

Método de Concepção de Sistema de Transmissão Ponto Multiponto com Enfoque na Ocupação Espectral, Potência Recebida e Probabilidade de Outage

Theoma Muriel Sanches Ootob e Horácio Tertuliano Filho

Resumo—Muito se escreve a respeito do processo de concepção de um sistema de comunicação, considerando os diferentes tipos de modulação, as taxas de transmissão assim como os possíveis serviços nele transportados. No entanto, a operacionalização das etapas de concepção de um sistema de transmissão (que é a base fundamental para a comunicação existir futuramente) possui pouca bibliografia atualizada dificultando dessa forma o entendimento macro do funcionamento do sistema. A motivação desse trabalho é baseada na ideia de se analisar projetos de sistemas de transmissão com uma precisão mais detalhada destes três aspectos considerados importantes: Ocupação espectral, Potência e a Probabilidade de Outage.

Palavras-Chave—Sistema de Transmissão, Ocupação Espectral, Potência Recebida e Probabilidade de Outage.

Abstract— Much is written about the process of conception of a communication system, considering the different types of modulation, transmission rates as well as the possible services in it Transported. However, the operationalization of the stages of conception of a system of Transmission (which is the fundamental for communication exist in the future) has little updated bibliography making it difficult therefore the macro understanding of functioning of the system. The motivation of this work is based on the idea of analyzing transmission systems with a more detailed precision of these three aspects considered important: Spectral Occupation, Power and Probability of Outage.

Keywords— Transmission System, Spectral Occupancy, Received Power, and Outage Probability.

I. INTRODUÇÃO

O problema do desempenho de um sistema de transmissão em relação à qualidade de seus serviços é um dos principais fatores que cada vez mais exige esforços da engenharia para ser atendido principalmente na medida em que novas tecnologias surgem. O desempenho neste cenário se caracteriza como sendo uma combinação de três aspectos: Ocupação espectral, Potência recebida e a Probabilidade de Outage.

A ocupação espectral se traduz pela associação da eficiência do uso do espectro de frequência (serviços) e as suas respectivas legislações vigentes que o permeiam. Já o aspecto referente à potência recebida se caracteriza por descrever a influência que os elementos que constituem o ambiente de

propagação exercem sobre o sinal transmitido até o seu destino final. E finalmente a probabilidade de Outage está associada ao limite de falhas permitido para o sistema em operação, [1]. Baseando-se no que foi precedentemente dito entende-se que a ideia de se implantar um sistema de transmissão, deve-se levar em consideração parâmetros relevantes que garantam ao responsável pelo projeto um desempenho satisfatório do sistema. Pode-se afirmar ainda que a simples ideia de concepção de um sistema de transmissão passa pelo entendimento dos diversos fatores constitutivos do mesmo, de uma análise de engenharia através de uma metodologia de concepção e do conhecimento da legislação vigente, [1].

A proposta desse trabalho foi o de oferecer uma rigorosa conjugação destes fatores no processo de concepção de um sistema de transmissão multiponto e multicanal em absoluta consonância com a legislação nacional e internacional vigente de modo a se obter, através de uma metodologia, dados que descrevam as características mais relevantes de um sistema de transmissão considerando os limites mínimos exigidos pela agência reguladora dos serviços de telecomunicações do Brasil para sistemas operando na faixa de 3,5 GHz atualmente em fase de padronização no Brasil, 5 GHz e 8,5 GHz. Resumidamente, a ideia de descrever o processo de concepção do sistema baseou-se no equacionamento de parâmetros vinculados a: geometria, frequência, potência, interferência (ruídos) e confiabilidade do enlace como pode ser observado na Figura 1.

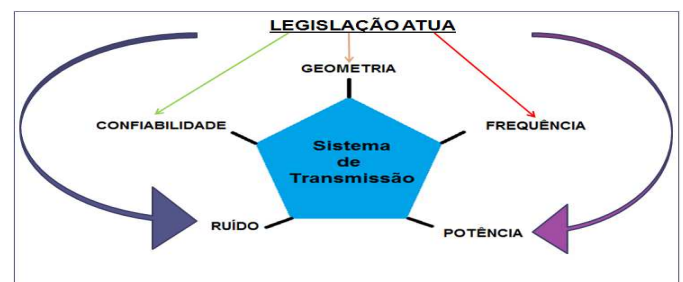


Fig. 1. Fases de Análise do Sistema.

A. Ocupação Espectral

Para se alcançar uma eficiência satisfatória em relação ao sistema de transmissão, torna-se necessário não só o cumprimento de uma sequência de procedimentos metodológicos atendendo a parâmetros que possam vir a

prejudicar a qualidade e a confiabilidade do sinal, como também, e, acima de tudo, uma regrada aplicação da legislação vigente. A Tabela I a seguir resume as principais legislações nacionais e internacionais vigentes para as frequências de 3,5 GHz, 5 GHz e 8,5 GHz e que serão utilizadas neste artigo, [1,2].

TABELA I. PRINCIPAIS NORMATIZAÇÕES APLICADAS

Fatores Relacionados com a Propagação	
Parâmetros	Recomendação
Atenuação no espaço livre	ITU-R 525-2 e ITU-R 341-5
Atenuação devido a Areia e a Poeira	RESOLUÇÃO ANATEL n° 99
Atenuação devido à Vegetação	CCIR 721-3
Perdas por Transmissão	ITU-R 833-3
Perdas por Difração	ITU-R 341-5
Atenuação por Gases Atmosféricos	ITU-R 526-5
Fator de Curvatura da Terra e índices de Refração	ITU-R 676-3 e ITU-R 676-4
Critérios de Liberação de Sinal	ITU-R 453-6
Atenuação de Sistema	ITU-R 453-7
Fatores Relacionados ao Equipamento	
Parâmetros	Recomendação
Índices de Qualidade	ITU-R 530-8
Valor de Sistema	ITU-R 341-5
Fatores Relacionados ao Equipamento	
Parâmetros	Recomendação
Tipos de Antenas	ITU-R PN. 837-1
Polarização	ETSI TR 102 243-1; RESOLUÇÃO ANATEL 609
Equipamento Transmissor e Receptor	ITU-R 838
Tipos de Cabos	RESOLUÇÃO ANATEL 492
Tipos de Torres	ETSI TR 102 243-1
Fatores Relacionados ao Sistema	
Parâmetros	Recomendação
Altura de Torre	RESOLUÇÃO ANATEL 399 e 470
Ruído Térmico	NBR 6123 e NBR 1472
Ruído de Eco - REC	Fatores Relacionados ao Sistema
Ruído devido a Polarização Cruzada - RPC e Paralela - RPP	Parâmetros
Limite total de Ruído do Sistema	Recomendação
Indisponibilidade do Sistema devido a Propagação	ITU-R P.372-8 e ITU-R P.1238-7
Indisponibilidade do Sistema devido a Falhas nos Equipamentos	ITU-R P.372-8
Disponibilidade Total do enlace	ITU-R 395-1
	ITU-T G.821
	RESOLUÇÃO ANATEL 542
	ITU-T G.25 e ITU-T G.22

B. Potência Recebida

As faixas de frequência licenciadas seguem severas condições de uso e de serviços aplicados às mesmas [3]. Dentro do escopo do trabalho de conceber um sistema operando em uma faixa de frequência licenciada apresenta-se então uma síntese das principais legislações sobre o uso específico das faixas de frequência de 3,5 GHz, 8,5 GHz e 8,5 GHz como mostra a Tabela II:

TABELA II. SÍNTESE DAS PRINCIPAIS LIMITAÇÕES RELACIONADA À POTÊNCIA RESPECTIVA DE CADA FREQUENCIA

Frequência	Faixa de Operação	Potência Transmitida	Limiar de Recepção
3,5 GHz	3400 MHz à 3600 MHz	Pr ≤ 30 W para sistemas com estações fixas	Para um BER ≤ 10 ⁻³ 4-PSK 4-QAM = - 87 dBm 16-QAM = - 84 dBm
	3400 MHz à 3550 MHz	Pr ≤ 5 W para sistemas fixos ou móveis.	Para um BER ≤ 10 ⁻⁶ 4-PSK 4-QAM = - 84 dBm 16-QAM = - 81 dBm
	3550 MHz à 3600 MHz	Pr ≤ 2 W para sistemas fixos ou móveis.	Para um BER ≤ 10 ⁻³ 64-QAM = - 72 dBm
5 GHz	4440 MHz à 5000 MHz	Pr ≤ 2 W para sistemas fixos ou móveis	Para um BER ≤ 10 ⁻⁶ 64-QAM = - 65 dBm
8,5 GHz	8275 MHz à 8500 MHz	Pr ≤ 1 W, para sistemas com estações fixas ou móveis.	Para um BER ≤ 10 ⁻³ 4-PSK, 16-QAM = - 78 dBm
			Para um BER ≤ 10 ⁻⁶ 4-PSK 16-QAM = - 75 dBm

C. Probabilidade de Outage

A determinação da confiabilidade de um link impacta na escolha dos equipamentos mais adequados para atender às necessidades do sistema. Para se determinar a probabilidade de outage de um sistema são necessárias as seguintes análises, [1 e 4]:

- Inoperância do Sistema (k): Foi utilizado neste trabalho o recomendado pela ITU-R P.530-14 que é determinado pela equação:

$$k = 10^{-4,4 - 0,0027 \times dN_1} \tag{1}$$

Onde:

dN₁ – Representa valor estatístico do gradiente de refratividade, podem ser obtidos através da Recomendação ITU-R P.453-9.

- Probabilidade do período de Inoperância total em minutos por ano: É a soma das probabilidades de inoperância em virtude do desvanecimento não seletivo e seletivo. Logo a Equação 2 que caracteriza esta relação em [dB]:

$$I_{\mu} = (P_{ns} + P_s) \times 10^2 \text{ [%]} \tag{2}$$

Onde:

P_{ns} – Representa a Probabilidade de Inoperância em razão do desvanecimento não seletivo [%];

P_s – Representa a Probabilidade de Inoperância em razão do desvanecimento seletivo [%].

- Porcentagem de Tempo com Falhas de Equipamento: representa o número de defeitos de equipamentos

terminais no ano depende basicamente das condições de funcionamento dos mesmos. A ANATEL através da resolução 542 estabelece a porcentagem de tempo máximo permitido com falhas de equipamento que é determinada pela Equação 3:

$$F = \frac{365}{MTBFr} \times a \times \frac{365}{MTBF} \times b \quad (3)$$

Onde:

- F - Representa o número de falhas no equipamento transmissor e receptor;
- a - Representa o número de transmissores no trecho considerado;
- b - Representa o número de modems no trecho considerado;
- MTBFr - Representa o tempo médio entre falhas de Tx e Rx em dias;
- MTBF - Representa o tempo médio entre falhas no modem em dias;

- Indisponibilidade Total do Sistema: Pode ser expressa pela equação 4:

$$I_{TOTAL} = (I_p + I_e + t) \% \quad (4)$$

Onde:

- I_p - Representa a indisponibilidade do sistema devido à propagação por recomendação do ITU-T G821 não deve exceder o valor de I_p = 15,2 x 10⁻⁶ % para rádio enlaces até 10 GHz;
- I_e - Representa a Indisponibilidade do Sistema devido a Falhas nos Equipamentos;
- t - Representa Tempo Total de Interrupção Devido a Falha do Equipamento [h].

II. METODOLOGIA

A metodologia proposta foi à simulação de um cenário de geração de um sinal em três frequências cujo critério de escolha da mesma partiu do princípio da verificação do uso do espectro de radiofrequência na região metropolitana de Curitiba em função da demanda de serviços e quantidade de usuários por segundo informação da ANATEL [5], [6] e [7]. Do exposto a Figura 2, ilustra o sistema de transmissão que será estudado neste trabalho:

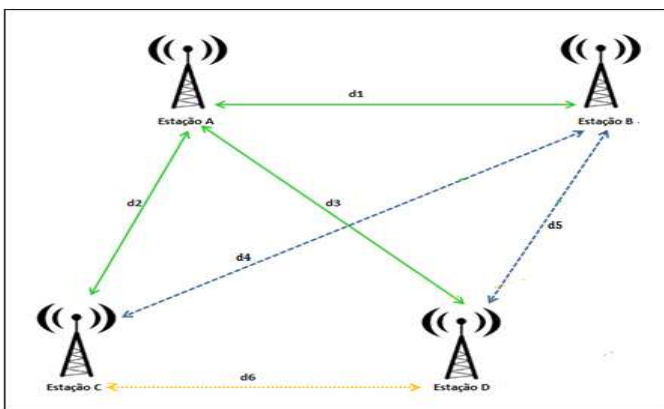


Fig 2 Sistema de Transmissão Ponto – Multiponto de Estações Fixas.

O projeto de dimensionamento do sistema terá premissa de interligação via rádio. Este tipo de enlace pode alcançar distâncias de até 50 km ou até mais estando então dentro do que se pretende para análise de caso. O desafio deste tipo de

interligação reside no problema de visibilidade das antenas, pois interligações via rádio são susceptíveis a interferências. Acredita-se então que para finalizar a convergência que permeará o estudo de caso cabe apenas o descritivo das etapas aqui elencadas como mostrarão as Figuras 3, 4, 5, 6 e 7:

• Parâmetros de Geometria

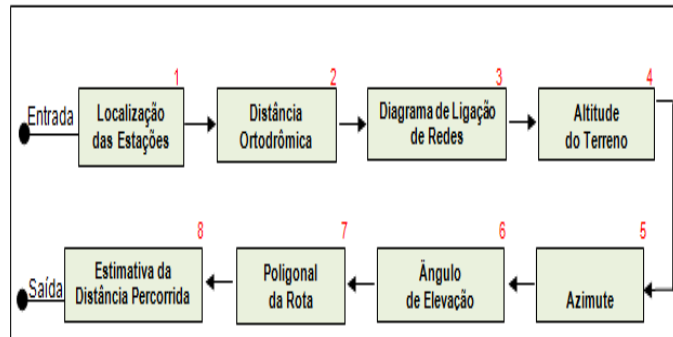


Fig. 3. Diagrama Referente aos Parâmetros de Geometria.

• Parâmetros de Potência

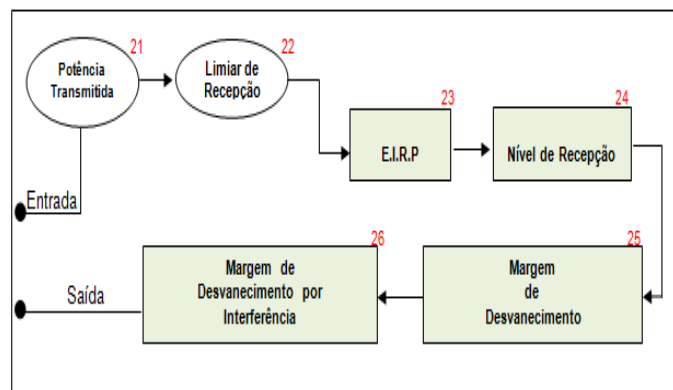


Fig. 4. Diagrama Referente aos Parâmetros de Potência.

• Parâmetros de Frequência e Propagação

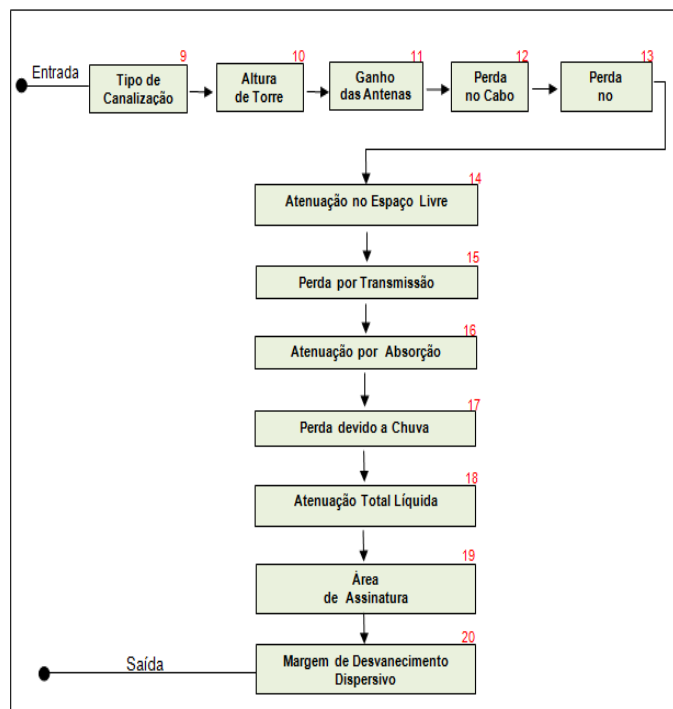


Fig.5. Diagrama Referente aos Parâmetros de Frequência e Propagação.

• **Parâmetros de Ruído**

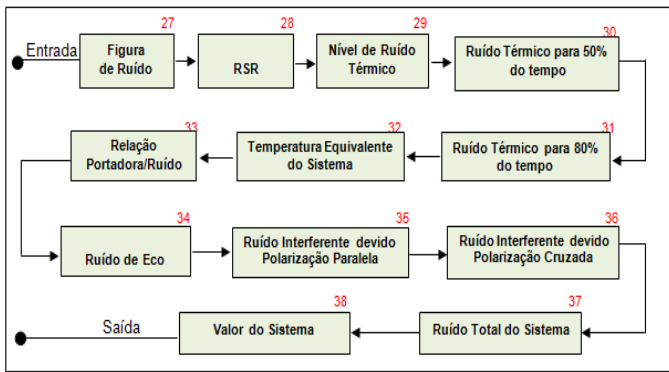


Fig. 6. Diagrama Referente aos Parâmetros de Ruído.

• **Parâmetros de Confiabilidade**

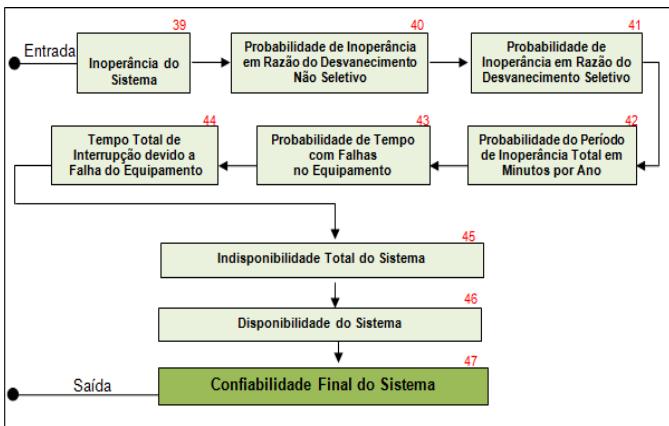


Fig. 7. Diagrama Referente aos Parâmetros de Confiabilidade.

III. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

O resultado visual dos pontos de transmissão e recepção dos links pode ser visto na Figura 8.

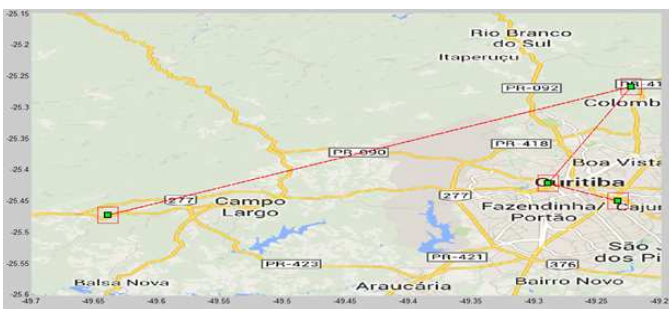


Fig. 8. Mapa da Localização das Estações Utilizando a Ferramenta MatLab.

Como o objetivo neste ponto foi a projeção de um sistema ponto multiponto (estações fixas), onde foram analisados seis links em distâncias distintas cobrindo a região urbana densa, urbana, suburbana e rural do estado do Paraná como mostra a Tabela III.

TABELA III. LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES

	Link 1 (CP-M)	Link 2 (CP-C)	Link 3 (CP-SLP)	Link 4 (M-C)	Link 5 (M-SLP)	Link 6 (C-SLP)
Ponto A Graus	Lat -25,4497°	-25,4699°	-25,4598°	-25,4216°	-25,4216°	-25,2666°
	Long -49,2339°	-49,2339°	-49,2339°	-49,2892°	-49,2892°	-49,2233°
Ponto B Graus	Lat -25,4216°	-25,2666°	-25,4722°	-25,2666°	-25,4722°	-25,4722°
	Long -49,2892°	-49,2233°	-49,6392°	-49,2233°	-49,6392°	-49,6392°

Onde:

- CP: representa a estação denominada Centro Politécnico;
- M: representa a estação denominada Mercês;
- C: representa a estação denominada Colombo;
- SLP: representa a estação denominada São Luiz do Purunã;

A Tabela IV sumariza as distâncias consideradas para análise

TABELA IV. RESULTADO DAS DISTANCIAS DOS LINKS

	Link 1 (CP-M)	Link 2 (CP-C)	Link 3 (CP-SLP)	Link 4 (M-C)	Link 5 (M-SLP)	Link 6 (C-SLP)
Distância Ortodrômica						
Δ (graus)	0,057426	0,1835708	0,3665950	0,1660419	0,3200488	0,4283745
D (km)	6,39019	20,42702	40,79323	18,47648	35,61375	47,667807

A partir das localizações das estações do sistema evidenciam-se os resultados referentes ao azimute na Tabela V.

TABELA V. RESULTADOS REFERENTES AOS AZIMUTES

	Link 1 (CP-M)	Link 2 (CP-C)	Link 3 (CP-SLP)	Link 4 (M-C)	Link 5 (M-SLP)	Link 6 (C-SLP)
Azimute em A e B (graus)						
B-A	119,5814	3,00115	86,5988	21,04584	80,97046	61,40305
A-B	299,5577	182,9966	266,4245	201,0176	260,8201	241,2248

Para os demais cálculos foram realizados os procedimentos descritos ao longo desse artigo e serão apresentados seus respectivos resultados na Tabela VI, VII e VIII respectivamente.

TABELA VI. RESULTADOS REFERENTES A FREQUÊNCIA 3,5 GHZ

	Estação A B	Estação A C	Estação A D	Estação B C	Estação B D	Estação C D
Atenuação no espaço livre	115 dB	113 dB	130 dB	119 dB	129 dB	128 dB
Perda por transmissão	61 dB	60 dB	62 dB	66 dB	68 dB	67 dB
Atenuação nos cabos	3,0 dB	4,5 dB	4,8 dB	4,6 dB	4,8 dB	5 dB
Perda por absorção atmosférica	0,0021 dB	0,0032 dB	0,028 dB	0,0027 dB	0,0025 dB	0,0035 dB
Atenuação total	64,27 dB	64,75 dB	67,15 dB	70,88 dB	74,12 dB	73,39 dB
Potência recebida	- 53 dBm	- 61 dBm	- 65 dBm	- 63 dBm	- 59 dBm	- 65 dBm
Limiar de recepção	- 81 dBm	- 81 dBm	- 81 dBm	- 81 dBm	- 81 dBm	- 81 dBm
Ruído térmico	- 105 dBm	- 105 dBm	- 105 dBm	- 105 dBm	- 105 dBm	- 105 dBm
REC	80 dB	81 dB	82 dB	83 dB	85 dB	87dB
RPP	72 dB	74 dB	71 dB	80 dB	78 dB	81 dB
RPC	67 dB	66 dB	68 dB	65 dB	70 dB	72 dB
Valor do sistema	84 dB	84 dB	84 dB	84 dB	84 dB	84 dB
MDI	78 dB	77 dB	79 dB	83 dB	85 dB	84 dB
MDD	79 dB	78 dB	80 dB	84 dB	86 dB	85 dB
Confiabilidade	99,86 %	98,85 %	97,34 %	98,59 %	97,12 %	96,45 %

* REC – Ruído de Eco, RPP – Ruído devido a Polarização Paralela, RPC – Ruído devido a Polarização Cruzada, MDI – Margem de Desvanecimento por Interferência e MDD – Margem de Desvanecimento Dispersivo.

TABELA VII. RESULTADOS REFERENTES A FREQUÊNCIA 5 GHz

	Estação A B	Estação A C	Estação A D	Estação B C	Estação B D	Estação C D
Atenuação no espaço livre	122 dB	132 dB	138 dB	131 dB	137 dB	139 dB
Perda por transmissão	68 dB	78 dB	84 dB	77 dB	83 dB	85 dB
Atenuação nos cabos	4,0 dB	4,5 dB	3,8 dB	4,6 dB	4,2 dB	4,1 dB
Perda por absorção atmosférica	0,0017 dB	0,0012 dB	0,028 dB	0,0037 dB	0,0039 dB	0,0032 dB
Atenuação total	65,32 dB	66,75 dB	68,15 dB	71,22 dB	74,12 dB	73,39 dB
Potência recebida	- 50 dBm	- 55 dBm	- 59 dBm	- 52 dBm	- 55 dBm	- 56 dBm
Limiar de recepção	- 65 dBm	- 65 dBm	- 65 dBm	- 65 dBm	- 65 dBm	- 65 dBm
Ruído térmico	- 102 dBm	- 102 dBm	- 102 dBm	- 102 dBm	- 102 dBm	- 102 dBm
REC	91 dB	89 dB	88 dB	87 dB	86 dB	87dB
RPP	74 dB	77 dB	79 dB	80 dB	82 dB	81 dB
RPC	67 dB	68 dB	60 dB	67 dB	70 dB	76 dB
Valor do Sistema	77 dB	76 dB	79 dB	84 dB	88 dB	89 dB
MDI	68 dB	65 dB	59 dB	66 dB	71 dB	74 dB
MDD	80 dB	82 dB	80 dB	86 dB	81 dB	90 dB
Confiabilidade	99,76 %	98,35 %	97,24 %	98,69 %	97,42 %	96,25 %

* Rec -- Ruído de Eco, RPP – Ruído devido a Polarização Paralela, RPC - Ruído devido a Polarização Cruzada, MDI – Margem de Desvanecimento por Interferência e MDD – Margem de Desvanecimento Dispersivo.

TABELA VIII. RESULTADOS REFERENTES A FREQUÊNCIA 8,5 GHz

	Estação A B	Estação A C	Estação A D	Estação B C	Estação B D	Estação C D
Atenuação no espaço livre	119 dB	120 dB	134 dB	126 dB	125 dB	118 dB
Perda por transmissão	66 dB	64 dB	67 dB	62 dB	67 dB	69 dB
Atenuação nos cabos	2,8 dB	3,6 dB	4,1 dB	3,5 dB	3,1 dB	5,2 dB
Perda por absorção atmosférica	0,0033 dB	0,0038 dB	0,022 dB	0,0026 dB	0,0021 dB	0,0032 dB
Atenuação total	69,27 dB	71,75 dB	68,14 dB	70,45 dB	62,22 dB	75,69 dB
Potência recebida	- 70 dBm	- 65 dBm	- 66 dBm	- 68 dBm	- 66 dBm	- 72 dBm
Limiar de recepção	- 75 dBm	- 75 dBm	- 75 dBm	- 75 dBm	- 75 dBm	- 75 dBm
Ruído térmico	- 106 dBm	- 106 dBm	- 106 dBm	- 106 dBm	- 106 dBm	- 106 dBm
REC	72 dB	76 dB	77 dB	79 dB	83 dB	87dB
RPP	82 dB	86 dB	89 dB	83 dB	85 dB	84 dB
RPC	80 dB	88 dB	80 dB	79 dB	81 dB	79 dB
Valor do sistema	72 dB	77 dB	73 dB	81 dB	85 dB	86 dB
MDI	79 dB	81 dB	74 dB	84 dB	87 dB	85 dB
MDD	81 dB	86 dB	82 dB	80 dB	87 dB	84 dB
Confiabilidade	99,55 %	99,85 %	97,99 %	99,56 %	97,32 %	98,99 %

* REC – Ruído de Eco, RPP – Ruído devido a Polarização Paralela, RPC - Ruído devido a Polarização Cruzada, MDI – Margem de Desvanecimento por Interferência e MDD – Margem de Desvanecimento Dispersivo.

IV. DISCUSSÃO

Neste trabalho procurou-se a compreensão do detalhamento das etapas que constituem um sistema de transmissão. Na sequência uma vez escolhida as três frequências de interesse foi realizada uma análise da legislação vigente que regulamenta o uso dos serviços destas frequências. Para efeito de validação criou-se o cenário de aplicação a onde toda uma análise técnica foi realizada mantendo como enfoque principal os aspectos relacionados à geometria, frequência, potência, atenuações, ruídos e a confiabilidade final de cada enlace.

Vale ressaltar que este sistema ponto-multiponto foi analisado na região de Curitiba de alta densidade (urbana densa e urbana) e zona rural. Percebeu-se neste trabalho que o uso da legislação se faz sentir prioritariamente na escolha do nível de potência, nas referências indicativas em relação ao ruído máximo permitido dentro de um sistema, bem como a aplicação de serviços, pois os mesmos não poderiam causar interferências entre usuários dentro de uma mesma canalização e, sobretudo no processo para determinar a probabilidade de *outage*, possibilitando dessa forma o cálculo referente a confiabilidade final de cada link. Mediante a este cenário foi possível observar que para todos os *links* analisados apresentou-se uma confiabilidade acima dos 95% para todas as frequências em estudo.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram abordados os principais aspectos que impactam, ou, que podem vir a impactar o desempenho de um sistema de transmissão. Uma metodologia foi desenvolvida visando à obtenção de dados que compõem um sistema multiponto e multicanal.

REFERÊNCIAS

- [1] T. M.S. Otobo e H. F. Tertuliano. “Efficiency, Reliability and Availability for 3,5 GHz Transmission Systems” In: 2014 Eighth International Conference on Next Generation Mobile Apps, Services and Technologies (NGMAST), 2014, v. I. p. 197-202.
- [2] Horácio F. Tertuliano, Metodologia de Equacionamento e Parametrização de Enlaces de Rádio Frequência, ed 1.,UFPR, volume 1, Curitiba, 2011.
- [3] F. Felice, H. F. Tertuliano, C. A. Dartora. “Análise do Desempenho de Enlaces Ponto-a-ponto na Faixa não Licenciada de 2,4GHz”. Journal of Microwaves and Optoelectronics, 2006.
- [4] E.N.Junior, T. M.S. Otobo e H. F. Tertuliano, E. C.Rolin “Performance Analysis of 380-470 MHz Band Radio Systems for Brazilian Public Security Use”. Revista IEEE América Latina, v. 13, p. 613-622, 2015.
- [5] F. Felice, H. F. Tertuliano, C. A. Dartora. “Análise do Desempenho de Enlaces Ponto-a-ponto na Faixa não Licenciada de 2,4GHz”. Journal of Microwaves and Optoelectronics, 2006.
- [6] F. Felice, H. F. Tertuliano, C. A. Dartora. “Análise do Desempenho de Enlaces Ponto-a-ponto na Faixa não Licenciada de 2,4GHz”. Journal of Microwaves and Optoelectronics, 2006.
- [7] Agência Nacional de Telecomunicações,.Resolução nº 307 de 14 de agosto de 2002: Regulamento sobre canalização e condições de uso da faixa de 3,5 GHzAgência Nacional de Telecomunicações,.Resolução nº 496 de 10 de agosto de 2010: Regulamento sobre canalização e condições de uso da faixa de 5 GHz
- [8] Agência Nacional de Telecomunicações,.Resolução nº 106 de 26 de fevereiro de 1999: Regulamento sobre canalização e condições de uso da faixa de 8,5 GHz.