

3 Propagação em sistemas via satélite

Este capítulo trata da propagação Terra-Espaço (*uplink*) e Espaço-Terra (*downlink*) para estabelecimento da comunicação entre as Estações Terrenas e os satélites geo-estacionários para frequências em Banda Ku (da ordem de 12GHz para *downlink* e 14GHz para *uplink*). O estudo da propagação em ambos sentidos da comunicação, é somente um dos componentes que está presente nos cálculos de enlace.

Os cálculos de enlace procuram realizar um balanceamento dos ganhos e das perdas associadas a uma rede de comunicações, no caso, via satélite, de forma a estimar a performance real fim-a-fim dos níveis de potência, dimensionamento das remotas e qualidade da comunicação. Para se chegar a uma resposta o mais próxima da realidade possível, um completo e detalhado estudo se faz necessário. Além disto, outros fatores devem ser considerados como os ganhos das antenas transmissora e receptora, as dimensões das mesmas e seus ângulos de elevação, as perdas associadas aos cabos, as interferências e os ruídos, além dos efeitos atmosféricos.

O que este capítulo traz é uma apresentação dos principais fatores que devem ser considerados quando de um estudo de enlace, aprofundando alguns itens quando necessário, mas não representa um estudo profundo e totalmente completo sobre todos esses fatores.

3.1 Enlace de comunicação via satélite

Os componentes básicos de um enlace satélite podem ser apresentados como se segue:

- Subida do sinal pela Estação Terrena;
- Caminho de subida até o satélite;
- Caminho de descida até a Estação Terrena;
- Descida do sinal na Estação Remota

O sinal de subida em uma Estação Terrena (HUB ou *Master*) é quase sempre compartilhado entre os vários clientes, ou seja, apesar de em algumas redes existirem equipamentos (de rede, encapsuladores IP em MPEG,

moduladores, etc...) de clientes diferentes dedicados na Estação Terrena, a combinação de cada um dos sinais se faz necessária para que seja possível a subida ocorrer na mesma antena da Estação Terrena *Master*.

A Figura 3.1 apresenta o diagrama geral com os conceitos já estudados e as Figura 3.2, 3.3 e 3.4, respectivamente, os elementos de subida de uma Estação Terrena, os elementos básicos de um satélite de comunicação, e os de descida de uma Estação Remota. Vale mencionar que o conversor de subida representado na Figura 3.2 possui características que dependem do *transponder* e do satélite.

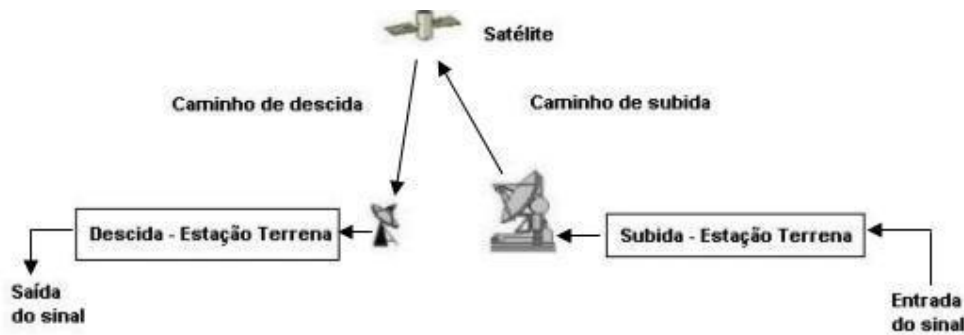


Figura 3.1: Diagrama geral de um enlace satélite

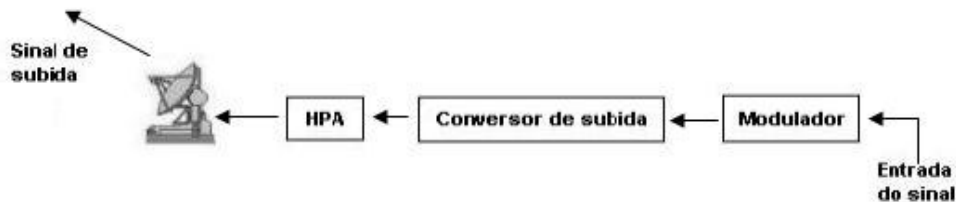


Figura 3.2: Elementos de subida em uma Estação Terrena

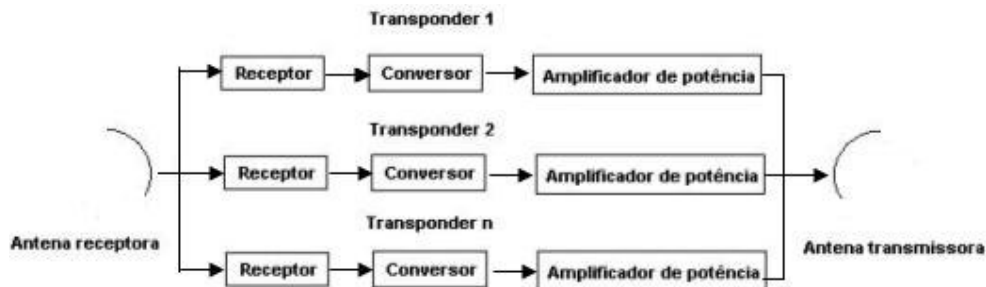


Figura 3.3: Elementos básicos de um satélite de comunicação

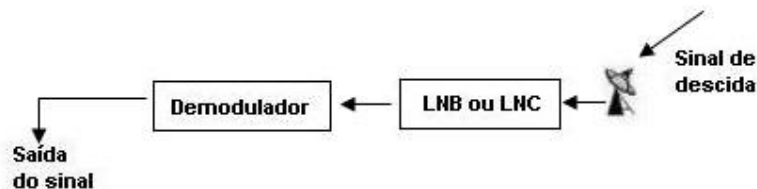


Figura 3.4: Elementos de descida em uma Estação Remota

3.2 Enlace de *uplink*

Um enlace de subida ou *uplink* de um satélite pode ser caracterizado, assim como um enlace de descida, pela composição dos seguintes elementos:

- Transmissor e antena transmissora da Estação Terrena;
- Caminho entre transmissor e receptor (atmosfera e espaço);
- Antena receptora e receptor do satélite

Um estudo de *uplink* é preparado para avaliar a performance de equipamentos em uso no enlace, para determinar a capacidade de um determinado conjunto de equipamentos, e sua contribuição para a performance global do sistema. A Figura 3.5 [52] exemplifica de uma forma bastante generalizada os níveis de potência de um *uplink*. Uma representação como esta é muito utilizada e normalmente recebe o nome de “Perfil do Enlace Satélite”, que pode ser bem mais detalhada do que a da Figura 3.5, exibindo as diversas contribuições de ganhos e perdas fim-a-fim.

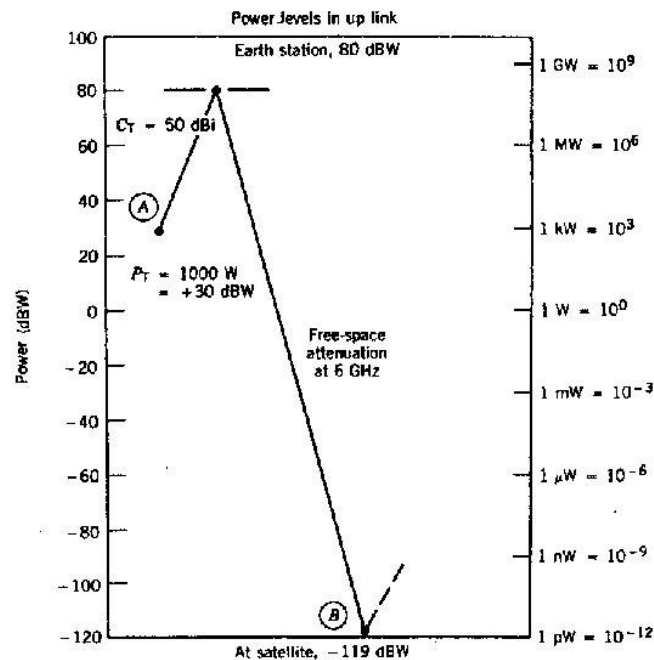


Figura 3.5: Níveis de potência no *uplink*

A Figura 3.5 traça os níveis de potência de um *uplink* típico (Terra-Espaço), onde uma estação “A” gera cerca de 1.000W ou 30dBW de potência e possui uma antena com ganho de 50dBi. Desta forma, a potência de saída da estação transmissora será de 30dBW + 50dBi = 80dBW. A atenuação de espaço livre (devido ao espalhamento do sinal) em por exemplo 6GHz (Banda C) reduz a potência para cerca de -119dBW ao chegar ao satélite “B”. O ganho

proporcionado pelo satélite eleva a potência do sinal novamente para que seja possível sua recepção na estação do usuário final.

Porém, um cálculo de enlace não é tão simples como o exemplo dado. Diversos outros fatores devem ser levados em consideração e para isso, um modelo para o cálculo dos ganhos e perdas associadas à propagação através de um meio compreendido pela atmosfera e espaço, pode ser seguido como sugere [44].

Neste capítulo, o conjunto de fatores que contribuem para os cálculos de desempenho de um enlace são apresentados. No capítulo 6, um estudo de caso procura avaliar a ocupação de segmento espacial e o dimensionamento das estações em atendimento a uma demanda de tráfego proveniente da rede WiFi onde são executadas as aplicações dos usuários finais.

Do ponto de vista de um *link budget*, a Estação Terrena é o componente onde se inicia o processo de cálculo do enlace de RF. A *Master* possui uma potência de transmissão saturada que é especificada pelo fabricante dos elementos de transmissão e é dado em dBW, após a passagem do sinal de origem pelo modulador e o conversor de subida.

A esta potência, reduz-se um valor em dB referente ao *backoff* do sistema de transmissão que é dado para um conjunto de “n” portadoras. Este parâmetro é dependente dos planos de frequência da estação e do satélite, do tamanho, número e espaçamento das portadoras, da susceptibilidade à interferência do método de modulação, das características de transferência de entrada-saída dos dispositivos não-lineares, etc. Representa quanto o ponto de operação do amplificador está afastado do seu ponto de saturação. Normalmente, assumem-se valores entre 4 e 8dB e podem ser definidos o *backoff* de entrada (BOi) e o *backoff* de saída (BOo) do amplificador.

A Figura 3.6 [52] apresenta este conceito. Para múltiplas portadoras por *transponder* tem-se um BOi = 8dB e BOo = 6dB. Quanto maior for o número de portadoras em um mesmo TPDR, maior deverá ser o valor do BOo.

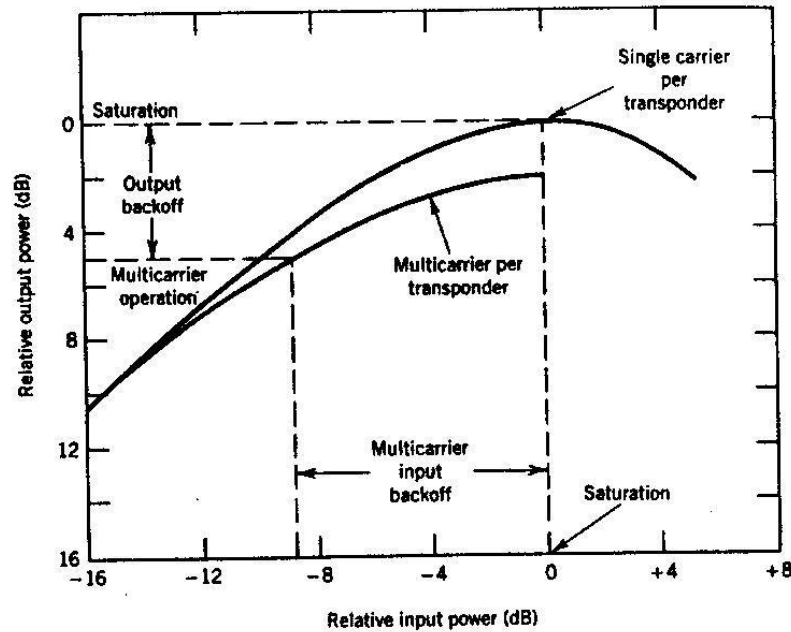


Figura 3.6: Curva de transferência de um amplificador do tipo TWT

O gráfico da Figura 3.6 acima apresenta a curva para um amplificador de potência do tipo TWT, porém, existem outros tipos e os mesmos apresentam curvas de não-linearidade diferentes entre si. Os amplificadores de potência podem ser classificados como na Tabela 3.1 [52]:

SSPA	Amplificadores de estado sólido (<i>solid state power amplifier</i>)	Para potências de saída até 100W
MPA	Amplificadores de média potência (<i>medium power amplifiers</i>) TWT (<i>travelling wave tube</i>)	Para potências entre 100W e 700W
HPA	Amplificadores de alta potência (<i>high power amplifier</i>)	Para potências de saída superiores a 700W

Tabela 3.1 – Tipos de amplificadores

Os amplificadores de estado sólido possuem uma resposta mais linear que por exemplo, os de média potência ou TWT. Este último conceito também é muito importante quando da determinação do tipo de TPDR a ser utilizado em um satélite, pois refletirá em um valor de *back-off* diferente para um caso ou outro.

Em seguida, à saída do amplificador de potência, o sinal atravessa a linha de transmissão e está sujeito às perdas associadas a este caminho. Estão incluídas as perdas devido à atenuação dos cabos e guias, as perdas de conexão, etc. Dizem respeito ainda, aos filtros, diplexadores, comutadores, combinadores, acopladores direcionais, alimentador da antena, etc. Valores típicos totais chegam a 2dB para grandes estações e 0,5dB para as de pequeno porte, como as VSATs.

A potência entregue ao sistema da antena, é submetida então a um ganho. Ganho este que está associado às dimensões da mesma, sua eficiência e a frequência de operação. O ganho da antena é expresso em dBi e pode ser representado através da fórmula geral:

$$G = \frac{4\pi A \eta_a}{\lambda^2} \quad (3.1)$$

Onde:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \text{ é a área da antena (m}^2\text{)}$$

η_a = é a eficiência da antena (%)

λ = é o comprimento de onda (m)

Representando a eq. (3.1) em termos de dB, tem-se:

$$G = 20,4 + 20 \log D(\text{m}) + 20 \log f(\text{GHz}) + 10 \log \eta_a \text{ (dBi)} \quad (3.2)$$

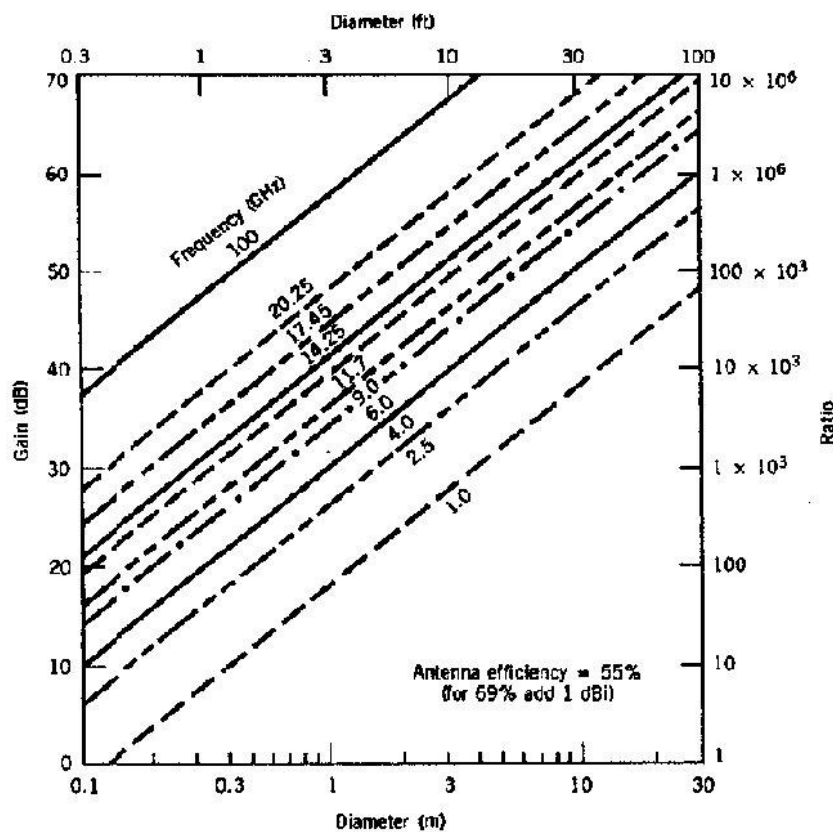


Figura 3.7 – Ganho da antena

Através da Figura 3.7 [52] pode-se identificar claramente o ganho de uma antena a partir do seu diâmetro e sua frequência de operação. Para antenas de grandes estações terrenas, como as HUBs, pode-se considerar uma eficiência da ordem de 65% a 75%. Sendo assim, se for considerada uma eficiência de

69%, deve-se adicionar 1dB ao valor encontrado no gráfico da Figura 3.7. Valores um pouco menores são encontrados em antenas alocadas para os pontos remotos.

Ao resultado de todas as contribuições, tanto positivas quanto as negativas no sistema de transmissão, dá-se o nome de EIRP, ou Potência Equivalente Isotropicamente Irradiada. Este é o valor efetivo da potência que será transmitida ao meio de propagação, onde o sinal sofrerá atenuações e interferências que degradarão o nível de potência até a chegada ao satélite, em órbita geo-estacionária. Com base no exemplo da Figura 3.8, pode-se encontrar uma potência de entrada de 10dBW e uma antena de 6m de diâmetro que levam a um ganho da ordem de 58dBi e uma EIRP de aproximadamente 67dBW. O gráfico da Figura 3.8 [52] a seguir, considera uma frequência $f = 14,25\text{GHz}$ para *uplink* e uma eficiência de 65%.

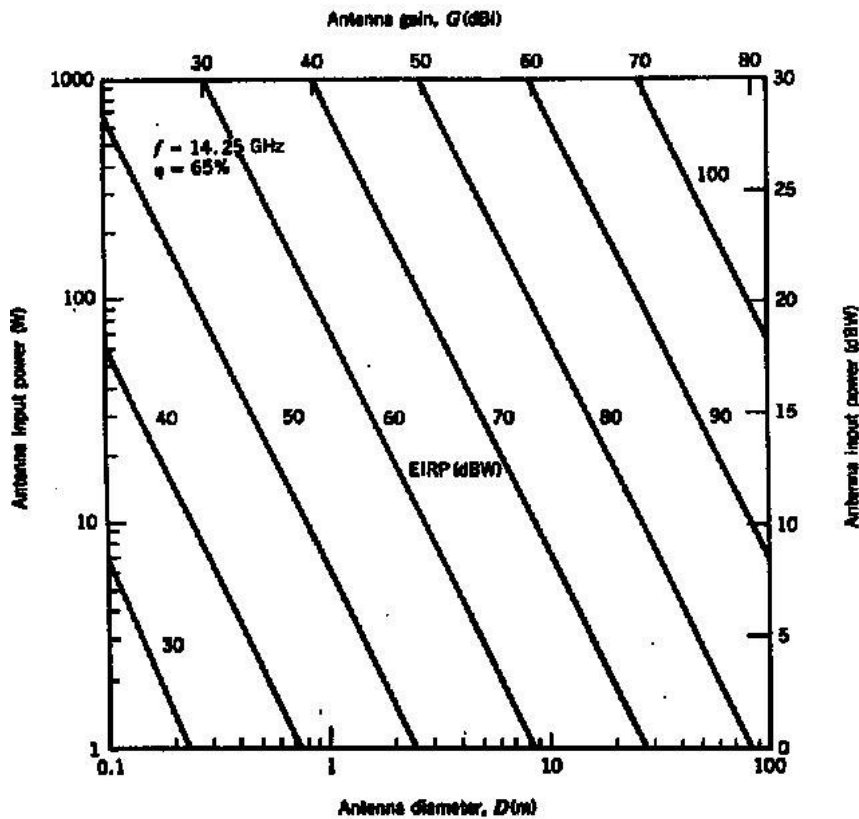


Figura 3.8 – EIRP em 14,25GHz

Além dos parâmetros que acabaram de ser apresentados, outros ainda podem e devem ser levados em consideração quando do cálculo da potência de saída de um sistema de transmissão de uma estação terrena.

O primeiro deles é a margem a ser considerada. Esta é utilizada para se levar em conta o efeito provocado pelo desvanescimento na onda transmitida

durante todo o seu caminho até o destino, seja ele da estação até o satélite, seja ele no enlace de descida. Normalmente assumem-se valores típicos de 3dB para enlaces em banda C e entre 7dB e 8dB para enlaces em banda Ku, objeto deste estudo. Estes valores permitem que a disponibilidade do link fique em torno de 99,5%, ou seja, em 0,5% do tempo o sinal será atenuado em mais que 3dB, ou 7dB a 8dB, respectivamente em banda C e Ku. [44]

Um outro fator é a perda por apontamento da antena transmissora ou receptora. Devido ao vento, neve, deformidades na fundação, etc... a antena pode perder o alinhamento com o satélite. Estações que possuem um mecanismo de “traqueamento”, não sofrem com este problema e a perda é nula para estes casos. As demais antenas, assim como as remotas, estão sempre sujeitas a este incômodo e para tal, são considerados valores típicos da ordem de alguns décimos a 1dB dependendo da largura do feixe da antena transmissora. Pode-se assumir por exemplo que, para antenas maiores de 4,5m de diâmetro, a perda é de 1dB para a transmissão e 0,5dB para a recepção. Para antenas menores que 4,5m, tem-se 0,3dB e 0,2dB para a transmissão e recepção, respectivamente.

Ainda existe a ocorrência do desapontamento das antenas devido ao movimento que o satélite realiza em sua órbita. Movimento este que também deve ser levado em conta e para tal, acrescenta-se uma perda de alguns décimos a 1dB no cálculo da potência transmitida pela estação. O valor máximo pode ser utilizado para antenas da ordem de 8m de diâmetro, e, para as demais, 0,5dB é bastante suficiente.

A interferência de satélite adjacente e a interferência de polarização cruzada não podem deixar de ser comentados aqui. O primeiro, diz respeito à existência de satélites próximos (o espaçamento atual regulamentado mundialmente é de 2° entre satélites em órbita geo-estacionária o que representa muitas centenas de quilômetros) ou mal construídos e que acabam por gerar sinais espúrios que afetam os demais sistemas de comunicação, atingindo suas estações terrenas. A sua contribuição, como perda, aumenta conforme o diâmetro das antenas cresce, desta maneira, sua contribuição nas recepções é um pouco menor que para as estações transmissoras de grande porte.

Já o segundo, este diz respeito ao transbordo de potência em outras direções de polarização e também pode ser maior conforme o aumento do tamanho da antena. A EIRP quando calculada tomando como influência todas estas condições, pode ser considerada como a EIRP de pior caso.

3.3 Terra-Espaço

Uma vez emitido por meio da antena de transmissão, o sinal inicia sua caminhada através da atmosfera e o espaço. Até sua chegada ao satélite, normalmente posicionado a 36.000Km de distância da superfície terrestre em uma órbita geo-estacionária, dependendo é claro da localização da estação transmissora (se logo abaixo da linha do satélite ou em um extremo de cobertura do mesmo) a onda propagada sofrerá diversas intempéries.

A primeira delas é a que estará presente em qualquer condição de propagação, que é a chamada “perda de espaço livre”. A mesma diz respeito à perda associada inversamente ao quadrado da distância percorrida por uma onda eletromagnética em um meio como o espaço livre e diretamente à sua frequência de operação.

Este valor é encontrado a partir da eq. (3.3):

$$A_0 = 92,44 + 20 \log D \text{ (Km)} + 20 \log f \text{ (GHz)} \quad (3.3)$$

Através do gráfico da Figura 3.9 [52], também é possível obter-se o valor para a atenuação em espaço livre. É importante que seja observada a posição da estação terrena com relação ao satélite. Caso a estação terrena esteja exatamente sob a projeção do satélite sobre a Terra, a distância a ser considerada é de $h = 35.786\text{Km}$. Caso a estação terrena esteja em uma posição tal que a borda de cobertura do satélite recaia sobre ela (no horizonte visto do satélite), a distância a ser considerada é de $H = 41.680\text{Km}$. Este segundo caso, fornece uma atenuação de espaço livre maior, obviamente. A Figura 3.10 torna imediata esta visão.

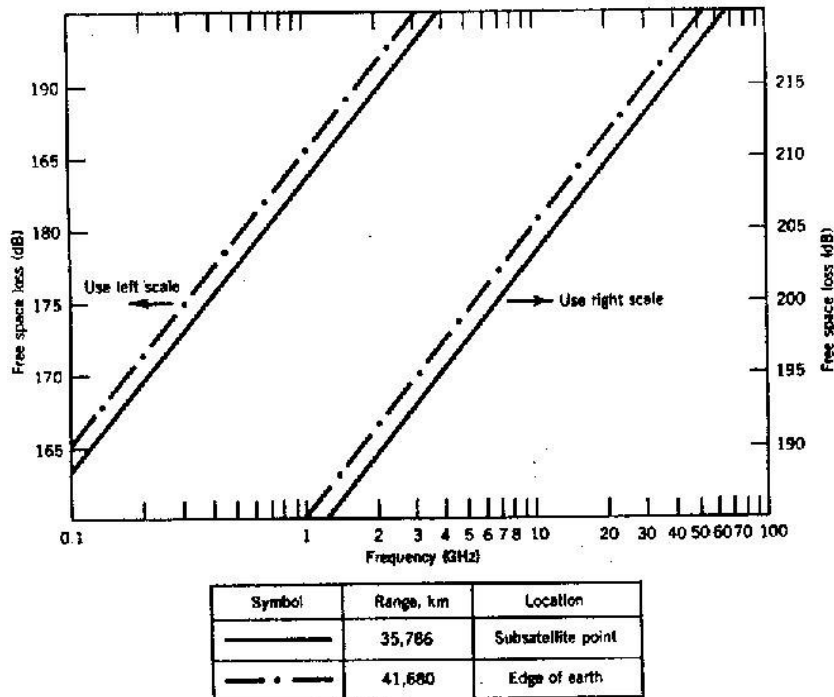


Figura 3.9 – Atenuação em espaço livre para satélites geo-estacionários

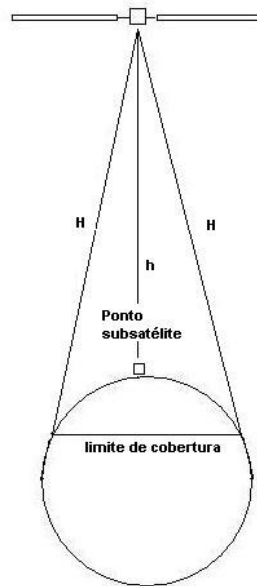


Figura 3.10 – Posição da estação terrena em relação ao satélite

Além desta perda, existem outras que estarão presentes neste tipo de meio como a perda atmosférica. Esta é proveniente das características de composição do meio atmosférico, ou ar. Sabe-se de antemão que o ar é composto por gases diversos, névoa, poluição, vapor d'água e chuva. Estes componentes atenuam o sinal que por eles atravessa, absorvendo sua energia.

Para frequências acima de 10GHz são significantes as perdas relacionadas à atenuação por chuvas e à absorção por oxigênio e vapor d'água,

pois o comprimento de onda para estas frequências passa a ser tão pequeno quanto o tamanho das partículas destes gases e passam portanto, a absorver energia. Os sistemas de comunicação via satélite que operam com frequências na faixa compreendida pela banda Ku, Ka e outras mais altas, consideram estes efeitos em seus cálculos de enlace. A Figura 3.11 [52] mostra a atenuação específica (dB/Km) associada a estas perdas. A curva que representa o nevoeiro considera uma concentração de $0,1\text{g/m}^3$. Também é apresentada a absorção por gases (oxigênio e vapor d'água).

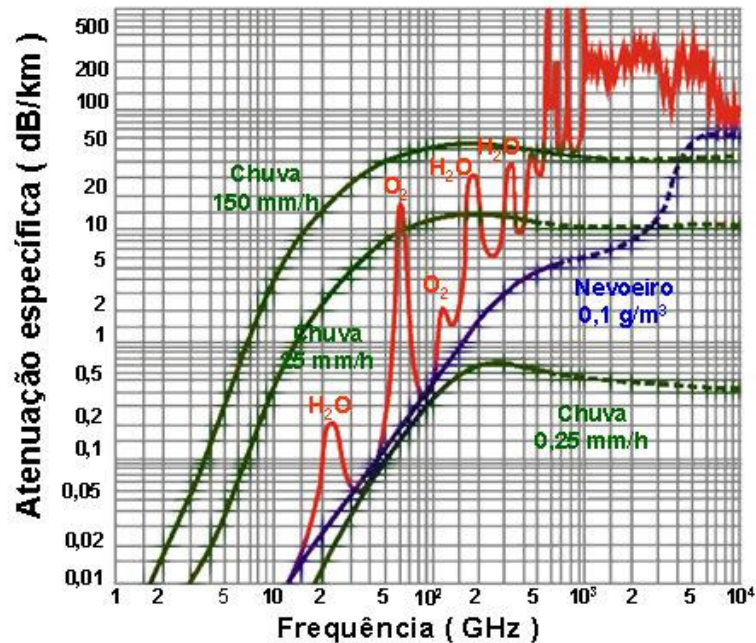


Figura 3.11 – Perdas atmosféricas

Os efeitos provocados pelas chuvas são ainda mais graves como pode ser visto no mesmo gráfico. Em comparação com a atenuação provocada pelos gases, em dB elas podem ser até 1.000 vezes mais agressivas, dependendo é claro de sua intensidade. A Figura 3.11 mostra três níveis de curva representando o efeito das chuvas, para precipitações de 0,25mm/h, 25mm/h e 150mm/h. Porém, o regime de chuvas varia de região para região em torno do planeta e também, obviamente com a época do ano. Para que seja possível realizar um estudo de enlace em uma determinada localidade, é muito importante conhecer o seu regime de chuvas. Diversos modelos são encontrados na literatura e nos órgãos de telecomunicações como a UIT, mas estes são baseados em informações bastante genéricas que por muitas vezes não refletem a verdadeira realidade.

Não é objeto deste trabalho realizar um estudo destes modelos, mas sim contribuir com informações que possam auxiliar na obtenção de resultados o

mais próximos da realidade. Para tanto, existem modelos regionalizados desenvolvidos por centros de estudo e pesquisa, baseados em medidas de campo reunidas ao longo de décadas que retratam de maneira bastante fiel essas características.

3.4 Satélite

Após atravessar todo o meio de propagação e enfrentar os intempéries, o sinal de comunicação é então recebido pela antena de recepção do satélite. Esta antena promove um ganho no mesmo, da ordem de 20dB e em seguida encaminha o sinal aos *transponders*.

Um satélite é composto por uma gama de TPDRs e cada um deles trabalha com uma determinada faixa de frequências. Cada TPDR é composto por receptor, conversor e amplificador como é visto na Figura 3.3. O conversor é utilizado para realizar a mudança entre as frequências de operação de subida do sinal e a de descida, o retorno à Terra.

O componente de amplificação do satélite é o que dá a maior contribuição para elevar o nível do sinal recebido bastante degradado. Valores alcançados podem chegar a 180dB de ganho ou ainda mais.

A temperatura de ruído do sistema de recepção do satélite é determinada para que se possa em seguida verificar a sua figura de mérito, que nada mais é que a sensibilidade da antena receptora do satélite na direção da estação transmissora. Para se chegar a um valor de ruído, é importante que seja levado em conta o ruído da antena, dos alimentadores, do próprio receptor, etc. A temperatura de ruído é dada em K (Kelvin) e pode ser expressa em dB (dBK = $10\log K$). A figura de mérito é então obtida através da relação G/T (dBi/K) e normalmente é fornecida pelo operador do satélite através dos mapas de cobertura.

Voltando à questão do posicionamento da estação terrena sob a cobertura do satélite, quando a mesma não está alinhada com o centro do feixe de descida, deve ser introduzida uma perda associada a esta diferença. A esta perda, dá-se o nome de *off-beam center loss*.

Por fim, deve-se considerar um valor de *backoff* (redução da intermodulação) que está relacionado aos TPDRs do satélite e extrair a EIRP efetiva do satélite a partir da EIRP de saturação. A EIRP de saturação pode ser obtida a partir dos mapas de cobertura do satélite, buscando utilizar o valor correspondente ao ponto de recepção. Este é um valor que não muda no sentido

da recepção, ao contrário do que ocorre no sentido da transmissão, estação-satélite.

Com o valor para a EIRP efetiva, é possível determinar mais um parâmetro bastante importante quando da determinação de um link budget. É o nível de iluminação do satélite ou densidade de fluxo de potência (DFP) expresso em dBW/m². Para o cálculo, deve-se seguir a eq. (3.4):

$$\text{DFP} = \text{EIRP} - k \text{ (dBW/m}^2\text{)} \quad (3.4)$$

Onde:

$k = 163,3$ para pontos no extremo da curvatura da Terra com cobertura satelital

$k = 162,0$ para pontos diretamente abaixo do satélite

3.5 Espaço-Terra

O sentido de comunicação do *downlink* é basicamente o inverso do *uplink*. Os transmissores do satélite geralmente utilizam valores de potência muito abaixo dos utilizados pelas estações terrenas (inclusive por este motivo é que são utilizadas frequências menores para *downlink* do que para o *uplink* – 12GHz e 14GHz em Banda Ku) e precisam amplificar um quantidade bastante grande de sinais devido à subdivisão de determinada faixa do espectro em diversos *transponders* ao contrário das estações remotas que manipulam apenas um sinal na transmissão.

Novamente, uma atenuação é então introduzida no enlace devido à propagação em espaço livre e aos efeitos atmosféricos. Vale mencionar, que quanto maior for a região a ser percorrida pelo sinal em presença de chuva por exemplo, maior será a atenuação imposta ao mesmo. É curioso observar também que, pode haver a situação em que uma estação terrena, recebendo ou transmitindo o sinal esteja em uma localidade com bom tempo, mas que durante o percurso das ondas eletromagnéticas, em algum lugar está uma coluna de chuva. Neste caso, apesar da estação não estar diretamente sofrendo a ação das chuvas, o sinal atravessa uma localidade que está tendo este impacto e assim a disponibilidade do enlace cai, às vezes sem se saber exatamente o porquê. O risco deste problema ocorrer é maior com remotas instaladas com baixo ângulo de elevação.

3.6 Estação Terrena

Um parâmetro bastante importante quando do cálculo de um enlace via satélite é a chamada figura de mérito de uma estação. Este parâmetro é representado pela razão entre o ganho associado à antena em análise e o somatório de todos os ruídos que a ela influenciam, ou seja, a temperatura de ruído do sistema (T_s). Assim, tem-se G/T_s .

Para o cálculo da figura de mérito de um sistema de recepção, é preciso primeiramente definir o ganho G (dBi) e a temperatura de ruído do sistema (T_s).

O ganho da antena pode ser descrito como o da eq. (3.2). Já a temperatura de ruído do sistema, esta é dependente de uma série de fatores que contribuem para a determinação de um valor final de T_s em Kelvin (K). Basicamente, o ruído do sistema pode ser subdividido em: ruído térmico (subida e descida), ruído de intermodulação (estação terrena e TPDR) e interferência (subida e descida).

Com alguma simplicidade, pode-se dizer que o ruído de intermodulação é causado pelas frequências resultantes da diferença entre as diversas portadoras que entram em um amplificador. Se f_1 e f_2 são frequências de duas portadoras distintas, as mesmas sofrerão da interferência resultante dos seus produtos de intermodulação $2f_2 - f_1$, $2f_1 - f_2$, $3f_2 - 2f_1$, etc...além de compartilharem a potência do amplificador.

A inserção de um filtro procura eliminar os harmônicos de uma única frequência reduzindo a intermodulação. Este filtro possui um parâmetro denominado de fator de *roll-off* que molda os extremos da curva representada pelo filtro e sua capacidade de eliminar as frequências indesejadas. Uma determinada portadora, centrada em uma frequência específica, ocupa uma faixa no espectro de frequências e para que seja minimizado o efeito da intermodulação, a mesma deverá estar afastada de tal maneira que o filtro seja capaz de eliminar a maior parcela de contribuições negativas. Assim, pode-se expor a expressão $E = B(1 + \alpha)$, onde E é o espaçamento entre as portadoras, B é a banda ocupada por uma portadora e α é o fator de *roll-off*.

Além disto, o uso do *back-off* também contribui favoravelmente. Para o caso em que é utilizada somente uma portadora, não há intermodulação e não haveria a necessidade do uso do *backoff*, porém, de uma forma geral, utiliza-se 1dB para o mesmo. Uma forma de se utilizar valores menores de *backoff* quando em presença do ruído de intermodulação, é através do emprego de

linearizadores que transformam uma curva típica como a da Figura 3.6 aumentando a região linear de trabalho.

Na Figura 3.12 [52] a seguir, são apresentados os fatores que contribuem com a magnitude de T_s .

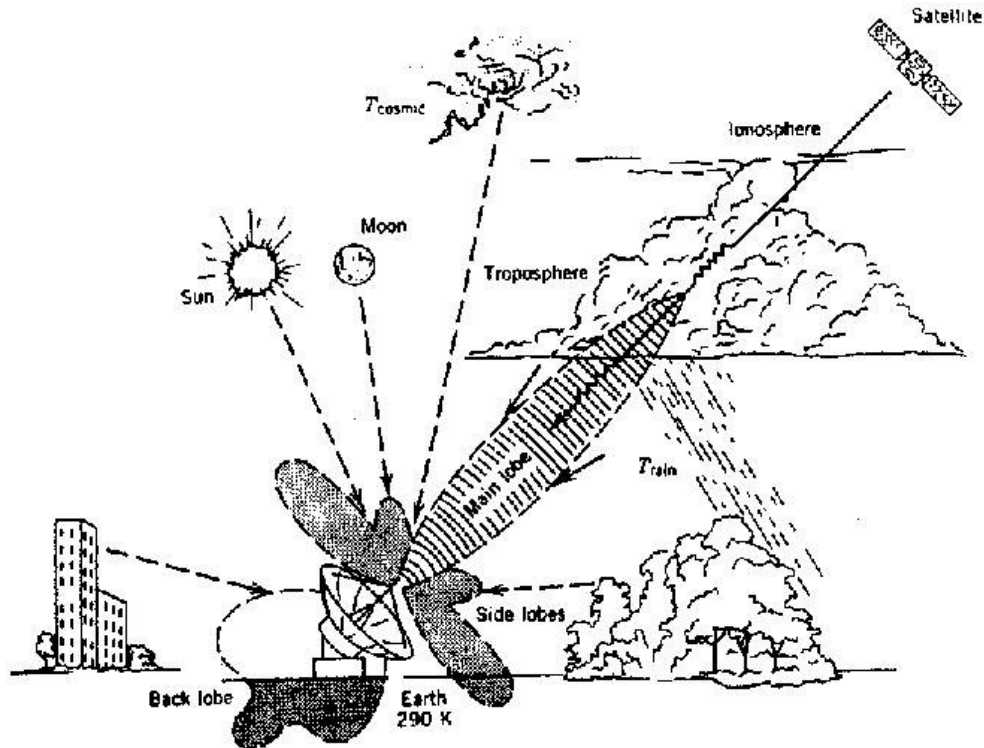


Figura 3.12 – Influências sobre T_s de um sistema de recepção

Como é apresentado através da imagem acima, existe a temperatura de ruído inerente à Terra (290K), o ruído cósmico (constante em 2,76K), a temperatura de ruído devido à precipitação (T_{atrop}), dos componentes da antena de recepção, da linha de transmissão, os ruídos troposféricos, os associados às construções próximas, o solar, o lunar e o galático que varia conforme a frequência e direção de operação. Para frequências acima de 4GHz, o ruído galático pode ser desprezado [52].

Para os ruídos cósmico, galático e da Terra, podem ser utilizados os valores mencionados acima entre parênteses. A temperatura de ruído troposférico varia conforme o ângulo de elevação da antena e da frequência de operação, como pode ser observado na Figura 3.13 [52]. Ao fixarmos um valor para o ângulo de elevação, teremos que com o aumento da frequência de operação, a temperatura de ruído troposférico se eleva. O mesmo vale para o caso em que se fixa uma frequência e reduz-se o ângulo de elevação da antena; o ruído aumenta.

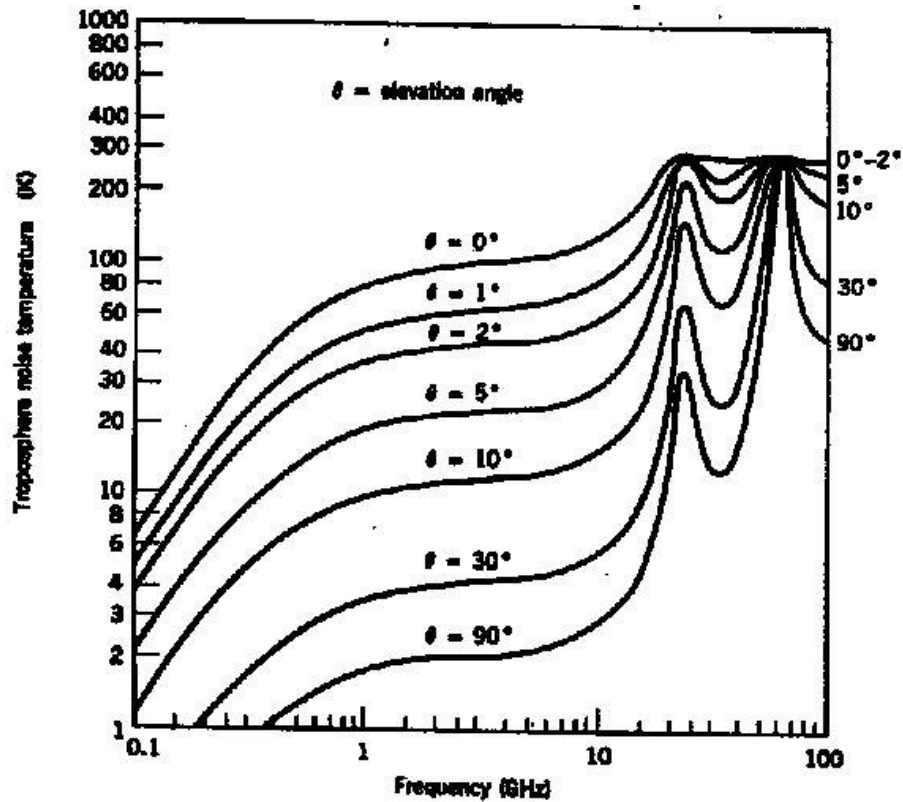


Figura 3.13 – Temperatura de ruído troposférico

A precipitação pode ocorrer de diversas formas: névoa, chuva, neve ou granizo. Onde para frequências entre 10GHz e 20GHz somente a chuva é considerada e acima disto também a névoa. A neve normalmente não causa atenuação considerável, a menos que se acumule na superfície da antena criando uma nova superfície refletora que distorce o diagrama da antena e seu ganho. Hoje, existem sistemas de antenas que impedem a formação de gelo e o acúmulo de neve no seu refletor.

A precipitação por chuva causa um aumento na temperatura de ruído além de atenuar o nível de sinal. A eq. (3.5) utilizada para estimar este valor de ruído é a que segue:

$$T_{aten} = T_m \left[1 - 10^{-(L_{aten}/10)} \right] \quad (3.5)$$

Onde:

T_m = temperatura de ruído da Terra = 290K

Como forma de encontrar os valores de L_{aten} em um cenário de chuva intensa, pode-se utilizar a Figura 3.14 [52]. A mesma considera uma antena apontada segundo um ângulo de elevação de 30°. Tomando um estudo para banda Ku, pode-se montar a Tabela 3.2 [52] para uma precipitação da ordem de 40mm/h, considerando-se os lóbulos principal, lateral e traseiro.

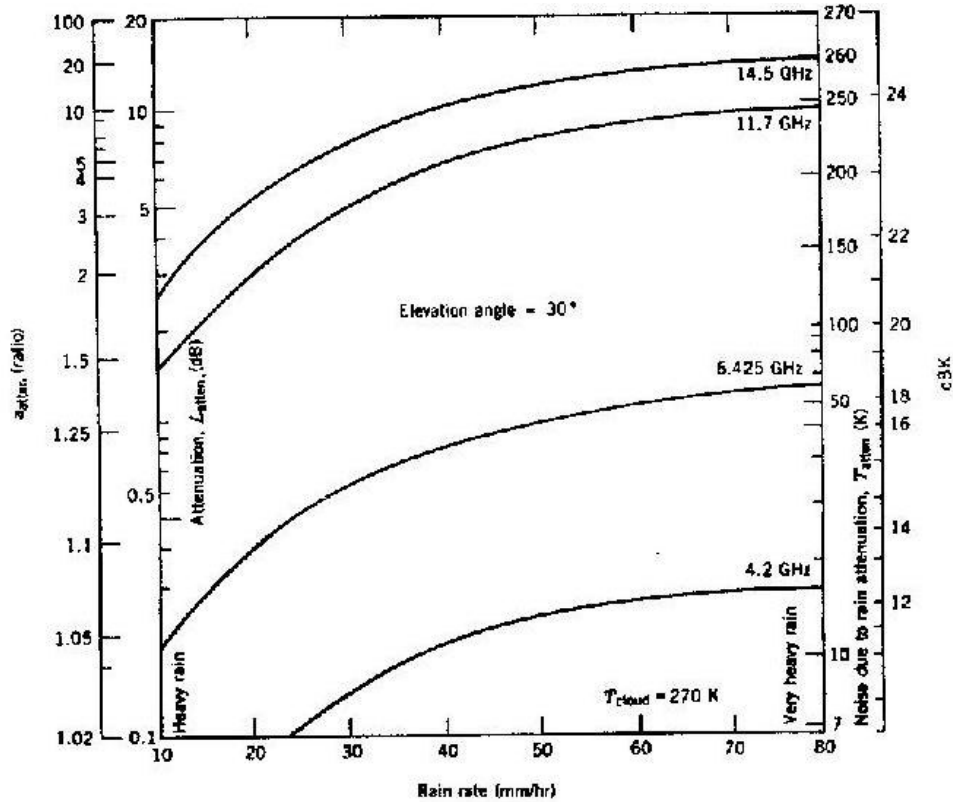


Figura 3.14 – Temperatura de ruído *versus* atenuação por chuvas intensas

Elemento	Lóbulo	Temperatura (K)	Fator peso	Temperatura final (K)
Ruído de precipitação atmosférica devido às fortes chuvas (40mm/hr) em 12GHz	Principal	215	1	215
	Lateral	290	0,05	14,5
Terra e objetos	Traseiro	290	1	29
	Principal	3	0,8	2,4
Ruído Galáctico	Lateral	3	0,05	0,15
	Temperatura efetiva T_{ant} em 12GHz			261

Tabela 3.2 – Temperatura efetiva de ruído da antena para chuvas intensas

A temperatura de ruído originária da presença do Sol pode ser observada através da Figura 3.15 [52] quando o Sol está posicionado na direção do apontamento da antena, para frequências de 4GHz e 12GHz. Sabe-se que conforme o diâmetro da antena aumenta, a largura do feixe da mesma diminui e consequentemente o efeito do Sol aumenta. Conforme a posição do Sol em relação à antena se altera, o ruído solar é reduzido enquanto ele se afasta do lóbulo principal, mas durante os ventos e explosões solares, a temperatura de ruído é enormemente maior que os casos comuns.

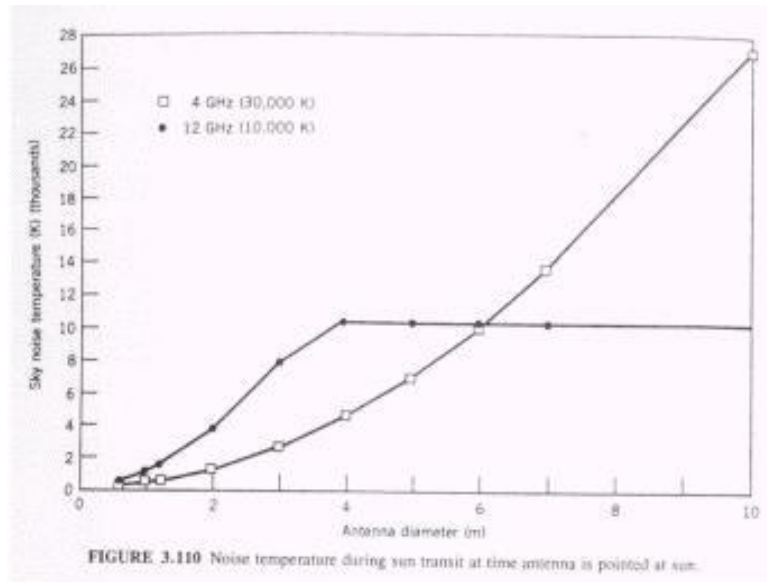


Figura 3.15 – Temperatura de ruído devido à presença do Sol

No que diz respeito à contribuição que a linha de transmissão que conecta a antena ao receptor proporciona, esta é devido às perdas que estão associadas a ela. A soma das perdas do guia de onda, cabos, conectores, junções, etc...chegam a 0,25dB; o que corresponderia a 15K. A temperatura de ruído da antena varia conforme o ângulo de elevação e suas dimensões. Para uma antena de 2,4m trabalhando em banda C por exemplo, pode-se assumir valores com cerca de 35K, mas para banda Ku, o valor a ser considerado é maior. A combinação da temperatura de ruído da antena e da linha de transmissão na entrada do receptor pode ser expressa por:

$$T = \left(\frac{T_{ant}}{a_r} \right) + T_R \left[\frac{(a_r - 1)}{a_r} \right] \quad (3.6)$$

Onde:

$$T_R = 290K$$

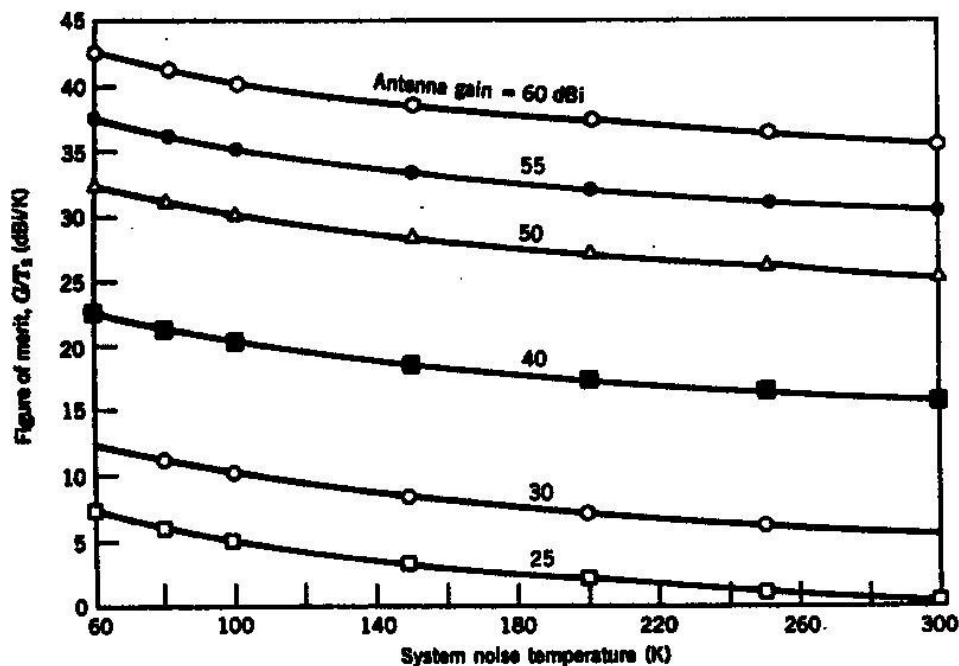
a_r = pode ser obtido na Tabela 3.3 [52]

Atenuação da linha L_{line} (dB)	a_r	T_{line} (K)
0,05	1,01	3,3
0,10	1,02	6,6
0,20	1,05	13,1
0,22	1,05	14,3
0,25	1,06	16,2
0,30	1,07	19,4
0,50	1,12	31,5
0,70	1,17	43,2
1,00	1,26	59,6
2,00	1,58	107,0
3,00	2,00	144,7

Tabela 3.3 – Temperatura da linha *versus* atenuação da linha

Há ainda uma parcela a ser considerada que diz respeito à temperatura de ruído do amplificador na recepção. Este, para banda C pode ter valores da ordem de 25K, porém, para banda Ku, este valor é muito maior.

Consolidando as contribuições vistas até aqui, a figura de mérito G/T_s do sistema de recepção de uma estação terrena pode ser encontrada através do gráfico da Figura 3.16 [52] a partir do ganho da antena em dBi e da temperatura de ruído do sistema.

Figura 3.16 – G/T_s *versus* T_s para diversas antenas

A Tabela 3.4 [52] fornece valores típicos para as várias temperaturas de ruído para antenas com ângulo de elevação de 30° com uso de amplificadores paramétricos e a Figura 3.17 [52] apresenta a combinação de T_s e o diâmetro da antena para alcançar um dado G/T_s .

Frequência (GHz)	Condição de céu	T_{ant} (K)	T_{atten} (K)	Perda na linha (dB)	T_{line} (K)	T_s (K)	T_s (dBK)
11,7	Chuva forte (30mm/hr)	40	170	0,1	7	317	25,0
11,7	Céu claro	40	0	0,1	7	147	21,7

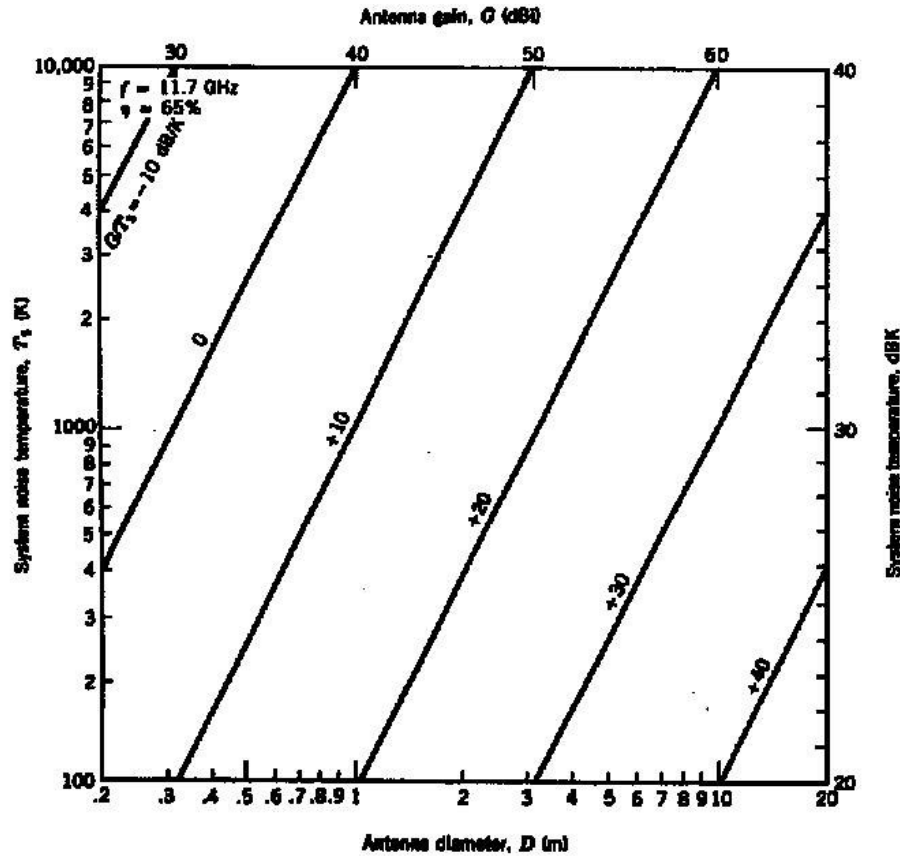
Tabela 3.4 – Valores típicos para T_s em 11,7GHz

Figura 3.17 – Figura de mérito para a faixa de 11,7GHz

Antenas grandes são mais caras, mas conseguem uma boa relação G/T_s , enquanto que as antenas menores são mais baratas mas requerem um bom amplificador de baixo ruído.

Assim, este capítulo procurou apresentar de uma maneira objetiva e resumida, as principais contribuições existentes em um cálculo de enlace via satélite. Para a determinação de um *link budget* preciso, um estudo bastante profundo deve ser realizado quando dos elementos que contribuem de alguma maneira com o resultado final do cálculo. O entendimento completo dos seus efeitos por si só já é insumo para um novo trabalho de pesquisa.