diferença entre o valor esperado e o valor estimado definido pela equação (11). O objetivo de aplicar o método LM é obter os valores de a_i e b_i que minimizem o Erro Quadrático Médio (EQM) dado pela equação (12) para cada CQI i .

$$R_i(Pt, p) = F_i(Pt) - U_i(Pt, p). \quad (11)$$

$$EQM_i = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k (R_i(Pt_n, p))^2. \quad (12)$$

Apresentada por Nielsen [Nielsen et al 2005] e utilizado nessa pesquisa, a estratégia para atualização do parâmetro λ_k , consiste em evitar grandes saltos entre iterações consecutivas, pois grandes oscilações de λ_k podem exigir maiores esforços para obtenção de um valor admissível. Considerando as constantes reais $\eta > 0$, $\mu > 1$ e $\beta > 0$, e um inteiro positivo ímpar l , sendo então o processo descrito por [Nielsen et al 2005] é dado por:

Se $\rho_k > \eta$, faça

$$\lambda_{k+1} = \lambda_k \max \left\{ \frac{1}{\mu}, 1 - (\beta - 1)(2\rho_k - 1)^l \right\}; v = \beta. \quad (13)$$

Senão

$$\lambda_{k+1} = \lambda_k v; v = 2v. \quad (14)$$

onde ρ é o coeficiente de redução relativa e é dado pela equação (15):

$$\rho_k = \frac{F(p_k) - F(p_k + d_k)}{m_k(0) - m_k(d_k)}, \quad (15)$$

onde $m_k(d)$ é a aproximação quadrática de F no ponto p_k representado pela equação (16).

$$m_k(d) = F(p_k) + F'(p_k)^T d + 0.5d^T (J_k^T(p_k) J_k(p_k) + \lambda_k I) d. \quad (16)$$

Em [Madsen et al 2004] os autores propõem $\beta = 2$, neste artigo foi considerado $\eta = 0.25$, $\mu = 3$, $l = 3$ e os parâmetros iniciais $v_0 = 2$ e λ_0 definido pela equação (17):

$$\lambda_0 = \max \left\{ \epsilon_{abs} * \max(\text{diag}(J_k^T(p_0) J_k(p_0))), \epsilon_{rel} \right\}, \quad (17)$$

onde $\epsilon_{abs} = 10^{-10}$ e $\epsilon_{rel} = 10^{-12}$.

Como comprovado em [Abdelhadi et al 2015], o log das funções de utilidade $U_i(\Phi_i(Pt_i))$ em um problema de otimização são funções estritamente côncavas e portanto, o problema de otimização é convexo e existe uma solução ideal global única e traçável. Sendo assim, a alocação ótima de potência e a equidade da utilidade do problema pode ser formulado como:

$$\text{Maximize(P)} \quad \prod_{i=0}^J \log(U_i(\Phi_i(Pt_i))) \quad (18)$$

$$\text{Sujeito a} \quad \sum_{i=1}^J Pt_i \leq P_{bs}, \quad (19)$$

$$Pt_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, J. \quad P_{bs} \geq 0, \quad (20)$$

onde J é o número de UEs e $P = Pt_1, Pt_2, \dots, Pt_J$.

A função objetivo em (18) garante uma alocação de potência não zero para todos os usuários. Sendo assim, o problema de otimização garante uma QoS mínima para todos os usuários. Além disso, esta abordagem aloca mais potência aos usuários com esquemas de modulação mais baixos, proporcionando melhoria na QoS do sistema celular. O objetivo do problema de otimização é alocar potência a cada UE que maximize o produto das utilidades de todas as UEs.

O problema de otimização tem duas restrições que são discutidas a seguir: em (19) a BS precisa alocar potência a todos os UEs, mantendo-se dentro de sua disponibilidade de potência. Em (20) é assegurado que seja alocado potência não nula a todas as UEs, ou seja, quando o $P_{bs} \neq 0$, $Pt_i > 0$ para todos os UEs atendendo a um critério mínimo de QoS para todos os usuários da rede móvel. O caso em que $Pt_i = 0$ é apenas quando $P_{bs} = 0$.

6. Resultados e Discussões

A faixa de 3,5 GHz é uma faixa ideal para uso compartilhado do espectro e implantações de pequenas células devido a sua menor cobertura. Através do relatório *Fast Track* o Instituto Nacional de Normas e de Tecnologia (NTIA - *National Institute of Standards and Technology*) identificaram a faixa de 3,5 GHz para um potencial compartilhamento no uso de banda larga federal e não federal. Esta faixa é muito favorável para o uso comercial em sistemas celulares, como os sistemas LTE-B [Shajaiah et al. 2016].

A simulação da rede de telefonia móvel foi realizado com 1 BS e 15 UEs com CQI diferentes se comunicando na faixa de 3.5 GHz. A potência total P_{bs} na BS é de 10W que é um valor típico para a estação de rádio base de pequena célula - *Small Cell*.

Para o ajuste não linear das curvas foi utilizado o algoritmo LM considerando como critério de parada uma norma relativa $\frac{\max(\text{abs}(x_{k-1}-x_k))}{\max(\text{abs}(x_k))} = 1 \times 10^{-16}$ ou um máximo de 2000 iterações.

Os resultados são mostrados na Figura 5, os parâmetros das 15 funções de utilidade são exibidos na Tabela 4

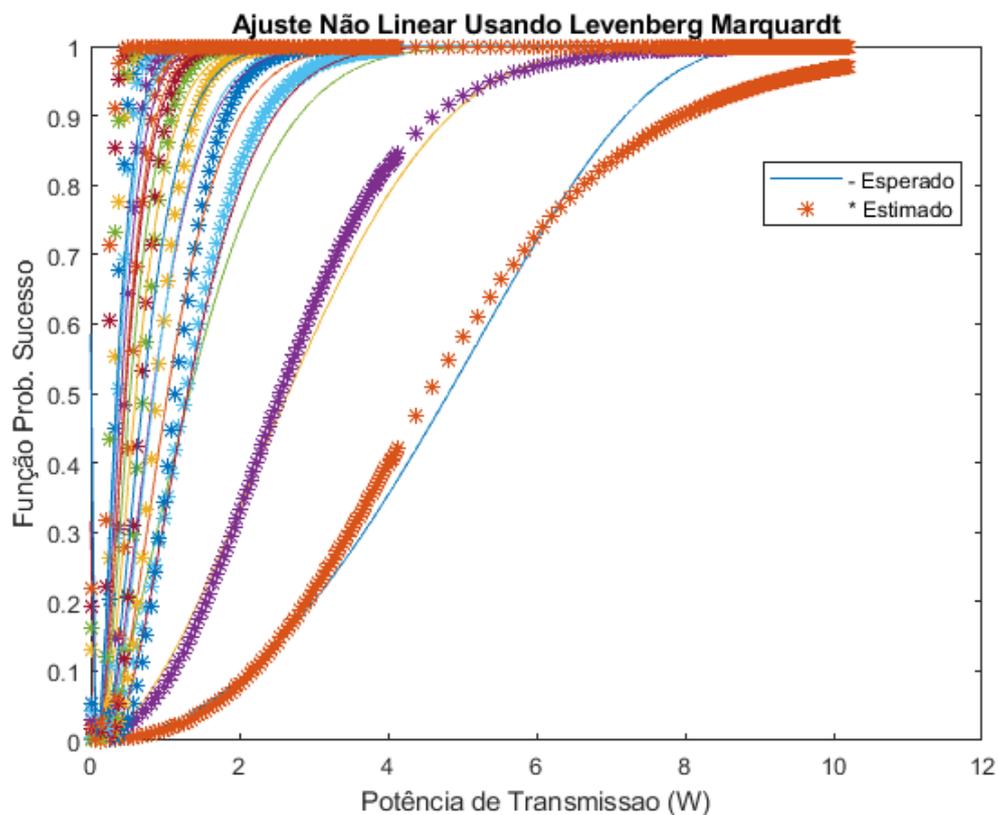


Figura 5. Potência parametrizada pela função utilidade

Os valores do erro quadrático médio (EQM) da parametrização estão satisfatórios e são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros da Função de Utilidade para cada CQI

CQI	a	b	EQM
1	0,57	2,82	2,49E-04
2	0,94	1,45	2,40E-04
3	1,86	0,71	2,55E-04
4	2,90	0,83	6,80E-04
5	3,80	0,64	6,26E-04
6	4,89	0,51	5,76E-04
7	5,77	0,52	8,21E-04
8	7,28	0,42	7,53E-04
9	8,87	0,35	6,94E-04
10	10,68	0,30	6,38E-04
11	12,37	0,26	5,89E-04
12	14,29	0,25	6,65E-04
13	16,59	0,22	6,08E-04
14	18,98	0,19	5,54E-04
15	20,79	0,18	5,18E-04

Outra forma de avaliar o modelo é calculando a distância em que os UEs estão da BS. À medida que a distância se torna maior o nível de SNR diminui devido ao acréscimo de perda de propagação. Quanto mais longe estiver o UE da BS, menor será a potência que ela pode receber.

A relação entre a potência que chega no UE, a potência que é enviada pela BS e a distância que o UE está da BS é limitada pela equação (21) [Wang et al 2016].

Foram utilizados os seguintes valores para os parâmetros:

- f é a frequência da portadora (3,5 GHz);
- c é a velocidade da luz (3×10^8 m/s);
- α em ambiente urbano é 3,5.

$$Pr_i = \frac{Pt_i f}{c(4d_i \pi)^\alpha} \quad (21)$$

Em [Li et al 2011], uma função linear foi utilizada para mapear SNR (dBm) com o CQI. Os CQIs obtidos pela função (22) é o valor limiar sobre todos os blocos de recursos (RB) relatados de volta pelos UEs para a BS.

$$CQI = 0,5223SNR + 4,6176. \quad (22)$$

Utilizando os valores limiares é feito o mapeamento entre CQI, SNR e distância conforme mostra a Figura 6.

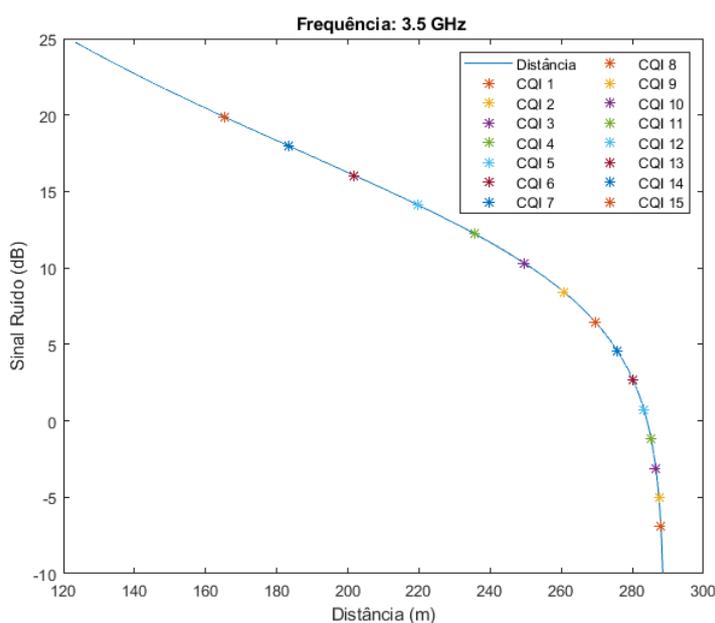


Figura 6. Mapeamento do CQI, SNR e a distância entre a UE e a BS

Conforme a Tabela 5 para uma frequência de 3.5 GHz, à medida que a UE se afasta da BS, assim como SNR o CQI diminui o que justifica um aumento na potência de alocação para se compensar as perdas de propagação e garantir um QoS mínimo para o UE. Os UEs com uma distância entre 1 m a 165 m da BS, têm a melhor qualidade de canal (CQI = 15) com modulação 256-QAM, a zona para a pior qualidade de canal (CQI = 1) está a 288 m da BS.

Tabela 5. Distância entre a UE e a BS na faixa de 3.5 GHz

CQI	Distância (m)
15	$d \leq 165,26$
14	$165,26 < d \leq 183,45$
13	$183,45 < d \leq 201,82$
12	$201,82 < d \leq 219,54$
11	$219,54 < d \leq 235,72$
10	$235,72 < d \leq 249,64$
9	$249,64 < d \leq 260,91$
8	$260,91 < d \leq 269,52$
7	$269,52 < d \leq 275,80$
6	$275,80 < d \leq 280,21$
5	$280,21 < d \leq 283,23$
4	$283,23 < d \leq 285,25$
3	$285,25 < d \leq 286,58$
2	$286,58 < d \leq 287,46$
1	$287,46 < d \leq 288,02$

7. Conclusões

Neste artigo, é feita uma implementação eficiente de uma versão do algoritmo LM que mostrou que tem fortes propriedades de convergência. Além da robustez, a principal característica desta implementação é a escolha do parâmetro λ , um regulador que deve proporcionar um decréscimo na função objetivo, e deve se aproximar de zero nos estágios finais do algoritmo, de maneira que a convergência quadrática do Método de Gauss-Newton seja resgatada.

Também, foram mapeados os valores padrão de CQI para as funções de utilidade sigmoidal, e encontrados os parâmetros que minimizam o erro quadrático médio entre os valores estimados e esperados. Foi verificado que os usuários com melhor qualidade de canal exigirá menos potência de transmissão da BS para receber um QoS mínimo. Além disso, foi mapeado o CQI e SNR com a distância entre o UE e a BS.

O desenvolvimento utilizando o Matlab possibilitou muitas implementações, correções de código e testes em pouco tempo, pois, com um conhecimento da ferramenta, o desenvolvimento dentro dela é rápido. Para projetos futuros, pode-se utilizar algoritmos para realizar a alocação ótima de potência conforme o problema de otimização e comparar os resultados.

Referências

- Abdelhadi, A. and Clancy, T.C. (2016) ‘Optimal context-aware resource allocation in cellular networks’, *2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, Kauai, pp. 1–5,
- Abdelhadi, A., Khawar, A. and Clancy, T.C. (2015) ‘Optimal downlink power allocation in cellular networks’, *Physical Communication*, Vol. 17, pp. 1–14,
- Hasan, Z., Boostanimehr, H. and Bhargava, V.K. (2011) ‘Green Cellular Networks: A Survey, Some Research Issues and Challenges’, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, Vol. 13, No. 4, pp. 524–540.
- Lathi, B.P. *Sistemas de Comunicação Analógicos e Digitais Modernos*. 4.Ed. Rio de Janeiro: Bookman, 2012.
- Lee, J., Mazumdar, R.R. and Shroff, N.B. (2005) ‘Downlink power allocation for multi-class wireless systems’, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 13, No. 4, pp. 854–867.
- Lee, J. and Kwon, J. (2009) ‘Utility-Based Power Allocation for Multiclass Wireless Systems’, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 58, No. 7, pp. 3813–3819.
- Li, X., Fang, Q. and Shi, L. (2011) ‘A effective SINR link to system mapping method for CQI feedback in TD-LTE system’, *IEEE 2nd International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering*, pp. 208–211.
- Madsen, K. Nielsen, H.B. and Tingleff, O. (2004) ‘Methods for non-linear leastsquares problems’, *2.ed. Lecture note, Informatics and Mathematical Modelling*, Technical University of Denmark, Lyngby, Dinamarca,
- Moré, J.J. (1977) ‘The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory’. *Em Proceedings of the 1977 Dundee conference on numerical analysis*, Lecture Notes in Mathematics 630. G. A. Watson. (ed.) Berlin, Springer, pp. 105–116
- Nielsen, H.B. (2005) ‘Damping parameter in Marquardt’s method’. *Report IMM-REP1999-05*, Technical University of Denmark, Lyngby, Dinamarca.
- Proakis, J.G. *Digital Communications*, 4th ed. New York: McGraw Hill, 2000.
- Shajaiah, H., Abdelhadi, A. and C. Clancy, (2016) ‘An application-aware spectrum sharing approach for commercial use of 3.5 GHz spectrum’, *Annual IEEE Systems Conference (SysCon)*, pp. 1–7.
- Shajaiah, H., Abdelhadi, A. and C. Clancy, (2014) ‘Multi-application resource allocation with users discrimination in cellular networks’, *2014 IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC)*, pp. 1163–1168.
- Wang, Y., Abdelhadi, A. and Clancy, T.C. (2016) ‘Optimal power allocation for LTE users with different modulations’, *2016 Annual IEEE Systems Conference (SysCon)*, Orlando, pp. 1–5.
- 36.213, G.T. *Evolved universal terrestrial radio access (e-utra): Physical layer procedures* (release 12), version 12.7.0, October 2015.