

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal  
de Campina Grande

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

***ANÁLISE DA COBERTURA DA CIDADE DE CAMPINA GRANDE PARA IMPLANTAÇÃO  
DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS EM 700MHz UTILIZANDO OS MODELOS DE OKUMURA-  
HATA, SUI E ERICSSON***

GABRIELA SOBREIRA DIAS DE CARVALHO

Campina Grande – PB

Agosto de 2017

GABRIELA SOBREIRA DIAS DE CARVALHO

***ANÁLISE DA COBERTURA DA CIDADE DE CAMPINA GRANDE PARA IMPLANTAÇÃO DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS EM 700MHz UTILIZANDO OS MODELOS DE OKUMURA-HATA, SUI E ERICSSON***

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal De Campina Grande - UFCG

Centro De Engenharia Elétrica E Informática - CEEI

Departamento De Engenharia Elétrica - DEE

Orientador: Dr. Glauco Fontgalland

Campina Grande – PB

Agosto de 2017

GABRIELA SOBREIRA DIAS DE CARVALHO

***ANÁLISE DA COBERTURA DA CIDADE DE CAMPINA GRANDE PARA IMPLANTAÇÃO DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS EM 700MHz UTILIZANDO OS MODELOS DE OKUMURA-HATA, SUI E ERICSSON***

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Aprovado em    /    /

---

**Professor Avaliador**

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador

---

**Professor Dr. Glauco Fontgalland**

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador

*À minha avó, Carminha Sobreira,  
exemplo e fortaleza que, com certeza,  
estaria muito feliz por essa conquista.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, minha Força, Refúgio e Consolo, pela graça infinita e por me permitir ir sempre mais longe do que eu posso imaginar.

À minha mãe, Giulia Sobreira, pelo amor incondicional e todos os gestos de carinho que tornaram essa caminhada menos árdua. Ao meu pai, Ricardo de Carvalho, por fazer tudo ao seu alcance para me apoiar.

Às minhas tias e tios, pelo incentivo e o suporte e por se alegrarem comigo a cada vitória.

Aos meus amigos, por compreenderem meus momentos de ausência e serem acolhida, descanso e leveza.

À Savenge Engenharia pela oportunidade de vivenciar o cotidiano da profissão e aos meus colegas de empresa cujos conhecimentos, tão generosamente compartilhados, tornaram essa tarefa mais fácil.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica pela dedicação e por me desafiarem sempre à superação. Àqueles que fizeram a diferença e se tornaram inspiração, minha mais profunda admiração. Agradeço, em especial, ao meu orientador, Glauco Fontgalland, pela compreensão e valiosa colaboração.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, particularmente, Adail Paz e Tchaikowsky Oliveira, obrigada pela torcida e prontidão em ajudar.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para o sucesso desse trabalho, muito obrigada.

*“Há sempre algo pelo qual ser grato”*

*Autor Desconhecido*

## RESUMO

A liberação da banda de 700MHz em consequência da digitalização dos sinais de televisão, surge como alternativa para tratar a necessidade de espectro enfrentada pelos serviços de comunicações móveis em função do aumento da demanda e da evolução tecnológica. Alinhando-se às recomendações internacionais, o Brasil adotou a faixa de 700MHz para a expansão da cobertura 4G LTE das operadoras de telefonia móvel atuantes no país. Este trabalho realiza uma revisão sobre o dividendo digital em 700MHz, descrevendo suas vantagens e padronização A nível mundial e destacando os aspectos relacionados à adoção dessa faixa de frequências no Brasil. Essa análise culmina no estudo de caso sobre a cobertura LTE 700 que se pretende implantar na cidade de Campina Grande/PB, utilizando os modelos de propagação de Okumura-Hata, *Stanford University Interim* (SUI) e Ericsson para estimar os raios de cobertura das estações radiobase do novo sistema.

**Palavras-Chave:** Dividendo digital, 4G LTE 700MHz, banda larga móvel.

## ABSTRACT

700MHz band release after digitization of television signals is an alternative to address the spectrum needs faced by mobile communications services because of increased demand and technological developments. In line with international recommendations, Brazil has adopted the 700MHz band for the expansion of the 4G LTE coverage of its mobile operators. This paper reviews the digital dividend at 700MHz, describing its advantages and standardization worldwide and highlighting aspects related to the adoption of this frequency band in Brazil. This analysis culminates in the case study about the LTE 700 coverage to be implemented in the city of Campina Grande/PB. Okumura-Hata, Stanford University Interim (SUI) and Ericsson propagation models are used to estimate the cell range in this frequency band.

**Key-words:** Digital dividend, 4G LTE 700MHz, mobile broadband.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Switch-off da TV analógica para a TV digital.....	14
Figura 2 - Definição dos dividendos digitais nas 3 Regiões definidas pela ITU segundo o WRC-07.....	15
Figura 3 - Canalização da versão FDD do APT 700 para o dividendo digital .....	16
Figura 4 - Lotes e área de prestação do leilão da faixa de 700MHz .....	17
Figura 5 - Mapa do relevo da cidade de Campina Grande .....	27
Figura 6 - Localização dos sites utilizadas pela TIM em Campina Grande.....	28
Figura 7 - Localização dos sites que receberão o sistema LTE 700 da TIM em Campina Grande.....	29
Figura 8 - Vista geral das estruturas verticais encontradas nos sites de Campina Grande .	30
Figura 9 – Vista geral das antenas do site 3SLCGBV00 .....	31
Figura 10 - Arquitetura Básica LTE .....	32
Figura 11 - Nokia AirScale System Module com porta LMP para comissionamento destacada .....	33
Figura 12 - Módulo de RF Nokia, modelo FRPB .....	33
Figura 13 - Data-sheet da antena Comba ODV-065R15NB18JJ02-G.....	35
Figura 14 - Curvas da perda de propagação do enlace em 700 MHz.....	39
Figura 15 - Cenário da cobertura em 700 MHz da TIM prevista para a cidade de Campina Grande.....	41
Figura 16 - Cenário da cobertura em 2600 MHz da TIM prevista para a cidade de Campina Grande.....	41
Figura 17 - Cenário proposto para a cobertura do LTE 700 da TIM em Campina Grande...	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cronograma do desligamento da TV analógica nas capitais do Brasil .....	18
Tabela 2 - Fórmulas do Parâmetro C do modelo de Okumura-Hata.....	23
Tabela 3 - Valores dos parâmetros a, b e c do modelo SUI .....	24
Tabela 4 - Valores-padrão dos parâmetros $a_0$ , $a_1$ , $a_2$ e $a_3$ do modelo Ericsson.....	25
Tabela 5 - Canais de televisão disponíveis em Campina Grande .....	26
Tabela 6 - Informações gerais dos sites que receberão o LTE 700 em Campina Grande ...	29
Tabela 7 - Tecnologias previamente existentes nos sites que receberão o LTE 700 em Campina Grande.....	30
Tabela 8 - Altura em que serão instaladas as antenas do LTE 700 nos sites de Campina Grande.....	31
Tabela 9 - Especificações do módulo de RF FRPB da Nokia.....	34
Tabela 10 - Níveis de sensibilidade de referência para BTS E-UTRA de longo alcance .....	34
Tabela 11 - Máxima potência de saída para o equipamento de usuário (UE) .....	36
Tabela 12 - Níveis de sensibilidade de referência para UE E-UTRA.....	37
Tabela 13 - Parâmetros do downlink.....	37
Tabela 14 - Parâmetros do uplink .....	38
Tabela 15 - Raios de cobertura calculados para os sites de Campina Grande em 700MHz	39
Tabela 16 - Raios de cobertura calculados para os sites de Campina Grande em 2600MHz .....	40
Tabela 17 – Máxima perda de potência permitida em percurso no downlink em função da potência do transmissor da BS .....	43

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

**3GPP** – *3rd Generation Partnership Project*

**ANATEL** – Agência Nacional de Telecomunicações

**APT** – *Asia-Pacific Telecommunity*

**BTS** – *Base Transceiver Station*

**EAD** – Entidade Administradora do Processo de Redistribuição e Digitalização de Canais de TV e RTV

**EPC** – *Evolved Packet Core*

**ERB** – Estação Radiobase

**E-UTRA** – *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access*

**FDD** – *Frequency Division Duplex*

**GIRED** – Grupo de Implantação do Processo de Redistribuição e Digitalização de Canais de TV e RTV

**GSM** – Global System for Mobile Communication

**IEEE** – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

**ITU** – *International Telecommunication Union*

**LTE** – Long-Term Evolution

**MAPL** – *Maximum Allowed Path Loss*

**MCTIC** – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

**NLOS** – Non-Line Of Sight

**PNBL** – Plano Nacional de Banda Larga

**RF** – *Radio Frequency*

**UE** – *User Equipment*

**TDD** – *Time Division Duplex*

**UHF** – *Ultra High Frequency*

**UMTS** – *Universal Mobile Telecommunications Service*

**WRC** – World Radio Congress

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	v
RESUMO .....	vii
ABSTRACT.....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE TABELAS .....	x
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	13
2. DIVIDENDO DIGITAL .....	14
3. A FAIXA DE FREQUÊNCIA DE 700MHz NO BRASIL .....	17
4. PERDA MÁXIMA PERMITIDA EM PERCURSO (MAPL) .....	20
5. MODELOS DE PROPAGAÇÃO.....	21
5.1    MODELO DE OKUMURA-HATA.....	22
5.2    MODELO SUI .....	23
5.3    MODELO ERICSSON 9999.....	24
6. ESTUDO DE CASO.....	26
6.1    CENÁRIO: CIDADE DE CAMPINA GRANDE .....	27
6.2    PARÂMETROS DA ERB.....	32
6.3    PARÂMETROS DA ESTAÇÃO MÓVEL.....	36
6.4    CÁLCULO DA PERDA MÁXIMA PERMITIDA EM PERCURSO .....	37
6.5    RESULTADOS .....	38
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	44
8. REFERÊNCIAS .....	45

## 1. INTRODUÇÃO

A demanda brasileira por serviços de telecomunicações cresce consistentemente a taxas elevadas. O número de aparelhos celulares superou o número de habitantes no país em 2010, mesmo ano em que o número de acessos móveis de banda larga ultrapassou o número de acessos fixos de banda larga [1]. Essa realidade não é exclusivamente brasileira. Segundo a União Internacional de Telecomunicações (ITU), em 2016, a cobertura celular estava disseminada entre 95% da população global - ou 7 bilhões de pessoas - que vive em áreas onde ao menos a tecnologia 2G está disponível [2].

Nesse cenário, a transição da TV analógica para a TV digital desocupa um espectro de frequência importante na faixa de UHF que é considerado apropriado para os serviços de telecomunicações. Do chamado “dividendo digital” pode-se destacar a banda de 700MHz, que promete acelerar o desenvolvimento dos serviços de banda larga móvel inclusive em regiões rurais e com baixa densidade demográfica. É estimado que, até 2020, aproximadamente 6 bilhões de pessoas terão cobertura móvel das tecnologias operando no espectro do dividendo digital [3]. Essa harmonização do uso do espectro para acesso à banda larga móvel oferece um potencial para economias de escala na produção de equipamentos de rede e dispositivos celulares que devem reduzir os custos e facilitar o *roaming* internacional.

Alinhado aos processos de harmonização internacional no âmbito da ITU, a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) leiloou em 2014 a faixa de frequência do 700MHz para expansão do 4G LTE no Brasil. Desde então, as operadoras de telefonia móvel têm investido na infraestrutura da nova tecnologia com o intuito de preparar o sistema para operar logo após o desligamento do sinal analógico de TV no país.

Neste contexto, o presente trabalho se propõe a analisar o panorama de cobertura do 4G em 700MHz que se pretende estabelecer na cidade de Campina Grande pela operadora TIM. Serão utilizados três modelos de propagação para estimar o raio de cobertura da nova tecnologia no município, a partir dos dados das estações radiobase que receberão o novo sistema.

O trabalho está organizado da seguinte maneira: no Capítulo 2 há uma contextualização sobre o dividendo digital, descrevendo suas vantagens e padronização na aplicação em serviços de comunicações. O Capítulo 3 apresenta aspectos relevantes sobre a implantação da faixa de 700MHz para a expansão do 4G no Brasil. A explicação sobre o cálculo da perda máxima permitida em percurso é realizada no Capítulo 4, enquanto a descrição dos modelos de propagação utilizados para prever a cobertura da nova tecnologia é feita no Capítulo 5. O estudo de caso desenvolvido neste trabalho se encontra no Capítulo 6, no qual são detalhadas características da cidade de Campina Grande, do sistema de transmissão em 700MHz e dos parâmetros adotados para descrever os terminais móveis. A partir dessas informações, a máxima perda de potência permitida no enlace é calculada e os resultados obtidos sobre a cobertura do 4G em 700MHz na cidade são descritos. Por fim, o Capítulo 7 traz considerações finais a respeito da análise realizada neste trabalho.

## 2. DIVIDENDO DIGITAL

A forte demanda por serviços móveis se contrapõe a escassez de espectro ocasionada pela atual atribuição de parte das frequências tecnicamente viáveis a outros serviços legados. Como o espectro de frequências é um recurso limitado, constituindo-se em bem público, é necessária a otimização do seu uso face à evolução tecnológica. Para lidar com o problema da escassez de espectro existem três grandes abordagens: a eficiência tecnológica, o *refarming* e o compartilhamento de espectro.

Na abordagem da eficiência tecnológica, os fabricantes de equipamentos se incumbem de amenizar o problema ao inovar seus produtos com funcionalidades mais eficientes na ocupação do espectro. Isto resulta num aumento da capacidade do sistema de realizar chamadas de voz ou comunicações de dados simultâneas, bem como no aumento da velocidade de transmissão de dados. Em redes de comunicações móveis, por exemplo, essa eficiência normalmente é medida em bit/s/Hz por *site*, apresentando uma evolução de 0.17 na tecnologia GSM para um valor de 0.53 na tecnologia 3G WCDMA e um máximo de 16.32 no padrão LTE [1].

No compartilhamento de espectro uma mesma banda é destinada a mais de um serviço. A designação de uma faixa de espectro em caráter secundário, no entanto, significa que o serviço pode operar na ausência do ocupante primário, mas sem garantias de proteção contra interferências. O *refarming*, por outro lado, é a expressão utilizada para designar a reorganização da ocupação do espectro pelos serviços existentes. Permite a inclusão de novos serviços, a expansão daqueles com alta demanda de uso e a compactação ou mesmo a eliminação daqueles que tenham passado por evolução tecnológica e não apresentem indícios de maior demanda.

O processo de digitalização da radiodifusão se alinha à abordagem do aumento da eficiência tecnológica abrindo espaço para o *refarming* da faixa de frequências conhecida como “dividendo digital”. O termo dividendo digital usualmente se refere a porção de espectro liberada pelo desligamento da TV analógica resultante do processo de digitalização da transmissão dos sinais de televisão. Esse desligamento deve ocorrer após um período de convívio em que as emissoras transmitem canais analógicos e digitais simultaneamente. No fim, apenas as transmissões no padrão digital serão permitidas para a radiodifusão da TV aberta.

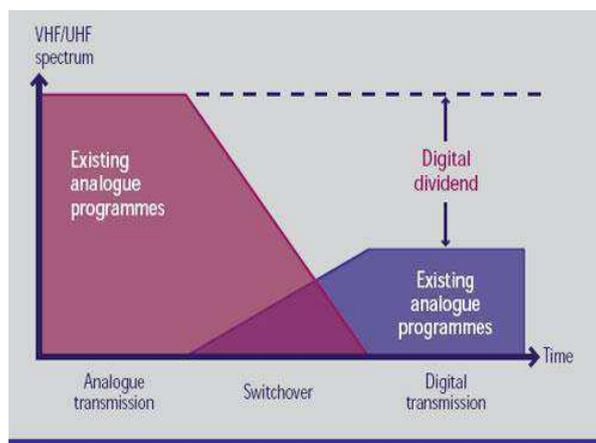


Figura 1 - Switch-off da TV analógica para a TV digital  
(Fonte: ITU News)

Na transmissão analógica, os sinais não podem ser comprimidos ou compactados, tal como ocorre na transmissão digital. O objetivo de comprimir um sinal digital de vídeo é representá-lo com uma redução de bits, preservando a qualidade e a inteligibilidade necessárias à sua aplicação. A compactação leva a uma menor taxa de transmissão, possibilitando que mais conteúdo seja veiculado nos mesmos canais. A compressão disponível para os sistemas de televisão digital permite a transmissão de até seis canais da televisão em resolução padrão (SDTV) no espectro de frequência utilizado por um único canal analógico, a depender da codificação e da técnica de modulação utilizadas [4]. Dessa forma, a digitalização dos canais analógicos reduz significativamente o uso do espectro de frequências. Outra possibilidade é o uso da melhor compressão para transmitir imagens com alta definição HDTV, caso em que só caberia um canal por banda.

O espectro do dividendo digital está na banda UHF, entre 200 MHz e 1 GHz, que é adequada para prover serviços móveis de banda larga, considerados importantes para o desenvolvimento social e econômico de um país. Em 2007, a Conferência Mundial de Radiocomunicações (*World Radio Congress – WRC-07*) identificou porções do dividendo digital para acelerar a adoção desses serviços em diferentes regiões do mundo [5], segundo o sistema da ITU de classificação regional ilustrado na Figura 2. Na Região 2, que abrange as Américas, e nove países da Região 3 incluindo China, Índia, Japão e Coreia do Sul, foi indicada a banda conhecida como 700MHz, que compreende a faixa entre 698MHz e 806MHz. Na Região 1 e demais países da Região 3 sugeriu-se a faixa 790-862MHz.

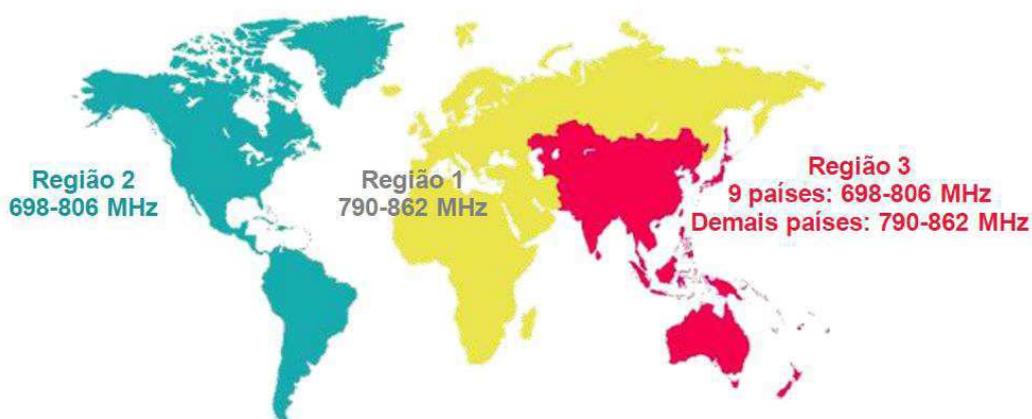


Figura 2 - Definição dos dividendos digitais nas 3 Regiões definidas pela ITU segundo o WRC-07 (Fonte: Relatório Técnico/Consultoria: Análise da utilização do espectro em 700MHz – CPqD)

A adoção de faixas de frequência similares entre os países cria a oportunidade de harmonização do espectro em nível global, que é um fator crítico para a utilização bem-sucedida de qualquer serviço sem fio. Essa harmonização aumenta o mercado de operadoras e fabricantes, possibilitando economias de escala que reduzem os custos dos equipamentos de rede e terminais, permitem a interoperabilidade dos usuários e alimentam a inovação. Sem esta coordenação na alocação do espectro, os custos poderiam ser proibitivos, o que reduziria as possibilidades de acesso [6].

Sistemas celulares operando na faixa de 700MHz apresentam-se como uma boa solução para levar acesso banda larga a regiões com baixa densidade populacional, áreas rurais e áreas que não são economicamente atrativas para a utilização de tecnologias com fio. Isto porque, em 700MHz, as perdas são menores, permitindo a cobertura de grandes distâncias e reduzindo o número de estações radiobase necessário para implantação do sistema numa região.

Por esses motivos, a cobertura da banda larga móvel em 700MHz é até 70% mais econômica do que a cobertura na faixa de 2100MHz [7], amplamente utilizada na implantação de sistemas 3G de acesso móvel em diversos países. O balanço entre custo de implantação e área de cobertura torna a faixa de 700MHz particularmente adequada para países em desenvolvimento e países com grandes áreas de baixa densidade populacional, contribuindo para a redução da exclusão digital.

Outra vantagem é que o 700MHz é mais eficiente no que se diz respeito à penetração *indoor* do que outras bandas mais altas. Estudos do *Small Cell Forum* – organização criada para impulsionar a adoção de pontos de acesso sem fio de baixa potência conhecidos como *small-cells* cujos membros incluem AT&T, Cisco e Huawei – indicam que 50% de todo o tráfego de voz e cerca de 80% do tráfego de dados móveis são roteados em ambientes fechados. Frequências menores, abaixo de 1.000MHz, tem maior penetração nesses espaços. No caso do 700MHz, a perda de potência pode ser até 10dB menor do que a observada na faixa de 2.600MHz, usada para o 4G atualmente [3].

Apesar do dividendo digital ser harmonizado nas Américas, há diferença na canalização do espectro adotada pelos países. A maior parte da América Latina, incluindo o Brasil, escolheu o plano de canalização Ásia-Pacífico (APT 700). O 3GPP designou duas bandas para o APT: Banda 28 para duplexação por divisão de frequência (FDD) e Banda 44 para duplexação por divisão de tempo (TDD).



Figura 3 - Canalização da versão FDD do APT 700 para o dividendo digital

A canalização APT, em sua versão FDD, possui o maior número de países adeptos e tem obtido suporte da indústria e dos órgãos regulatórios em nível global. Ela é padronizada com dois blocos de 45MHz (703-748MHz para o *uplink* e 758-803MHz para o *downlink*) e uma banda de guarda de 10MHz, conforme ilustrado na Figura 3. Essa é a configuração especificada para os sistemas LTE e LTE-*Advanced* das redes de acesso de quarta geração.

### 3. A FAIXA DE FREQUÊNCIA DE 700MHz NO BRASIL

O processo de regulamentação da faixa de 700MHz no Brasil alinhou-se aos processos de harmonização internacional no âmbito da União Internacional de Telecomunicações (ITU), afim de usufruir dos ganhos de escala em equipamentos de rede e terminais para os serviços de telecomunicações [1].

As condições de uso da banda foram estabelecidas pela Resolução 625 da ANATEL, em 11 de novembro de 2013 [8]. De acordo com o documento, a faixa entre 698MHz e 806MHz será destinada aos serviços de telefonia celular, internet e telefonia fixa. Além disso, será utilizada também para o Serviço Limitado Privado (SLP), em aplicações de segurança pública, defesa nacional e infraestrutura.

Em setembro de 2014, a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) leiloou a banda de 700MHz para serviços móveis 4G LTE. Os objetivos do governo incluíam o aumento da cobertura e da velocidade da internet móvel para atender os requisitos do Plano Nacional de Banda Larga (PNBL), bem como a aceleração das condições para a digitalização da TV analógica no país.

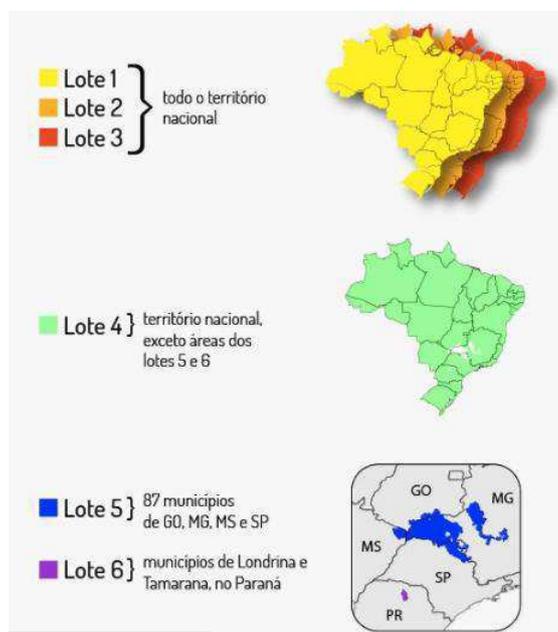


Figura 4 - Lotes e área de prestação do leilão da faixa de 700MHz  
(Fonte: Portal ANATEL)

A faixa de 700 MHz foi dividida em seis lotes com 10MHz de espectro cada. Os três primeiros lotes possuem abrangência nacional e foram arrematados pelas três maiores operadoras do país: Claro, Tim e Vivo. A Algar Telecom arrematou o lote 5 do leilão, que permite oferta do 4G em 87 municípios do interior de São Paulo, Goiás, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais, área que a empresa possui concessão de telefonia. Não houve interessados para o lote 6, que abrange a área de concessão da empresa paranaense de telecomunicações Sercomtel (cidades de Londrina e Tamarana), e para o lote 4, que permite oferecer o serviço do 4G em todo o país exceto as áreas de concessão da Sercomtel e da Algar [9].

As frequências licitadas podem causar interferência com o serviço de TV digital aberto. Por prevenção, determinados canais deverão ter sua frequência e numeração alterada. Toda essa migração exige compra de equipamentos e ajustes de redes, cujos custos deverão ser arcados pelas operadoras de telefonia móvel. Os adquirentes das radiofrequências para a

prestação dos serviços de telecomunicações também devem arcar com os custos das soluções propostas para os problemas de interferência, quando esses existirem.

No Brasil, a grande maioria das cidades se encontra na fase de convívio entre os sistemas analógico e digital, mas em alguns municípios a transição para o sinal digital já foi concluída. A previsão é que o serviço seja totalmente desativado até 2018. O cronograma do desligamento da TV analógica nas capitais do país é descrito na Tabela 1 [10]. O Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), no entanto, estabeleceu o índice mínimo de 93% dos lares com acesso ao sinal digital para que o desligamento do sinal ocorra nos municípios nas datas previstas.

*Tabela 1 - Cronograma do desligamento da TV analógica nas capitais do Brasil*

<b>Ano</b>	<b>Data</b>	<b>Cidade</b>
2016	17/novembro	Brasília/DF
2017	29/março	São Paulo/SP
2017	31/maio	Goiânia/GO
2017	26/julho	Recife/PE
2017	27/setembro	Fortaleza/CE Salvador/BA
2017	25/outubro	Vitória/ES Rio de Janeiro/RJ
2017	08/novembro	Belo Horizonte/MG
2018	31/janeiro	Curitiba/PR Florianópolis/SC Porto Alegre/RS
2018	28/março	São Luiz/MA
2018	30/maio	Belém/PA João Pessoa/PB Maceió/AL Manaus/AM Teresina/PI Aracaju/SE Natal/RN
2018	28/novembro	Boa Vista/RR Campo Grande/MS Cuiabá/MT Macapá/AP Palmas/TO Porto Velho/RO Rio Branco/AC

A liberação do 4G em 700MHz pelas operadoras do serviço móvel passa ainda pelas etapas de licenciamento e autorização. O licenciamento de estações é fruto do trabalho realizado no âmbito do Grupo de Implantação do Processo de Redistribuição e Digitalização de Canais de TV e RTV (Gired) para possibilitar a convivência harmônica entre os serviços de televisão digital e de telefonia móvel [11].

A Anatel realiza avaliações de viabilidade técnica nos municípios a serem liberados para evitar interferências entre os serviços. Esse estudo deve ser aprovado pelo Gired, que é

presidido pela Anatel e conta com a participação da Secretaria de Radiodifusão do MCTIC, além de associações das empresas de radiodifusão e das operadoras de telecomunicações.

A partir da aprovação do Gired, a Entidade Administradora do Processo de Redistribuição e Digitalização de Canais de TV e RTV (EAD) inicia um estudo preventivo de mitigação de eventuais interferências e, somente depois do encerramento dessa atividade, a Anatel libera o licenciamento das estações.

Para que as cidades licenciadas consigam autorização para começar a operar na faixa de 700MHz, precisa haver ainda uma campanha de “mitigação preventiva”, na qual a população é informada sobre como agir em caso de interferência do sinal da banda larga móvel na TV aberta digital. O período de mitigação dura em média 30 dias. Após o término desse processo, a Anatel autoriza que a banda larga móvel passe a funcionar na faixa de 700MHz.

Segundo a Anatel, 2.023 cidades de todo o país já possuem viabilidade técnica para a entrada em operação do sinal do serviço de telefonia móvel na faixa de 700MHz. Em 158 delas, a “mitigação preventiva” foi finalizada até junho de 2017. Segundo dados do site TV Perfeita, criado pela EAD, o 4G em 700MHz já está disponível em 80 cidades do Brasil, incluindo as capitais Brasília (DF), Campo Grande (MT), Teresina (PI) e Natal (RN) [12].

#### 4. PERDA MÁXIMA PERMITIDA EM PERCURSO (MAPL)

O planejamento inicial de qualquer rede de comunicações móveis começa com o cálculo do balanço do enlace (*link budget*). Ele estima a máxima atenuação de sinal permitida entre a estação radiobase e o receptor móvel. Isso é, a maior perda de propagação para qual usuários localizados na fronteira das células ainda consigam utilizar o sistema [13].

Como o próprio nome sugere, o balanço do enlace é o cálculo final de potência que relaciona os ganhos e as perdas do transmissor pelo meio de propagação até o receptor. Ele leva em consideração parâmetros como a potência da transmissão, as diversas perdas em equipamentos (da estação base e do usuário), os ganhos das antenas e os efeitos da propagação. Essa análise tem o objetivo de determinar a perda máxima permitida em percurso ou *Maximum Allowed Path Loss* (MAPL).

O cálculo da MAPL permite que o máximo raio de cobertura da célula seja estimado a partir de um modelo de propagação adequado. Essa informação, por sua vez, pode ser utilizada para calcular o número de ERBs necessárias para garantir a cobertura em uma determinada área de interesse [14].

De uma forma geral, a perda máxima em percurso pode ser expressa pela equação 1 na qual  $P_{TX}$  é a potência de transmissão em dBm,  $G_{TX}$  é o ganho da antena transmissora em dBi,  $L_{TX}$  são as perdas da transmissão em dB,  $S_{RX}$  é a sensibilidade do receptor em dBm,  $G_{RX}$  é o ganho da antena receptora em dBi e  $L_{RX}$  são as perdas na recepção em dB.

$$MAPL = P_{TX} + G_{TX} - L_{TX} - S_{RX} + G_{RX} - L_{RX} \quad (1)$$

Cálculos separados são feitos para *downlink* e *uplink*, dada à distinção dos parâmetros nos dois sentidos de transmissão. A MAPL do enlace deve ser considerada como a menor entre as MAPLs do *uplink* e do *downlink*. Isso é importante para balancear a potência e minimizar a diferença do alcance entre os dois sentidos da transmissão. Como a potência transmitida pela estação móvel é menor que a transmitida pela estação radiobase, o *link budget* do *uplink* é mais crítico comparado ao do *downlink* e, em geral, o sentido de *uplink* é limitante no estabelecimento de comunicação entre o aparelho e o equipamento de RF.

## 5. MODELOS DE PROPAGAÇÃO

O canal de comunicação rádio móvel impõe limitações fundamentais ao desempenho dos sistemas sem fio. O percurso de transmissão entre transmissor e receptor pode variar de uma simples linha de visada a um caminho seriamente obstruído. O nível do sinal diminui com a distância e é atenuado por obstáculos presentes no meio de propagação, como edifícios, montanhas e vegetações. Além disso, o sinal transmitido pode ser afetado por outros sinais ou por ruído. A recepção do sinal também flutua devido a obstruções que acontecem quando o usuário se move dentro de uma certa área. Os múltiplos percursos resultantes produzidos por reflexão, refração e/ou difração podem ser combinados construtiva ou destrutivamente no receptor [15]. Como resultado, canais de rádio são extremamente aleatórios e de difícil análise, diferentemente dos canais de sistemas com fios, estacionários e previsíveis

Para representar as características da difusão eletromagnética em um ambiente e assim conseguir prever a performance de sistemas nesse meio, se faz necessário o uso de modelos de propagação. Em geral, eles predizem o valor médio do sinal recebido a uma certa distância do transmissor. A complexidade do comportamento dos sinais em um ambiente com múltiplos percursos é geralmente simplificada por modelos matemáticos que usam restrições de cobertura e abordagens numéricas. Muitos modelos determinísticos e empíricos foram propostos para prever o desvanecimento e fenômeno dos múltiplos percursos da telefonia móvel.

Os modelos determinísticos são baseados nos princípios físicos fundamentais da propagação das ondas eletromagnéticas e podem ser aplicados a ambientes diferentes com a mesma precisão. Esses modelos, no entanto, requerem um conhecimento detalhado de características do meio tais como a geometria do terreno e a dimensão dos prédios. A dificuldade da obtenção desses dados, muitas vezes, afeta a aplicabilidade dos métodos em questão. Além disso, os algoritmos utilizados por modelos determinísticos são complexos e de baixa eficiência computacional, o que restringe sua implementação à pequenas áreas ou ambientes fechados [16].

Os modelos empíricos, por sua vez, são modelos estatísticos baseados em medições e estimam a perda de propagação média em função de parâmetros como altura das antenas, distância e frequência. Todas as influências do meio são implicitamente levadas em consideração e sua precisão depende tanto da precisão das medições quanto da similaridade entre o ambiente analisado e o ambiente em que as medições foram realizadas. A aplicação desses modelos usualmente requer a classificação dos ambientes de propagação em categorias. Essa classificação considera, entre outros, alguns parâmetros tais como: ondulação do terreno, densidade da vegetação, densidade e altura dos edifícios, existência de áreas abertas e existência de superfícies aquáticas. Diante disso, é comum a distinção de três grandes categorias: Rural, Suburbana e Urbana. Por serem de fácil implementação e baixo custo computacional, os modelos empíricos são amplamente utilizados no planejamento celular de redes de comunicações móveis.

Neste trabalho serão analisados os modelos empíricos de Okumura-Hata, SUI (*Stanford University Interim*) e Ericsson 9999.

## 5.1 MODELO DE OKUMURA-HATA

O estudo dos modelos de propagação de campo foi iniciado por Okumura, em 1968, a partir de medições realizadas ao redor da cidade de Tóquio, no Japão. Foram executados dois testes em larga escala entre 1962 e 1965 com várias estações emissoras transmitindo em várias bandas numa grande variedade de ambientes de propagação, tentando explorar os fatores fundamentais que influenciam a propagação desde a morfologia do terreno à existência de edifícios, orientação de ruas, existência de superfícies abertas, superfícies aquáticas, etc. Okumura, então, desenvolveu um modelo empírico em forma de curvas para calcular a potência do sinal recebido em frequências de até 2GHz. O trabalho de pesquisa de Okumura foi continuado por Hata que, em 1980, estabeleceu expressões matemáticas experimentais para descrever as informações gráficas de Okumura.

O modelo de Okumura-Hata [17], [18] é um dos modelos mais comumente utilizados e quase todos os modelos subsequentes se baseiam em seus resultados. Ele assume que não há obstáculos dominantes entre a estação radiobase e a estação móvel e que as características do terreno variam muito lentamente.

A perda por propagação no modelo de Okumura-Hata é calculada por meio da expressão 2, na qual a distância  $d$  do enlace deve ser dada em quilômetros respeitando o intervalo  $1\text{km} \leq d \leq 20\text{km}$ .

$$PL_{Okumura-Hata} = A + B \log(d) + C \quad (2)$$

Os parâmetros A e B são dependentes da frequência  $f$  em MHz e das alturas das antenas da estação-base ( $h_b$ ) e da estação móvel ( $h_m$ ), ambas fornecidas em metros. Os valores de A e B podem ser calculados a partir das fórmulas descritas nas equações 3 e 4.

$$A = 69.55 + 26.16 \log(f) - 13.82 \log(h_b) - a(h_m) \quad (3)$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log(h_b) \quad (4)$$

O fator de correção da altura da antena do equipamento móvel  $a(h_m)$  é definido de maneira distinta dependendo do tamanho da cidade analisada. Para cidades de pequeno/médio porte deve-se utilizar a equação 5.

$$a(h_m) = (1.1 \log(f) - 0.7)h_m - 1.56 \log(f) + 0.8 \quad (5)$$

Para cidades de grande porte, por sua vez, o fator de correção da altura da antena do receptor móvel deve ser calculado conforme a equação 6.

$$a(h_m) = \begin{cases} 8.29(\log(1.54h_m))^2 - 1.1, & f \leq 300 \text{ MHz} \\ 3.2(\log(11.75h_m))^2 - 4.97, & f \geq 300 \text{ MHz} \end{cases} \quad (6)$$

O parâmetro C na equação 2 depende do tipo de ambiente para o qual se deseja aplicar o modelo de Okumura-Hata. Os ambientes são distinguidos em três categorias (urbano, suburbano e rural) e as expressões que definem o valor de C em cada um deles são descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Fórmulas do Parâmetro C do modelo de Okumura-Hata

Ambiente	Parâmetro C
Urbano	$C = 0$
Suburbano	$C = -2 \left( \log \left( \frac{f}{28} \right) \right)^2 - 5.4$
Rural	$C = -4.78(\log(f))^2 + 18.33\log(f) - 40.98$

O modelo de Okumura-Hata é válido somente para frequências entre 150 MHz e 1500 MHz, bem como para alturas das antenas entre 30m e 200m para a estação radiobase, e de 1m a 10m para o terminal móvel.

## 5.2 MODELO SUI

O modelo SUI (*Stanford University Interim*) [19], [20] é um modelo desenvolvido pelo Grupo de Acesso à Banda Larga Sem Fio IEEE 802.16. O modelo foi proposto para enlaces entre estações radiobase e estações móveis em ambientes urbanos sem linha de visada direta (NLOS), levando em consideração limitações dos modelos de Hata e COST-231. Ele é baseado em medições realizadas pela AT&T em 95 macro-células ao redor dos EUA na frequência de 1900 MHz e se diferencia por incluir fatores de correção para a frequência e para a altura da antena do terminal receptor.

O modelo divide os ambientes de propagação em três diferentes categorias. A Categoria A corresponde à terrenos montanhosos com densidade de árvores moderada ou alta, resultando na pior condição de propagação dentre as três categorias. A Categoria B abrange terrenos majoritariamente planos com alta/moderada densidade de vegetação e terrenos montanhosos com baixa densidade de vegetação, que caracterizam cenários com perda de propagação intermediária. A Categoria C representa terrenos planos com baixa densidade arbórea, onde se encontram as menores perdas.

A perda de potência do enlace no modelo SUI é definida pela expressão 7, para a qual  $d_0=100\text{m}$  é a distância de referência,  $\lambda$  é o comprimento de onda em metros e  $h_T$  é a altura da antena transmissora em metros, cujos valores devem variar de 10m a 80m. A distância  $d$  entre a ERB e o usuário está definida para valores entre 100m e 8000m.

$$PL_{SUI} = A + 10\gamma \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + \Delta PL_f + \Delta PL_h \text{ (dB)}, \quad d > d_0 \quad (7)$$

Os fatores  $A$  e  $\gamma$  são calculados utilizando as equações 8 e 9.

$$A = 20 \log \left( \frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (8)$$

$$\gamma = a - b \cdot h_T + \frac{c}{h_T} \quad (9)$$

Os parâmetros  $a$ ,  $b$  e  $c$  da equação 9 são constantes que dependem do tipo de terreno conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Valores dos parâmetros  $a$ ,  $b$  e  $c$  do modelo SUI

Parâmetro	Categoria do Terreno		
	Tipo A	Tipo B	Tipo C
$a$	4.6	4.0	3.6
$b$	0.0075	0.0065	0.005
$c$	12.6	17.1	20

O fator de correção da frequência  $\Delta PL_f$  e o fator de correção da altura da antena receptora  $\Delta PL_h$  são definidos, em dB, conforme as equações 10 e 11. Nelas,  $f$  é a frequência do sinal em MHz e  $h_R$  é a altura da antena receptora definida para valores entre 2m e 10m.

$$\Delta PL_f = 6 \log \left( \frac{f}{2000} \right) \quad (10)$$

$$\Delta PL_h = -10.8 \log \left( \frac{h_R}{2} \right), \text{ para os terrenos dos tipos A e B} \quad (11.a)$$

$$\Delta PL_h = -20 \log \left( \frac{h_R}{2} \right), \text{ para os terrenos do tipo C} \quad (11.b)$$

Para distâncias menores que a distância de referência, ou seja, para  $d$  menor que  $d_0$ , a perda de propagação do modelo SUI deve ser considerada igual à perda de propagação no espaço livre.

### 5.3 MODELO ERICSSON 9999

O modelo Ericsson 9999 [21], [22] foi desenvolvido pela Ericsson como uma modificação do modelo de Hata. Ele permite a modificação de certos parâmetros dependendo das particularidades do ambiente de propagação.

Nesse modelo, a perda de potência no enlace é definida conforme a equação 12.

$$PL_{Ericsson} = a_0 + a_1 \log(d) + a_2 \log(h_b) + a_3 \log(h_b) \log(d) - 3.2(\log(11.75h_m))^2 + g(f) \quad (12)$$

Para a qual:

$$g(f) = 44.49 \log(f) - 4.78(\log(f))^2 \quad (13)$$

A distância do enlace  $d$  é dada em km, e as alturas da antena transmissora  $h_b$  e da antena móvel receptora  $h_m$  devem ser fornecida em metros. O modelo da Ericsson, assim como o modelo de Okumura-Hata em que se baseia, possui limitações dos parâmetros de entrada. A distância é restringida a valores entre 1km e 20km, enquanto a altura das antenas da estação radiobase e do equipamento móvel devem obedecer, respectivamente, os intervalos  $30m \leq h_b \leq 200m$  e  $1m \leq h_m \leq 10m$ .

Os valores de  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$ . são constantes mas podem ser ajustados de acordo com o cenário. A Tabela 4 contém os valores de referência do modelo Ericsson para os parâmetros  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$ .

Tabela 4 - Valores-padrão dos parâmetros  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  do modelo Ericsson

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>	<b>Valor Padrão (ambientes urbanos)</b>
$a_0$	Offset constante em dB: regula o nível absoluto da curva de perdas.	36.2
$a_1$	Representa a perda dependente da distância e regula a inclinação da curva de perdas.	30.2
$a_2$	Coefficiente influenciado pela altura do transmissor: regula a posição vertical da curva de perdas.	-12.0
$a_3$	Fator de multiplicação para $\log(h_m)\log(d)$ do modelo de Okumura-Hata	0.1

## 6. ESTUDO DE CASO

Este trabalho busca avaliar a área de cobertura do LTE em 700MHz que se pretende estabelecer na cidade de Campina Grande após o desligamento da TV analógica. A base de dados das estações transmissoras provém da operadora de telefonia móvel TIM (*Telecom Italia Mobile*).

O sinal analógico de TV em Campina Grande e região está programado para ser desligado em 05 de dezembro de 2018, mesmo cronograma das cidades de Feira de Santana/BA, Petrolina/PE e Caruaru/PE [10]. A lista de canais de televisão disponíveis em Campina Grande pode ser consultada na Tabela 5.

*Tabela 5 - Canais de televisão disponíveis em Campina Grande  
(Fonte: Portal BSD [23])*

<b>Canal Virtual</b>	<b>Canal RF</b>	<b>Emissora (Rede)</b>	<b>Qualidade de Vídeo</b>	<b>Tipo da transmissão</b>
	3 VHF	TV Paraíba (Globo)	Standard	Analógico
	5 VHF	TV Aparecida (Rede)	Standard	Analógico
	7 VHF	TV Manaíra (Band)	Standard	Analógico
	9 VHF	TV Borborema (SBT)	Standard	Analógico
	11 UHF	TV Maior (Rede TV!)	Standard	Analógico
	13 UHF	TV Correio (Record)	Standard	Analógico
	14 UHF	Record News (Record News)	Standard	Analógico
7.1	16 UHF	TV Manaíra (Band)	Standard	Digital
18.1	18 UHF	TV Itararé (TV Cultura)	HDTV	Digital
	19 UHF	TV Itararé (TV Cultura)	Standard	Analógico
3.1	21 UHF	TV Paraíba (Globo)	HDTV	Digital
	23 UHF	Rede Vida (Rede Vida)	Standard	Analógico
23.1	24 UHF	Rede Vida (Rede Vida)	HDTV	Digital
13.1	26 UHF	TV Correio (Record)	HDTV	Digital
9.1	30 UHF	TV Borborema (SBT)	Standard	Digital
11.1	35 UHF	TV Maior (Rede TV!)	HDTV	Digital
51.1	51 UHF	Rede Mercosul (Record News)	Standard	Digital

## 6.1 CENÁRIO: CIDADE DE CAMPINA GRANDE

Campina Grande é um município brasileiro no interior do estado da Paraíba. De acordo com estimativas de 2016, sua população é de 407 754 habitantes, sendo a segunda cidade mais populosa do estado [24]. Considerada um dos principais polos universitários do Nordeste do Brasil, Campina Grande é o segundo município mais populoso do interior nordestino e está entre as 20 maiores economias da região, segundo o IBGE [25]. A área do município abrange 593 km<sup>2</sup>.

O município de Campina Grande, está inserido na unidade geoambiental do Planalto da Borborema, uma região serrana no interior do Nordeste que mede aproximadamente 400 km em linha reta norte-sul entre os estados de Alagoas e Rio Grande do Norte [26]. No mapa do relevo da cidade (Figura 5), percebe-se características acidentadas, com altitudes variando de 475m a 650 m.

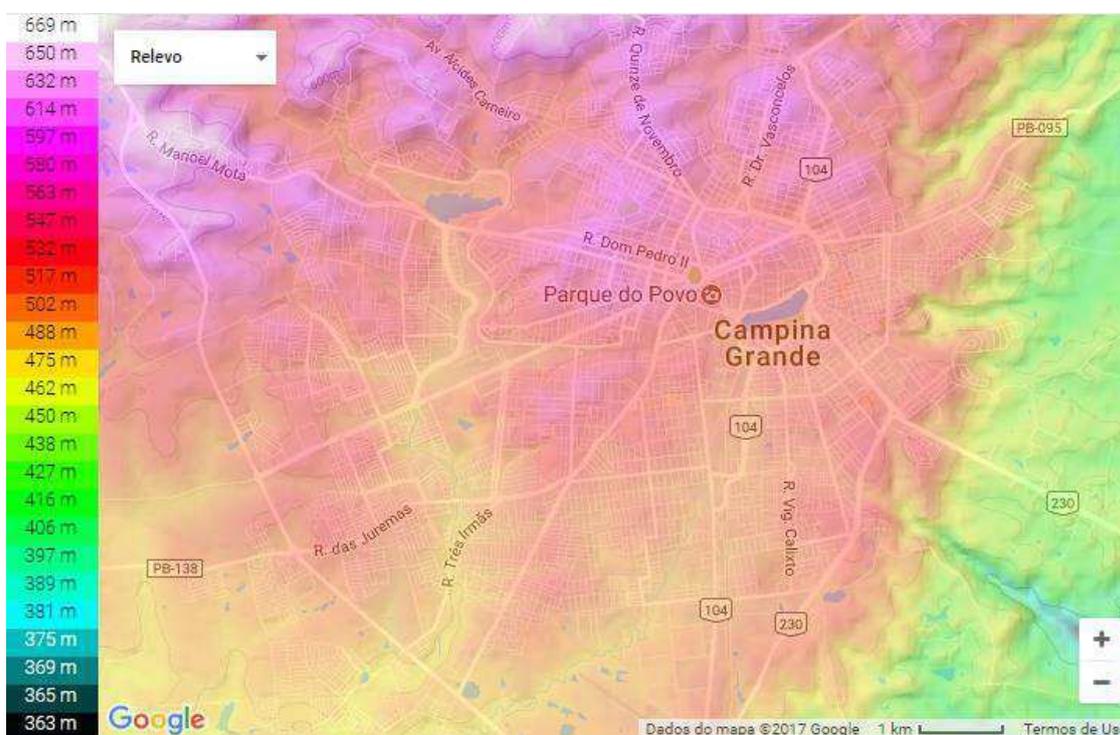


Figura 5 - Mapa do relevo da cidade de Campina Grande  
(Fonte: Topographic-map.com [27])

Situada no agreste paraibano, a cidade possui vegetação rasteira - típica da caatinga nordestina - e possui pouca densidade de edificações. Por todos esses fatores, definiu-se que Campina Grande se encaixa no perfil de terreno tipo B do modelo SUI: montanhoso com baixa densidade de vegetação.

Na utilização do modelo Okumura-Hata, o ambiente da cidade de Campina Grande será rotulado como “Suburbano”. Esta escolha se baseia no fato que esse modelo foi desenvolvido em um ambiente altamente urbanizado (Tóquio), cujas características se distanciam consideravelmente das encontradas em Campina Grande.

Segundo a Anatel, existem cinco operadoras atuantes no município: Claro, Tim, Vivo, Oi e Nextel. As quatro primeiras, fazem a cobertura 2G, 3G e 4G da cidade, enquanto a Nextel possui apenas estações radiobase 3G.

Na Figura 6, pode ser visto o panorama das estações radiobase da TIM em Campina Grande. São 22 ERB's instaladas pela cidade, das quais 17 possuem tecnologia 2G, 21 possuem tecnologia 3G e 15 possuem tecnologia 4G, segundo dados da Anatel [28] e da Associação Brasileira de Telecomunicações (Telebrasil) [29]. Neste trabalho, usaremos a expressão *site*, comumente utilizada pelos profissionais da área, para designar o local que recebe a infraestrutura de uma estação radiobase.

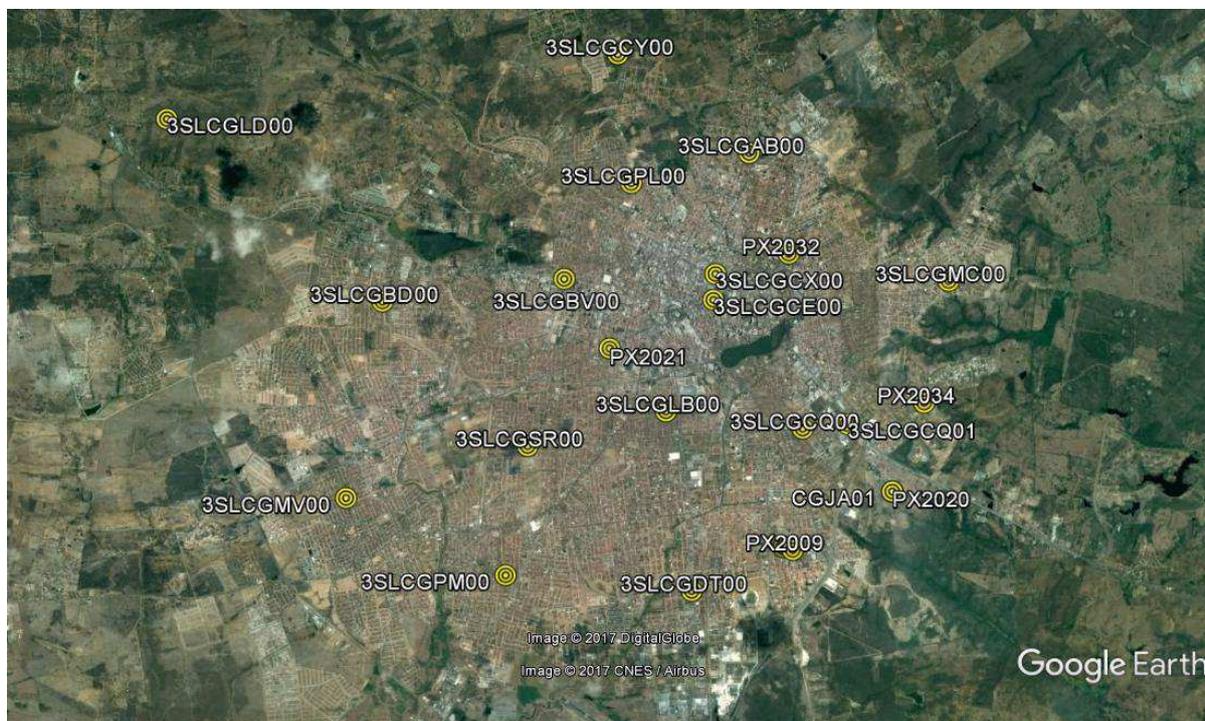


Figura 6 - Localização dos sites utilizadas pela TIM em Campina Grande

A fim de usufruir de sua infraestrutura atual, a TIM instalará o sistema LTE 700 em 14 estruturas verticais já existentes pela cidade. Essa escolha evita as etapas de planejamento e aquisição de novos *sites* e seus custos associados, uma vez que já existem contratos firmados com as detentoras dos *sites* onde a TIM opera atualmente. Na Figura 7, pode-se visualizar a localização das estações radiobase em Campina Grande que receberão a nova tecnologia. A maioria deles também recebeu a instalação do 4G 2600MHz em etapa anterior da expansão da cobertura banda larga móvel da operadora na cidade.

As características gerais das estações são descritas na Tabela 6. Nela pode-se consultar o código, o endereço, as coordenadas geográficas (latitude e longitude) e a altitude de cada estação transmissora.

As Estações Radiobase (ERBs), com relação à construção, podem ser classificadas em dois tipos básicos: *Greenfield* ou *Rooftop* [30]. As ERBs que pertencem ao tipo *Greenfield* são erguidas diretamente no solo. Já as que fazem parte do grupo *Rooftop* são instaladas nas coberturas de edifícios. Ambas podem utilizar equipamentos de telecomunicação *indoor* (dentro de compartimentos) ou *outdoor* (fora de compartimentos). No primeiro caso, as características de fabricação dos equipamentos determinam a necessidade de uma infraestrutura de climatização. No segundo caso, os equipamentos são unidades autônomas, previamente concebidas para exposição ao ar livre, e dimensionadas para obter uma ventilação apropriada.

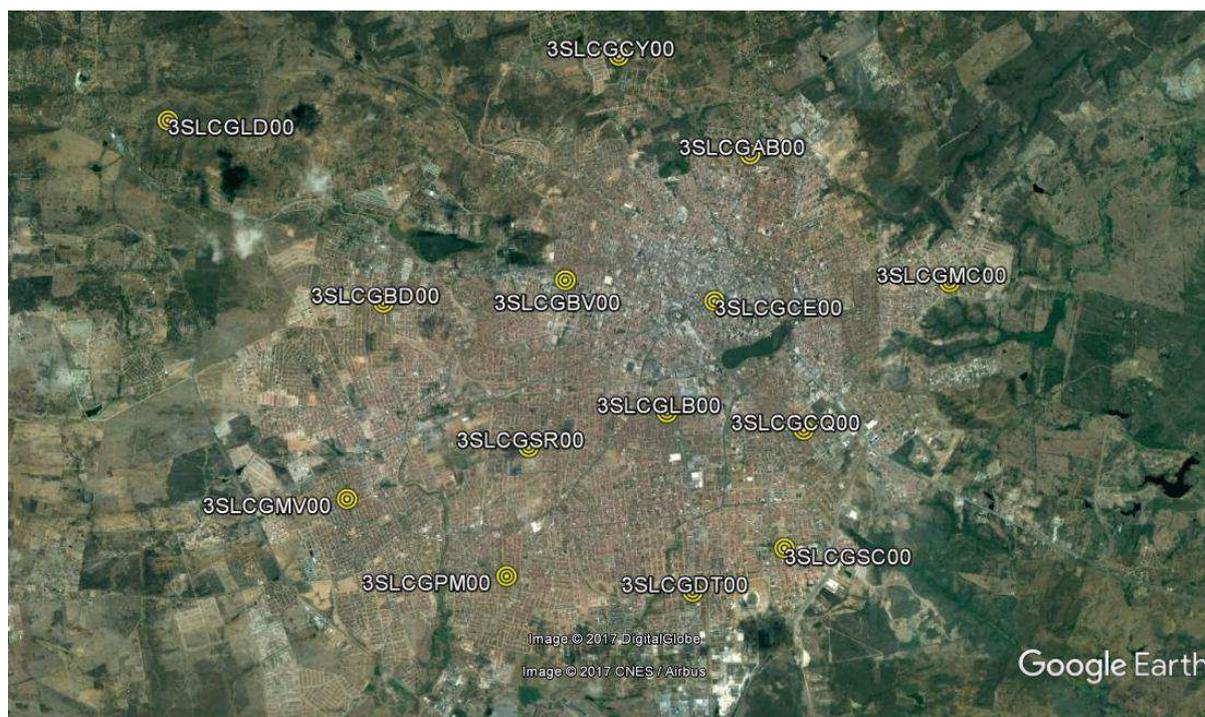


Figura 7 - Localização dos sites que receberão o sistema LTE 700 da TIM em Campina Grande

Os sites de Campina Grande que receberão o LTE 700 são do tipo *Greenfield* com torres de uso exclusivo para telecomunicações nas quais as antenas são fixadas. Neste conjunto de estações radiobase são encontradas estruturas verticais dos tipos poste metálico, torre de concreto e torre metálica com base quadrada, cujas alturas variam de 30m a 100m. Uma visão geral dessas estruturas verticais é fornecida na Figura 8.

Tabela 6 - Informações gerais dos sites que receberão o LTE 700 em Campina Grande

SiteID	Logradouro	Latitude	Longitude	Altitude
3SLCGSR00	AVENIDA JOSE MARTINS DE ANDRADE, S/N, SANTA ROSA	-7,236689	-35,905856	547m
3SLCGCQ00	RUA EDUARDO OLIVEIRA LOBO, S/N, CATOLÉ	-7,234722	-35,875	517m
3SLCGCE00	AV. MARECHAL FLORIANO PEIXOTO, 410, CENTRO	-7,220278	-35,885028	553m
3SLCGPM00	RUA JOSEFA RAMOS BORBA, S/N, PRESIDENTE MÉDICI	-7,250833	-35,908333	508m
3SLCGSC00	RUA VALERIANO FERREIRA DE MELO, S/N, SANDRA CAVALCANTE	-7,248056	-35,876972	524m
3SLCGAB00	RUA DOUTOR VASCONCELOS, 988, ALTO BRANCO	-7,203917	-35,880278	580m
3SLCGMV00	RUA DAS COROA DOS FRADES, S/N, MALVINAS	-7,242511	-35,926411	530m
3SLCGBD00	RUA MANOEL JOAQUIM RIBEIRO, S/N, BODOCONGÓ	-7,2203	-35,922244	539m
3SLCGCY00	RUA 15 DE NOVEMBRO, S/N, CUITÉS	-7,192778	-35,895833	640m
3SLCGLB00	RUA SAO PAULO, 348, LIBERDADE	-7,232778	-35,890306	529m
3SLCGBV00	RUA CAPITAO JOAO ALVES DE LIRA, S/N, BELA VISTA	-7,218194	-35,901961	587m
3SLCGDT00	AV. ASSIS CHATEAUBRIAND, S/N, DISTRITO INDUSTRIAL	-7,253056	-35,8875	500m
3SLCGMC00	OFICIAL DE JUSTIÇA ANTÔNIO GOMES, 89, MONTE CASTELO	-7,218194	-35,858528	517m
3SLCGLD00	RUA FILADELFIA, S/N, LAGOA DE DENTRO	-7,199167	-35,952361	600m

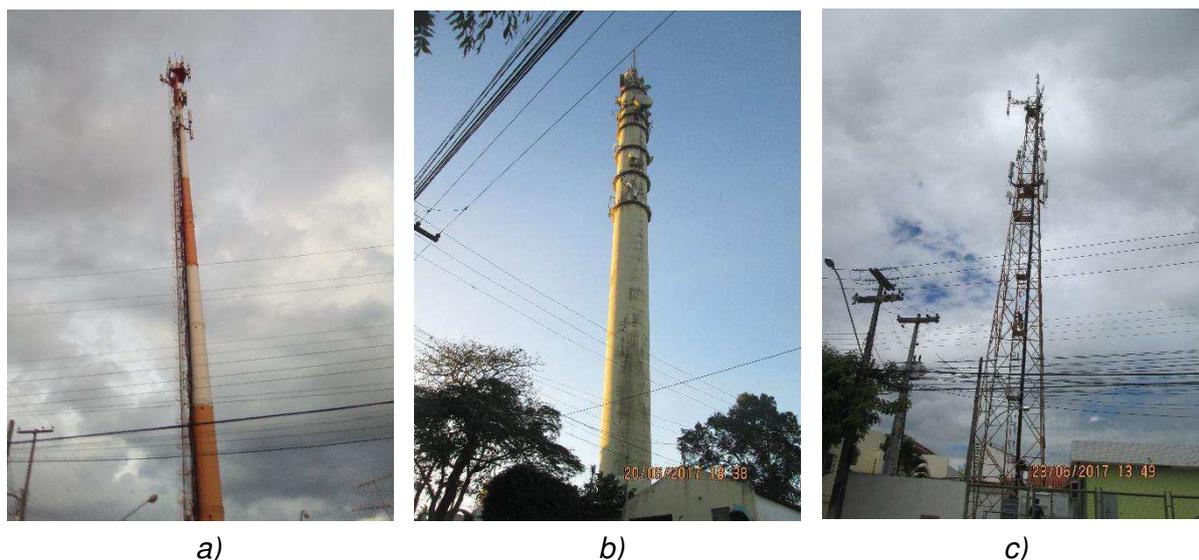


Figura 8 - Vista geral das estruturas verticais encontradas nos sites de Campina Grande  
 a) 3SLCGPM00 (Presidente Médici), b) 3SLCGCY00 (Cuités) e c) 3SLCGCQ00 (Catolé)  
 (Fonte: Savenge Engenharia LTDA)

Os dados sobre os padrões de comunicações móveis existentes em cada *site* e as respectivas frequências adotadas podem ser encontrados na Tabela 7. A maioria dos *sites* analisados possui sistemas 2G, 3G e 4G instalados. As antenas atuais, conforme Figura 9, são do tipo painel distribuídas em três setores ao redor da torre. Essas antenas setoriais concentram o sinal em determinada direção e são apropriadas para comunicações ponto-área como as dos sistemas de telefonia móvel.

Em geral, há uma antena para cada geração da telefonia celular digital presente no *site*, ou seja, três antenas por setor. Em alguns deles, no entanto, essa quantidade é diminuída, seja pela diplexação de frequência próximas como, por exemplo, o GSM 1800 e o UMTS 2100, seja pela utilização de antenas *dual-band* ou *tri-band*, que concentram os sinais de duas ou mais tecnologias no mesmo irradiador. Em dois desses *sites* houve o reforço da cobertura 2G a partir da instalação de um setor adicional irradiando o GSM em 900MHz.

Tabela 7 - Tecnologias previamente existentes nos sites que receberão o LTE 700 em Campina Grande

SiteID	GSM (2G)		UMTS (3G)		LTE (4G)
	1800	900	2100	850	2600
3SLCGSR00	X		X	X	X
3SLCGCQ00	X		X	X	X
3SLCGCE00	X	X	X	X	X
3SLCGPM00	X		X	X	X
3SLCGSC00	X		X	X	X
3SLCGAB00	X		X	X	X
3SLCGMV00	X		X	X	X
3SLCGBD00	X		X	X	X
3SLCGCY00	X	X	X	X	X
3SLCGLB00	X		X	X	X
3SLCGBV00	X		X	X	X
3SLCGDT00	X		X	X	X
3SLCGMC00			X	X	
3SLCGLD00			X	X	



Figura 9 – Vista geral das antenas do site 3SLCGBV00  
(Fonte: Savenge Engenharia LTDA)

O projeto de implantação do LTE em 700MHz da operadora em questão prevê a instalação de antenas *quad-band* que, além da nova tecnologia, também devem irradiar os sinais das tecnologias do legado das telecomunicações móveis existentes nos *sites*. Dessa forma, as antenas atuais serão desativadas e devem ser removidas durante a própria instalação do novo sistema. No cenário final, após a instalação do 4G 700MHz, haverá apenas uma antena por setor na estrutura vertical. Na maioria dos *sites* a nova antena terá a seguinte configuração: Porta 1 - LTE 700, Porta 2 - UMTS 850, Porta 3 - GSM 1800 e UMTS 2100 diplexados e Porta 4 - LTE 2600.

A altura das antenas instaladas é um fator importante no planejamento de redes móveis celulares. Quanto maior a altura da antena em relação ao plano do solo, maior a distância que o sinal precisa percorrer para atingir um usuário na superfície. A altura da antena pode ter, inclusive, maior impacto do que a própria potência da transmissão, especialmente em ambientes urbanos. A altura em que as antenas da operadora em questão serão instaladas em cada *site* estão descritas na Tabela 8.

Tabela 8 - Altura em que serão instaladas as antenas do LTE 700 nos sites de Campina Grande

SiteID	Altura das Antenas (h <sub>T</sub> )	SiteID	Altura das Antenas (h <sub>T</sub> )
3SLCGSR00	40	3SLCGBD00	50
3SLCGCQ00	40	3SLCGCY00	97
3SLCGCE00	75	3SLCGLB00	45
3SLCGPM00	50	3SLCGBV00	50
3SLCGSC00	45	3SLCGDT00	50
3SLCGAB00	30	3SLCGMC00	40
3SLCGMV00	50	3SLCGLD00	50

## 6.2 PARÂMETROS DA ERB

A arquitetura de rede do LTE possui três componentes principais: o equipamento do usuário (*User Equipment - UE*), a rede de acesso de rádio terrestre UMTS evoluída (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network* ou E-UTRAN) e o núcleo de pacotes evoluído (*Evolved Packet Core* ou EPC).

A E-UTRAN é composta por apenas um elemento que possibilita a comunicação entre o aparelho móvel e o EPC: a estação radiobase evoluída também conhecida como eNodeB ou eNB. A eNB realiza primariamente duas funções: enviar e receber sinais usando a interface aérea do LTE e controlar as operações de baixo-nível de seus usuários por meio de mensagens de sinalização, como os comandos de *handover* [31].

Cada eNB se conecta com a rede EPC por meio de uma interface S1 e também pode se conectar a outras eNBs próximas por uma conexão X2, usada para sinalização e transferência de pacotes durante o *handover*. A conexão S1 termina no *Gateway* de Serviço (S-GW) do ponto de vista do Plano do Usuário ou termina na Entidade de Gerenciamento Móvel (MME) do ponto de vista do Plano de Sinalização [32]. Uma representação da arquitetura de uma rede LTE é fornecida na Figura 10.

As eNBs são compostas de uma unidade de banda básica (BBU) e até três módulos de RF que se conectam à BBU por meio de uma interface óptica. A BBU é responsável pelo processamento digital dos sinais em banda básica e pelo monitoramento do processo de controle. Os pacotes IP recebidos da rede são modulados em sinais de banda básica e transmitidos ao módulo de RF que, por sua vez, converte os sinais de banda básica em sinais de radiofrequência e amplifica-os para transmissão. Por fim, as antenas transformam o sinal de RF em energia eletromagnética irradiada para o meio [33].

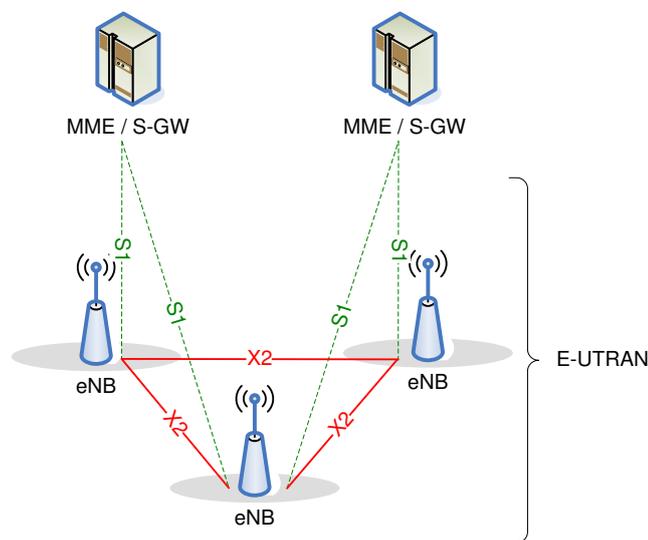


Figura 10 - Arquitetura Básica LTE  
(Fonte: 3GPP TS 36.300-880)

No projeto LTE 700 TIM para a cidade de Campina Grande, as eNBs serão fornecidas pela Nokia. O modelo utilizado será o *AirScale BTS*, que é composto pelo *AirScale System Module* e pelo módulo de RF FRPB, mostrados nas Figuras 11 e 12. As especificações do módulo de RF FRPB podem ser visualizadas na Tabela 9.

Na *AirScale BTS* vários parâmetros podem ser controlados por *software* de acordo com os requisitos da tecnologia utilizada e as características de projeto desejadas. Dentre esses parâmetros pode-se destacar:

- A ativação de setores (1, 2 ou 3 setores ativos de um módulo de RF);
- A potência RF por setor (39, 41.8, 43, 44.8 ou 46 dBm);
- A largura de banda da célula (5, 10, 15 ou 20MHz).



Figura 11 - Nokia AirScale System Module com porta LMP para comissionamento destacada  
(Fonte: AirScale BTS – Nokia)

A configuração desses parâmetros é realizada durante a instalação, quando os equipamentos são comissionados para integração à rede da TIM. O comissionamento é realizado via porta Ethernet, destacada na Figura 11, que é conectada ao laptop do técnico responsável pela instalação. A partir do momento em que os equipamentos são integrados, a operação e o controle podem ser realizados remotamente pela operadora, inclusive, alterando os parâmetros configurados durante a instalação, caso seja necessário.

Os lotes leiloados pela Anatel para o 4G 700MHz em 2012 possuíam 10MHz de espectro, que já é o tamanho do canal que a TIM vem prestado seus serviços nos últimos anos [34]. Além disso, as ERB's da TIM costumam operar com 3 setores ativos. Por fim, assumiremos que a potência transmitida por setor em Campina Grande será a mesma utilizada em Petrolina/PE que tem proporções similares à paraibana: 46dBm.

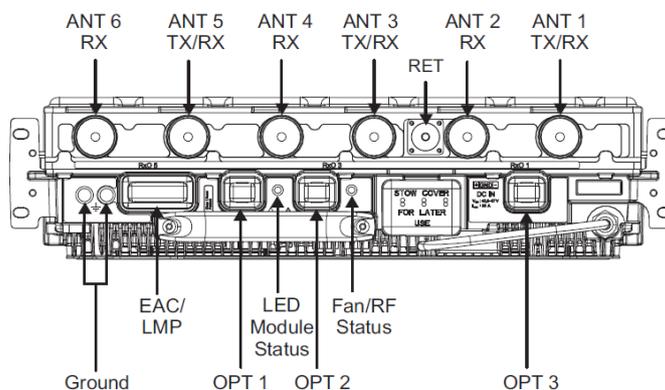


Figura 12 - Módulo de RF Nokia, modelo FRPB  
(Fonte: AirScale BTS – Nokia)

As eNBs da Nokia, nos sites de Campina Grande, serão instaladas com solução distribuída, também conhecida como sem cabos (*feederless*). Diferente da solução concentrada, na qual

são lançados longos cabos de RF da base da torre até a altura de instalação das antenas, na solução distribuída o(s) módulo(s) de RF são instalados próximo(s) às antenas, no alto das torres. Dessa forma, a performance do sistema é otimizada, tanto no *uplink* quanto no *downlink*, uma vez que as perdas nos cabos são eliminadas.

Tabela 9 - Especificações do módulo de RF FRPB da Nokia  
(Fonte: Nokia Solutions)

Propriedade	Modelo FRPB
Potência de saída	6x40W
MIMO	Yes, 2TX
Tecnologia com suporte de <i>software</i>	FDD-LTE
Faixa de frequências do transmissor	773-803 MHz
Faixa de frequências do receptor	718-748 MHz
Largura de Banda Instantânea do <i>Downlink</i>	30 MHz
Largura de Banda Instantânea do <i>Uplink</i>	30 MHz

Outras vantagens da solução distribuída são [35]:

- Instalação mais fácil e rápida devido à redução da necessidade de fixação dos cabos à torre;
- Extinção dos amplificadores instalados na torre para suprir às perdas nos cabos;
- Redução do peso total e da carga exposta ao vento;
- Redução da potência total consumida;

As perdas por conexão são usualmente pequenas, da ordem de 0.1dB [36] e também serão desconsideradas neste estudo.

Neste trabalho, a sensibilidade da eNB na recepção de sinais será admitida como a sensibilidade de referência sugerida pelo Relatório Técnico 3GPP TR 36.104 [37] que contém as especificações para a transmissão e a recepção das estações radiobase no E-UTRA.

O valor de referência da sensibilidade é a mínima potência média que deve ser recebida no conector da antena para que um requisito de *throughput* seja atingido num canal específico. Para o E-UTRA, o *throughput* deve ser  $\geq 95\%$  do *throughput* máximo de referência do canal. A Tabela 10 mostra os valores de sensibilidade da BS sugeridos na especificação para canais com larguras de banda distintas. Neste trabalho, a sensibilidade do receptor móvel adotada foi de -101.5 dBm, que é o valor recomendado para canais LTE 700 de 10 MHz em estações de longo alcance.

Tabela 10 - Níveis de sensibilidade de referência para BTS E-UTRA de longo alcance  
(Fonte: 3GPP TS 36.104)

Largura de Banda do canal E-UTRA [MHz]	Nível de potência da sensibilidade de referência [dBm]
1.4	-106.8
3	-103.0
5	-101.5
10	-101.5
15	-101.5
20	-101.5

As antenas serão o último elemento da estação radiobase analisado aqui. Elas realizam a interface entre a eNB e o meio de propagação ao converter os sinais de RF em ondas

eletromagnéticas irradiadas. No caso de Campina Grande, está prevista a instalação de antenas Comba, modelo ODV-065R15NB18JJ02-G para implantação do novo sistema em 700MHz. Essas antenas são setoriais, como as comumente utilizadas em torres de telefonia celular, e serão instaladas em cada um dos três setores existentes nos *sites*. Elas possuem alto ganho e, ainda que direcionais, fornecem um sinal relativamente não-focado, permitindo o atendimento de áreas de cobertura mais amplas.

## Outdoor Directional Quad-band Antenna ODV-065R15NB18JJ02-G

XXXX Pol, 65°

698-806/824-960/1710-2690/1710-2690MHz

13.5/14.3/17.8/17.8dBi, E-Tilt: 2-14/2-14/2-12/2-12

### Electrical Specifications

Parameters / Specifications	Frequency Range (MHz)					
	698-806	824-960		1710-2690	1710-2690	
	698-806	824-894	880-960	1710-1990	1920-2170	2490-2690
Polarization	±45°					
Gain (dBi)	13.5	14.0	14.3	16.7	17.2	17.8
Horizontal Beamwidth (°)	68	65	65	68	64	60
Vertical Beamwidth (°)	15	14	13	7.0	6.0	4.8
Electrical Downtilt (°)	2-14	2-14		2-12 / 2-12		
1 <sup>st</sup> Upper Sidelobe Suppression (dB)	≥15(2°) ≥14(7°) ≥13(14°)			≥16(2°) ≥15(7°) ≥14(12°)		
Front-To-Back Ratio 180°±30° (dB)	≥25(typ.)					
Cross-polar Discrimination @0° (dB)	≥18(typ.)			≥20(typ.)		
VSWR	≤1.5:1					
Isolation Intra-system (dB)	≥28					
Isolation Inter-system (dB)	≥30					
IM3 (2x43 dBm Carrier) (dBc)	<-150					
Maximum Power per Port (W)	500			250		
Impedance (Ω)	50					

### Mechanical Specifications

Parameters	Specifications	Product Picture
Dimensions, HxWxD (mm) / (in)	1500x380x138 / 59.1x15.0x5.4	
Weight, w/o Mounting Kit (kg) / (lb)	28.0 / 61.7	
Weight, with Mounting Kit (kg) / (lb)	34.3 / 75.6	
Radome Material and Color	Fiberglass, Light Grey	
Mounting Kit	00-ZJ10(12)	
Connector Type and Location	8 x 7/16 DIN-Female, Bottom	
Operational Temperature (°C)	-50 to +70	
Operational Humidity (%)	≤95	
Operational/Max Wind Speed (km/h)	150 / 200	
Wind Load* @150km/h		
Frontal / Lateral / Rearside (N)	694 / 126 / 824	
Shipping Dimensions, HxWxD (mm) / (in)	1965x490x270 / 77.4x19.3x10.6	
Shipping Weight (kg) / (lb)	41.5 / 91.4	
Lightning Protection	Direct Ground	

\* TIA-222-G

### Connector Position

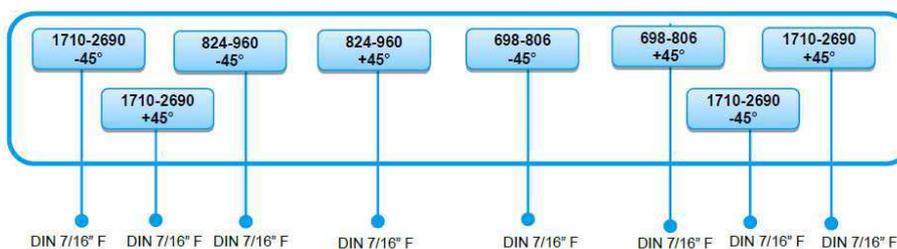


Figura 13 - Data-sheet da antena Comba ODV-065R15NB18JJ02-G

A antena Comba, modelo ODV-065R15NB18JJ02-G possui 4 portas e opera irradiando frequências entre 698MHz e 2690MHz, conforme *data-sheet* da Figura 13:

- Porta 1: 698MHz - 806MHz;
- Porta 2: 824MHz - 960MHz;
- Porta 3: 1710MHz - 2690MHz;
- Porta 4: 1710MHz - 2690MHz.

As portas 3 e 4 podem ser utilizadas para receber os sistemas GSM 1800, UMTS 2100 e/ou LTE 2600, caso esses já existam na ERB. De maneira semelhante, a porta 2 deve receber o legado do GSM 900 e do UMTS 850, quando necessário. A porta 1, por sua vez, será utilizada para a irradiação do LTE 700. Como o ganho associado a essa porta é de 13.5 dB, este será o valor utilizado para o cálculo do balanço de potências neste trabalho.

### 6.3 PARÂMETROS DA ESTAÇÃO MÓVEL

A estação móvel é constituída de um equipamento móvel e um módulo de identidade do assinante (Subscriber Identity Module - SIM), geralmente um chip. Ela utiliza um transceptor portátil de voz e dados, para se comunicar com rádios das estações base em qualquer um dos canais alocados, por meio de uma conexão *full-duplex* [38].

Segundo a Anatel, o mês de junho de 2017 encerrou com 242,1 milhões de linhas móveis em operação no Brasil [39]. As características de potência dos aparelhos desses usuários variam de acordo com o fabricante. Por isso, os dados do Relatório Técnico 3GPP TS 36.101 [40], que proveem as especificações de rádio da transmissão e da recepção do equipamento do usuário no E-UTRA, serão utilizados como valores de referência dos parâmetros necessários para o cálculo do balanço de potência.

As especificações desse documento indicam que a potência da transmissão de um equipamento móvel, em qualquer largura de banda de canal, não deve ser superior a +23 dBm, como descrito na Tabela 11. Esse valor de referência foi determinado de forma a estabelecer a melhor relação de balanço entre dois interesses conflitantes: a diminuição dos requisitos de consumo e o aumento da cobertura *uplink*.

Tabela 11 - Máxima potência de saída para o equipamento de usuário (UE)  
(Fonte: 3GPP TS 36.104)

E-UTRAN band	UE Class 3 (dBm)	Tolerance (dB)
28 (APT 700)	23	+2/-2.5

A sensibilidade do receptor móvel, por sua vez, depende da figura de ruído do aparelho, bem como da mínima relação sinal-ruído requerida [41]. A sensibilidade de referência do receptor é definida como a mínima potência média aplicada as portas da antena para a qual o *throughput* alcança ou excede as exigências do canal especificado. Similar à especificação para a sensibilidade da BTS, o *throughput* aqui deve ser maior ou igual a 95% do *throughput* máximo observado para o canal.

Os valores de sensibilidade do MS sugeridos no Relatório Técnico 3GPP TR 36.101 são apresentados na Tabela 12 para canais com diferentes larguras de banda e modulação QPSK. Neste trabalho, a sensibilidade do receptor móvel adotada foi de -95.5dBm, que é o valor recomendado para canais LTE 700 de 10 MHz.

Tabela 12 - Níveis de sensibilidade de referência para UE E-UTRA  
(Fonte: 3GPP TS 36.101)

E-UTRA Band	Channel Bandwidth						Duplex Mode
	1.4 MHz (dBm)	3 MHz (dBm)	5 MHz (dBm)	10 MHz (dBm)	15 MHz (dBm)	20 MHz (dBm)	
28 (APT 700)		-100.2	-98.5	-95.5	-93.7	-91	FDD

As antenas dos aparelhos celulares devem ser projetadas para receber sinais de todas as direções e enviar sinais à todas as direções. Isto se deve ao fato da localização da ERB mais próxima ao usuário ser usualmente desconhecida. Bem como ao fato do sinal recebido ser a soma de sinais refletidos, tendo em vista a dificuldade da existência de visada direta em ambientes urbanos [42]. Antenas típicas de equipamentos móveis possuem, portanto, baixo ganho, da ordem de 0 dBi.

Por fim, as perdas na recepção dos aparelhos móveis serão consideradas desprezíveis.

#### 6.4 CÁLCULO DA PERDA MÁXIMA PERMITIDA EM PERCURSO

Como visto na Seção 2, o *link budget* é o cálculo final de potência em todo o percurso entre transmissor e receptor, levando em consideração a potência de transmissão, as diversas perdas em equipamentos (da estação base e do usuário), ganhos de antena e efeitos da propagação.

As características das antenas da estação radiobase e da antena do receptor móvel foram cuidadosamente analisadas nas subseções 6.2 e 6.3. Elas serão utilizadas aqui para se obter a máxima perda de potência permitida. A partir dela, na seção seguinte, será estimado o máximo raio de cobertura para as 14 ERBs consideradas.

Os parâmetros utilizados para o cálculo do *link budget* no *downlink* são sumarizados na Tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros do downlink

<b>Downlink</b>	
Potência do Transmissor ( $P_{TX}$ )	46 dBm
Ganho da Antena Transmissora ( $G_{TX}$ )	13.5 dBi
Perdas da Antena Transmissora ( $L_{TX}$ )	0 dB
Sensibilidade da Antena Receptora ( $S_{RX}$ )	-95.5 dBm
Ganho da Antena Receptora ( $G_{RX}$ )	0 dBi
Perdas da Antena Receptora ( $L_{RX}$ )	0 dB

A partir da equação 1, encontra-se a máxima perda de propagação permitida quando a ERB transmite sinais a um usuário móvel:

$$MAPL_{downlink} = 155 \text{ dB}$$

Os parâmetros utilizados para o cálculo do *link budget* no *uplink* são descritos na Tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetros do *uplink*

<b>Uplink</b>	
Potência do Transmissor ( $P_{TX}$ )	23 dBm
Ganho da Antena Transmissora ( $G_{TX}$ )	0 dBi
Perdas da Antena Transmissora ( $L_{TX}$ )	0 dB
Sensibilidade da Antena Receptora ( $S_{RX}$ )	-101.5dBm
Ganho da Antena Receptora ( $G_{RX}$ )	13.5 dBi
Perdas da Antena Receptora ( $L_{RX}$ )	0 dB

Fazendo uso, novamente, da equação 1, a máxima perda de propagação permitida é calculada para a situação em que o usuário móvel envia sinais à estação radiobase:

$$MAPL_{uplink} = 138 \text{ dB}$$

A MAPL do enlace deve ser considerada como a menor entre as duas MAPLs calculadas. Como esperado, o *uplink* é o sentido limitante do enlace móvel, pois seu MAPL é menor que o MAPL do *downlink*. Logo, conclui-se que a máxima perda de potência permitida para o sistema LTE analisado é de 138 dB.

## 6.5 RESULTADOS

Os resultados foram obtidos utilizando os modelos de Okumura-Hata, SUI e Ericsson apresentados no Capítulo 5. Campina Grande foi enquadrada na categoria B dos tipos de terreno do modelo SUI e como ambiente “suburbano” no modelo de Okumura-Hata, pelos motivos explanados na Seção 6.1. A altura padrão do equipamento de usuário adotada foi de 1.5m em todas as simulações.

Primeiramente, foi realizada uma avaliação das características dos modelos escolhidos para simularem as condições de propagação da cidade. As curvas de perda de propagação calculada pelos três modelos, além do limite inferior determinado pela condição de mínimas perdas, conhecida como espaço-livre e modelada pela equação de Friis, são fornecidas na Figura 14. Para este caso, a altura da antena da BTS foi definida como 50m.

O modelo SUI é aquele que apresenta maiores perdas, provavelmente porque foi desenvolvido para a tecnologia proposta pelos padrões de banda larga sem fio IEEE 802.16, também conhecida como WiMAX. O WiMAX opera em frequências mais altas, especialmente a banda de 3500MHz, e os parâmetros de correção do modelo SUI foram aperfeiçoados para frequências a partir de 1900MHz. Como a perda do enlace aumenta com o aumento da frequência, pode-se esperar que, quando aplicado a frequências mais baixas como o 700MHz, esse modelo se comporte de maneira mais pessimista ao prever à atenuação do enlace.

O modelo Ericsson, por sua vez, é mais otimista em relação às perdas de percurso encontradas na cidade. Para distâncias curtas, até 200m, ele inclusive se assemelha às condições de espaço-livre, e mesmo após 4km não prevê uma atenuação maior do que 120

dB, valor bem abaixo dos 138 dB calculados como a máxima perda permitida. É preciso ressaltar que ao utilizar os valores-padrão dos coeficientes deste modelo, a cidade de Campina Grande foi aproximada ao ambiente em que o modelo Ericsson foi criado. Dessa forma, as características singulares do município analisado podem ter sido negligenciadas.

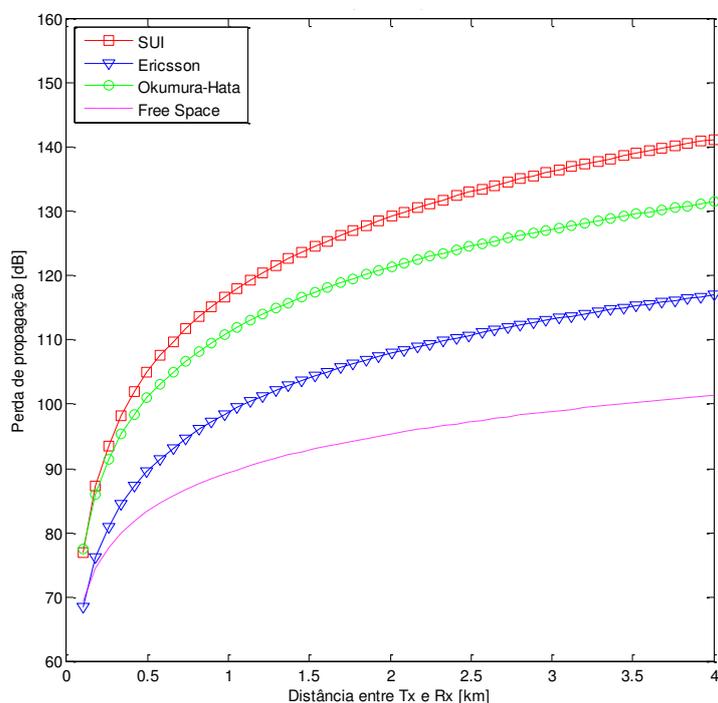


Figura 14 - Curvas da perda de propagação do enlace em 700 MHz

O modelo de Okumura-Hata apresentou comportamento intermediário quando comparado aos outros dois modelos tratados. Como não há medições reais para comparação, uma vez que o sistema LTE em 700 MHz ainda não foi implantado em Campina Grande, não é possível fazer considerações quanto a precisão dos modelos. O modelo SUI, no entanto, será usado como referência nas análises acerca do raio de cobertura que se seguem, pois é o mais conservador entre os modelos considerados.

Como descrito no Capítulo 4, o cálculo da máxima perda de percurso permitida realizado na seção anterior permite que o raio de cobertura da célula seja estimado a partir de um modelo de propagação adequado. Aqui, usaremos os três modelos estudados para prever o alcance dos 14 *sites* de Campina Grande que receberão o LTE em 700MHz. Serão consideradas, portanto, a altura específica das antenas em cada *site*, conforme dados da Tabela 8.

Tabela 15 - Raios de cobertura calculados para os sites de Campina Grande em 700MHz

SiteID	Raio de Cobertura (km) (MAPL = 138 dB)		
	Okumura- Hata	SUI	Ericsson
3SLCGSR00	5.50	2.92	18.00
3SLCGCQ00	5.50	2.92	18.00
3SLCGCE00	7.88	4.28	23.00
3SLCGPM00	6.22	3.31	19.64
3SLCGSC00	5.87	3.11	18.84
3SLCGAB00	4.72	2.48	16.08
3SLCGMV00	6.22	3.31	19.64

3SLCGBD00	6.22	3.31	19.64
3SLCGCY00	9.24	4.50	25.44
3SLCGLB00	5.87	3.11	18.44
3SLCGBV00	6.22	3.31	19.64
3SLCGDT00	6.22	3.31	19.64
3SLCGMC00	5.50	2.92	18.00
3SLCGLD00	6.22	3.31	19.64

Os resultados encontrados são fornecidos na Tabela 15. Como esperado, o modelo SUI estima os menores alcances, uma vez que considera maiores perdas no percurso. Foram calculados raios de cobertura entre 2,48 km e 4,50 km, limites obtidos para as antenas mais baixas (30m) e mais altas (97m), respectivamente.

O modelo Ericsson provê resultados bastante irrealistas quanto ao que se deve esperar de uma cobertura sem fio em ambientes urbanos e suburbanos, estimando raios de cobertura que variam entre 16km e 25km. É necessária a modificação dos parâmetros do modelo, especialmente do coeficiente  $a_0$  que regula o *offset* da curva, para que este possa fornecer estimativas mais coerentes. Por fim, o modelo de Okumura-Hara apresenta resultados otimistas, com raios de cobertura quase duas vezes maiores que os calculados pelo modelo SUI.

A título de comparação, utilizou-se a máxima perda do enlace calculada para o sistema LTE em 700MHz para estimar os raios de cobertura do sistema LTE em 2600MHz, já instalado na cidade. Os valores encontrados podem ser vistos na Tabela 16. Os modelos apresentam comportamentos similares aos observados para o 700MHz, com o modelo SUI sendo o mais conservador e o modelo Ericsson fornecendo valores ainda bem acima da média.

É esperado que o LTE em 700MHz, por operar em uma frequência mais baixa, tenha alcance de cobertura até quatro vezes maior, comparado ao LTE em 2600MHz [43]. Os resultados encontrados mostram que os raios de cobertura calculados para o LTE 700 em Campina Grande são aproximadamente duas vezes maiores que os raios de cobertura do LTE 2600, se estimados pelo mesmo modelo de propagação.

Tabela 16 - Raios de cobertura calculados para os sites de Campina Grande em 2600MHz

SiteID	Raio de Cobertura (km) (MAPL = 138 dB)		
	Okumura- Hata	SUI	Ericsson
3SLCGSR00	2.63	1.29	9.59
3SLCGCQ00	2.63	1.29	9.59
3SLCGCE00	3.62	1.72	12.27
3SLCGPM00	2.94	1.42	10.46
3SLCGSC00	2.79	1.35	10.04
3SLCGAB00	2.30	1.14	8.57
3SLCGMV00	2.94	1.42	10.46
3SLCGBD00	2.94	1.42	10.46
3SLCGCY00	4.17	1.78	13.56
3SLCGLB00	2.79	1.35	10.04
3SLCGBV00	2.94	1.42	10.46
3SLCGDT00	2.94	1.42	10.46
3SLCGMC00	2.63	1.29	9.59

3SLCGLD00	2.94	1.42	10.46
-----------	------	------	-------

Para ilustrar a cobertura do 4G em 700MHz e em 2600MHz na cidade de Campina Grande, foram criadas as Figuras 15 e 16, respectivamente. Usualmente, a área de cobertura da célula é assumida como tendo um formato hexagonal em cada setor. Aqui, por simplicidade, considerou-se que os *sites* cobrem uma área circular, com centro na torre e raio igual ao estimado pelo modelo SUI nas Tabelas 15 e 16.

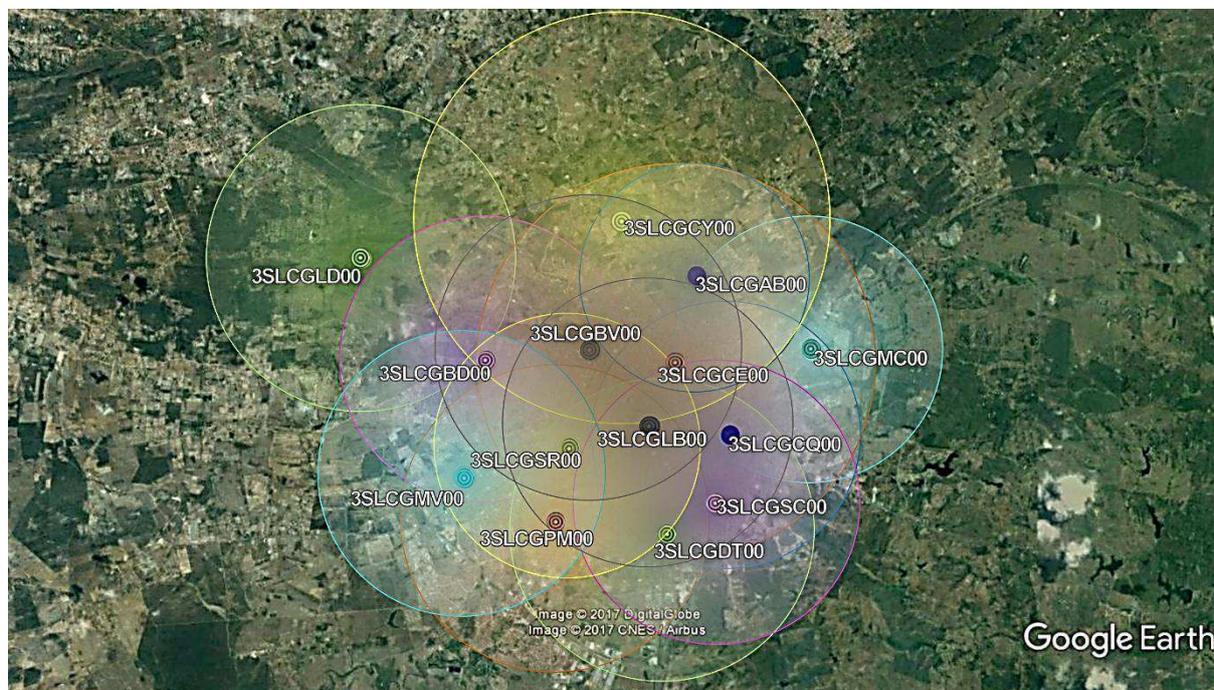


Figura 15 - Cenário da cobertura em 700 MHz da TIM prevista para a cidade de Campina Grande

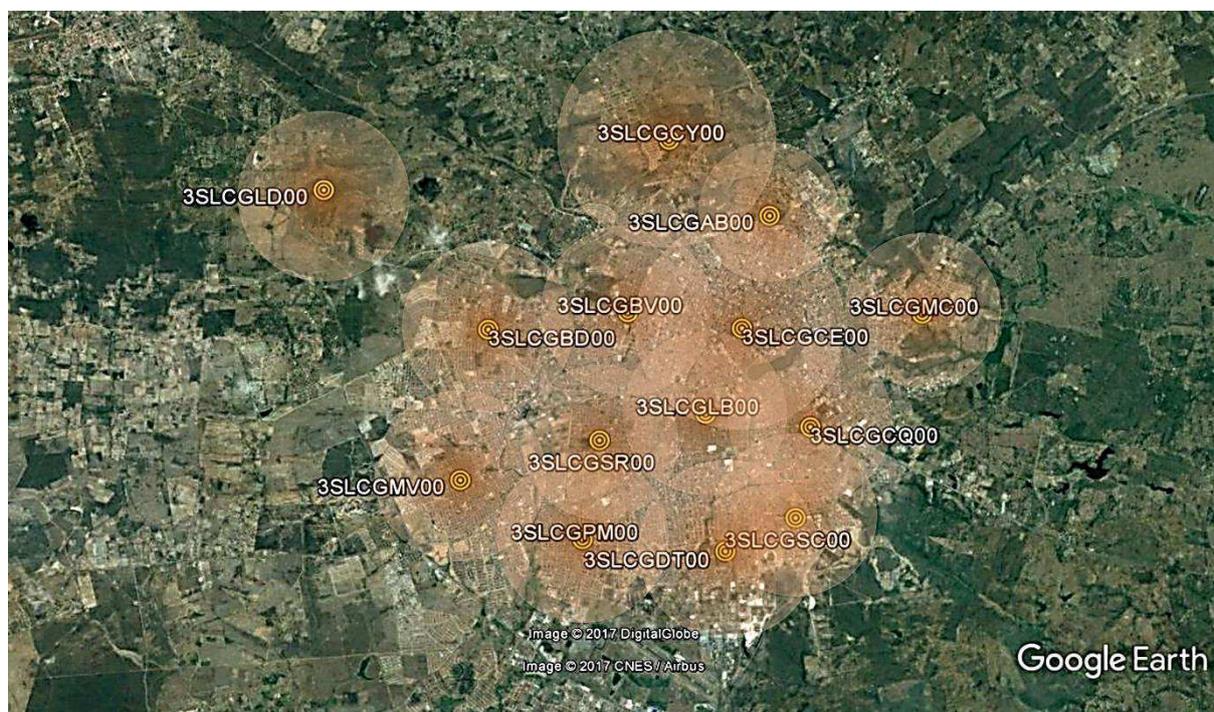


Figura 16 - Cenário da cobertura em 2600 MHz da TIM prevista para a cidade de Campina Grande

É possível visualizar que as áreas de abrangência dos *sites* no LTE 700 se sobrepõem, havendo redundância de cobertura na maior parte da cidade. Isso se deve ao fato que o LTE 700 será implementado em praticamente todos os *sites* que irradiam o 4G em 2600MHz. Como analisado anteriormente, a área de cobertura do LTE 700 chega a ser de duas a quatro vezes superior à área de cobertura do LTE 2600. Dessa forma, é de se esperar que o número de estações radiobase utilizadas para cobrir a mesma área de interesse seja inferior no 4G em 700MHz. Essa, na verdade, é uma das grandes vantagens da nova tecnologia que, por alguma razão, não foi contemplada no plano operativo da TIM.

Apenas 6 estações radiobase equipadas com o sistema LTE 700 seriam suficientes para garantir a cobertura da cidade de Campina Grande nessa frequência, como pode-se visualizar na Figura 17. Os raios de cobertura estimados com o modelo mais conservador (SUI), ou seja, que prevê a maior quantidade de perdas, foram novamente os adotados como referência nessa análise.

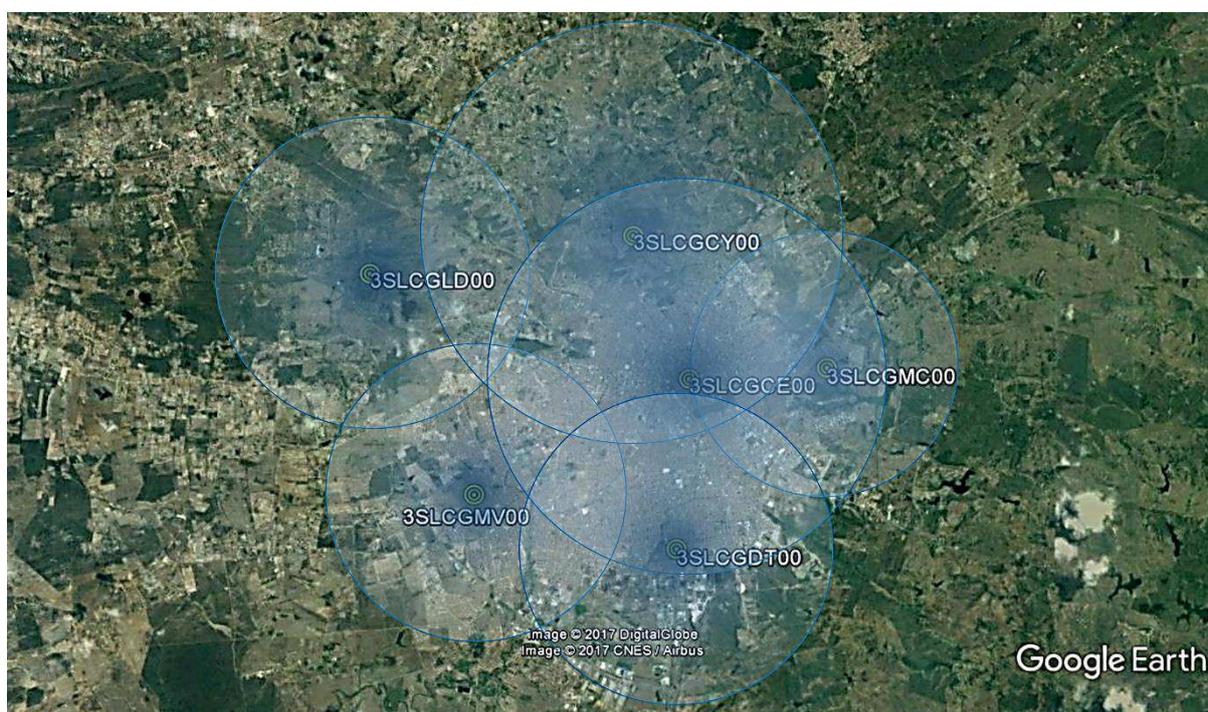


Figura 17 - Cenário proposto para a cobertura do LTE 700 da TIM em Campina Grande

Há espaço ainda para discutir a possibilidade de diminuição da potência transmitida pelo sistema LTE 700 a ser implementado na cidade. Diminuir a potência do transmissor implicaria em redução do consumo da operadora e, conseqüentemente, dos custos associados à transmissão. A potência transmitida adotada inicialmente foi de 46dBm, mas esse valor poderia ser ajustado em 39dBm, 41.8dBm, 43dBm ou 44.8dBm, como visto na Seção 6.2.

Uma mudança na potência de saída da estação radiobase alteraria o valor da máxima perda de potência permitida do enlace no sentido do *downlink*. Quando o valor da MAPL do *downlink* é recalculado em função da potência do transmissor, encontra-se os resultados contidos na Tabela 17.

O menor valor observado é de 148dB, obtido quando o transmissor opera com potência de saída igual a 39dBm ou 8W. A MAPL do *uplink* não sofreria alteração e continuaria igual a 138dB, conforme calculado na Seção 6.4. Dessa forma, conclui-se que o *uplink* continua sendo o sentido limitante, uma vez que a máxima perda permitida do enlace deve ser igual a menor entre as duas MAPLs calculadas.

*Tabela 17 – Máxima perda de potência permitida em percurso no downlink em função da potência do transmissor da BS*

<b>Potência do Transmissor [dBm]</b>	<b>MAPL<sub>downlink</sub> [dB]</b>
46	155
44.8	153.8
43	152
41.8	150.8
39	148

Os resultados relacionados à cobertura do 4G LTE 700MHz em Campina Grande expostos até aqui foram obtidos para uma limitação de perda de potência de 138dB no enlace. Portanto, segundo essa avaliação, nenhuma análise descrita nesse trabalho seria alterada ainda que a potência do transmissor fosse ajustada em seu valor mínimo.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foram abordados os principais aspectos sobre o dividendo digital liberado pela digitalização do sistema analógico de televisão. Seguindo as recomendações de órgãos internacionais como a União Internacional de Telecomunicações (ITU), vários países adotaram a faixa de frequência disponibilizada pelo desligamento da TV analógica para suprir a necessidade de espectro enfrentada pelas comunicações móveis e fomentar a evolução dos seus sistemas de acesso à banda larga sem fio. Essa adoção em nível global cria a oportunidade de harmonização do espectro que promove significativas economias de escala na fabricação de equipamentos de rede e terminais móveis.

O Brasil também alocou a faixa de 700MHz do dividendo digital para serviços de telecomunicações, buscando impulsionar a expansão do 4G LTE das operadoras em atuação no país e acelerar o processo de transição da TV analógica para a TV digital. Neste contexto, foi realizado um estudo de caso sobre a cobertura 4G em 700MHz que se pretende estabelecer na cidade de Campina Grande/PB.

Nos sistemas de comunicações móveis, o enlace entre transmissor e receptor ocorre através de um ambiente de propagação complexo, repleto de obstruções que causam fenômenos como a reflexão, a difração e o espalhamento do sinal transmitido. Para estimar as perdas que ocorrem na transmissão desses sinais e prever o desempenho do novo sistema na cidade paraibana foram utilizados os modelos de propagação de Okumura-Hata, *Standford University Interim* (SUI) e Ericsson 9999.

O modelo SUI apresentou os resultados mais conservadores, com raios de cobertura variando entre 2.48km e 4.50km, a depender da altura de instalação das antenas transmissoras em relação ao plano do solo. O modelo de Okumura-Hata forneceu previsões mais otimistas com alcances entre 4.7km e 9km, enquanto os resultados do modelo Ericsson foram desconsiderados por serem incompatíveis com o esperado para a aplicação.

Os resultados do modelo SUI serviram de base para a análise da cobertura a ser instalada em Campina Grande, foco deste trabalho. Mesmo adotando o modelo que prevê maiores perdas, os resultados encontrados mostram que o alcance do LTE em 700MHz é, aproximadamente, duas vezes maior do que aquele calculado para o LTE em 2600MHz. Essa é uma das maiores vantagens introduzidas pela frequência de 700MHz – a mais baixa já utilizada na telefonia digital celular – que possibilita acesso à banda larga móvel em grandes áreas utilizando um número reduzido de estações radiobase.

Com um número menor de ERBs, os custos de implantação diminuem e a introdução da cobertura móvel em ambientes rurais e de baixa densidade populacional passa a ser incentivada, de forma a diminuir a exclusão digital. Essa vantagem não parece ter sido contemplada pelo plano operativo da TIM, que prevê a instalação de equipamentos para o sistema LTE 700 em 14 dos 15 *sites* que já possuem o sistema LTE em 2600MHz na cidade de Campina Grande. Chegou-se à conclusão que o número de ERBs previsto para receber a nova tecnologia é excessivo e poderia ser reduzido em cerca de 57%. Ou seja, apenas 6 estações transmissoras seriam suficientes para prover a cobertura da cidade.

Por fim, foi realizada uma pequena análise sobre a potência de saída do transmissor de quarta geração em 700MHz no município de Campina Grande. Segundo a metodologia adotada, a potência da transmissão poderia ser ajustada para o valor mínimo de 39dBm sem prejuízo da cobertura prevista para a cidade.

## 8. REFERÊNCIAS

- [1] CPqD, “Análise de Utilização do Espectro de 700MHz,” 28 de setembro de 2011.
- [2] Nações Unidas no Brasil - ONUBR., UIT: 3,7 bilhões de pessoas ainda não têm acesso à Internet no mundo, <https://nacoesunidas.org/uit-37-bilhoes-de-pessoas-ainda-nao-tem-acesso-a-internet-no-mundo/>, 22 de julho de 2016.
- [3] 4G AMERICAS, “700 MHz Spectrum Processes in Latin America,” Agosto, 2011.
- [4] ITU News, The digital dividend - opportunities and challenges, <https://www.itu.int/net/itunews/issues/2010/01/27.aspx>, Jan-Feb, 2010.
- [5] ITU, Final Acts of the World Radiocommunication Conference (WRC-07), Geneva, 2007.
- [6] GSMA, “Dividendo Digital para Prestadoras de Serviços Móveis: Banda Larga para Todos,” 2009.
- [7] 4G AMERICAS, “Benefits of Digital Dividend,” Setembro, 2012.
- [8] Portal Brasil, “Resolução destina faixa de 700 MHz para serviço de 4G,” <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2013/11/resolucao-destina-faixa-de-700-mhz-para-servico-de-4g>, Novembro, 2013.
- [9] AMATO, F. , “Claro, TIM e Vivo arrematam os três lotes nacionais do leilão do 4G,” Portal G1, Brasília,30 de setembro de 2014, <http://g1.globo.com/economia/noticia/2014/09/claro-arremata-primeiro-lote-do-leilao-do-4g-por-r-1947-bilhao.html>.
- [10] Portal G1, “Calendário TV Digital Atualizado,” <http://estaticog1.globo.com/2017/07/04/CalendarioTVDigitalatualizado.pdf>, Abril, 2017.
- [11] Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL, “Uso de 700 MHz na banda larga móvel é possível em mais de 2 mil cidades brasileiras,” <http://www.anatel.gov.br/institucional/component/content/article?id=1700>, 26 de julho de 2017.
- [12] TV Perfeita, “Ativação 4G - 700 MHz,” EAD, 01 de julho de 2017, <http://www.tvperfeita.com.br/informacoes/>.
- [13] Portal Teleco, “Rede Celular: Link Budget,” [http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialavaltrans/pagina\\_2.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialavaltrans/pagina_2.asp).
- [14] LTEEncyclopedia, “LTE Radio Link Budgeting and RF Planning,” <https://sites.google.com/site/lteencyclopedia/lte-radio-link-budgeting-and-rf-planning>.
- [15] FONTGALLAND, G. et al., “Using measurement to evaluate field strength prediction models in urban and suburban areas in Brazilin,” *in proceedings of CCCT'04/IIIS*, Austin, USA, 2004.
- [16] Portal TELECO, “Redes 4G: Modelos de Propagação,” [http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredes4g/pagina\\_3.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredes4g/pagina_3.asp).

- [17] PEREIRA, M. A. B., “ANÁLISE DE MODELOS DE PROPAGAÇÃO NA ÁREA URBANA DA REGIÃO DE CURITIBA – PR NA FAIXA DE FREQUÊNCIA DE 1800 MHz,” Dissertação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, 2007.
- [18] MOLISCH, A. F., *Wireless Communications*, 2 ed, 884 pgs: Wiley-IEEE Press, Dezembro, 2010.
- [19] MILANOVIC, J., RIMAC-DRLJE, S. e BEJUK, K., “Comparison of Propagation Models Accuracy for WiMAX on 3.5 GHz,” em *14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, Marrocos, 2007.
- [20] IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, “Multi-hop Relay System Evaluation Methodology,” 19 de fevereiro de 2007.
- [21] KUMAR, P., PATIL, B. e RAM, S., “Selection of Radio Propagation Model for Long Term Evolution (LTE) Network,” Janeiro/Fevereiro, 2015.
- [22] MILANOVIC, J., SIMAC, G. e MAZOR, K., “Performance analysis of empirical propagation model for long term evaluation (LTE) network,” em *2016 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST)*, Osijek, 2016.
- [23] Portal BSD, Lista de Canais Terrestres, [http://www.portalbsd.com.br/terrestres\\_channels.php?channels=116](http://www.portalbsd.com.br/terrestres_channels.php?channels=116).
- [24] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, “População dos municípios brasileiros,” Disponível em: [http://www.ibge.gov.br/home/mapa\\_site/mapa\\_site.php#populacao](http://www.ibge.gov.br/home/mapa_site/mapa_site.php#populacao).
- [25] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, “Produto Interno Bruto dos Municípios 2010 - 2014,” [http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pibmunicipios/2014/default\\_xls.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pibmunicipios/2014/default_xls.shtm).
- [26] Wikipédia, a enciclopédia livre., “Planalto da Borborema,” [https://pt.wikipedia.org/wiki/Planalto\\_da\\_Borborema](https://pt.wikipedia.org/wiki/Planalto_da_Borborema).
- [27] Topographic-map.com., “Mapa do Relevo de Campina Grande,” <http://pt-br.topographic-map.com/places/Campina-Grande-4005092>.
- [28] Agência Nacional de Telecomunicações -ANATEL, “Mapa SIEC,” <http://www.anatel.gov.br/dados/index.php/mapa-siec>.
- [29] Associação Brasileira de Telecomunicações - Telebrasil, “Mapa de ERBs Brasil (antenas),” <http://www.telebrasil.org.br/panorama-do-setor/mapa-de-erbs-antenas>.
- [30] Portal Teleco, “Tutoriais Telefonia Celular,” [http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialerb/pagina\\_1.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialerb/pagina_1.asp).
- [31] Tutorials Point, “LTE Network Architecture,” [https://www.tutorialspoint.com/lte/lte\\_network\\_architecture.htm](https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm).
- [32] Artiza Networks, “E-UTRAN Architecture,” [http://www.artizanetworks.com/resources/tutorials/eut\\_arc.html](http://www.artizanetworks.com/resources/tutorials/eut_arc.html).

- [33] WATANABE, K. e MACHIDA, M., “Outdoor LTE Infrastructure Equipment (eNodeB),” <https://www.fujitsu.com/global/documents/about/resources/publications/fstj/archives/vol48-1/paper11.pdf>.
- [34] BRAGA, L., “O que você precisa saber (até agora) sobre a faixa de 700 MHz do 4G brasileiro,” <https://tecnoblog.net/163765/4g-700-mhz-licitacao-setembro/>..
- [35] Nokia Networks, “Flexi Multiradio 10 Base Station Product Description”.*Consumer Confidential*.
- [36] MISHRA, A. R., Fundamentals of Cellular Network Planning and Optimisation: 2G/2.5G/3G ...Evolution to 4G, John Wiley & Sons, 2004.
- [37] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), “Technical Specification Group Radio Access Network - Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRAN): Base Station (BS) radio transmission and reception,” Release 14, 2017.
- [38] MUNIZ, O. C. et al., “Componentes das redes de telefonia móvel,” UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.
- [39] Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL, “Brasil encerra junho com 242,1 milhões de linhas móveis em operação,” <http://www.anatel.gov.br/dados/destaque-1/283-movel-acessos-maio>), 2017.
- [40] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), “Technical Specification Group Radio Access Network - Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): User Equipment (UE) radio transmission and reception,” Release 14, 2017.
- [41] ANITA, “Receiver sensitivity / Noise,” [http://www.phys.hawaii.edu/~anita/new/papers/militaryHandbook/rcvr\\_sen.pdf](http://www.phys.hawaii.edu/~anita/new/papers/militaryHandbook/rcvr_sen.pdf), 2017.
- [42] CISCO, “Omni Antenna vs. Directional Antenna,” <http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/wireless-mobility/wireless-lan-wlan/82068-omni-vs-direct.html>, February 27, 2007.
- [43] SEVERIANO, V., “TIM amplia cobertura da internet 4G de 700 MHz em sete capitais,” <https://www.tecmundo.com.br/4g/118659-tim-amplia-cobertura-internet-4g-700-mhz-sete-capitais.htm>, 03 de julho, 2017.