



Universidade Federal de Uberlândia

– Material extra de estudo em RF –

Termos, conceitos, nomenclaturas e medidas¹**Eletrônica de radiofrequência***Prof. Alan Petrônio Pinheiro*

Faculdade de Engenharia Elétrica

Curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações

Versão 1.0 – primeiro semestre de 2019

Apresentação

Este material resume em um só documento alguns dos termos, conceitos e medidas frequentemente usadas na área de Eletrônica de Radiofrequência. Trata-se de um “**dicionário básico de termos para RF**”. Outros documentos complementares a este, disponíveis na página desta disciplina de graduação, também tratam de medidas que por serem largamente usadas, como a decibel (dB), mereceram um documento a parte. Todos estes documentos de ensino fazem parte da série “*Material extra de estudo em RF*”.

Ainda, por este ser um material resumido, cujo propósito principal é introduzir de forma básica estes termos ao estudante, recomenda-se a busca por material mais específico em caso de interesse de informações mais aprofundadas. A ordem com que são tratados os termos é completamente aleatória. Por fim, como alguns conceitos as vezes tem diferentes nomenclaturas, tentou-se ao máximo abranger estas diferentes nomenclaturas inclusive inserindo-se algumas vezes estas em sua versão inglesa.

¹ A autoria deste material é diversa tendo inclusive a colaboração de estudantes de graduação da disciplina de Eletrônica de RF.

Sumário dos termos

RUÍDO DE FASE OU PUREZA ESPECTRAL (<i>PHASE NOISE</i> OU <i>SPECTRAL PURITY</i>).....	3
FAIXA DINÂMICA (<i>DYNAMIC RANGE</i>)	5
RUÍDO (<i>NOISE</i>).....	7
LINK BUDGET	8
STANDING WAVE RATIO (SWR)	9
IP3 – THIRD-ORDER INTERCEPT POINT.....	11
DIAGRAMA DE OLHO (<i>EYE DIAGRAM</i>).....	12
RELAÇÃO SINAL RUÍDO (SNR - <i>SIGNAL TO NOISE RATIO</i>).....	14
INTERMODULAÇÃO (INTERMODULATION).....	16
RECEIVED SIGNAL STRENGTH INDICATION (RSSI)	16
DENSIDADE ESPECTRAL (<i>SPECTRAL DENSITY</i>).....	16
RESOLUÇÃO DE LARGURA DE BANDA (<i>RESOLUTION BANDWIDTH</i>)	16
RUÍDO TÉRMICO (<i>TERMAL NOISE</i> OU <i>JOHNSON NOISE</i>).....	16
FIGURA DE RUÍDO (<i>NOISE FIGURE</i>).....	16
DENSIDADE DE RUÍDO (<i>NOISE DENSITY</i> OU <i>NOISE FLOOR</i>).....	17

Ruído de fase ou pureza espectral (*phase noise* ou *spectral purity*)

Refere-se ao ruído presente em um sinal de portadora (*carrier signal*) devido à variações de fase ou frequência no sinal desta portadora. O ruído é geralmente próximo a frequência/fase da portadora e é medido em decibéis relativa à portadora (*carrier*) ou dBc/Hz (o "c" refere-se a 'carry').

Esta medida é avaliada no domínio da frequência e pode indicar flutuações rápidas e/ou aleatórias na fase e/ou frequência. Quando estas variações são de frequência vistas no domínio do tempo elas também podem ser chamadas de **jitter**. Na área de RF é comum o uso deste termo para avaliar o comportamento de um oscilador. A Figura 1 ilustra esquematicamente seu significado.

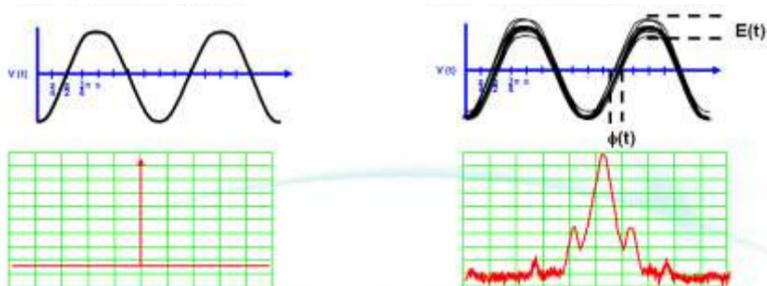


Figura 1 – Sinal ideal sem variações de fase e frequência (esquerda) e seu respectivo espectro. E sinal real com variações de frequência e fase que causam um espalhamento da energia do sinal em outras frequências do espectro (direita).

Na figura da esquerda, percebe-se um sinal “puro” sem variações de frequência ou fase. Naturalmente que seu espectro vai estar concentrado em um único valor. Mas no mundo real, é mais comum encontrarmos um sinal similar ao que se vê na figura da direita. Observe que vários ciclos foram sobrepostos na imagem para mostrar as variações de frequência e de fase. Esta variação é representada no espectro com o surgimento de outras componentes de frequência. Quanto maiores as variações, maiores as energias destas componentes próximas a frequência principal (de maior energia) com quem idealmente o oscilador deveria oscilar.

A variação da oscilação (ou ruído da oscilação) contém diversas componentes de frequência. As variações da amplitude também têm características randômicas. Desta forma, este ruído é descrito em termos estatísticos. Uma vez que sua amplitude tem uma amplitude média, o ruído pode ser expresso em valores RMS. A Figura 2 mostra (esquerda) o ruído de fase da portadora representado em um gráfico fasorial em uma região de “incerteza”. A distribuição estatística do ruído de fase é mostrada na direita.

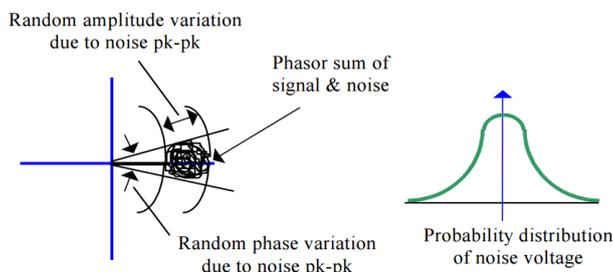


Figura 2 – Representação do ruído de fase na forma fasorial (esquerda) e sua distribuição estatística (direita).

Pare entender um dos problemas ocasionados pelo ruído de fase, considere que um oscilador de um transmissor apresenta algum ruído de fase. Neste transmissor, tanto o sinal de portadora gerado pelo oscilador quanto seu ruído são amplificados pelos estágios de ganho dos circuitos que estão após o oscilador. Assim, tanto o sinal desejado quanto o ruído amplificado podem (se não forem filtrados) ser enviados para a antena e assim serem transmitidos. Assim, o sinal desejado é rodeado por um conjunto de frequências de ruído originárias do ruído de fase do oscilador local do transmissor. Assim o ruído gerado pode se espalhar e mascarar outros canais de comunicação como ilustrado na Figura 3.

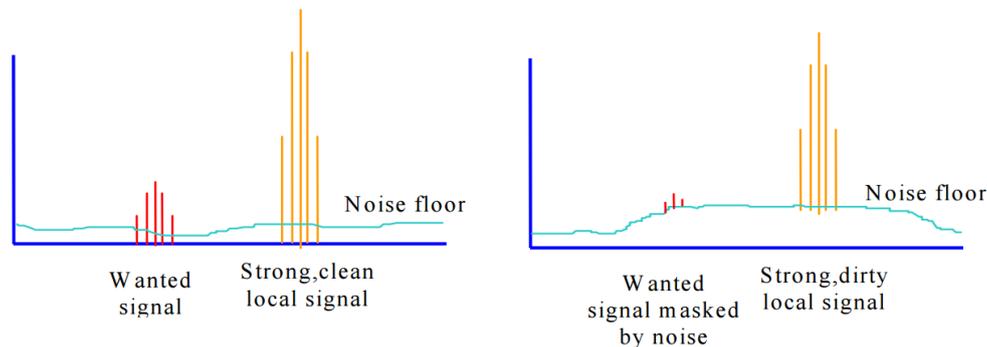


Figura 3 – Ilustração de como um ruído de fase pode prejudicar uma comunicação invadindo, inclusive, outros canais e prejudicando ou mascarando outras fontes de informações adjacentes no espectro.

Conforme ilustração da Figura 4, o cálculo de ruído de fase é dado pela relação:

$$L(f) = \frac{\text{Área da largura de banda de 1Hz}}{\text{Área total sob a curva}} \text{ [dBc/Hz]}$$

Desta forma, analisa-se uma determinada área de largura de banda de 1Hz a uma frequência de f Hz a partir da portadora. Esta área deve ser dividida pela potência total do sinal. Algumas vezes, esta medida resultante é plotada usando uma relação logarítmica em termos de frequência.

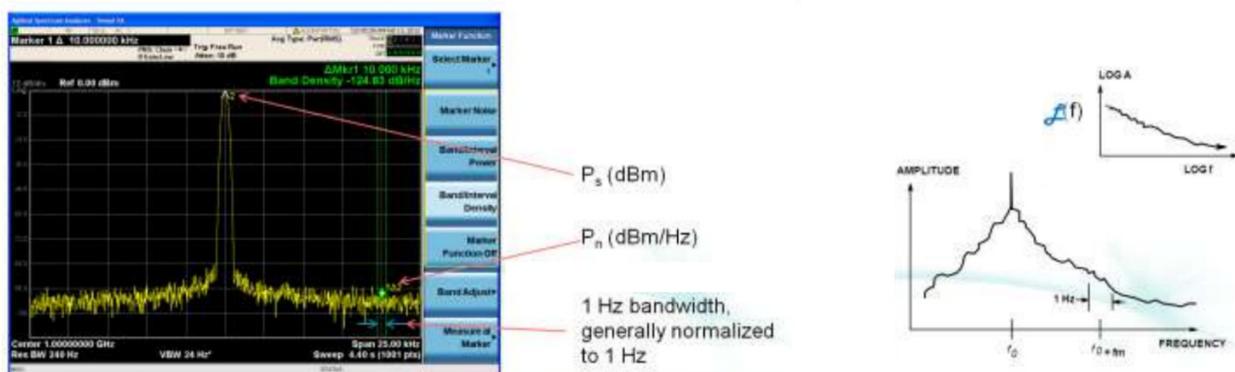


Figura 4 – Ilustração do cálculo da figura de ruído de um espectro.

Faixa dinâmica (*dynamic range*)

A faixa dinâmica ou *dynamic range* é um parâmetro importante nos sistemas eletrônicos de RF. Tomando por base a Figura 1 podemos notar que temos a faixa dinâmica (*Dynamic Range*) que é a razão entre o menor nível de sinal e o maior nível de sinal e a faixa dinâmica livre espúria (*Spurious Free Dynamic Range*) que é a faixa dinâmica livre de componentes indesejados, esses componentes serão tratados adiante.

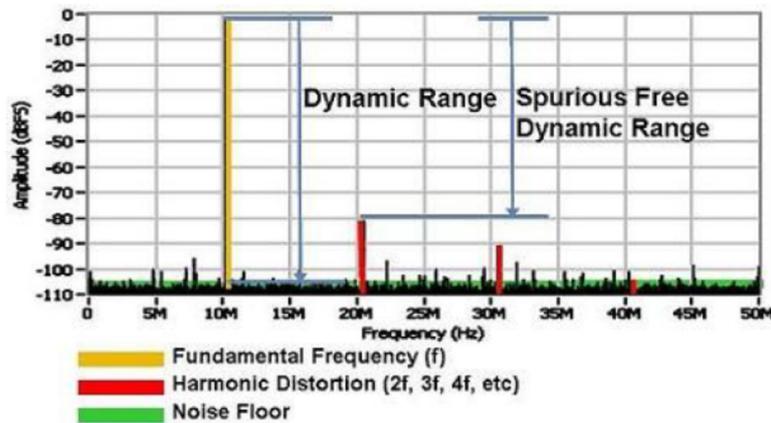


Figura 1 – Ilustração da faixa dinâmica.

A faixa dinâmica se trata de um parâmetro tipicamente mensurado em decibéis (dB) e pode ser interpretado como sendo a faixa de níveis de sinal na qual o sistema pode operar. O limite inferior da faixa é regido por sua sensibilidade, enquanto na outra extremidade é governado por sua capacidade de sobrecarga.

Vamos analisar esses limites (ou os parâmetros associados a eles) separadamente para compreender melhor essa faixa conforme segue:

- **Sensibilidade:** o principal parâmetro que determina o limite inferior é a sensibilidade. Para especificações de faixa dinâmica o chamado sinal mínimo discernível ou *minimum discernible signal (MDS)* é quem deve ser avaliado, que é normalmente dado em dBm, se trata de um valor mínimo para o funcionamento do sistema. Em outras palavras, qual é o valor mínimo de sinal que o sistema ainda consegue interpretar. Contudo vale destacar que esta análise (do sistema) não deve levar em conta apenas a sensibilidade. Outros parâmetros também devem ser analisados de forma conjunta. Por exemplo, a relação sinal-ruído (SNR) deve ser usada para mensurar a eficiência de um sistema e as condições que o sinal deve atender para que possa ser corretamente decodificado, por exemplo.
- **Produtos de terceira ordem:** isto geralmente acontece quando temos um sinal muito forte. Ele está relacionado à presença e mistura das harmônicas dos sinais dentro da banda de análise. Por exemplo, considere duas frequências principais f_1 e f_2 . A mistura destas frequências (ou melhor, de suas harmônicas) é $(2f_1 - f_2)$, $(3f_1 - 2f_2)$, $(4f_1 - 3f_2)$, ... e assim por diante. Esse fenômeno pode ser visto na Figura 2 e aparecem justamente

porque os sinais são fortes (e suas harmônicas, também, por consequência e quando existirem).

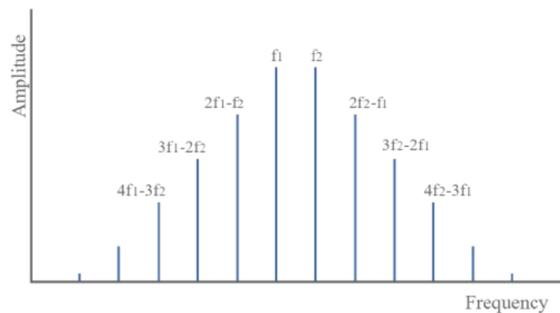


Figura 2 - Frequências principais e misturadas de f_1 e f_2 .

- **Bloqueio** : é um outro fator que ocorre quando um sinal forte está presente, um sinal forte bloqueia ou reduz a sensibilidade de um receptor por exemplo, a quantidade desse bloqueio depende diretamente da intensidade do sinal, esse efeito pode ser observado quando temos um sinal em um receptor e liga-se um transmissor com alto nível de sinal próximo a esse receptor, esse transmissor “captura” a entrada do receptor e inibe os sinais em outras frequências de menor amplitude.
- **Ponto de interceptação**: Idealmente a saída de um amplificador de RF deveria ser proporcional à entrada em todos os níveis de sinal. Porém nota-se que esses amplificadores possuem uma capacidade de saída limitada, e para valores maiores que esse limite a saída cai abaixo do nível requerido. Deste modo, pode-se dizer que os amplificadores de RF são lineares para valores inferiores a esse limite. Como os estágios de saída não conseguem lidar com valores de potência mais altos, os sinais começam a ficar comprimidos. Com base na Figura 3 pode-se observar que até um certo limite de amplitude da entrada o amplificador se comporta de forma linear. A partir desse limite começa a trabalhar sob compressão e sua amplitude de saída não são lineares.

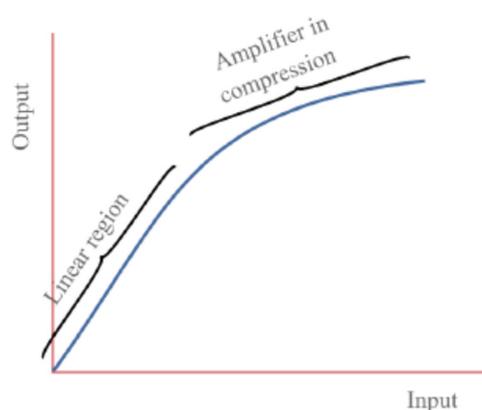


Figura 3 - Curva característica de um amplificador, evidenciando a região linear e a região em compressão

Pode-se observar que são vários os aspectos para se levar em conta no projeto de um sistema que tenha uma ampla faixa dinâmica.

Ruído (*noise*)

Existem diferentes tipos de ruídos. O ruído por sua própria definição tem características aleatórias. Ele se estende de variadas formas através de todo espectro de frequência, mas não necessariamente na mesma amplitude. O ruído pode ser classificado em diferentes categorias de acordo com a distribuição de frequências a saber:

- **Ruído branco:** semelhante a luz branca que inclui energia em todas as cores, o ruído que tem sua potência distribuída uniformemente por todas as frequências. A densidade espectral de potência do ruído branco é proporcional ao longo de sua frequência. A Figura 1 ilustra um exemplo de ruído branco contaminando um sinal.

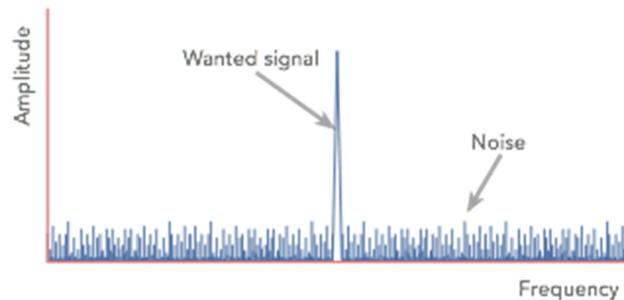


Figura 1 – Espectro do ruído branco em relação a amplitude e frequência.

- **Ruído rosa:** é um tipo específico de ruído aleatório onde a densidade espectral de potência é inversamente proporcional à frequência. Em outras palavras, quanto maior a frequência, menor a magnitude do ruído. É justamente por não ter um comportamento “plano”, ele ganha seu nome pela semelhança com o espectro da luz vermelha que possui uma inclinação na densidade de potência semelhante. É possível ver este comportamento e compará-lo com o ruído branco na Figura 2.

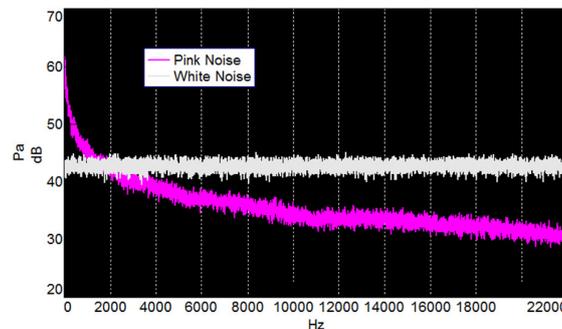


Figura 2 – Comparação do ruído rosa com o ruído branco. Retirado de: <https://magentafp.com/2018/07/10/pink-noise/>

- **Ruído de tremulação ou ruído 1/f:** esse tipo de ruído ocorre em quase todos os dispositivos eletrônicos. Tem uma variedade de causas, cada uma relacionada ao fluxo de corrente direta. Tem um espectro de frequência que cai constantemente nas frequências mais altas.
- **Ruído de fase:** este ruído já foi tratado anteriormente neste material. Favor achar o termo neste material para mais informações.

- **Ruído térmico:** Esta forma de ruído, também conhecida como ruído de Johnson, surge como resultado da agitação térmica dos portadores de carga - tipicamente elétrons - em um condutor. Como a temperatura e, portanto, a agitação dos portadores de carga aumenta, também aumenta o nível de ruído.
- **Ruído de ruptura:** é uma forma de ruído encontrada em alguns circuitos onde o funcionamento do semiconductor dá origem a um impulso súbito.

Link budget

Em redes e telecomunicações o “link budget²” se refere a um cálculo final de potência de transmissão ao longo de todo um caminho, usado para contabilizar a energia durante todo seu trajeto até o receptor. Nele se mostram todos os ganhos e/ou perdas de um sinal durante seu estado ativo, e os efeitos de sua propagação. Ao se comunicar com um receptor através de um meio, como fio de cobre, fibra óptica ou sem fio.

O Link budget faz um registro de todas as perdas e ganhos que se mantêm na propagação do sinal seja ele em meio guiado (cabo) ou não (wireless). O controle dessas perdas e ganhos é essencial para se calcular a confiabilidade e a eficiência da conexão pela qual o transmissor e o receptor se comunicam. A Figura 1 mostra o esquemático mais simples do conceito do que é a estimação do Link budget.

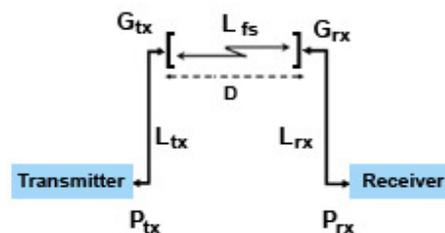


Figura 1 – Representação simples da comunicação do transmissor com o receptor.

Na figura anterior é possível identificar a representação do esquemático de um dispositivo transmissor fazendo a transmissão do sinal para o receptor, representando a saída da potência do transmissor (P_{tx}), suas perdas (L_{tx}) ao longo de sua conexão (cabos, conectores, entre outros), e seu ganho (G_{tx}). No link (enlace) entre o transmissor e o receptor, observa-se as perdas no espaço livre (L_{fs}). Semelhante ao transmissor, o receptor recebe uma potência (P_{rx}) onde já foi considerada as perdas associadas (L_{rx}) associadas a recepção (filtros, conectores, etc) ou ganhos (G_{rx}) usados para reforçar a potência do sinal recebido (quando necessário). O cálculo de Link Budget é feito através da equação a seguir, onde se faz necessário saber o valor da potência transmitida, ganhos e perdas do sistema.

$$Prx = Ptx + Gtx - Lfs - Lm + Grx - Lrx$$

onde:

$$Prx = \text{Potência recebida (dBm)}$$

² Não se encontrou termo em português razoável para uma tradução. Por isto se manteve na língua inglesa. O termo link pode ser traduzido aqui como “enlace”.

P_{tx} = Potência de saída do transmissor (dBm)
 G_{tx} = Ganho da antena transmissora (dBi)
 L_{tx} = Perdas do transmissor (dB)
 L_{fs} = Perdas do espaço livre (dB)
 L_m = Perdas de sensibilidade de recepção (dB)
 G_{rx} = Ganho da antena receptora (dBi)
 L_{rx} = Perdas do receptor (dB)

Desta forma, é explícito a importância dessa ferramenta para projetar sistemas que possuem uma certa sensibilidade na transmissão de sinal para um receptor com uma distância específica. Geralmente o Link budget é utilizado em serviços de rádio e satélite, onde as perdas e os ruídos são normalmente muito altos.

Standing wave ratio (SWR)

A *Stand Wave Ratio* (SWR), no português Relação de Onda Estacionária (ROE) é uma medida bastante importante em transmissores de alta frequência. Esta grandeza mensura a relação entre o sinal incidente e o sinal refletido em um circuito de RF.

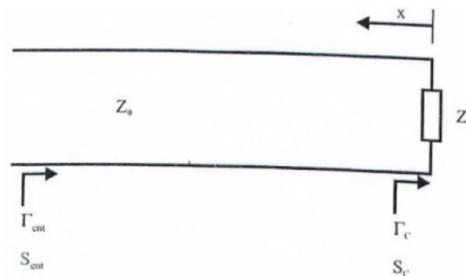


Figura 1 – Circuito resistivo em alta frequência. Fonte: José Carlos Sartori, 1999.

O primeiro conceito importante a se considerar é o de coeficiente de reflexão (Γ). Ele avalia a relação entre a onda incidente e a onda refletida em um circuito. Em termos de tensão, podemos pensar:

$$\Gamma = \frac{V_{ref}}{V_{inc}}$$

onde:

Γ - Coeficiente de reflexão.

V_{ref} - Amplitude do sinal refletido.

V_{inc} - Amplitude do sinal incidente.

Analisando o coeficiente na carga do circuito temos:

$$\Gamma = \frac{Z_c - Z_0}{Z_c + Z_0}$$

onde:

Z_c - Impedância da carga.

Z_0 - Impedância da fonte.

Nisto, podemos indicar que:

- Um $\Gamma=1$ simboliza que todo o sinal que está saindo do gerador está sendo refletido de volta, simbolizando um curto.
- Um $\Gamma=0$ significa que todo o sinal está sendo absorvido pela carga e o circuito está casado.
- Um $\Gamma=-1$ significa que toda a tensão incidente está sendo refletida com defasagem de 180° .

Entender o significado prático desta variável é muito importante. Ela representa o nível de casamento de impedância entre todos os componentes do circuito (gerador-linha e linha-carga). Quanto maior o casamento entre os componentes, menor a amplitude do sinal refletido e, quanto menor o casamento, maior a reflexão.

Com este conceito de casamento e descasamento, podemos pensar unicamente em função da amplitude máxima e mínima do sinal em um dado ponto, sendo também em função dos sinais incidente e refletido, onde:

$$SWR = ROE = S = \frac{|V_{max}|}{|V_{min}|} = \frac{|V_{inc}| + |V_{ref}|}{|V_{inc}| - |V_{ref}|}$$

Podemos entender aqui que, o maior sinal de tensão é aquele onde o sinal incidente e o sinal refletido se somam (interferência construtiva) e o menor sinal é quando o sinal incidente e o sinal refletido têm sinais opostos (interferência destrutiva) fazendo com que o sinal refletido diminua a amplitude do sinal incidente.

Após algumas deduções, temos que:

$$SWR = ROE = S = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

A análise prática pode ser feita da seguinte forma:

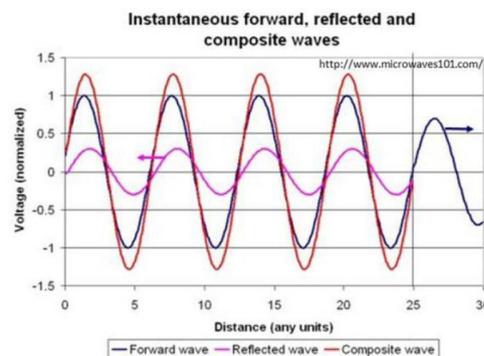


Figura 2 - Representação de uma onda incidente, refletida e resultante. Fonte: microwaves101.com

Podemos indicar:

- 1) O sinal incidente em escuro (*forward wave*) incide em um sistema de RF.
- 2) Por causa do descasamento dos componentes, uma parcela do sinal de entrada é refletida de volta. Este sinal em rosa (*reflected wave*) é visto retornando para a origem do sinal.
- 3) O sinal refletido é somado ao sinal incidente, gerando uma onda estacionária em vermelho (*composite wave*).

No caso avaliado houve uma interferência construtiva entre os sinais incidente e refletido. Na prática, este efeito causa uma deformação indesejada do sinal. Para evitar este efeito, os componentes do circuito devem sempre que aplicável serem casados com seus estágios anteriores ou posteriores.

IP3 – third-order intercept point

O estudo da linearidade dos amplificadores é extremamente importante no estudo de circuitos de RF. Eles são descritos principalmente pela sua potência de saída, ganho, banda, eficiência, ruído e impedância de entrada e saída. Nas aplicações de RF a linearidade é uma característica chave em muitas aplicações (se não em todas!). A primeira análise a ser feita é o gráfico de linearidade de um amplificador, onde é plotada a saída em função da entrada conforme Figura 1.

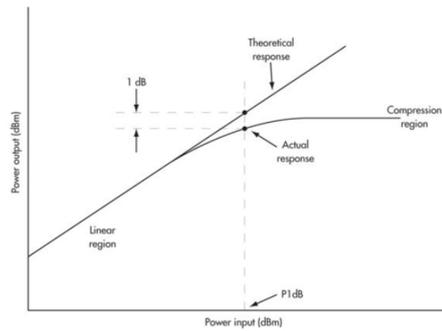


Figura 1 - Gráfico representando a saída de um amplificador em função de sua entrada. Fonte: electronicdesign.com.

Como pode se observar, após a região linear do amplificador há uma região não linear onde a saída tende a se estabilizar apesar do aumento do sinal de entrada. Há inclusive um ponto em que o sinal de saída prático e o teórico (pensando em uma operação na região linear) diferem exatamente 1dB. Este ponto é chamado de **P1dB** e é uma boa métrica na avaliação de amplificadores de potência.

Amplificadores na região não-linear: quando um amplificador passa a operar na região não-linear, harmônicas passam a ser criadas na saída, havendo (pelo menos) harmônicas de segunda e terceira ordem.

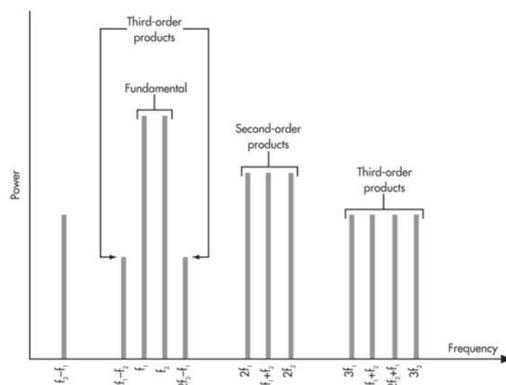


Figura 2 - Harmônicas e as fundamentais de um amplificador na região não-linear. Fonte: electronicdesign.com.

Mensurar a relação entre as harmônicas e as frequências fundamentais são uma importante ferramenta para avaliar o amplificador. Para isso, o *third-order intercept point* (IP3) é usado. Analisando a potência das harmônicas de terceira ordem e da fundamental, construímos o gráfico da Figura 3.

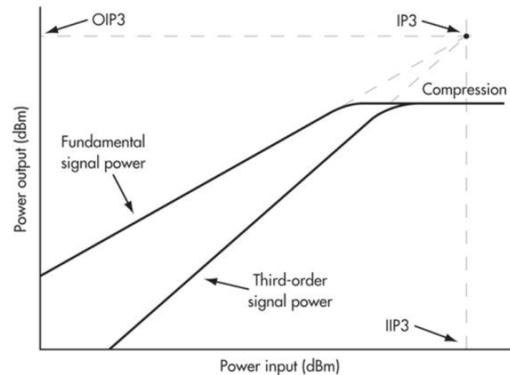


Figura 3 - Análise da amplificação da fundamental e das harmônicas de terceira ordem.
Fonte: electronicdesign.com.

Como podemos ver, o ganho das harmônicas tende a ser maior que das fundamentais até que se chegue na região de saturação (compressão). Porém, podemos alongar as retas de amplificação até que as duas convergem para um ponto em que a potência das harmônicas de terceira ordem é igual a potência das fundamentais. Este ponto é chamado de *third-order intercept point* (IP3). O IP3 pode ser avaliado em função do sinal de entrada (IIP3) e do sinal de saída (OIP3). Apesar de ser um ponto teórico inatingível, ele serve para avaliar a qualidade do amplificador operando na região não-linear.

Diagrama de olho (*eye diagram*)

O diagrama do olho é uma ferramenta de análise estatística de sinal, basicamente qualitativa. Ele é obtido superpondo várias amostras de um sinal, colhidas no domínio do tempo, de modo que cada símbolo (ou período do sinal) fique superposto. Considere o seguinte sinal:

$$y(t) = \sum a_k p(t - kT_b)$$

o mesmo pode ser aplicado à entrada vertical do osciloscópio. A base de tempo do osciloscópio é disparada à mesma taxa $1/T_b$ de chegada de pulsos, produzindo uma varredura que dura exatamente T_b segundos, a duração de um símbolo/período do dado transmitido. O osciloscópio mostra a superposição de diversos traços de comprimento T_b da saída do canal $y(t)$. O que aparece no osciloscópio é simplesmente o corte do sinal de entrada (entrada vertical), feitos a cada T_b e superpostos uns aos outros. A Figura 1 ilustra um exemplo

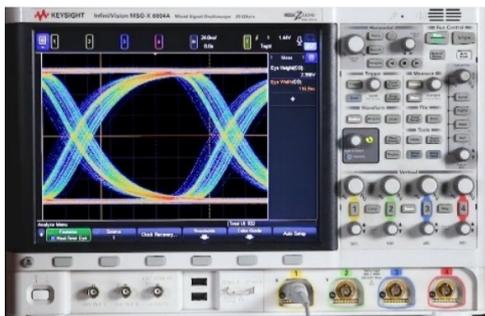


Figura 1 – Ilustração da formação de um diagrama de olho em um osciloscópio configurado para ter uma taxa de aquisição suficiente para formar a figura.

Considere um exemplo de um sinal de transmissão que tem formado binário de pulsos polares NRZ conforme ilustra a Figura 2a. Os correspondentes diagramas de olho são mostrados na Figura 2b para bases de dados T_b e $2T_b$, respectivamente. Outro exemplo de sinal (Figura 2c) com formato diferente de pulsos também é ilustrada na Figura 2d. De igual maneira, um terceiro sinal (mostrado na Figura 2e) também teve seu diagrama de olho mostrado na Figura 2f. Neste caso, como este sinal teve variações de amplitude (conhecidas como *shimmer*) e até de frequência (conhecidas como *jitter*), o diagrama de olho apresentou uma figura mais complexa dada estas variações (amplitude e frequência) indesejadas e geralmente de características aleatórias.

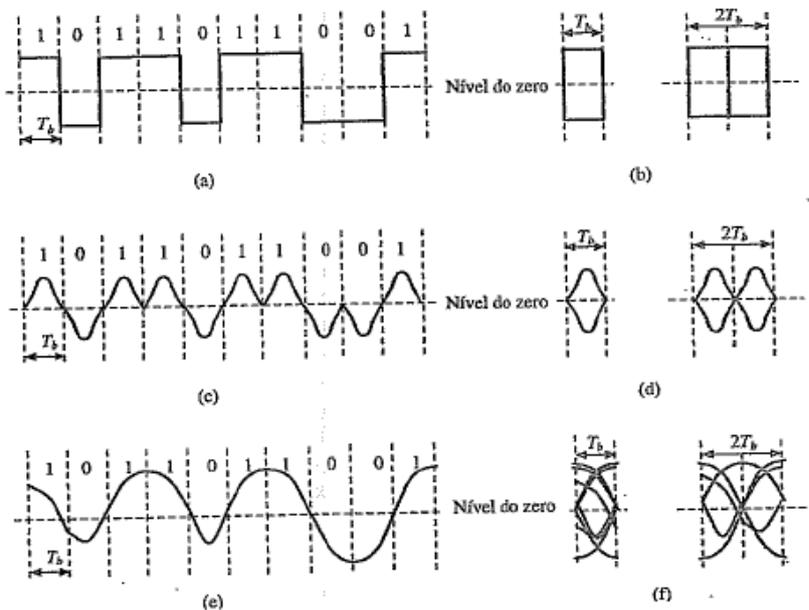
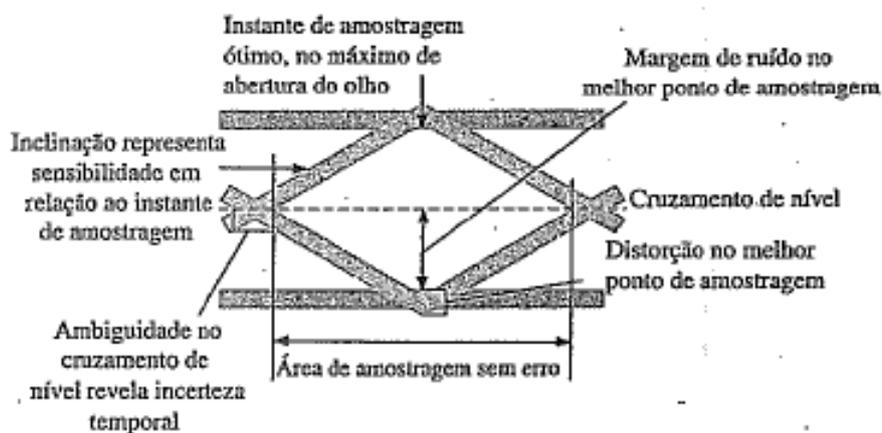


Figura 2 – Formação de um diagrama de olho de um sinal binário.

As variações (*jitter* e *shimmer*) citadas, dentre outras possíveis, geralmente vem de diferentes fontes. Um canal com distorção ou com largura de banda finita, podem ser os causadores de tal “deformação” no sinal, por exemplo. Após passagem pelo canal não ideal, o sinal polar NRZ da Figura 2a pode se tornar a

forma da onda na Figura 2e, por exemplo. Os pulsos de sinal recebidos não são mais retangulares, mas arredondados, distorcidos e alargados. Portanto, em cada traço, os valores do pulso nos respectivos instantes de amostragem se desviarão dos valores ideais causando um borrão e resultando em um padrão novo padrão de olho.

Neste sentido, o diagrama de olho é uma ferramenta voltada à análise de variações temporais de sinais em experimentos em tempo real. Ele tem operação simples e pode fornecer informação rica e importante sobre a variabilidade do sinal em questão quando o mesmo tem mínimas características repetitivas. A Figura 3 mostra um típico diagrama de olho e algumas das medidas que podem ser extraídas dele.



Figura³ 3 - Leitura de um diagrama de olho.

Relação sinal ruído (SNR - *signal to noise ratio*)

É definido como a razão da potência de um sinal sobre a potência do ruído sobreposto ao sinal. Ou seja, refere-se à comparação do nível de um sinal desejado com o nível do ruído do sinal.

$$SNR = \frac{\text{Potência do sinal}}{\text{Potência do ruído}}$$

É comum a SNR ser expresso em decibel, como mostra a equação abaixo:

$$SNR_{(dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{sinal}}}{P_{\text{ruído}}} \right) [dB]$$

Um de seus efeitos, é o limite do desempenho dos sistemas, distorcendo e degradando a informação recebida. Muitas vezes no receptor, chega apenas o ruído, perdendo-se toda a informação contida na transmissão. Para minimizar este efeito, uma das alternativas é aumentar a potência do sinal. Segue a Figura 1 como um exemplo. Nela, a potência do sinal aleatório é representada pela letra S e a letra N a potência do ruído. Neste exemplo pode-se observar que a potência do sinal é superior a potência do ruído.

³ Figuras extraídas do livro Sistemas de Comunicações Analógicas e Digitais Modernos – B. P. Lathi e Zhi Ding – 4ª Ed.

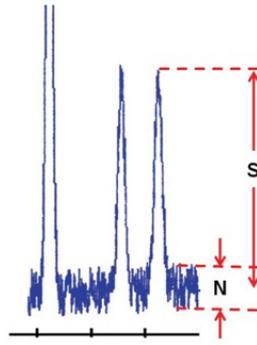


Figura 1 - Amostra de um sinal. Figura extraída de <http://blog.santoangelo.com.br/relacao-sinal-ruído/>