

ROGÉRIO DE ANDRADE SILVA

Validação da Viabilidade de Rádio Enlace Utilizando o Software *Pathloss 5.0*

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Prof. José Feliciano Adami

Guaratinguetá
2016

Silva, Rogério de Andrade
S586 v Validação da viabilidade de rádio enlace utilizando o software
Pathloss 5.0 / Rogério de Andrade Silva – Guaratinguetá, 2016.
57 f : il.
Bibliografia: f. 57

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.
Orientador: Prof. Dr. José Feliciano Adami

1. Ondas de rádio – propagação 2. Sistemas de transmissão de dados
I. Título

CDU 621.396.24


VALIDAÇÃO DA VIABILIDADE DE RÁDIO ENLACE UTILIZANDO O
SOFTWARE PATHLOSS 5.0.
ROGÉRIO DE ANDRADE SILVA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

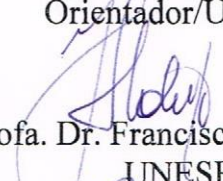
APROVADO EM SUA FORNIA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

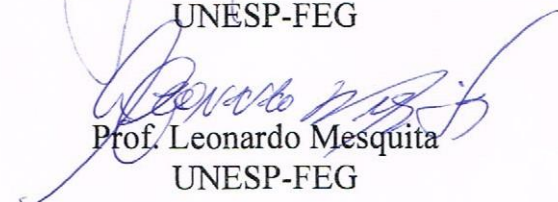
Prof. Dr. Leonardo Mesquita Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. José Feliciano Adami

Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. Francisco Antonio Lotufo
UNESP-FEG


Prof. Leonardo Mesquita
UNESP-FEG

Janeiro de 2017

DADOS CURRICULARES

ROGÉRIO DE ANDRADE SILVA

NASCIMENTO	01.07.1989 – Guarulhos / SP
FILIAÇÃO	Marli Barbuio de Andrade Silva Homero Feliciano de Andrade Silva Filho
2005/2006	Ensino Médio Colégio Mater Amabilis – Guarulhos
2007	Curso Preparatório Intergraus – Unidade Santana / SP
2008/2016	Curso de Graduação em Engenharia Elétrica Universidade Estadual Paulista – Campus Guaratinguetá

de modo especial para minha família, amigos e irmãos da República D.V., pois sem eles nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço meus pais Homero e Marli pelo constante apoio e por fornecer as bases morais e tranquilidade para que eu pudesse chegar até aqui. Não tenho dúvidas que sem eles nada disso seria possível,

às minhas irmãs Soraya e Marcela, que sempre me aconselharam e estiveram do meu lado em todas as decisões da minha vida,

ao meu orientador Professor José Feliciano Adami, pela sua orientação, dedicação e auxílio durante todo o processo de elaboração deste trabalho de graduação,

à República D.V., lar de irmãos que coletei durante todo o período de graduação e que me acolheram e me propiciaram inúmeros momentos de alegria, me ensinaram o que é viver em uma irmandade e me ajudaram a amadurecer como pessoa.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível”

Charles Chaplin

Silva, R. A.. **Validação da Viabilidade de Rádio Enlace Utilizando o Software *Pathloss* 5.0.** 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

RESUMO

Esta monografia tem por objetivo calcular e analisar a viabilidade de um enlace de radiocomunicação de dados através das diretrizes, recomendações e equações pertinentes e atualizadas de acordo com as recomendações do ITU-R (International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector), comparando o resultado obtido com software amplamente utilizado no ramo (*Pathloss* versão 5.0). Tal comparação visa atestar ou contestar os resultados obtidos via software. O projeto consiste em calcular todos os parâmetros de viabilidade de enlace em um enlace já implantado e em funcionamento, localizado na rodovia BR-040, oferecendo link de dados entre as cidades de Congonhas e Cristiano Ottoni. Como este link já é existente e operante, é possível também obter os níveis reais de sinal através do equipamento de rádio enlace e o comparar com os obtidos via cálculo e via software.

PALAVRAS-CHAVE: Radiocomunicação, Rádio Enlace, Enlace de Dados, ITU-R, Projeto, Pathloss.

Silva, R. A.. **Validation of Radio Link Viability Using *Pathloss* Software 5.0.** 2016. Monograph (Graduation in Electrical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

ABSTRACT

This monograph has the objective of calculate and analyse the viability of a data radio link through the current relevant guidelines, recommendations and equations according to the ITU-R (International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector) recommendations, comparing the obtained results with a software widely used in the business (*Pathloss* version 5.0). This comparison aims to certify or disprove the results via software. The project consists in calculate all link viability parameters in an already deployed and operational link, located on the highway BR-040, providing data link between the cities of Congonhas and Cristiano Otoni. As the link exist and is active, it will also be possible to read the actual signal levels and compare it with those obtained via calculation and via software.

KEYWORDS: Radiocommunication, Radio Link, Data Link, ITU-R, Project, *Pathloss*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Comparativo Tecnologia Analógica e Digital	17
Figura 2 – Ampliação da área de cobertura	18
Figura 3– Rádio Enlace	19
Figura 4– Rodovia BR-040	20
Figura 5– Diagrama Unifilar Rodovia BR-040	21
Figura 6- Telas de Serviço Pathloss	22
Figura 7– Perfil do Enlace	25
Figura 8 - Cálculo de Visada	29
Figura 9 - Elipsóides de Fresnel	30
Figura 10- Instalação (1+1)	37
Figura 11- Tela de Adição de Sites	48
Figura 12- Disposição dos Sites	49
Figura 13- Configuração Critérios de Visada.....	50
Figura 14- Tela de Análise de Transmissão	51
Figura 15- Tela de Configuração	52
Figura 16 - Apresentação de resultados Pathloss	53
Figura 17- Interface do rádio	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Frequência X Distância do Enlace	26
Tabela 2- Canalização para faixa de 7,5 GHz	26
Tabela 3 - Características do Rádio	27
Tabela 4- Características da Antena	27
Tabela 5 - Percentagem de raio de Fresnel X Frequência	30
Tabela 6 - Dados Área de Assinatura	43
Tabela 7 - Comparativo Pathloss x Método Convencional	54

LISTA DE SÍMBOLOS

m	metro
km	quilômetro
Hz	Hertz
Mbit/s	megabit por segundo
dBm	decibel-milliwatts
dBi	decibel (isotrópico)
ITU-R	International Telecommunication Unit
TDMA	Time Division Multiple Access
IP	Internet Protocol
ODU	Outdoor Unit
IDU	Indoor Unit

Sumário

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 PRIMÓRDIOS DAS COMUNICAÇÕES	14
1.2 SURGIMENTO DA RADIOCOMUNICAÇÃO	14
1.3 INTRODUÇÃO À RADIOCOMUNICAÇÃO	15
1.4 A RADIOCOMUNICAÇÃO DIGITAL	15
1.5 VANTAGENS DA COMUNICAÇÃO DIGITAL	16
1.5.1 Melhor Qualidade de Áudio	16
1.5.2 Maior Alcance.....	16
1.5.3 Maior Duração de Bateria.....	17
1.5.4 Maior Capacidade	17
1.6 ENLACES DE RÁDIO E REDE DE DADOS	17
2. INFORMAÇÕES DO ENLACE EM ESTUDO	20
2.1 APRESENTAÇÃO DO SOFTWARE (<i>Pathloss 5.0</i>).....	21
2.2 FREQUÊNCIAS LICENCIADAS E NÃO-LICENCIADAS.....	23
2.3 APRESENTAÇÃO DO ENLACE	24
2.4 PERFIL DO ENLACE	24
2.5 ESCOLHA DA FAIXA DE FREQUÊNCIA.....	25
2.6 EQUIPAMENTO	27
3. CÁLCULO DE VIABILIDADE DE ENLACE	29
3.1 LINHA DE VISADA	29
3.1.1 O fator K	29
3.1.2 Cálculo do raio de Fresnel (RF).....	30
3.1.3 Correção equivalente da curvatura da Terra (Hm)	31
3.1.4 Cálculo da altura das antenas.....	32
3.2 CÁLCULO DE DISPONIBILIDADE DO ENLACE (MÉTODO TRADICIONAL)	33
3.2.1 Atenuação de espaço livre (Free Space Loss).....	34
3.2.2 Atenuação por absorção atmosférica	35
3.2.3 Atenuação total do circuito de ramificação	36
3.2.4 Atenuação do guia de onda / cabo coaxial.....	37
3.2.5 Atenuação total do sistema e nível de sinal recebido	38

3.2.6	Disponibilidade do Enlace no Pior Mês	39
3.2.7	Disponibilidade Anual do Enlace	41
3.2.8	Atenuação devido a chuvas.....	45
3.2.9	Disponibilidade do enlace devido às chuvas	46
3.2.10	Disponibilidade total do enlace.....	47
3.3	CÁLCULO DE DISPONIBILIDADE DO ENLACE (VIA SOFTWARE)	47
3.3.1	Apresentação dos resultados	52
3.4	COMPARATIVO ENTRE OS DOIS MÉTODOS	53
3.4.1	Comparativo dos valores calculados com o nível de sinal implantado	54
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	56

1. INTRODUÇÃO

1.1 PRIMÓRDIOS DAS COMUNICAÇÕES

A procura por uma forma de comunicação eficaz de longas distâncias pode ser traçada a alguns milhares de anos, com gregos, persas e romanos. Tais civilizações já utilizavam sistemas de sinalização através de fumaça ou fogo para transmitir informações previamente estipuladas.

Para seu ataque a Troia o rei grego Agamenon teria construído, por volta de 1084 a.C., uma linha de faróis que se estendia por 500 km. Conjuntamente com o fogo e a fumaça, os romanos utilizavam um sistema de vigas de madeira, as quais situavam-se em torres com uma grande linha de visada. Eles abaixavam e levantavam tais vigas para transmitir mensagens por todo o império. O rei persa Dario I (550 a.C. - 486 a.C.) supostamente teria implementado uma rede de comunicação com fogo através de toda a Pérsia, com o objetivo de obter informações sobre revoltas, rebeliões ou mesmo de ataques externos.

1.2 SURGIMENTO DA RADIOCOMUNICAÇÃO

Há divergências entre autores quanto ao mérito do desenvolvimento da tecnologia de transmissão por ondas de rádio. Alguns pesquisadores atribuem o surgimento da radiocomunicação ao italiano Guglielmo Marconi, que desenvolveu a tecnologia de transmissão de informações por ondas de rádio, efetuando sua primeira transmissão no ano de 1896. Porém a Suprema Corte Americana concedeu o mérito da criação do rádio à Nikola Tesla, sendo que Marconi utilizou 19 patentes de Tesla em seu projeto. Os experimentos de Marconi visavam a substituição do telégrafo elétrico e o radiotelégrafo, que dispensava o cabeamento de vastas regiões, se difundiu rapidamente entre as frotas marítimas.

Considera-se que a primeira vez que transmitiu-se som utilizando ondas de rádio foi em 1906, pelo engenheiro canadense Reginald Fessenden. Era véspera de Natal, e Fessenden transmitiu um concerto de Natal aos tripulantes dos navios da United Fruit Company que navegam pelo Mar do Caribe e pelo Oceano Atlântico.

Motivo de muitas polêmicas, no Brasil, três anos antes de Marconi, o padre Roberto Landell de Moura já realizava transmissões bem-sucedidas via rádio. Porém os registros dessa primeira atividade são escassos. Landell também realizaria, em 1899 a primeira transmissão de

voz via rádio do mundo, a partir do Colégio das Irmãs de São José (atualmente Colégio Santana, na zona Norte de São Paulo).

As primeiras emissoras de rádio surgiram apenas após a Primeira Guerra Mundial, em 1920 com Frank Conrad. Conrad era engenheiro da Westinghouse Electric, empresa responsável pela fabricação dos rádios utilizados pelos militares americanos durante a guerra. Passado o conflito, haviam muitos equipamentos parados, sem utilização, então Conrad começou a transmitir notícias lidas de um jornal e músicas. Com o sucesso das transmissões a empresa decidiu investir nas mesmas: fundou uma emissora e passou a vender os rádios para cidadãos interessados em acompanhar as transmissões. Outros, acompanhando o sucesso da emissora de rádio, seguiram os mesmos passos e, em 1922 já se somavam 300 emissoras em solo norte-americano.

1.3 INTRODUÇÃO À RADIOCOMUNICAÇÃO

A radiocomunicação é um recurso das telecomunicações a fim de prover uma comunicação bidirecional através da transmissão de ondas eletromagnéticas. Tais ondas podem ser propagadas por diversos meios como fibras ópticas, cabos coaxiais, e até mesmo pela emissão das mesmas no ar, que é o alvo do projeto deste trabalho de graduação.

Uma estação de radiocomunicação é composta basicamente de três elementos, são eles:

- Transceptor: nada mais é do que um transmissor e receptor
- Linha de Transmissão;
- Antena.

Em seu início a única tecnologia disponível de radiocomunicação era a analógica. Com as crescentes pressões e exigências associadas ao uso comercial e a necessidade de otimização do espectro de frequência, começou-se a implementação de uma nova tecnologia no que diz respeito à radiocomunicação: a tecnologia digital.

1.4 A RADIOCOMUNICAÇÃO DIGITAL

Diferentemente da transmissão analógica, que realiza a transmissão das ondas de rádio de forma contínua, a radiocomunicação digital se baseia na transmissão de informação por meio de métodos de modulações digitais, ou seja, a mensagem é codificada em um número finito de

valores discretos.

1.5 VANTAGENS DA COMUNICAÇÃO DIGITAL

1.5.1 Melhor Qualidade de Áudio

Nas transmissões de áudio utilizando um rádio analógico é transmitido todo e qualquer som ambiente, ou seja, muitos dos ruídos ambientes são captados e transmitidos. Além disso o rádio analógico é mais suscetível à interferência, o que acrescenta ruídos na saída e causa distorções na voz.

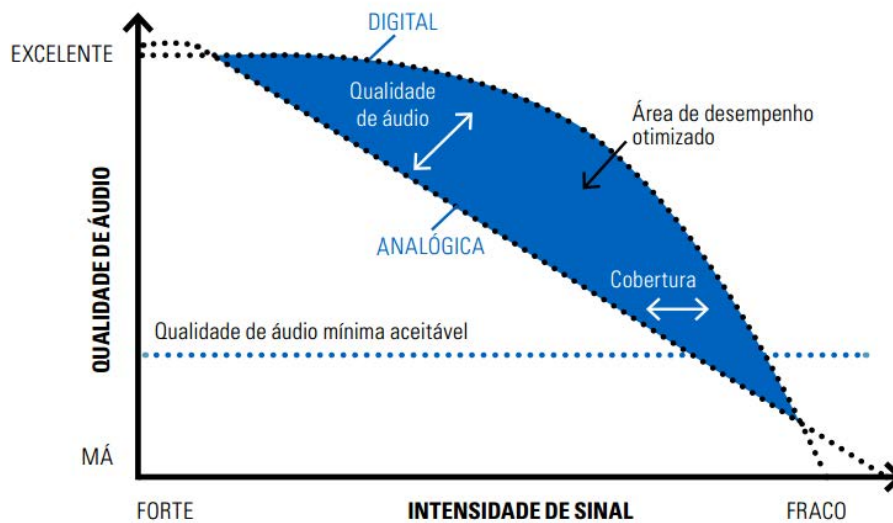
O rádio digital tem a capacidade de filtrar os ruídos ambientes, captando e transmitindo apenas o som da voz do locutor. Além disso tal tecnologia conta com uma correção automática de erros, onde ocorre uma reconstrução e manutenção da clareza da voz, mesmo na presença de um sinal comprometido.

1.5.2 Maior Alcance

A tecnologia de rádio digital é capaz de manter a integridade e qualidade da voz em todos os pontos da área de cobertura. Com o afastamento do ponto de transmissão e a diminuição do nível de sinal a qualidade de chamada dos rádios analógicos se distorce com muito mais rapidez.

Devido à correção de erros integrada, no ponto de pior sinal da área de cobertura, o rádio digital é capaz de transmitir uma chamada clara e limpa, enquanto no rádio analógico haverá distorções e vibrações. A figura 1 apresenta um gráfico que ilustra melhor essa comparação:

Figura 1- Comparativo Tecnologia Analógica e Digital



Fonte: Motorola Solutions

1.5.3 Maior Duração de Bateria

A capacidade de duração da bateria é sempre um ponto muito importante quando o assunto é dispositivos móveis e portáteis. Quando estão em modo de stand-by (aguardando chamada) tanto os rádios analógicos como digitais consomem a mesma quantidade de bateria. Porém, na transmissão os rádios digitais chegam a ser 40% mais econômicos.

1.5.4 Maior Capacidade

Uma das maiores vantagens dos rádios digitais é a sua maior capacidade de transmissão no que se refere à eficiência de espectro. O rádio analógico comporta um canal em uma faixa de frequência de 12,5 kHz, enquanto através da tecnologia TDMA (*Time Division Multiple Access*) o rádio digital comporta dois canais digitais.

Em outras palavras a tecnologia digital dobrou a capacidade de transmissão via rádio. Isso implica em um custo reduzido tanto em equipamentos, como em espaço de instalação e em certificações relativas à frequência de operação.

1.6 ENLACES DE RÁDIO E REDE DE DADOS

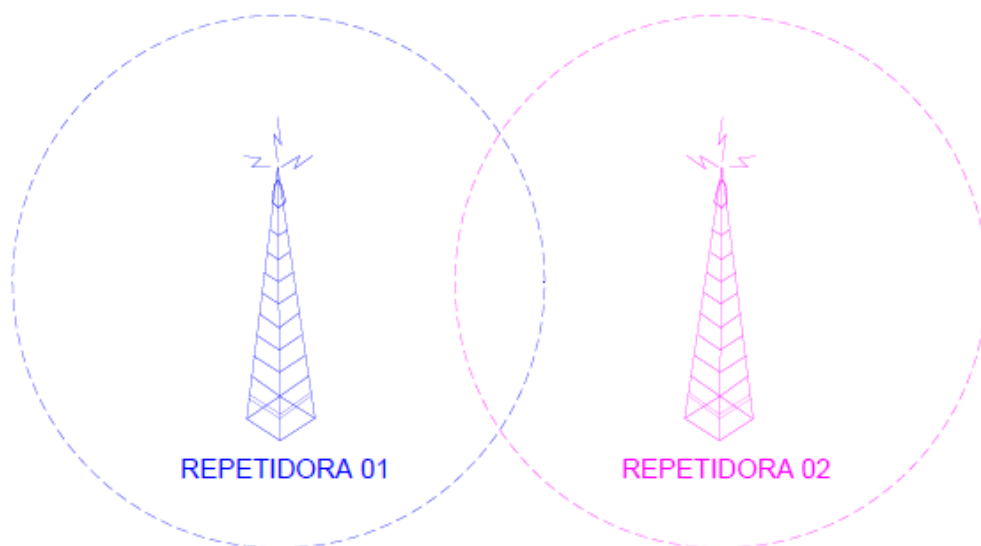
Os sistemas de rádio podem adotar diversas configurações com o propósito de atingir seus objetivos de comunicação. Tais configurações dependem de fatores como número de

usuários e área de cobertura.

Quando há a necessidade de usuários se comunicarem através de maiores distâncias, um equipamento muito importante é indispensável: a repetidora de sinais.

Como o próprio nome já diz, a repetidora nada mais é do que um equipamento fixo e de maior potência capaz de captar o sinal de uma chamada proveniente de um rádio e o retransmitir, aumentando consideravelmente a área de cobertura da comunicação. Porém grande parte das comunicações atualmente são feitas através de distâncias ainda maiores, as quais transcendem a capacidade de cobertura de uma só repetidora. Para ampliar essa capacidade torna-se necessária a utilização de mais repetidoras, ampliando a área total de cobertura, como demonstrado na Figura 2.

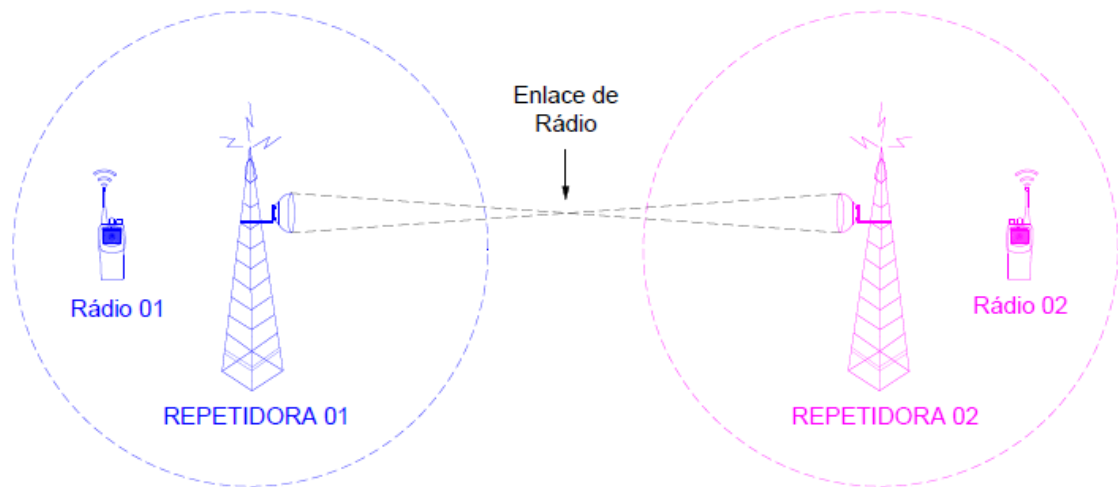
Figura 2 – Ampliação da área de cobertura.



Fonte: Produção do próprio autor

Porém na tecnologia digital a rede de voz tem de ser acompanhada por uma rede de dados, pois para que essas duas repetidoras estabeleçam uma comunicação entre si, elas precisam estar sob uma mesma rede IP. Tal rede IP pode ser provida de algumas maneiras, dentre as quais estão os enlaces de rádio. Sendo assim estes enlaces de rádio nada mais são do que conexões estabelecidas entre duas repetidoras, de modo que as comunicações realizadas sob a área de cobertura de uma repetidora podem ser recebidas por aqueles que estão sob a cobertura da próxima. A figura 3 ilustra esta situação.

Figura 3– Rádio Enlace



Fonte: Produção do próprio autor

Na Figura 3 nota-se que os dois rádios não estão sob a mesma área de cobertura, porém haverá a comunicação entre ambos pois as duas repetidoras estão sob a mesma rede IP obtida através do rádio enlace. Os enlaces de dados podem ser feitos diretamente entre as repetidoras, mas muito comumente os locais onde se encontram as repetidoras não colaboram para uma visada direta de enlace. Nestes casos é preciso realizar a conexão utilizando dois ou mais enlaces. Para entender essa situação de maneira mais clara, é preciso compreender a solução de radiocomunicação abordada neste trabalho de graduação, o que é apresentado no próximo tópico.

2. INFORMAÇÕES DO ENLACE EM ESTUDO

Neste trabalho é analisado um enlace de rádio implantado na Rodovia BR-040, que compõe a rede de comunicação de dados via rádio. A área da rodovia à qual esta rede de comunicação serve é a área sob concessão de uma empresa de pedágio, tem extensão de 936,8 km, sendo o início do trecho na divisa de Goiás com o Distrito Federal e o final do trecho na cidade de Juiz de Fora -MG. A Figura 4 apresenta o eixo completo da rodovia.

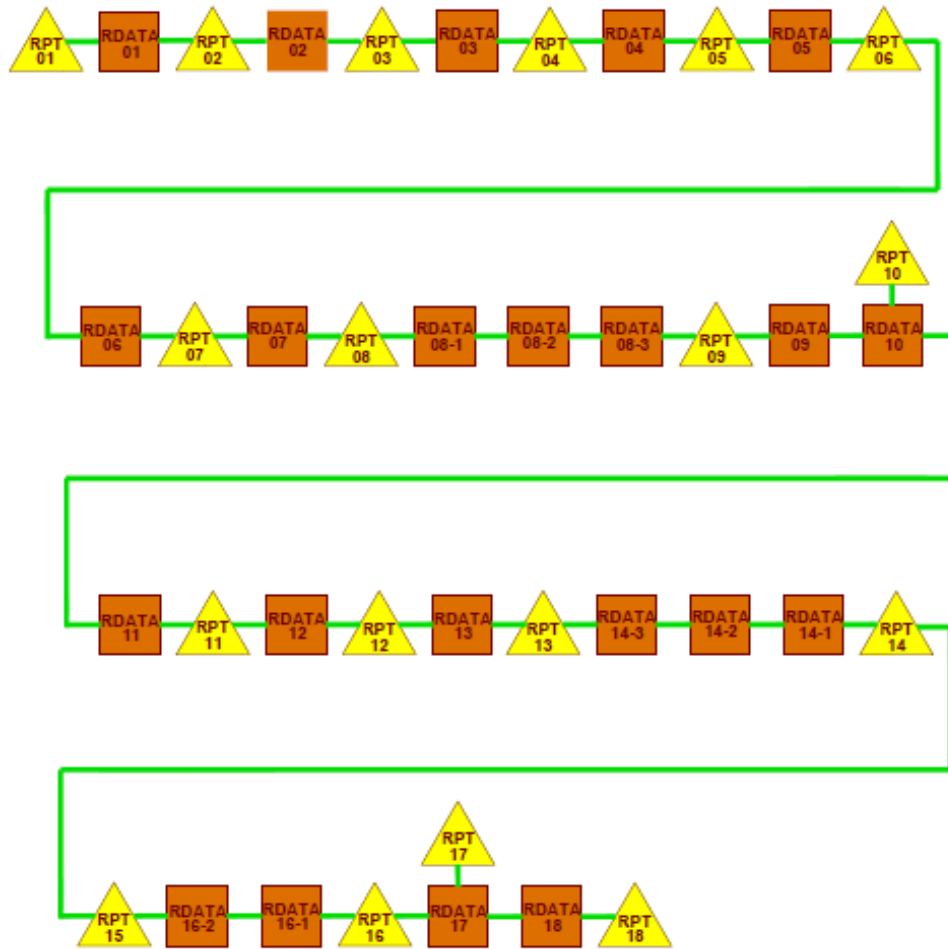
Figura 4– Rodovia BR-040



Fonte: Wikipedia

A rede de voz que provê a cobertura de todo o trecho de concessão é composta por 18 sítios de repetição de voz (repetidoras), interligadas por uma rede de dados composta por 36 enlaces fornecidos através de 22 sítios de repetição de dados. A Figura 5 apresenta um diagrama unifilar dos enlaces.

Figura 5– Diagrama Unifilar Rodovia BR-040



Fonte: Produção do próprio autor

Na Figura 5 os triângulos denominados “RPTs” são todos sítios de repetição de voz, e os quadrados denominados “RDATAs” são sítios de repetição de dados. Cada sítio de repetição de voz, a rigor também é um sítio de repetição de dados, uma vez que ele também realiza a propagação da rede de dados.

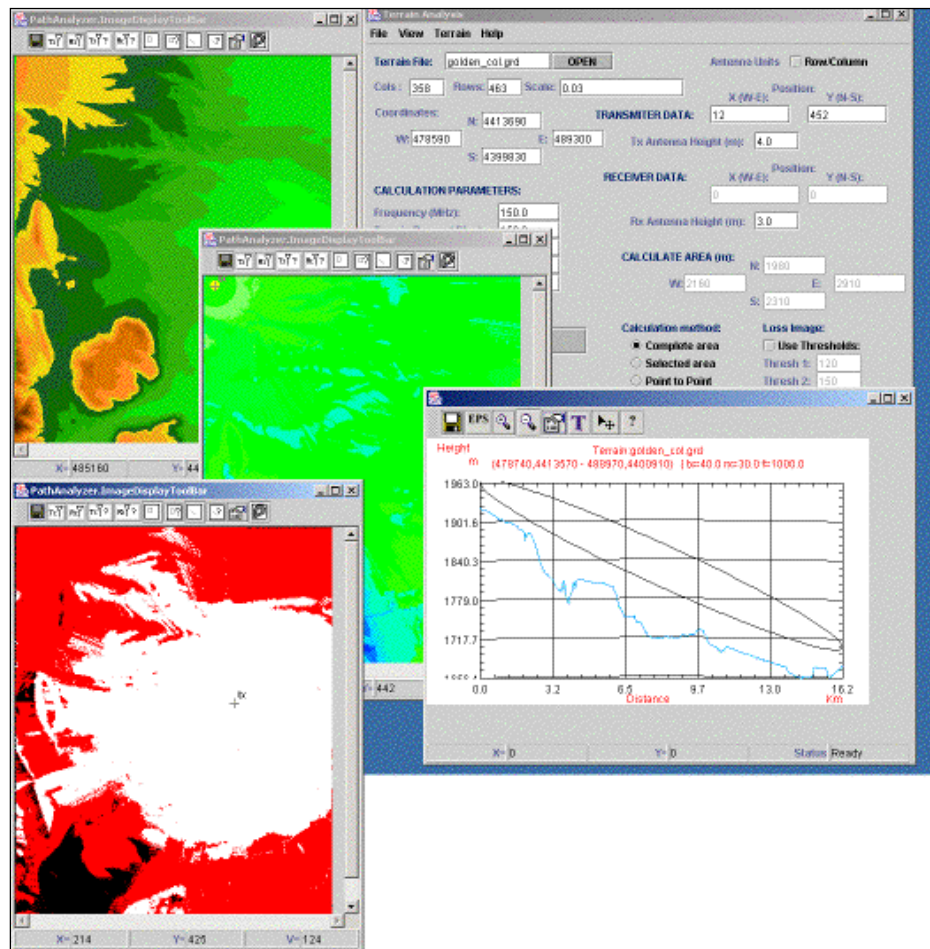
No presente estudo são feitas as análises tanto de visada quanto de viabilidade do enlace entre as repetidoras 14 e 15 (RPT 14 e RPT 15) localizadas respectivamente nas cidades de Congonhas e Cristiano Ottoni em Minas Gerais.

2.1 APRESENTAÇÃO DO SOFTWARE (*Pathloss 5.0*)

Para realizar os estudos de predição e cálculo de enlaces de microondas, além do método matemático tradicional, foi utilizado um software amplamente conhecido em projetos desta natureza, chamado *Pathloss*.

O aplicativo *Pathloss* é uma ferramenta versátil que suporta cálculos para links de rádio que operem na faixa de frequência de 30 MHz a 100 GHz. O programa está organizado de forma a atender todos os requisitos necessários do projeto. A Figura 6 apresenta algumas telas presentes nesta ferramenta.

Figura 6- Telas de Serviço *Pathloss*



Fonte: *Pathloss* 5.0

Para que o *Pathloss* possa traçar o perfil correto de cada enlace, ele utiliza cartas topográficas geradas pela NASA. Após a inserção da latitude e longitude dos dois lados do enlace, é necessário ligar os dois pontos e o software esboça o perfil exato do terreno.

Assim como qualquer outra ferramenta atual para estudos de viabilidade, o *Pathloss* não prevê aspectos que não os topográficos, como construções, vegetação ou outros obstáculos que possam interferir no desempenho do enlace. Por esse motivo é recomendável visitar os locais de interesse após um estudo prévio de viabilidade a fim de validar a base de dados do projeto.

Após a determinação do perfil do enlace, é necessária a inclusão dos dados técnicos dos

equipamentos que serão utilizados, como potência, sensibilidade e frequência de operação, dentre outros.

O Software então analisa os critérios de desobstrução da elipsoide de Fresnel, no ponto crítico do enlace, faz os cálculos necessários para a viabilidade do enlace com base nas informações acrescentadas e gera um relatório com os resultados obtidos.

2.2 FREQUÊNCIAS LICENCIADAS E NÃO-LICENCIADAS

Ao se fazer um projeto de rádio um aspecto muito importante ao qual se tem de atentar é a frequência a ser utilizada. Os enlaces de rádios não licenciados são aqueles com faixas de frequências livres (sendo principais as faixas de 2,4GHz e 5GHz), ou seja, podem ser utilizados por qualquer usuário, sem ter a necessidade de obtenção de autorização prévia do órgão regulador para a sua operação dentro de uma mesma região. Desta forma, mesmo que num primeiro momento seja obtida uma transmissão livre de interferências, nunca haverá qualquer garantia de que resguarde sua operação, ou seja, se houver uma ou várias fontes de interferências que possam surgir a qualquer instante e provocarem a degradação do desempenho do enlace ou a redução da sua disponibilidade, não haverá contramedidas previstas em Lei.

À medida que se tem mais sinais interferentes no local, mais difícil se tornará a probabilidade de o enlace manter-se disponível. Mesmo sendo projetados para suportar determinados níveis de sinais indesejados, os equipamentos da rede, muitas vezes, não suportam situações mais severas de interferência.

Os enlaces de rádios licenciados são aqueles que utilizam faixas ou canais de frequências predeterminadas para uso exclusivo do permissionário para uma dada região e que são licenciadas, no caso do Brasil, pela ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações), o que tem por objetivo evitar qualquer interferência mútua.

As redes de micro-ondas autorizadas, embora raramente sofram ou ofereçam interferências entre elas, em eventuais divergências, a Anatel intermedia e arbitra tais conflitos. Dessa forma aumenta a segurança e confiabilidade para as empresas que se utilizam desses tipos de enlaces, ao ter assegurado que o canal designado é para seu uso exclusivo em caráter primário, dentro de uma dada área geográfica, e que as comunicações essenciais não serão prejudicadas por interferências de terceiros.

O sistema de operação e administração de uma rodovia, por envolver muitos usuários, tanto colaboradores quanto transeuntes, é considerado um sistema de missão crítica. Ou seja, precisa de uma alta disponibilidade e confiabilidade. Devido a isso quase que a totalidade das

administradoras das rodovias, sejam privadas, estatais ou federais, utilizam frequências licenciadas pela ANATEL

2.3 APRESENTAÇÃO DO ENLACE

Quando se fala em rodovias concessionadas, há uma área que é de administração da concessionária chamada “faixa de domínio”. O DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), atual DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte) define faixa de domínio da seguinte maneira:

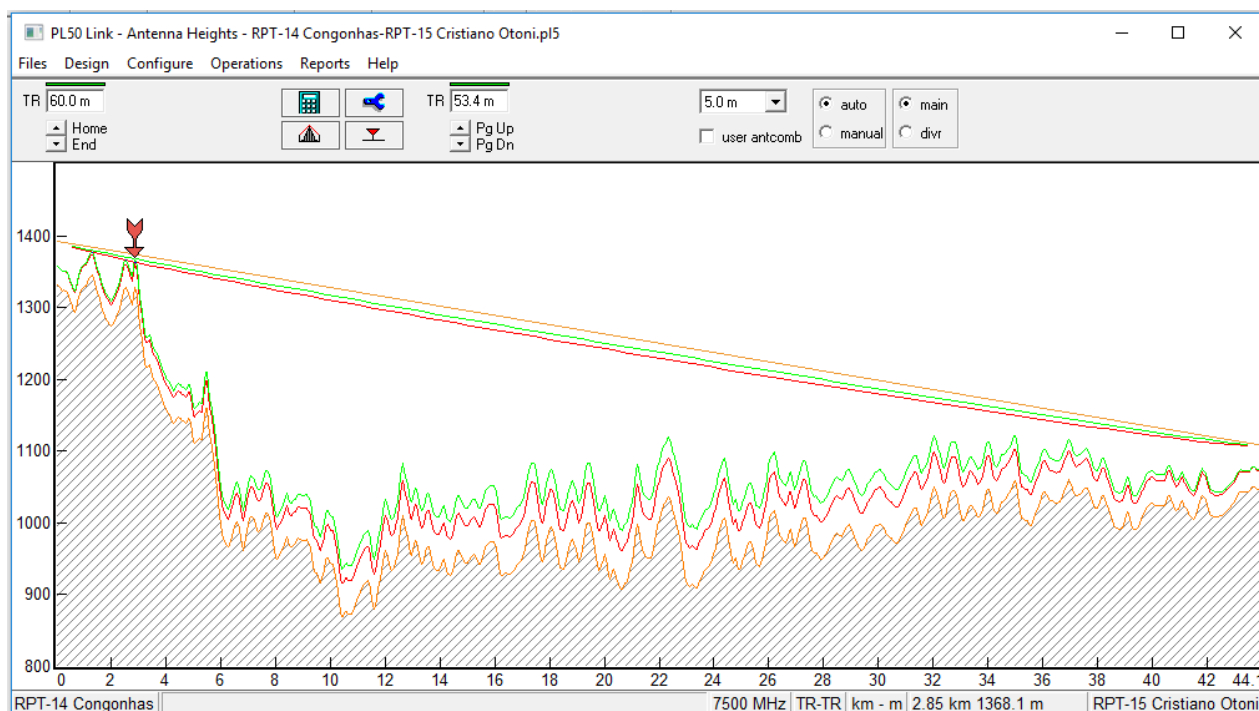
Base física sobre a qual assenta uma rodovia, constituída pelas pistas de rolamento, canteiros, obras-de-arte, acostamentos, sinalização e faixa lateral de segurança, até o alinhamento das cercas que separam a estrada dos imóveis marginais ou da faixa do recuo. (DNER, Glossário de Termos Técnicos Rodoviários, 1997, p.108)

Tal área depende da largura da rodovia, quantas pistas possui, tráfego de veículo e do relevo. No caso da implantação de sistemas de rádio, assim como outros serviços de apoio à concessionária e aos usuários, é conveniente para a mesma realizar a implantação dentro de sua faixa de domínio, assim evitando maiores gastos com aluguéis de terrenos de terceiros. Foi visando a utilização da faixa de domínio que todo o projeto citado no tópico anterior foi concebido.

2.4 PERFIL DO ENLACE

Como mencionado anteriormente, o enlace a ser estudado foi o implantado entre as repetidoras 14 e 15. O ponto no qual está situada a repetidora 14 está a uma altitude de 1332 metros do nível do mar, já o ponto do qual foi implantada a repetidora 15 se encontra a 1057 metros do nível do mar e tais pontos estão distantes 44,1 km um do outro em linha reta. A figura 7 traz a tela do perfil desse enlace gerada no *Pathloss 5.0*.

Figura 7– Perfil do Enlace



Fonte: *Pathloss 5.0*

A seta vermelha na figura 7 acima indica o ponto crítico, ponto de maior obstáculo para o estabelecimento da linha de visada para o enlace.

2.5 ESCOLHA DA FAIXA DE FREQUÊNCIA

Como discutido anteriormente há dois caminhos a se seguir com respeito à frequência de operação do enlace: frequências licenciadas e não licenciadas. Basicamente essa é uma escolha do cliente. Como o projeto em questão se trata de um sistema de missão crítica, é comum e aconselhável a utilização de frequências licenciadas.

A escolha da faixa de frequência na qual o enlace será implantado é etapa crucial no projeto de sistemas de radiocomunicação. Tal escolha se baseia no tamanho do enlace e na taxa de transmissão de dados que se espera do sistema, tudo isso obedecendo às normas da ANATEL de canalização e licenciamento na faixa de frequência em questão.

Quanto maior for o comprimento do enlace, menor terá de ser a frequência na qual este irá operar. A Tabela 1 ilustra bem essa relação.

Tabela 1- Frequência X Distância do Enlace

Frequência	15 GHz	18 GHz	23 GHz	38 GHz
Distância	6 a 15 km	3 a 6 km	1 a 3 km	até 1 km

Fonte: Miyoshi (2002)

Para o enlace em questão, devido ao seu comprimento relativamente grande (44,1 km) e a taxa de transmissão de dados de 50 Mbit/s definida pelo cliente, foi optada pela implantação na faixa de 7,5 GHz. A ANATEL possui normas de licenciamento e de canalização para todas as faixas de frequência licenciadas. A norma para a faixa de 7,5 GHz ilustra, através da Tabela 2, o licenciamento de tal faixa para as seguintes bandas:

Tabela 2- Canalização para faixa de 7,5 GHz

SISTEMA Mbit/s	LARGURA DE FAIXA (MHz)
2	3,5
3	3,5
2x2	3,5
8	7
4x2	7
17	14
2x8	14
16x2	14
21x2	14
34	14
51	14
140	28
155	28

Fonte: ANATEL

Como o cliente determinou que a taxa de transmissão para este enlace deverá ser de 50 Mbit/s, consultando a Tabela 2 pode-se definir um enlace licenciado para 51 Mbit/s, que terá uma largura de faixa de 14 MHz. Para esta largura de faixa, a norma de 7,5 GHz disponibiliza até 10 canais, ou seja, é possível licenciar até 10 pares de frequências nesta mesma faixa de operação.

2.6 EQUIPAMENTO

Com as informações de banda passante (taxa de transmissão de dados), frequência de operação e largura de faixa passa-se para a próxima etapa, que é a de escolha do equipamento a ser utilizado. Tal equipamento deve atender as premissas supracitadas, além de ser capaz de prover uma comunicação estável.

O rádio de dados utilizado neste projeto é composto por duas unidades. A ODU (*Outdoor Unit*), uma unidade outdoor que é fixada diretamente na antena e a IDU (*Indoor Unit*), uma unidade indoor instalada em um abrigo. Na Transmissão a IDU é responsável por transformar o sinal proveniente da rede em um sinal de frequência intermediária, que é transmitido para a ODU que por sua vez, faz a transformação e frequência intermediária para RF para que a antena possa enviar a informação. Na recepção de mensagens, ocorre o caminho contrário. A ODU transforma o sinal de RF recebido pela antena em um sinal de frequência intermediária e o envia para a IDU, que o recupera e transmite para a repetidora.

As Tabelas 3 e 4 trazem as informações do rádio e da antena designados para este projeto.

Tabela 3 - Características do Rádio

Características do Rádio	
Fabricante	SIAE Microeletrônica
Faixa de Frequência	7100 – 7900 MHz
Largura de Faixa	14 MHz
Taxa de Transmissão	52 Mbit/s
Modulação	32 QAM
Potência de Tx	26 dBm
Rx Threshold (1E-6 BER)	-78,5 dBm
Rx Máximo (1E-6 BER)	- 22 dBm

Fonte: SIAE Microeletrônica

Tabela 4- Características da Antena

Características da Antena	
Fabricante	RFS
Diâmetro	1,2 metros
Ganho	37 dBi

Fonte: RFS Antenas

Com essas informações em mãos pode-se dar início ao cálculo de viabilidade de enlace. Este cálculo leva em conta diversos fatores que são apresentados adiante e tem como resultado a altura nas quais deverão ser instaladas as antenas, porcentagem de tempo na qual o enlace está disponível e o nível de sinal existente.

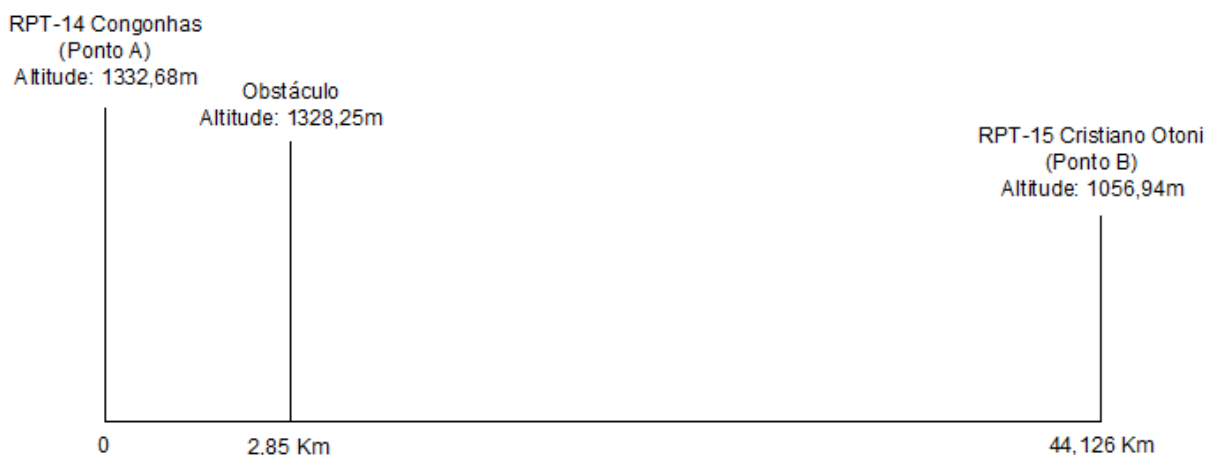
3. CÁLCULO DE VIABILIDADE DE ENLACE

3.1 LINHA DE VISADA

Para se efetuar o cálculo de viabilidade do enlace primeiramente deve-se fazer o cálculo de linha de visada, ou seja, calcular as alturas nas quais as antenas deverão ser instaladas para que o enlace fique livre de obstruções físicas. Para isso é necessário obter informações geográficas a respeito dos locais de instalação das torres e obstáculos, a fim de aplicar as fórmulas.

No enlace a ser analisado, tem-se o cenário ilustrado na Figura 8:

Figura 8 - Cálculo de Visada



Fonte: Produção do próprio autor

3.1.1 O fator K

Analisando a Figura 8, tem-se os locais de disposição das torres em linha reta. Mas isso não representa a realidade. A superfície terrestre é curva, e quanto maior for o enlace, mais essa curvatura tem influência sob a linha de visada.

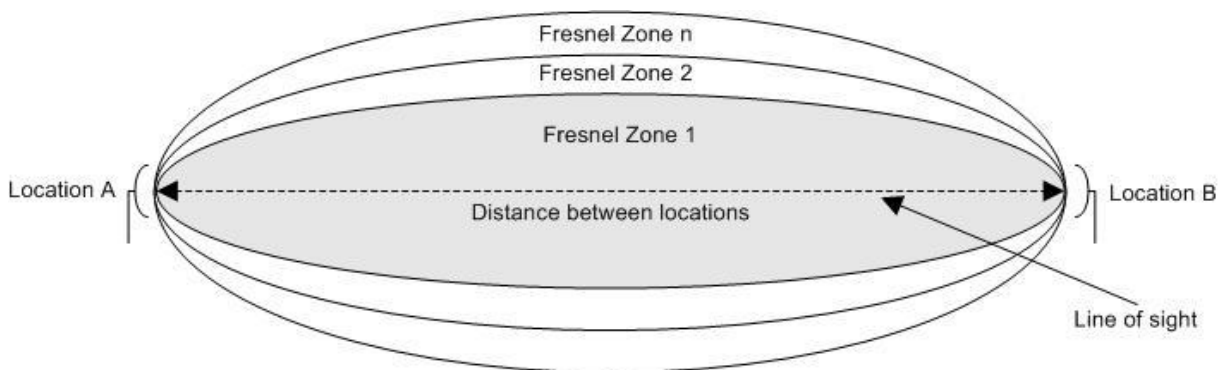
O fator K é empregado com o intuito de corrigir a curvatura terrestre para que os cálculos estejam mais próximos da realidade.

Em um projeto de enlace de rádio, em geral são aplicados dois valores de K, o Kmédio e o Kmínimo, que por premissas de projeto estão fixados em 4/3 e 2/3, respectivamente.

3.1.2 Cálculo do raio de Fresnel (RF)

Quando se fala em comunicação via rádio entre dois pontos, pode-se subdividir este trajeto em uma série de elipses, chamados de elipsóides de Fresnel. A figura 9 traz uma visualização das diferentes elipsóides de Fresnel.

Figura 9 - Elipsóides de Fresnel



Fonte: wiki.ham.hu

A linha de visada de um enlace depende da desobstrução da zona de Fresnel em três casos que dependem da frequência de operação, apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Percentagem de raio de Fresnel X Frequência

< 1Ghz	Entre 1 e 3 Ghz	Acima de 3Ghz
30% de raio de Fresnel para k = kmédio	60% de raio de Fresnel para k = kmédio	100% de raio de Fresnel para k = kmédio
10% de raio de Fresnel para k = kmínimo	30% de raio de Fresnel para k = kmínimo	60% de raio de Fresnel para k = kmínimo

Fonte: Miyoshi (2002)

Afim de avaliar essa desobstrução, deve-se calcular o raio de Fresnel, que é justamente o ponto de maior abertura da primeira elipsóide de Fresnel. Pode-se calculá-lo através da equação (1).

$$RF = 550 n \sqrt{\frac{d1 \times d2}{(d1 + d2)f}} \quad (1)$$

onde: d_1 = distância entre o ponto A (RPT-14) e o obstáculo [km];
 d_2 = distância entre o ponto B (RPT-15) e o obstáculo [km];
 n = porcentagem livre da primeira zona de Fresnel;
 f = frequência de operação [MHz].

Devido à frequência de operação de 7,5 GHz, deverão ser utilizados os critérios de 100% de desobstrução do raio de Fresnel para $K_{\text{médio}}$ e 60% de desobstrução para $K_{\text{mínimo}}$ que serão representados por RF e RF' , respectivamente. Substituindo os valores, tem-se:

$$RF = 550 \times 1 \times \sqrt{\frac{2,85 \times 41,276}{(2,85 + 41,276)7500}}$$

$$RF' = 550 \times 0,6 \times \sqrt{\frac{2,85 \times 41,276}{(2,85 + 41,276)7500}}$$

$$RF = 10,36 \text{ m}$$

$$RF' = 6,22 \text{ m}$$

3.1.3 Correção equivalente da curvatura da Terra (H_m)

A seguir é necessário calcular a correção equivalente da curvatura da Terra, etapa que visa adquirir um valor em metros que representa o quão a curvatura da terra influi na obstrução do enlace.

Esse valor é adquirido também levando-se em consideração os dois valores de K , que são expressos como H_m para $K_{\text{médio}}$ e H_m' para $K_{\text{mínimo}}$. Tal correção pode ser obtida através da equação (2).

$$H_m = \frac{d_1 \times d_2}{K \times 12,740} \quad (2)$$

Substituindo-se os valores, tem-se:

$$Hm = \frac{2,85 \times 41,276}{1,33 \times 12,740}$$

$$Hm' = \frac{2,85 \times 41,276}{0,67 \times 12,740}$$

$$Hm = 6,94 \text{ m}$$

$$Hm' = 13,78 \text{ m}$$

3.1.4 Cálculo da altura das antenas

O último passo do cálculo de visada é o cálculo da altura das antenas. É nesta etapa que fica expressa quais devem ser as alturas nas quais as antenas devem ser instaladas para que haja uma visada direta e sem obstrução do enlace. Com este valor nas mãos, também pode-se definir uma torre de tamanho adequado para a implantação.

Neste caso de estudo as torres já estão implantadas, a da RPT-14 possui 60 metros de altura e a da RPT-15 possui 70 metros. Sendo assim pode-se considerar uma das antenas estando no topo de uma das torres, assim precisando calcular apenas a altura da antena de um dos lados do enlace. Fixando-se uma das antenas (antena 2) no topo da torre da RPT-15, é necessário calcular então a altura da antena 1 na torre da RPT-14. A altura da antena pode ser obtida através da equação (3).

$$h1 = \frac{d \times [hpc + (RF + Hm) + MC - hA] - d1 \times (hB + h2 - hA)}{d2} \quad (3)$$

onde: d = comprimento total do enlace [km];

hpc = altitude do obstáculo com relação ao nível do mar [m];

MC = Margem de segurança [m];

hA = altitude da estação RPT-14 com relação ao nível do mar [m];

hB = altitude da estação RPT-15 com relação ao nível do mar [m];

$h2$ = altura da antena 2 [m].

d_1 = distância entre o ponto A (RPT-14) e o obstáculo [km];

d_2 = distância entre o ponto B (RPT-15) e o obstáculo [km];

Assim como os parâmetros anteriores, a altura da antena também deve ser calculada levando-se em conta as duas situações, uma utilizando-se RF e Hm e outra utilizando-se RF' e Hm'. Como premissa de projeto utiliza-se uma margem de segurança de 20 metros, o que pode variar conforme a vegetação e edificações contidas no trajeto do enlace.

Sendo assim, os cálculos são:

$$h_1 = \frac{44,126 \times [1328,25 + (10,36 + 6,94) + 20 - 1332,68] - 2,85 \times (1056,92 + 70 - 1328,25)}{41,276}$$

$$h_1' = \frac{44,126 \times [1328,25 + (6,22 + 13,78) + 20 - 1332,68] - 2,85 \times (1056,92 + 70 - 1328,25)}{41,276}$$

$$h_1 = 49,04 \text{ m}$$

$$h_1' = 51,93 \text{ m}$$

Sendo assim utiliza-se o maior dos valores, que será o de h_1' . Como este ainda é inferior os 60 metros da torre da RPT-14, não haverá problema na implantação.

Assim está encerrado então o cálculo de visada, que resultou em uma visada livre para uma antena implantada a 52 metros na RPT-14 e uma a 70 metros na RPT-15.

3.2 CÁLCULO DE DISPONIBILIDADE DO ENLACE (MÉTODO TRADICIONAL)

Um enlace de rádio é suscetível a uma enorme gama de fatores que o influenciam negativamente. Esses fatores podem afetar tanto a disponibilidade de tempo em funcionamento do enlace quanto impor atenuações no sinal de rádio, que se opõem aos ganhos providos pelas antenas e rádios. Tais fatores são:

- Atenuação no espaço livre (A_e);
- Atenuação devido à absorção atmosférica (A_{ab});
- Atenuação total do circuito de ramificação (Tx e Rx) (A_{rmf});
- Atenuação do guia de onda / cabo coaxial (Tx e Rx) (A_{cAB});
- Atenuação por chuvas (A_r).

Esta última não afeta o nível do sinal recebido, e sim o torna mais susceptível a quedas. Em um procedimento padrão, deve-se então calcular todas estas atenuações afim de se especificar quais equipamentos devem ser utilizados para a obtenção de um nível de sinal satisfatório e qual é o tempo no qual o enlace fica inativo por ano. Como este trabalho trata de um estudo comparativo, o equipamento já foi especificado, os cálculos nos servirão de base de comparação.

O primeiro passo é calcular o nível de sinal recebido. Para tal deve-se iniciar o cálculo dos fatores atenuantes.

3.2.1 Atenuação de espaço livre (Free Space Loss)

Durante o trajeto de uma antena até a outra, o sinal de rádio sofre uma atenuação chamada de atenuação de espaço livre. Tal perda na intensidade do sinal aumenta quão maiores forem a distância e a frequência de operação, sendo dada por:

$$A_e = 32,4 + 20 \log(f) + 20 \log(d) \quad (5)$$

Aplicando os valores de frequência de operação, em MHz, e distância do enlace, em Km, tem-se:

$$A_e = 32,4 + 20 \log(7500) + 20 \log(44,126)$$

$$A_e = 142,8dB$$

A atenuação de espaço livre representa a maior fonte de perdas presenciadas por um

enlace de rádio.

3.2.2 Atenuação por absorção atmosférica

O oxigênio e o vapor de água presentes na atmosfera são capazes de absorver uma pequena porção da energia irradiada. Esta atenuação é muito menor se comparada com as causadas por demais fatores, porém não pode ser desprezada.

Para o cálculo da atenuação por absorção atmosférica os dois fatores devem ser calculados separadamente: a atenuação pelo oxigênio (γ_o) e a atenuação pelo vapor de água (γ_w), ambas representadas pelas equações (6) e (7):

$$\gamma_o = \left[7,19 * 10^{-3} + \frac{6,09}{f^2 + 0,227} + \frac{4,81}{(f - 57)^2 + 1,5} \right] \times f^2 \times 10^{-3} \quad (6)$$

$$\gamma_w = \left[0,067 + \frac{3}{(f - 22,3)^2 + 7,3} + \frac{9}{(f - 183,3)^2 + 6} + \frac{4,3}{(f - 323,8)^2 + 10} \right] \times f^2 \times \rho \times 10^{-4} \quad (7)$$

onde: ρ = densidade do vapor de água no nível do mar a 15°C [g/m³].

Aplicando-se a frequência de operação de 7,5 GHz, e a densidade do vapor de água nos parâmetros especificados sendo 7,5 g/m³, teremos:

$$\gamma_o = \left[7,19 * 10^{-3} + \frac{6,09}{7,5^2 + 0,227} + \frac{4,81}{(7,5 - 57)^2 + 1,5} \right] \times 7,5^2 \times 10^{-3}$$

$$\gamma_o = 0,00658 \text{ dB/km}$$

$$\gamma_w = \left[0,067 + \frac{3}{(7,5 - 22,3)^2 + 7,3} + \frac{9}{(7,5 - 183,3)^2 + 6} + \frac{4,3}{(7,5 - 323,8)^2 + 10} \right] \times 7,5^2 \times 7,5 \times 10^{-4}$$

$$\gamma_w = 0,00339 \text{ dB/km}$$

Os valores adquiridos através do cálculo acima são valores de atenuação por quilômetro, para se obter a atenuação total do trajeto é necessário somá-los e multiplica-los pela distância

entre os dois pontos do enlace.

$$A_{ab} = (\gamma\sigma + \gamma w) \times d \quad (8)$$

$$A_{ab} = (0,00658 + 0,00339) \times 44,126$$

$$A_{ab} = 0,44 \text{ dB}$$

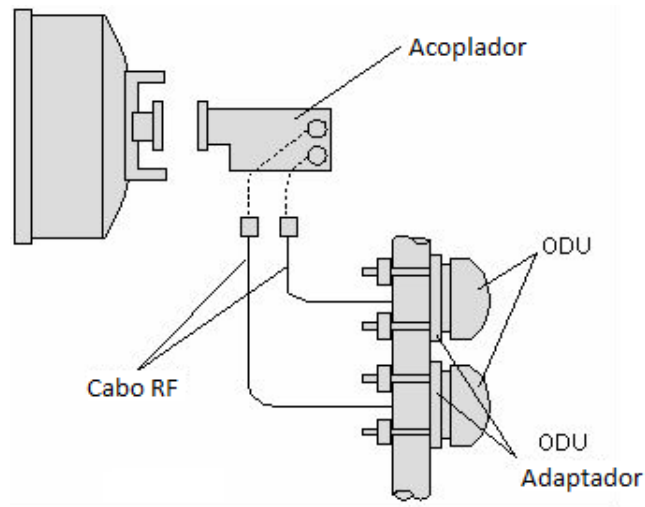
Pode-se perceber realmente o quão essa atenuação é inferior à atenuação de espaço livre, mas ainda assim é um fator que deve ser levado em consideração.

3.2.3 Atenuação total do circuito de ramificação

A atenuação relativa ao circuito de ramificação engloba a perda proveniente de equipamentos como circuladores, duplexadores, e demais que compõem o sistema desde a geração do sinal até sua recepção.

No sistema em questão é um sistema com nível de redundância (1+1), ou seja, há na realidade um rádio em operação constante e outro em stand-by que assume a transmissão automaticamente caso o primeiro falhe. Mas a antena só possui entrada para acoplar um rádio. Então tem-se de introduzir um equipamento chamado híbrida ou acoplador, para que possam ser conectados os dois rádios. Estes acopladores introduzem uma perda de 3 dB em ambos os lados de Rx e Tx. A figura 10 ilustra esta instalação.

Figura 10- Instalação (1+1)



Fonte: Huawei

Sendo assim a perda total do circuito de ramificação fica expressa na equação (9).

$$Arm_f = Ahr_x + Aht_x \quad (9)$$

onde: Ahr_x = perda da híbrida de Rx [dB];

Aht_x = perda da híbrida de Tx [dB].

A atenuação total do circuito de ramificação será:

$$Arm_f = 3 + 3$$

$$Arm_f = 6 \text{ dB}$$

3.2.4 Atenuação do guia de onda / cabo coaxial

O sinal trocado entre a ODU e a IDU é de uma frequência intermediária, muito inferior à de operação (300MHz) para que as perdas sejam menores. Por recomendação da própria SIAE microeletrônica, fabricante do rádio utilizado, este modelo de rádio tem sensibilidade tal que, para a conexão de frequência intermediária, suporta perdas equivalentes a 200 m de cabo coaxial.

O cabo utilizado é o RGC-213, que possui uma perda de 7,63 dB/100m. Ou seja, esse modelo de rádio suporta até 15,26 dB de perda nas conexões de frequência intermediária sem que o sinal de RF seja prejudicado.

Como a torre de maior tamanho (RPT-15) possui 70 metros, mesmo com 20 metros de folga de cabo a tolerância imposta pelo fabricante ainda é respeitada. Pode-se considerar então que:

$$Acab = 0$$

3.2.5 Atenuação total do sistema e nível de sinal recebido

A atenuação total do sistema é dada pela soma de todas as atenuações calculadas acima, além dos ganhos das antenas (G_{Tx} e G_{Rx}), como apresentado na equação (10).

$$At = Ae + Aab + Armf + Acab - (Gtx + Grx) \quad (10)$$

$$At = 142,8 + 0,44 + 6 + 0 - (37 + 37)$$

$$At = 75,24 \text{ dB}$$

Com o valor da atenuação total do sistema podemos então calcular o nível do sinal recebido utilizando a equação (11).

$$Prx = Ptx - At \quad (11)$$

Onde P_{tx} é a potência de transmissão do rádio apresentada na Tabela 3.

$$Prx = 26 - 75,24$$

$$Prx = -49,24 \text{ dB}$$

Como a potência do sinal recebido está entre os limiares de potência máxima e mínima do rádio (entre -78,5 dB e -22 dB) apresentados na Tabela 3, pode-se concluir que o nível do

sinal recebido será satisfatório para a operação.

3.2.6 Disponibilidade do Enlace no Pior Mês

Nesta etapa calcula-se a porcentagem de tempo de disponibilidade do enlace no pior mês do ano. O método utilizado é o da recomendação do ITU-R de número P.530. O primeiro passo é calcular o fator geoclimático k através da equação (12).

$$k = 10^{-4,4-0,0027 \times dN1} \times (10 + Sa)^{-0,46} \quad (12)$$

onde: $dN1$ = refratividade excedida em 1% do tempo;
 Sa = rugosidade do solo na região do enlace.

A refratividade do solo pode ser obtida através da recomendação ITU-R P.453. A rugosidade do solo representa o desvio de altura do terreno em uma área de 110 km x 110 km a partir do centro do enlace. Dessa forma foi obtido um valor de 197,13 para esse enlace.

$$k = 10^{-4,4-0,0027 \times (-192,49)} \times (10 + 197,13)^{-0,46}$$

$$k = 1,13 \times 10^{-5}$$

Agora deve ser calculada a inclinação da linha de visada através da equação abaixo:

$$\varepsilon_p = \frac{h_r + h_e}{d} \quad (13)$$

onde: h_r = maior altura de antena em relação ao nível do mar;
 h_e = menor altura de antena em relação ao nível do mar;

A inclinação fica:

$$\varepsilon_p = \frac{1384,68 + 1126,94}{44,126}$$

$$\varepsilon_p = 5,84$$

Agora sim a porcentagem de tempo que o enlace ficará indisponível no pior mês pode ser calculada. Para tal é utilizada a seguinte equação:

$$p_w(\%) = k \times d^{3,4} \times (1 + |\varepsilon_p|)^{-1,03} \times f^{0,8} \times 10^{-0,00076 \times h_t - \frac{A_f}{10}} \quad (14)$$

Este parâmetro é calculado em função da margem de desvanecimento plano A_f , que é a diferença entre a potência do sinal recebido, calculada pela equação (10) e o nível de threshold do equipamento.

$$A_f = Prx - Trhld \quad (15)$$

$$A_f = -49,24 - (-78,5)$$

$$A_f = 29,26 \text{ dB}$$

Agora tem-se todos os parâmetros para a aplicação da equação (14).

$$p_w(\%) = 1,133 * 10^{-5} \times 44,126^{3,4} \times (1 + |5,84|)^{-1,03} \times 7,5^{0,8} \times 10^{-0,00076 \times 1126,94 - \frac{29,26}{10}}$$

$$p_w(\%) = 5,054 \times 10^{-4} \%$$

Ou seja, este enlace estará indisponível durante 0,00005054 % no pior mês do ano. Se este valor for subtraído de 100%, tem-se o tempo de disponibilidade do enlace no pior mês, como se segue:

$$D_w = 100 - 5,054 \times 10^{-4}$$

$$D_w = 99,99949 \%$$

Também é possível de se saber em quanto tempo se traduz a porcentagem de indisponibilidade, basta aplicar a porcentagem encontrada sobre o número de segundos contidos em um mês.

$$p_w = 30 \times 24 \times 60 \times 60 \times 5,054 \times 10^{-6}$$

$$p_w = 13,099 \text{ segundos}$$

3.2.7 Disponibilidade Anual do Enlace

Calculado o item anterior, que é relativo somente ao pior mês do ano, tem de ser calculada a disponibilidade do enlace ao longo de um ano. Este processo se inicia com o cálculo de fator geoclimático, que já foi calculado na Equação (12).

Feito isso, deve ser calculado o fator de ocorrência de múltiplos caminhos utilizando a equação (16).

$$p_0(\%) = k \times d^{3,1} \times (1 + |\varepsilon_p|)^{-1,29} \times f^{0,8} \times 10^{0,00089 \times h_L} \quad (16)$$

Lembrando que ε_p é a inclinação da linha de visada, calculada através da equação (13) e h_L é a altura da menor antena, com relação ao nível do mar. Substituindo-se os valores, tem-se:

$$p_0(\%) = 5,17 \times 10^{-5} \times 44,126^{3,1} \times (1 + |5,84|)^{-1,29} \times 7,5^{0,8} \times 10^{-0,00089 \times 1126,94}$$

$$p_0(\%) = 5,908 \times 10^{-2} \%$$

$$P_0 = 5,908 \times 10^{-4}$$

A próxima etapa é determinar a probabilidade de falha no sistema em razão do

desvanecimento plano através da equação (17).

$$P_{NS} = P_0 \times 10^{-\frac{Af}{10}} \quad (17)$$

$$P_{NS} = 5,908 \times 10^{-4} \times 10^{-\frac{29,26}{10}}$$

$$P_{NS} = 7,006 \times 10^{-7}$$

Já está calculada a parte referente ao desvanecimento, agora deve ser calculada a probabilidade de falha relativa ao desvanecimento seletivo. A probabilidade de ocorrer o desvanecimento seletivo pode ser calculada através da equação (18).

$$\eta = 1 - \exp(-0,2 \times P_0^{0,75}) \quad (18)$$

$$\eta = 1 - \exp(-0,2 \times (5,908 \times 10^{-4})^{0,75})$$

$$\eta = 7,58 \times 10^{-4} \%$$

Para dar continuidade, é preciso calcular o atraso médio entre os dois percursos, dado pela equação (19).

$$\tau_m = 0,7 \times \left(\frac{d}{50} \right)^{1,3} \quad (19)$$

$$\tau_m = 0,7 \times \left(\frac{44,126}{50} \right)^{1,3}$$

$$\tau_m = 0,595 \text{ ns}$$

Antes de finalizar esta etapa, é necessário o cálculo da área de assinatura do equipamento, para tal são necessários alguns dados do equipamento, que são apresentados na

tabela (6).

Tabela 6 - Dados Área de Assinatura

Atraso de Assinatura - τ_r	6,3 ns
Largura de Faixa das Áreas de Assinatura - B_s	14 MHz
Assinatura (fase mínima) - D_m	34,10
Assinatura (fase não mínima) - D_{nm}	34,10

Fonte: Siae Microeletrônica

A área total de assinatura do equipamento é a média entre a área de fase mínima e a área de fase não mínima. Mas como neste equipamento ambas as assinaturas são iguais, é possível calcular apenas uma delas através da equação (20).

$$S = \frac{\lambda \times B_s \times 10^{-3}}{\tau_r} \quad (20)$$

Onde λ é a profundidade média de Notch, calculada pela equação (21).

$$\lambda = 10^{\frac{-D}{20}}$$

$$\lambda = 10^{\frac{-34,1}{20}}$$

$$\lambda = 0,01972$$

Substituindo os valores na equação (20), tem-se:

$$S = \frac{0,01972 \times 14 \times 10^{-3}}{6,3}$$

$$S = 43,8 \times 10^{-6} \text{ ns}^{-2}$$

Com esta informação, agora pode ser calculada a probabilidade de falha no enlace

devido ao desvanecimento seletivo utilizando a equação (22).

$$P_s = 4,3 \times \eta \times S \times \tau_m^2 \quad (22)$$

$$P_s = 4,3 \times 7,58 \times 10^{-4} \times 43,8 \times 10^{-6} \times 0,595^2$$

$$P_s = 5,05 \times 10^{-8}$$

A probabilidade de inoperância total é a soma de P_s com P_{ns} .

$$P_{tot} = P_s + P_{ns} \quad (23)$$

$$P_{tot} = 5,05 \times 10^{-8} + 7,006 \times 10^{-7}$$

$$P_{tot} = 7,51 \times 10^{-7}$$

Esta é a probabilidade de ocorrer queda no enlace ao longo de um ano. Para saber o tempo de inatividade em segundos por mês, basta aplicar a seguinte fórmula:

$$T_{tot} = P_{tot} \times 2,592 \times 10^6$$

$$T_{tot} = 1,95 \text{ s/mês} = 23,36 \text{ s/ano}$$

Para expressar o tempo total de operação do enlace ao longo do ano, basta aplicar a equação (24)

$$P_{op} (\%) = 100 - P_{tot} \times 100 \quad (24)$$

$$P_{op} (\%) = 100 - 7,51 \times 10^{-7} \times 100$$

$$P_{op} (\%) = 99,9999249 \%$$

3.2.8 Atenuação devido a chuvas

Uma etapa importante no projeto e dimensionamento de enlaces de radiocomunicação é a consideração da atenuação provinda das chuvas. Essas atenuações não oferecem piora no nível do sinal recebido, porém podem aumentar o tempo de indisponibilidade do enlace.

Há vários métodos de cálculo das atenuações devido a chuvas, o que será abordado neste projeto é o mais utilizado deles, o método do ITU-R P.530.

Esse cálculo tem início com a equação (25), que fornece a atenuação específica do enlace, que nada mais é do que a atenuação por quilômetro.

$$\gamma_r = K \times R_{0,01\%}^\alpha \quad (25)$$

onde: K e α = coeficientes dependentes da polarização e estrutura da chuva;

$R_{0,01\%}$ = taxa pluviométrica para 0,01% do tempo [mm/h].

A taxa pluviométrica depende da região geográfica e é retirada da recomendação ITU-R 837, já os outros coeficientes variam com a frequência e com a polarização da antena e são retirados da recomendação ITU-R 838.

Após determinados estes valores pode ser dada continuação no cálculo da atenuação específica.

$$\gamma_r = 3,662 \times 10^{-3} \times 70,79^{1,333}$$

$$\gamma_r = 1,071 \text{ dB/km}$$

Na próxima etapa calcula-se o percentual do enlace em que deve haver chuva. Esse fator leva em consideração o fato de que a chuva não terá a mesma intensidade em todo o enlace e é definido pela equação (26).

$$r = \frac{1}{0,477 \times d^{0,633} \times R_{0,01\%}^{0,073 \times \alpha} \times f^{0,123} - 10,579(1 - e^{-0,024 \times d})} \quad (26)$$

$$r = \frac{1}{0,477 \times 44,126^{0,633} \times 70,79^{0,073 \times 1,33} \times 7,5^{0,123} - 10,579(1 - e^{-0,024 \times 44,126})}$$

$$r = 0,3021$$

Agora pode ser calculado o diâmetro efetivo da célula de chuva multiplicando-se o valor de r pela distância total do enlace.

$$d_{eff}(km) = r \times d \quad (27)$$

$$d_{eff}(km) = 0,3021 \times 44,126$$

$$d_{eff}(km) = 13,329 \text{ km}$$

Já foi calculada a atenuação específica e o diâmetro da célula de chuva. Basta multiplicar os dois fatores para obter a atenuação proveniente de chuvas para este enlace.

$$Ar = \gamma_r \times d_{eff} \quad (28)$$

$$Ar = 1,071 \times 13,329$$

$$Ar = 14,28 \text{ dB}$$

3.2.9 Disponibilidade do enlace devido às chuvas

Calculada atenuação proveniente de chuvas, deve-se tomar um tempo para analisar essa situação. A chuva está oferecendo uma atenuação de 14,28 dB. Porém o sistema apresenta uma margem de 29,26 dB, calculada pela equação (15).

Sendo assim, é seguro afirmar que esse enlace nunca ficara indisponível devido às chuvas, pois estas nunca vão oferecer uma atenuação que ultrapasse os 29,26 dB.

3.2.10 Disponibilidade total do enlace

A disponibilidade total do enlace é encontrada somando-se as indisponibilidades provenientes das chuvas e dos desvanecimentos e subtrair o valor encontrado de 100%. Como apresentado no item anterior, as chuvas não afetam a disponibilidade do enlace, então a disponibilidade total do enlace será somente a relativa ao desvanecimento.

$$Disp = 99,9999249 \%$$

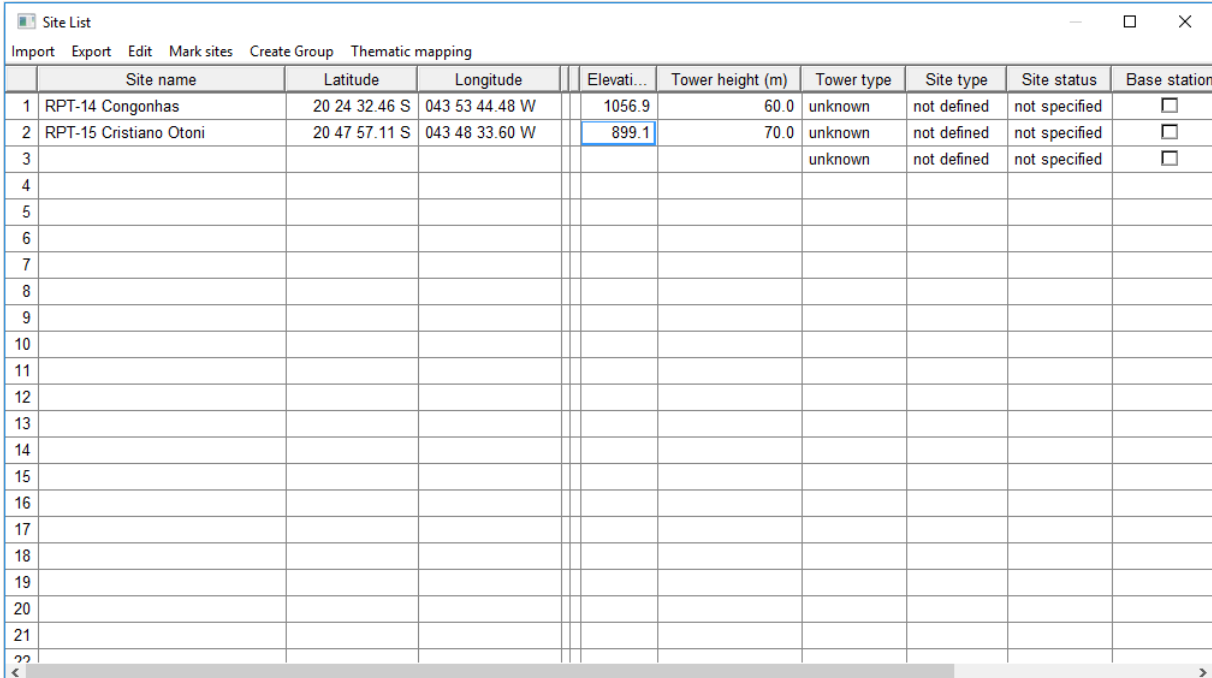
Isto conclui o estudo de viabilidade de enlace pelo método tradicional. O próximo tópico aborda a utilização do software para a realização dos cálculos.

3.3 CÁLCULO DE DISPONIBILIDADE DO ENLACE (VIA SOFTWARE)

Usualmente todos os cálculos apresentados na seção anterior são realizados por softwares especializados devido à grande quantidade de tempo demandada na realização dos mesmos.

O intuito deste trabalho de graduação é atestar ou contestar os resultados fornecidos por um dos principais softwares utilizados no ramo, o *Pathloss* 5.0.

O primeiro passo para a realização de um estudo no *Pathloss* é a adição dos *sites* de repetição de dados através das respectivas coordenadas geográficas. Na mesma tela pode ser adicionada a altura das torres, se essa informação estiver presente. A figura (11) ilustra essa etapa.

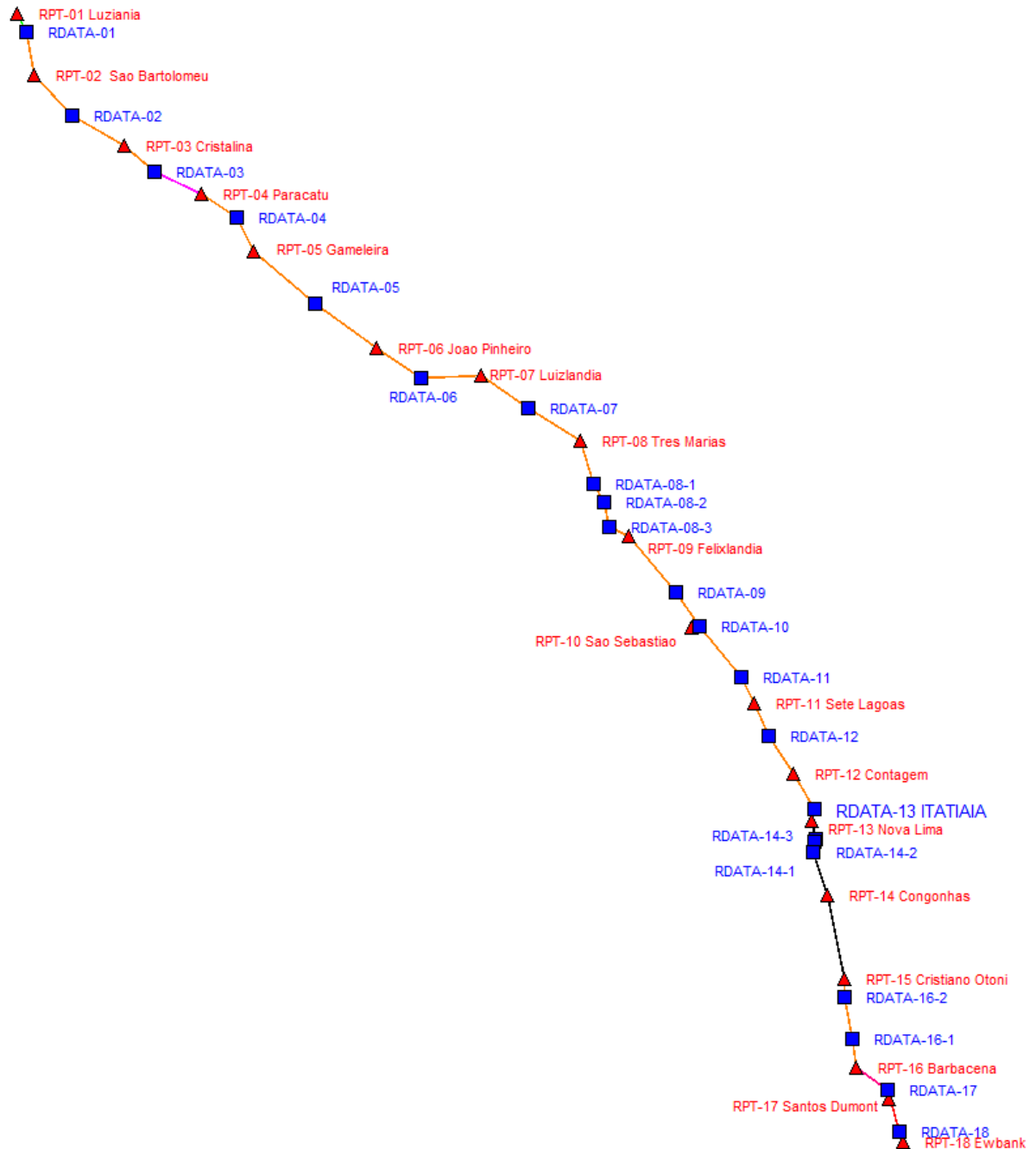
Figura 11- Tela de Adição de *Sites*


	Site name	Latitude	Longitude	Elevati...	Tower height (m)	Tower type	Site type	Site status	Base station
1	RPT-14 Congonhas	20 24 32.46 S	043 53 44.48 W	1056.9	60.0	unknown	not defined	not specified	<input type="checkbox"/>
2	RPT-15 Cristiano Ottoni	20 47 57.11 S	043 48 33.60 W	899.1	70.0	unknown	not defined	not specified	<input type="checkbox"/>
3						unknown	not defined	not specified	<input type="checkbox"/>
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									

Fonte: *Pathloss*

Após a adição de todos os *sites* desejados, os mesmos são apresentados na tela principal já em suas devidas posições geográficas, como na Figura 12.

Figura 12- Disposição dos Sites



Fonte: *Pathloss*

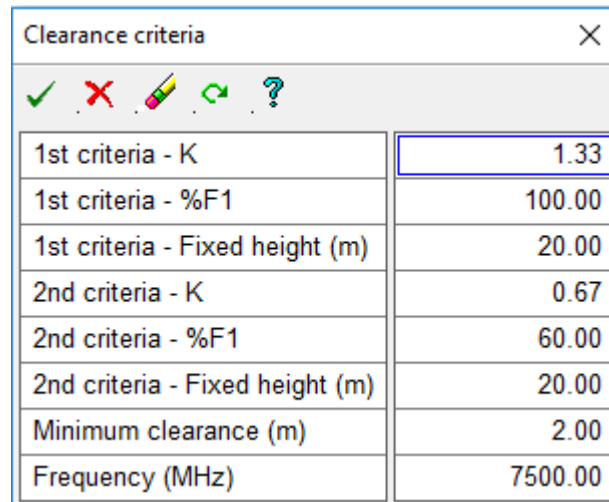
Porém ainda não é possível traçar os enlaces. Para isso é preciso configurar os dados do terreno. Os dados topográficos são provenientes de arquivos fornecidos pela NASA, esses arquivos são subdivididos nos quadrantes de latitude e longitude, por exemplo, há um arquivo S21W32 que traz as informações do quadrante de latitude sul de 21 graus e longitude oeste de 32 graus.

Com todos os arquivos topográficos carregados, agora é possível traçar os enlaces. Ao

fechar-se um enlace entre dois pontos, é apresentada a tela capturada na Figura 7.

Esta é a tela de cálculo da altura das antenas. Para este cálculo ser útil é preciso configurar os parâmetros desejados, como a frequência de operação, o $K_{\text{médio}}$, $K_{\text{mínimo}}$, dentre outros, como ilustrado na Figura 13.

Figura 13- Configuração Critérios de Visada



Clearance criteria	
1st criteria - K	1.33
1st criteria - %F1	100.00
1st criteria - Fixed height (m)	20.00
2nd criteria - K	0.67
2nd criteria - %F1	60.00
2nd criteria - Fixed height (m)	20.00
Minimum clearance (m)	2.00
Frequency (MHz)	7500.00

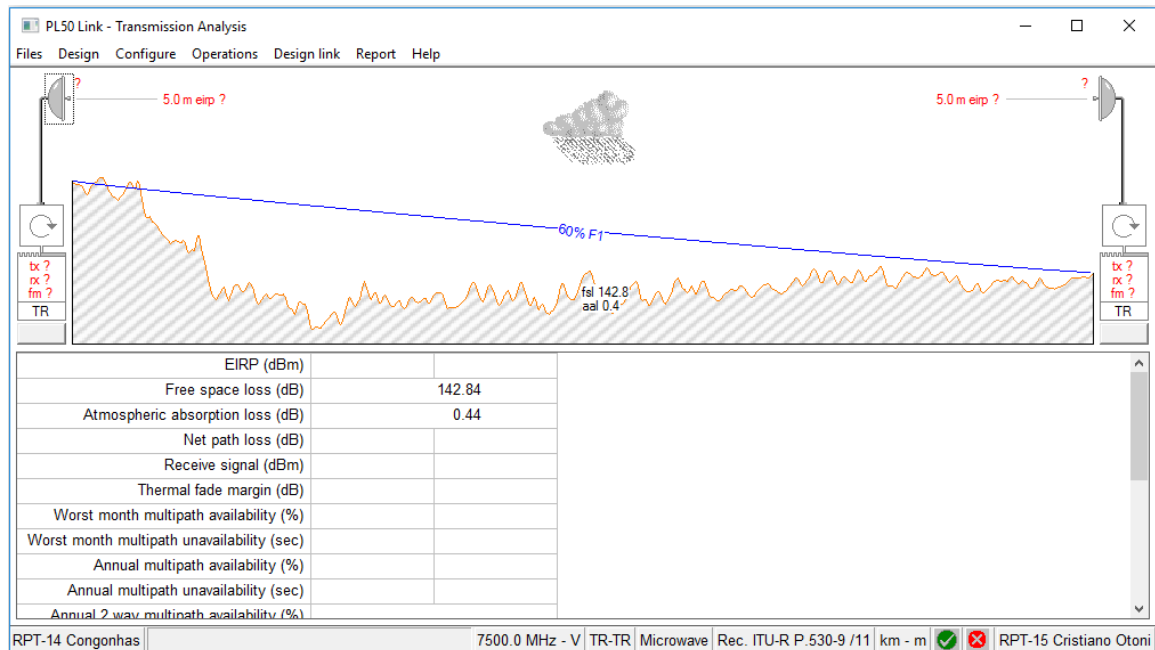
Fonte: *Pathloss*

Nessa tela podem ser visto os critérios de visada utilizados nos cálculos da seção anterior e expressos na Tabela 5. Com isso feito, o software calcula automaticamente as alturas das antenas. Pode-se também alterar a altura da antena de um lado que o outro se ajustará automaticamente.

Analisando a Figura 7 pode-se notar 3 linhas de cores distintas, de cores laranja, vermelha e verde. Elas representam, respectivamente, a linha de referência, a linha de 100% da zona de Fresnel e a linha de 60% da zona de Fresnel.

Efetuada esta etapa é hora de acessar a tela de cálculo e análise de transmissão, representada pela Figura 14.

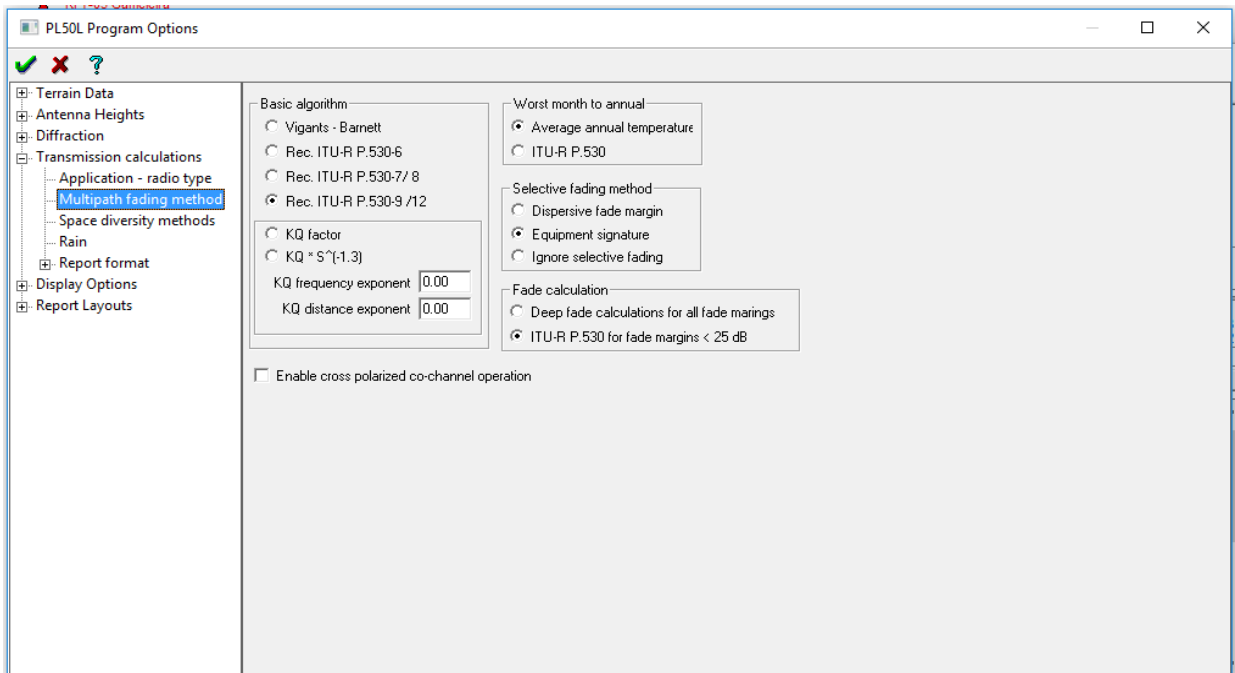
Figura 14- Tela de Análise de Transmissão



Fonte: *Pathloss*

É nesta tela que se configura as características dos equipamentos e atenuações. Os arquivos que indicam coeficientes de chuvas e rugosidade do solo já estão carregados no programa. Todos os parâmetros utilizados para os cálculos são configuráveis, assim como os respectivos métodos. A Figura 15 exemplifica uma das telas de configuração.

Figura 15- Tela de Configuração



Fonte: *Pathloss*

Na configuração dos equipamentos é possível a introdução de novos equipamentos e todos os seus parâmetros, ou também, como é o caso dos equipamentos utilizados neste projeto, os próprios fabricantes disponibilizam bancos de dados próprios para o *Pathloss*, tanto de diferentes modelos de rádios quanto de antenas, já com todas as características pertinentes para os cálculos.

Após a configuração de todos os equipamentos e parâmetros o software realiza automaticamente os cálculos de viabilidade de enlace, que será apresentado no próximo item.

3.3.1 Apresentação dos resultados

Os resultados provenientes de todos os cálculos de viabilidade podem ser extraídos através de um relatório. A figura (16) ilustra os resultados obtidos para o cálculo do enlace alvo deste trabalho de graduação.

Figura 16 - Apresentação de resultados *Pathloss*

Transmission details		January 11, 2017	
	RPT-14 Congonhas	RPT-15 Cristiano Otoni	
Latitude	20 24 32.46 S	20 47 57.11 S	
Longitude	043 53 44.48 W	043 48 33.60 W	
True azimuth (°)	168 14 37.91	348 12 48.51	
Elevation (m)	1332.68	1056.92	
Tower height (m)	60.00	70.00	
Antenna diameter (m)	1.22	1.22	
Antenna height (m)	52.37	70.00	
Frequency (MHz)		7500.00	
Polarization		Horizontal	
Path length (km)		44.13	
Worst month multipath availability (%)	99.99967		99.99967
Worst month multipath unavailability (sec)	8.80		8.80
Annual multipath availability (%)	99.99989		99.99989
Annual multipath unavailability (sec)	35.41		35.41
Annual 2 way multipath availability (%)		99.99978	
Annual 2 way multipath unavailability (sec)		70.82	
Polarization		Horizontal	
0.01% rain rate (mm/hr)		70.79	
Flat fade margin - rain (dB)		29.22	
Rain attenuation (dB)		9.27	
Annual rain availability (%)		100.00000	
Annual rain unavailability (min)		0.00	
Annual rain + multipath availability (%)		99.99978	
Annual rain + multipath unavailability (min)		1.18	

Fonte: *Pathloss*

3.4 COMPARATIVO ENTRE OS DOIS MÉTODOS

Este capítulo resume todos os objetivos deste trabalho, que é atestar ou contestar os resultados dos cálculos feitos através da utilização do software. Para melhor expressar esse comparativo, todos os resultados de ambos os métodos foram compilados na tabela (6).

Tabela 7 - Comparativo *Pathloss* x Método Convencional

	<i>Pathloss</i>	Método Convencional
Atenuação de espaço livre (dB)	142,84	142,8
Atenuação de absorção atmosférica (dB)	0,44	0,44
Atenuação total (dB)	75,28	75,24
Sinal Recebido (dB)	-49,28	-49,24
Desvanecimento Plano (dB)	29,22	29,26
Disponibilidade no pior mês (%)	99,99967	99,99949
Indisponibilidade no pior mês (seg)	8,80	13,099
Disponibilidade anual (dois lados) (%)	99,99989	99,9999249
Indisponibilidade anual (dois lados) (seg)	70,82	23,36
Taxa pluviométrica para 0.01% do tempo (mm/hr)	70,79	70,79
Atenuação por chuvas (dB)	9,27	14,28
Disponibilidade anual por chuvas (%)	100,00	100,00
Indisponibilidade anual por chuvas (min)	0,00	0,00
Disponibilidade anual total (%)	99,99978	99,99976
Indisponibilidade anual total (min)	1,18	0,39

Fonte: Produção do próprio autor

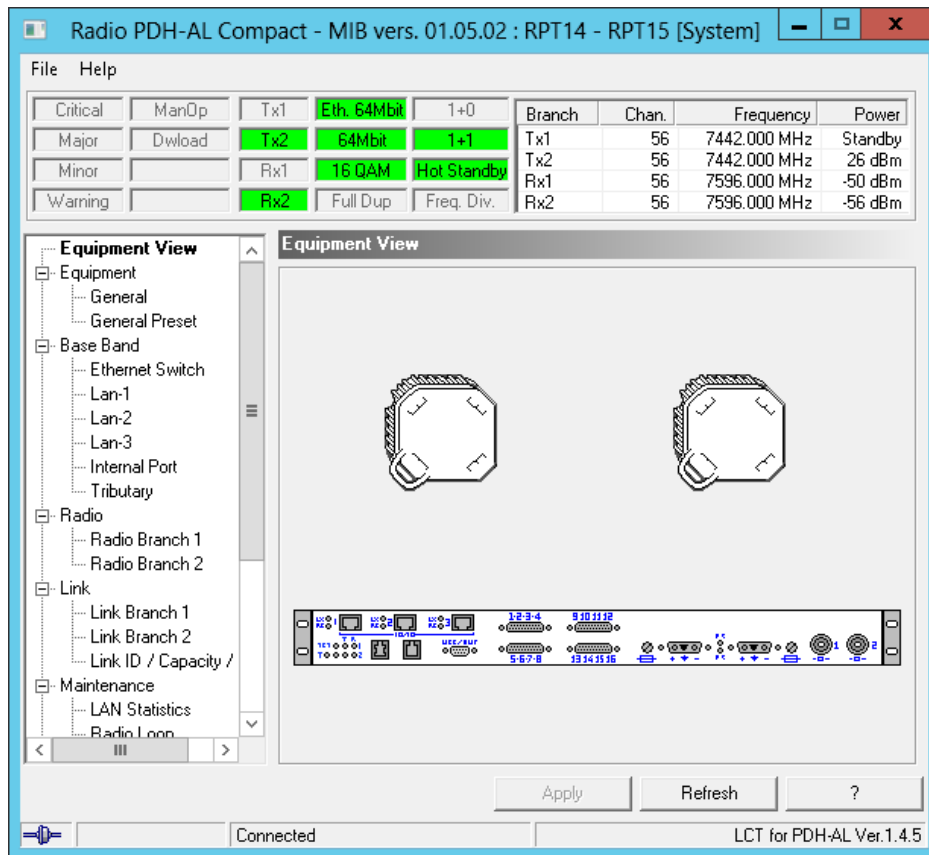
Pode-se notar algumas discrepâncias entre os resultados provenientes de ambos os métodos. No que diz respeito ao nível de sinal recebido, é correto afirmar que os resultados são quase que idênticos. Porém ao analisar as disponibilidades e a atenuação por chuvas, os valores obtidos divergem.

Isso não quer dizer que qualquer um dos métodos está errado. Em uma pesquisa mais minuciosa, foi evidenciado que o software *Pathloss* em sua versão 5.0 utiliza recomendações que não estão mais vigentes, tendo as mesmas sido atualizadas pelo ITU-R. Até o momento da publicação deste trabalho de graduação, o software já está em sua versão 5.1, na qual estas atualizações já foram feitas.

3.4.1 Comparativo dos valores calculados com o nível de sinal implantado

Como o enlace estudado neste trabalho de graduação é um enlace que está em operação, é possível acessar a interface do rádio para obter os valores reais do nível de sinal que o rádio está recebendo. A figura (17) traz um *print* dessa interface.

Figura 17- Interface do rádio



Fonte: Software SCT (*Subnetwork Craft Terminal*)

Pode-se notar dois sinais de Rx na Figura (17), provenientes dos dois rádios. O Rx1 é o nível de sinal do rádio principal, que fica atuante normalmente, e o Rx2 é o rádio de backup, que é intencionalmente configurado para ter um nível de sinal menor que o principal. O rádio de backup só assume quando o nível do rádio principal fica menor do que o dele.

Fica evidenciado então que os estudos trazem um resultado muito fiel ao nível de sinal implantado. Enquanto que o estudo teórico indicou um nível de sinal de -49,28 dB, o implantado opera com um nível de sinal de -50 dB. Esta pequena diferença pode ser proveniente da incerteza nas atenuações dos acopladores, que é de $\pm 0,5$ dB, ou até mesmo de alguma divergência no alinhamento do enlace.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas de radiocomunicações modernos estão presentes em todos os níveis da sociedade. Desde segurança pública à setores privados, todos dependem de uma comunicação de alto nível de confiabilidade.

Esta confiabilidade tem início no projeto de sistemas. Os cálculos para dimensionamento tem que ser condizentes com o comportamento do equipamento após a implantação. Tanto na questão do nível de sinal quanto na questão da disponibilidade do enlace, não podem haver surpresas durante a operação de tais sistemas, muito menos naqueles de missão crítica.

Este trabalho de graduação atestou que os cálculos realizados através do software conseguem se aproximar muito daqueles realizados pelo método tradicional, e ambos se provaram fiéis ao nível de sinal coletado em campo.

Sendo assim não é falso afirmar que a utilização do software, não só é possível, como recomendada para adicionar agilidade à entrega de projetos, além de facilidade e maior maleabilidade na mudança de dados como locais dos *sites*, alturas de torres e antenas, dados de equipamentos entre outros fatores que, na elaboração de um projeto, mudam constantemente.

Do mais, é necessário dizer que não restam dúvidas que a utilização do software abordado neste estudo agrega muito ao processo de projetos de sistemas de radiocomunicação

REFERÊNCIAS

ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações. **Regulamento Sobre Canalização e Condições de Uso da Faixa de 7,5 GHz.**

GOMES, G. G. R. **Sistemas de Radioenlaces Digitais: Terrestres e por Satélites.** 1. Ed. São Paulo: Érica, 2013.

HAYKIN, S. **Sistemas de Radiocomunicação: Analógicos e Digitais.** 4. Ed. São Paulo: Bookman, 2004.

HISTÓRIA DA COMUNICAÇÃO – **O Surgimento do Rádio** – Disponível em: <<http://historia-da-comunicacao.blogspot.com.br/2012/03/o-surgimento-do-radio.html>>. Acesso em: 02 dez. 2016.

ITU-R - International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector. **Recomendation ITU-R P.530-16. Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Terrestrial Line-of-Sight System.** Genebra: International Telecommunication Union, 2015.

ITU-R - International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector. **Recomendation ITU-R P.453-9. The radio refractive index: its formula and refractivity data.** Genebra: International Telecommunication Union, 2003.

MIYOSHI, E. M.; SANCHES, C. A. **Projetos de Sistemas de Rádio.** São Paulo: Érica, 2002.

WIKIPEDIA – **Rádio (Telecomunicações)** – Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/R%C3%A1dio_\(telecomunica%C3%A7%C3%B5es\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/R%C3%A1dio_(telecomunica%C3%A7%C3%B5es))>. Acesso em: 02 dez. 2016.

WIKIPEDIA – **Roberto Landell de Moura** – Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Roberto_Landell_de_Moura>. Acesso em: 04 dez. 2016.