

**Daniel Yuji Mitsutake Cueto**

**Planejamento de Cobertura e Capacidade de  
Redes LTE-Advanced**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador : Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello  
Co-Orientador: Prof. Carlos Vinício Rodríguez Ron

Rio de Janeiro  
Agosto de 2013

**Daniel Yuji Mitsutake Cueto**

**Planejamento de Cobertura e Capacidade de  
Redes LTE-Advanced**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello**

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. Carlos Vinício Rodríguez Ron**

Co-Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. Gláucio Lima Siqueira**

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. Leni Joaquim de Matos**

UFF

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de Agosto de 2013

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

**Daniel Yuji Mitsutake Cueto**

Engenheiro em Telecomunicações graduado pela Universidade Católica “San Pablo”, La Paz - Bolívia em 2010.

Ficha Catalográfica

Mitsutake Cueto, Daniel Yuji

Planejamento de cobertura e capacidade de redes *Lte-advanced* / Daniel Yuji Mitsutake Cueto; orientador: Luiz Alencar Reis da Silva Mello ; co-orientador: Carlos Vinício Rodríguez Ron. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2013.

v., 127 f: il. ; 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica – Tese. 2. Sistemas *LTE-Advanced*; Redes Móveis; Banda Larga. I. Reis da Silva Mello, Luiz Alencar. II. Rodríguez Ron, Carlos Vinício. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 004

## Agradecimentos

Gostaria de agradecer a minha mãe pelo apoio e amor incondicional.

Aos meus melhores amigos Diego e Mauricio pela amizade nesses anos.

Ao meu Orientador Dr. Silva Mello por ser meu guia durante a tese.

Aos tios Sofia e Jaime por tudo o carinho e apoio durante todo esse tempo.

Meus amigos do CETUC que me ajudaram e apoiaram.

À CNPq e PUC-Rio, pelo auxílios concedidos.

## Resumo

Mitsutake Cueto, Daniel Yuji; Reis da Silva Mello, Luiz Alencar; Rodríguez Ron, Carlos Vinício. **Planejamento de Cobertura e Capacidade de Redes *LTE-Advanced***. Rio de Janeiro, 2013. 127p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O acesso sem fio de banda larga está se tornando uma realidade, não apenas para uso corporativo e doméstico, mas para usuários com mobilidade. Dos estimados 1.8 bilhão de pessoas que já utilizam banda larga desde 2012, cerca de dois terços serão consumidores de banda larga móvel e a maioria será servida por redes HSPA (*High Speed Packet Access*) e LTE-A (*Long Term Evolution-Advanced*), uma evolução para as redes 4G, capaz de oferecer velocidades acima de 500 Mbps. O planejamento celular tem como objetivo estabelecer a rede de rádio adequada e eficiente em termos de cobertura, capacidade, qualidade de serviço (QoS), custo, utilização de frequências, a implantação de equipamentos e desempenho. O objetivo deste trabalho é estudar dos métodos de planejamento de cobertura e capacidade de sistemas celulares *LTE-Advanced* e propor uma metodologia passo-a-passo para o planejamento inicial e dimensionamento do número de estações rádio base necessárias para atender uma determinada área de serviço com a capacidade requerida. Um estudo de caso é apresentado, ilustrando a aplicação da metodologia proposta. É apresentada também uma análise comparativa dos recursos requeridos para atender às especificações do projeto quando são utilizadas as bandas de frequência de 2.6 GHz, atualmente autorizada no Brasil, e a banda de 700 MHz, que está em consideração para uso futuro. Os resultados quantificam claramente as vantagens do uso da banda de 700 MHz em relação à banda de 2.6 GHz.

## Palavras-chave

Sistemas *LTE-Advanced*; Redes Móveis; Banda Larga.

## Abstract

Mitsutake Cueto, Daniel Yuji; Reis da Silva Mello, Luiz Alencar (Advisor); Rodríguez Ron, Carlos Vinício (Co-Advisor). **Coverage and Capacity Planning for LTE-Advanced Networks**. Rio de Janeiro, 2013. 127p. MSc Dissertation — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The wireless broadband is becoming a reality, not only for corporate and domestic use, but for mobile users. Of the estimated 1.8 billion people already using broadband since 2012, about two thirds will be mobile broadband consumers and the majority will be served by HSPA (High Speed Packet Access) and LTE-A (Long Term Evolution-Advanced), an evolution to 4G networks, able to offer speeds up to 500 Mbps. The cell planning establishes a radio network properly and efficiently in terms of coverage, capacity, quality of service (QoS), cost, frequency usage, deployment of equipment and performance. The objective of this work is to study the methods of planning coverage and capacity of LTE-A cellular systems and propose a methodology step-by-step for the initial planning and dimensioning of the number of base stations required to meet a given service area with the required capacity. A study case is presented, illustrating the application of the proposed methodology. It also presented a comparative analysis of the required resources to meet the project specifications when used frequency bands of 2.6 GHz, nowadays licensed in Brazil, and the 700 MHz band, which is under consideration for future use. The results clearly quantify the advantages of the use of the 700 MHz band relative to the 2.6 GHz band.

## Keywords

LTE-Advanced Systems; Mobile Networks; Wide band.

## Sumário

1	Introdução	12
1.1	Padronização.	13
1.2	<i>LTE-Advanced</i> .	14
1.2.1	Adoção do LTE no mundo.	15
1.2.2	Estatísticas de Celulares no Brasil.	16
1.3	Objetivos do Trabalho	17
2	Tecnologia <i>LTE-Advanced</i> .	19
2.1	Introdução.	19
2.1.1	Pilares do <i>LTE-Advanced</i> .	20
2.2	Arquitetura <i>LTE-Advanced</i> .	23
2.2.1	<i>Enhanced Base Stations (eNodeB)</i> .	24
2.2.2	<i>Core Network</i> e <i>Gateway</i> .	25
2.2.3	Camada Física do LTE.	26
2.3	MIMO.	35
2.3.1	Modos MIMO.	39
3	Métodos para cálculo de cobertura e interferências.	43
3.1	Introdução.	43
3.2	Modelos para cálculo da perda de propagação.	44
3.2.1	Okumura-Hata.	44
3.2.2	COST-231.	45
3.2.3	IMT-2000.	46
3.2.4	Modelo Winner.	47
3.2.5	IEEE 802.16j <i>Model</i> .	52
3.3	Modelos para Caracterização de Canais em Banda Larga.	54
3.3.1	Modelo de Turin.	54
3.3.2	Modelo de Saleh-Valenzuela.	55
3.4	Cálculo de Enlace.	57
3.4.1	Especificações de equipamento.	58
4	Planejamento da Célula.	61
4.1	Introdução.	61
4.2	Dimensionamento da rede.	61
4.2.1	Entradas do dimensionamento LTE.	62
4.2.2	Saídas do dimensionamento LTE.	63
4.2.3	Processo do dimensionamento LTE.	63
4.3	Planejamento de Cobertura.	66
4.3.1	Identificação das Células.	68
4.3.2	Tipos de Células.	69
4.4	Planejamento de Capacidade.	70
4.4.1	Cálculo do <i>throughput</i> médio da célula.	71
4.4.2	Estimativa do tráfego demandado e fator de <i>Overbooking</i> .	72
4.4.3	Capacidade baseada na contagem de <i>sites</i> .	73

4.5	Parâmetros de avaliação do desempenho.	73
4.6	Ferramentas de planejamento.	75
5	Estudo de Caso.	<b>77</b>
5.1	Introdução.	77
5.2	Cálculo das Perdas no Enlace.	78
5.2.1	<i>Downlink</i> .	78
5.2.2	<i>Uplink</i> .	79
5.3	Cálculo do Raio Teórico.	80
5.4	Cálculo do Máximo <i>Throughput</i> Teórico.	84
5.5	Cálculo da Máxima Eficiência Espectral.	86
5.6	Cálculo da Relação Sinal Ruído (SNR).	87
5.7	Cálculo do Raio em Função da Modulação e SNR.	87
5.8	Cálculo da Interferência Co-Canal com Setorização Tripla.	94
5.9	Cálculo da quantidade de ERBs necessárias para cobertura.	96
5.10	Cálculo da quantidade de ERBs necessárias para capacidade.	97
5.11	Projeto da Rede.	99
6	Conclusões	<b>110</b>
A	Referências Bibliográficas	<b>112</b>
B	Glossário	<b>117</b>
C	Análise das Ferramentas Existentes.	<b>121</b>



## Lista de figuras

1.1	Visão geral dos sistemas móveis celulares 3G-4G.	12
1.2	Paradigma da evolução do mercado das comunicações móveis.	13
1.3	Relação do custo da rede com o volume do tráfego.	13
1.4	Crescimento de celulares no Brasil.[46]	17
2.1	Alocação Dinâmica do Espectro.	20
2.2	Adição de Portadora.	21
2.3	Esquema CoMP no canal de descida.	22
2.4	Esquema de célula com nós relé.	23
2.5	Arquitetura Básica LTE.	24
2.6	Integração das Redes GSM, UMTS e LTE.[19]	26
2.7	Parâmetros do <i>Downlink</i> LTE.[28]	29
2.8	Portadora Simples e OFDM.[37]	30
2.9	Multiplexação de usuários em OFDMA.[7]	31
2.10	Ilustração do <i>scheduling</i> de pacotes em OFDMA.[7]	32
2.11	Transmissão SC-FDMA.[41]	34
2.12	Transmissão utilizando OFDMA vs. SC-FDMA.[41]	35
2.13	Princípio MIMO para uma configuração de duas antenas.	37
2.14	Símbolos de Referência OFDMA.[27]	38
2.15	Princípio MIMO para múltiplos utilizadores.	38
2.16	Sistemas de Acesso de Múltiplas Antenas.[27]	39
3.1	Modelo da Geometria para d1 e d2 na perda de percurso.	50
3.2	Decaimento exponencial e perfil de retardos.[38]	55
4.1	Dimensionamento da rede LTE.[6]	65
4.2	Exemplo do resultado de uma previsão gerada pelo ASSET.	76
5.1	<i>Throughput</i> na camada física do LTE-A com modulação QPSK.	85
5.2	<i>Throughput</i> na camada física do LTE-A com modulação 16-QAM.	86
5.3	<i>Throughput</i> na camada física do LTE-A com modulação 64-QAM.	86
5.4	Eficiência Espectral do <i>LTE-Advanced</i> .	87
5.5	Comparação da cobertura LTE-A em 2.6 GHz e 700 MHz - Largura de Banda 20 MHz.	91
5.6	Comparação da cobertura LTE-A em 2.6 GHz e 700 MHz - Largura de Banda 40 MHz.	91
5.7	Comparação da cobertura LTE-A em 2.6 GHz e 700 MHz - Largura de Banda 60 MHz.	91
5.8	Comparação da cobertura LTE-A em 2.6 GHz e 700 MHz - Largura de Banda 80 MHz.	92
5.9	Comparação da cobertura LTE-A em 2.6 GHz e 700 MHz - Largura de Banda 100 MHz.	92
5.10	Variação do <i>Throughput</i> conforme a distância para largura de banda de 20 MHz.	93

5.11	Variação do <i>Throughput</i> conforme a distância para largura de banda de 40 MHz.	93
5.12	Variação do <i>Throughput</i> conforme a distância para largura de banda de 60 MHz.	93
5.13	Variação do <i>Throughput</i> conforme a distância para largura de banda de 80 MHz.	94
5.14	Variação do <i>Throughput</i> conforme a distância para largura de banda de 100 MHz.	94
5.15	Interferência com setorização tripla.	95
5.16	Área de cobertura, Ipanema, Rio de Janeiro.	99
5.17	Localização das ERBs.	100
5.18	Intensidade do sinal na área de cobertura, para 20 MHz.	103
5.19	Intensidade do sinal na área de cobertura, para 40 MHz.	104
5.20	Intensidade do sinal na área de cobertura, para 60 MHz.	104
5.21	Intensidade do sinal na área de cobertura, para 80 MHz.	104
5.22	Intensidade do sinal na área de cobertura, para 100 MHz.	105
5.23	Cobertura <i>Best Server</i> , para 20 MHz.	105
5.24	Cobertura <i>Best Server</i> , para 40 MHz.	106
5.25	Cobertura <i>Best Server</i> , para 60 MHz.	106
5.26	Cobertura <i>Best Server</i> , para 80 MHz.	106
5.27	Cobertura <i>Best Server</i> , para 100 MHz.	107
5.28	Relação Sinal-Ruído.	107
5.29	Planejamento das Frequências.	108
5.30	Relatório de planejamento de Frequências.	108
5.31	Análise das áreas com sombra.	109
5.32	Análise das áreas com sombra, considerando a Difração.	109
C.1	Ambiente do Software CELLP.	122
C.2	Abas do <i>Predict</i> .	122
C.3	<i>Radio Link</i> - Dados de Entrada.	123
C.4	<i>Radio Link</i> - Resultados.	124
C.5	<i>Traffic Tool</i> - Geração de tabela de tráfego.	124
C.6	Ambiente do <i>Software Traffic Design</i> .	126

## Lista de tabelas

1.1	Fornecedores para os operadores no Brasil.[46]	16
2.1	Faixas FDD.	27
2.2	Sub-Quadros do TDD.[28]	28
2.3	Faixas TDD.	28
2.4	<i>Resource Blocks</i> e Subportadoras.[18]	33
2.5	Parâmetros físicos dos <i>Resource Blocks</i> .[18]	34
2.6	Matriz de Decisão para os Principais Modos MIMO.[27]	42
3.1	Constantes A,B e C do Modelo Winner.	49
3.2	Cenários Específicos de propagação no modelo WINNER.[25]	52
3.3	Parâmetros pelo tipo A/B/C.[21]	53
3.4	Níveis de Potência para o Cálculo de Enlace.	58
3.5	Margens para PCA= 90% utilizando o desvio padrão.	60
3.6	Margens para PCA= 90% utilizando o tipo de cobertura.	60
4.1	Requerimentos SINR no <i>Downlink</i> .[52]	67
5.1	Parâmetros para o Cálculo de Enlace de <i>Downlink</i> .	78
5.2	Sensibilidade Requerida na Recepção para <i>LTE-Advanced</i> .[16]	78
5.3	Parâmetros para o Cálculo de Enlace de <i>Uplink</i> .	79
5.4	Parâmetros do modelo para os diferentes tipos de terrenos.	81
5.5	Número de Subportadoras e <i>Resource Blocks</i> .[27]	84
5.6	<i>Throughput</i> para as larguras de banda de 20, 40, 60, 80 e 100 MHz.	85
5.7	SNR requerida para respectivas modulações e taxa de códigos.	87
5.8	Raio da célula considerando o SNR na faixa de 2.6 GHz.	89
5.9	Raio da célula considerando o SNR na faixa de 700 MHz.	90
5.10	Relação SIR com setorização tripla.	96
5.11	Latitudes e Longitudes dos eNodeB.	100
5.12	Alturas dos eNodeBs utilizados para o projeto.	100
5.13	Equipamento <i>Multiradio Flexi BTS - Nokia Siemens</i> .[33]	101
5.14	Faixas de <i>Uplink</i> e <i>Downlink</i> para o LTE. [52]	102
C.1	Sub-Programas do CELLP.	122