

A Metrologia nos Sistemas Não-Lineares de Radiofrequência

Nuno Borges Carvalho

A aula de síntese das provas de agregação de Nuno Borges Carvalho centra-se na metrologia de rádio frequência, mais especificamente nas técnicas de medida e instrumentação para componentes não lineares.

Esta área de conhecimento é bastante alargada, abrangendo áreas tão distintas como a electrónica, processamento de sinal, instrumentação e sistemas de controlo.

Nesta apresentação iniciar-se-á a exposição da área por uma breve resenha histórica dos sistemas de medida e da necessidade de utilização desses mesmos sistemas em componentes rádio, para depois se apresentarem e discutirem os principais sistemas de instrumentação rádio, caso do analisador de espectros, analisador de quadripólos e medidores de potência.

O passo seguinte consistirá na apresentação e discussão dos sinais de excitação para a correcta caracterização e modelação desses mesmos sistemas. Esta secção versa principalmente a correcta compreensão da necessidade de utilização de sinais diferentes do usualmente aplicado em laboratório como seja a sinusóide simples. Apresentar-se-ão os sinais de dois tons, multi-seno e seus factores de mérito e capacidades associadas.

Com o advento dos novos sistemas digitais ao rádio e subsequente utilização de domínios mistos (analógicos e digitais), introduzir-se-á a seguir os conceitos básicos de rádio definido por software, SDR, e ainda de rádios cognitivos, CR.

Esta introdução a estes sistemas, permitirá ao ouvinte integrar e compreender as necessidades futuras de instrumentação e medidas para SDR. Apresentam-se assim algumas quantidades digitais e analógicas a medir em rádio e diversos sistemas ou combinação de sistemas para a medida de front-ends de SDR e CR.

Finalmente termina-se a aula com a apresentação de medidas reais e caracterização de um front-end de SDR para aplicações futuras de rádio cognitivo.

A Metrologia nos Sistemas Não-Lineares de Radiofrequência

Nuno Borges Carvalho
nbcarvalho@ua.pt
www.av.it.pt/nbcarvalho
Universidade de Aveiro



Índice

1. Introdução
2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF
3. A Importância do Sinal de Excitação
4. Novos Paradigmas – SDR
5. Instrumentação para SDR
6. Cenários de Medida Reais

1. Introdução



Os sistemas rádio iniciam-se com Tesla, Maxwell, Henry, Marconi, Armstrong...

Com o nascimento desta nova tecnologia, a metrologia a si associada surgiu imediatamente, pois a medida de alguns parâmetros era fundamental para a avaliação da experiência.

*Metrologia é definida no International Bureau of Weights and Measures (BIPM)
"the science of measurement, embracing both experimental and theoretical
determinations at any level of uncertainty in any field of science and technology."*

1. Introdução

Os sistemas rádio iniciam depois o seu percurso e evolução tecnológica massificada com a difusão de rádio, radiofonia.

Nesse tempo a metrologia aplicada ao rádio endereçava tipicamente a medida de potência emitida e recebida.



- Potência transmitida;
- Qualidade do sinal medido por recurso à audição;



1. Introdução

A necessidade de medidas mais específicas surgiu com a segunda guerra mundial e com a invenção do radar. Por exemplo, a medida de atrasos utilizando pulsos de RF, caso típico de um radar. Outro tipo de medidas considerava a medida de potência reflectida na carga, ou seja o coeficiente de reflexão, este parâmetro passou a ser muito importante devido à elevada potência transmitida.



1. Introdução

Com o aumento exponencial das transmissões rádio, o espectro radioelétrico começou a estar super povoado, o que aumentou significativamente a necessidade de sistemas de medida fiáveis e robustos, de modo a suportar os lucros das entidades reguladoras do espectro.



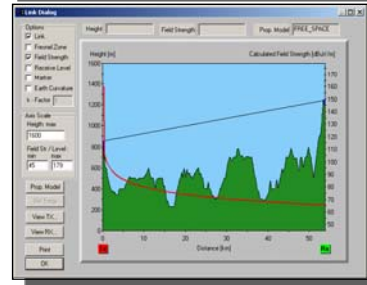
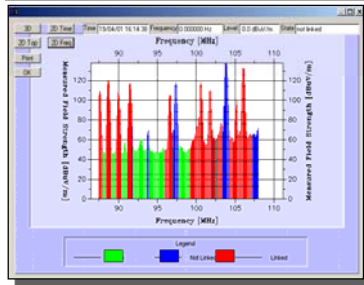
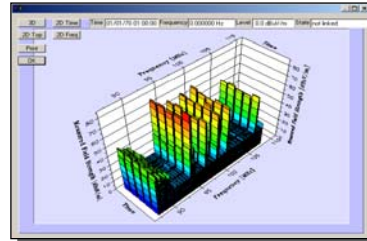
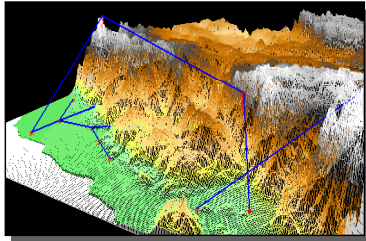
Medidas como:

- Largura de banda rádio
- SNR, SIR, etc....



1. Introdução

Medidas de campo começam a ser fundamentais, SNR, SIR, SAR.



1. Introdução

Com o advento das comunicações móveis, a metrologia impôs novos paradigmas:

- Efeito de Doppler
- SNR
- Intermodulação



Music While Walking With Radio

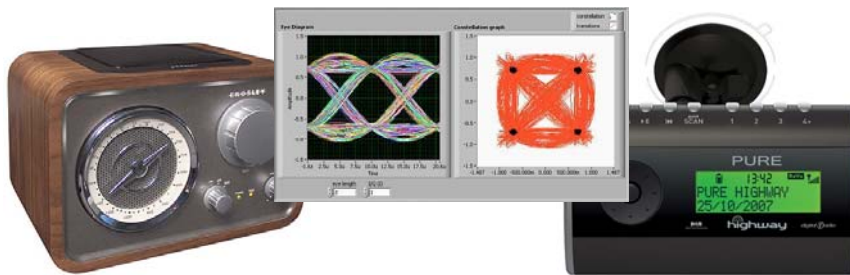


"Calling Herbert Mundin to stage 6"—messages such as these are radioed to this actor as he works on movie set.

1. Introdução

O próximo passo em rádio comunicações e consequentemente na metrologia associada, foi o início das comunicações digitais.

- Error Vector Magnitude
- Bit Error Rate
- Intermodulação



1. Introdução

Os procedimentos de medida foram então transpostos para níveis de abstracção mais elevados, por exemplo com medidas de QoS em redes de comunicação.

Medida de QoS
Medida de parâmetros de rede



QoS na Perspectiva do Utilizador

Corresponde à percepção de qualidade sentida por um utilizador quando utiliza o serviço.

Indica o grau de satisfação do utilizador em termos de, por exemplo, acessibilidade, retenção e integridade do serviço.

É normalmente expressa em termos de sensações humanas, do tipo, “Excelente”, “Boa”, “Aceitável”, “Pobre” e “Má”

1. Introdução

Com a massificação de novos sistemas, RFID, WLAN, GSM, 3G, a medida da interferência devida a fenómenos não lineares é fundamental para a gestão moderna do espectro.



1. Introdução

A metrologia de sistemas rádio tem um impacto muito importante para múltiplos sectores associados ao rádio:

- Investigadores
- Operadores de Rede
- Entidades Regulamentadoras
- Dispositivos não humanos
- ...



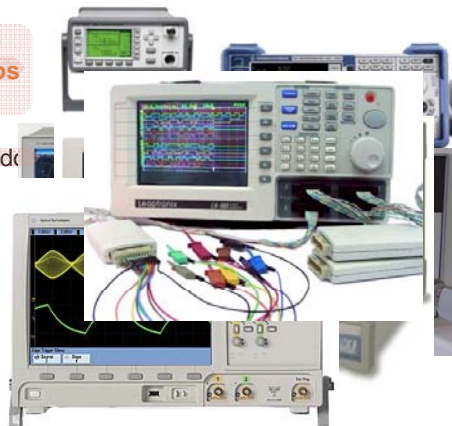
Índice

1. Introdução
- 2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF**
3. A Importância do Sinal de Excitação
4. Novos Paradigmas – SDR
5. Instrumentação para SDR
6. Cenários de Medida Reais

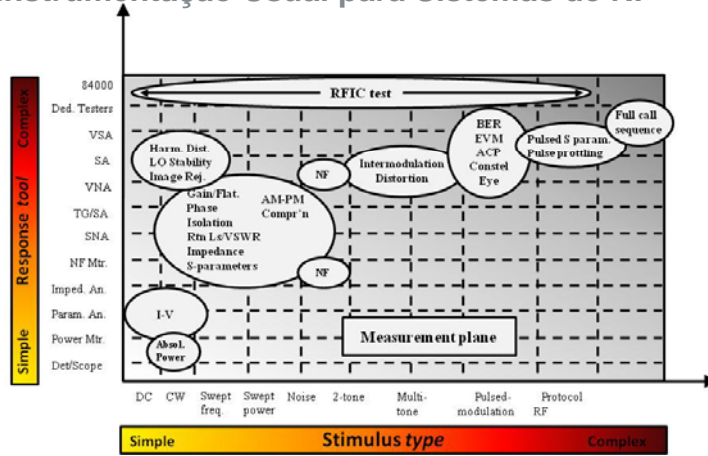
2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF

Instrumentação típica em sistemas de RF inclui:

- **Medidores de Potência**
- **Analísadores de Espectros**
- **Analísadores de Redes**
- Osciloscópios
- Medidores de Factor de ruído
- Analísadores Vectoriais
- Analísadores Lógicos
- ...



2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF



VSA – Vector Signal Analyzer, SA – Spectrum Analyzer, VNA – Vector Network Analyzer, TG/SA – Tracking Generator, SA, SNA – Scalar NA, NF Mtr. – Noise Figure Meter, Imp. An. – Impedance Analyzer, Power Mtr. - Power Meter, Det. Scope – Diode Detector, Oscilloscope

Copyright: Agilent

2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF

Medidor de Potência de RF



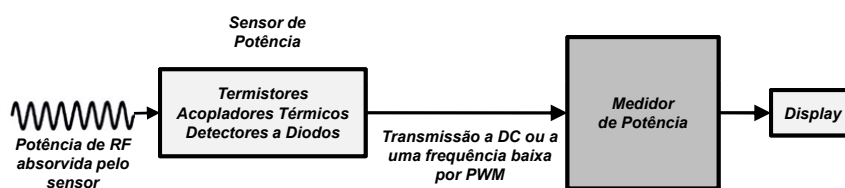
Copyright: Agilent

2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF

A potência pode ser obtida de:

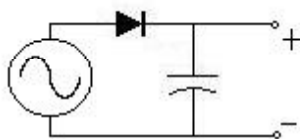
$$p = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |v(t)|^2 dt$$

Podemos considerar a potência medida num período, se o sinal for periódico, ou então numa janela de tempo.



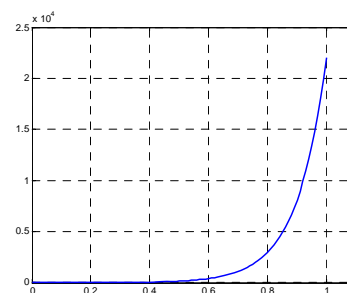
2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF

Um detector a díodos pode ser representado por:



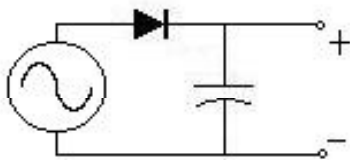
A corrente de saída pode ser modelada por:

$$y(t) = I_s \left(e^{\frac{v}{V_T}} - 1 \right) \approx k_1 v(t) + k_2 v(t)^2 + \dots$$



$$y(t) \approx k_1 A \sin(\omega t) + k_2 [A \sin(\omega t)]^2 = k_1 A \sin(\omega t) + k_2 \frac{A^2}{2} [\sin(2\omega t) + 1]$$

2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF

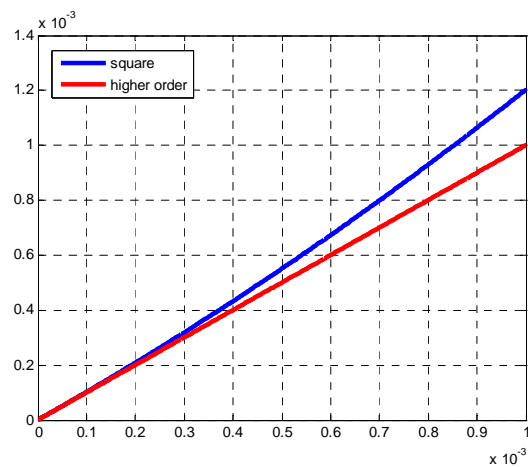


A corrente de saída será assim:

$$y_{DC}(t) \approx k_2 \frac{A^2}{2}$$

2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF

De um ponto de vista prático, a curva DC é uma função não linear, por isso deverá ser calibrada de acordo com essa não idealidade.



2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF

Calibração

“is the process of establishing the relationship between a measuring device and the units of measure.”



$$P_{real}(P_{in}) = P_{medida}(P_{in}) * F_{correção}(P_{in})$$

2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF

Analizador de Redes

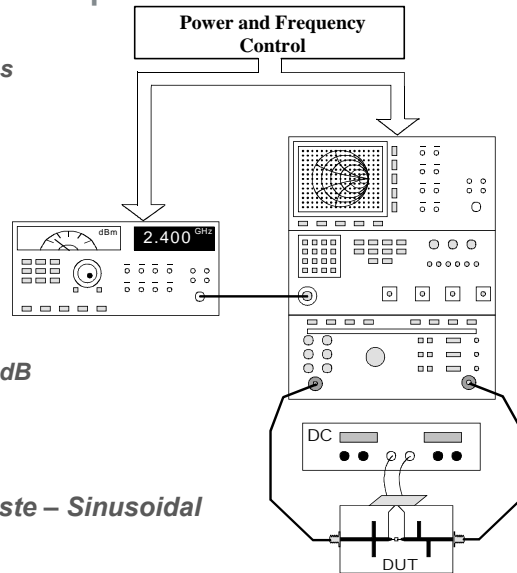


2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF

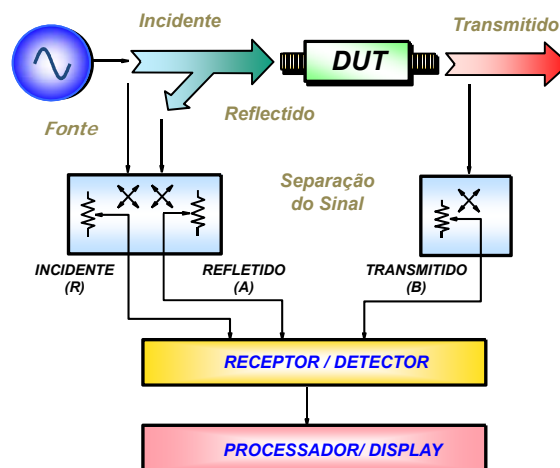
Analizador de Redes

- Parâmetros *S*
- VSWR
- Ganho (Amplitude e Fase)
- Largura de Banda
- Ponto de compressão de 1dB
- AM/AM e AM/PM

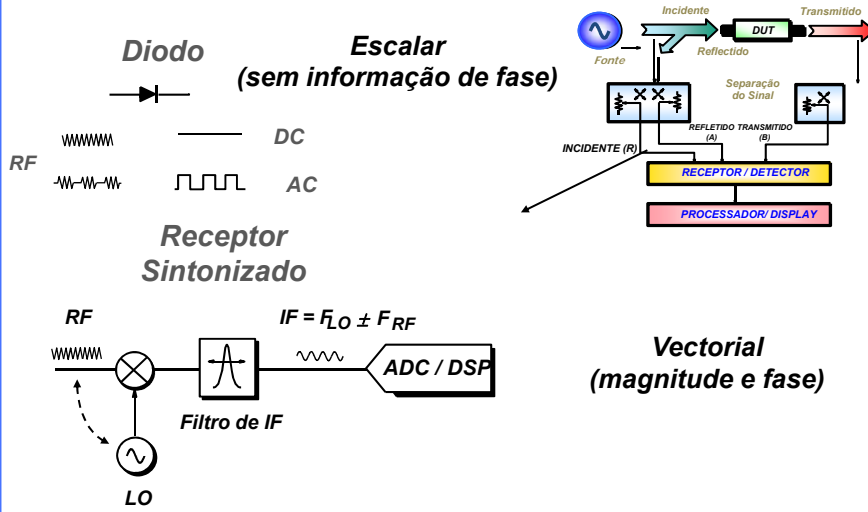
Sinal de Teste – Sinusoidal



2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF



2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF



Copyright: Agilent

2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF

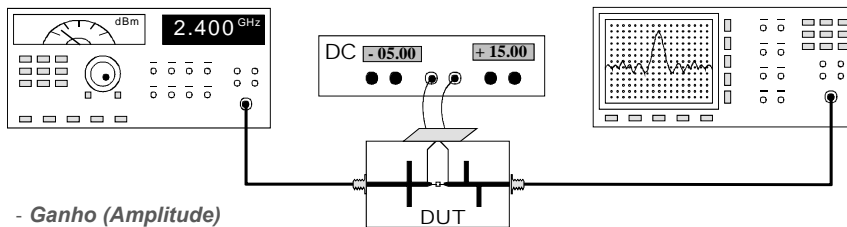
Analizador de Espectros



Copyright: Agilent

2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF

Analizador de Espectros



- Ganho (Amplitude)
- IMD
- Largura de Banda
- IP3
- AM/AM
- ACPR
- Compressão a 1dB
- NPR

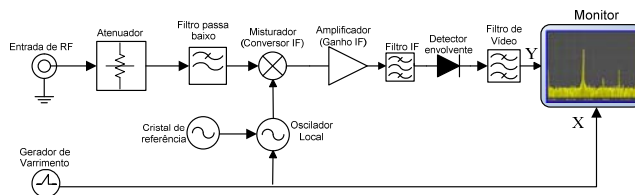
Sinais de Teste:

- Sinusoidais
- Dois-tons
- Multiseno
- Arbitrários

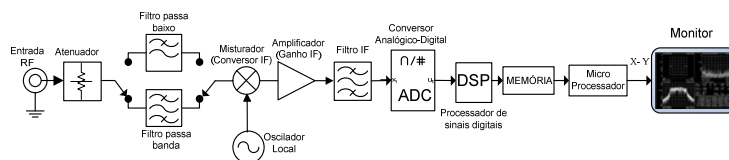
2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF

Analizador de Espectros

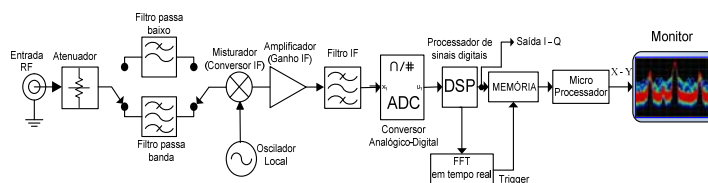
SA



VSA



RTSA



2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF

Analógicos

- **Analizador de Espectro de Varrimento (SA)** (Devido à sua arquitectura)
 - Surgiu no comércio no início dos anos 60
 - Desenvolvido para a análise de sinais analógicos



Digitais

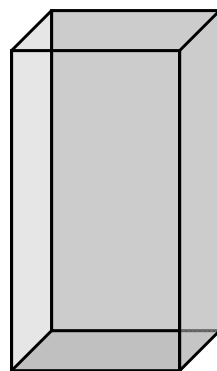
- **Analísadores FFT** (Devido ao facto de efectuar a passagem dos sinais no domínio do tempo para o domínio da frequência com base na computação das FFT's (Fast Fourier Transform)
 - a) **Vector Signal Analyser (VSA)**
 - Surgiu no início dos anos 90
 - Desenvolvido para a análise de sinais complexos (Digitais)
 - b) **Real Time Spectrum Analyser (RTSA)**
 - Surgiu recentemente no mercado
 - Desenvolvido para a análise de sinais dinâmicos



2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF

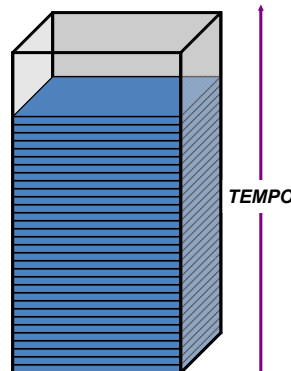
Real Time Spectrum Analyser (RTSA)

Analísadores de Varrimento



FREQUÊNCIA

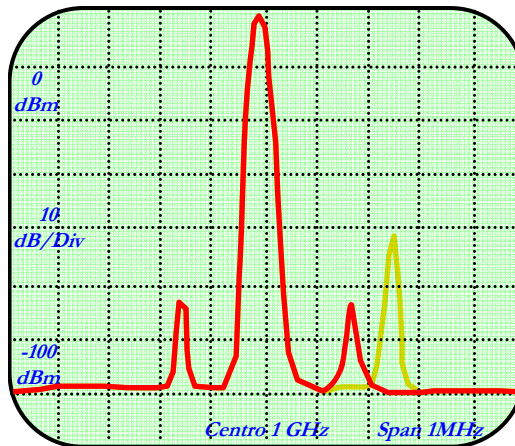
Analísadores em Tempo Real



FREQUÊNCIA

2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF

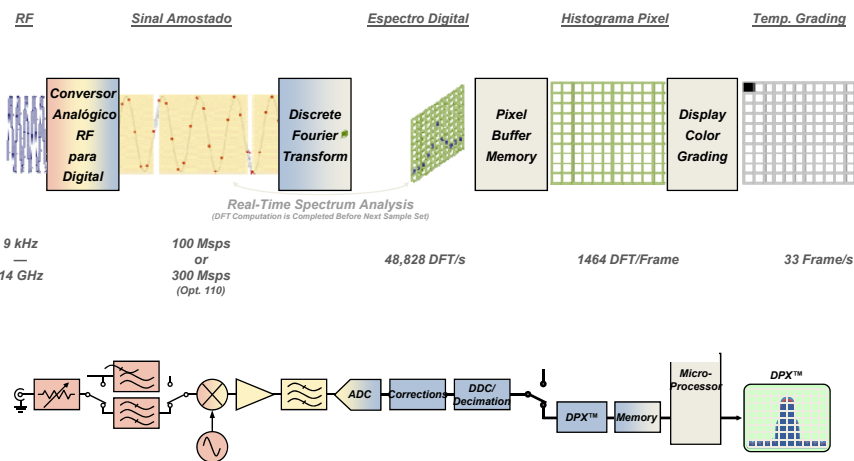
Real Time Spectrum Analyser (RTSA)



Copyright: Tektronix

2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF

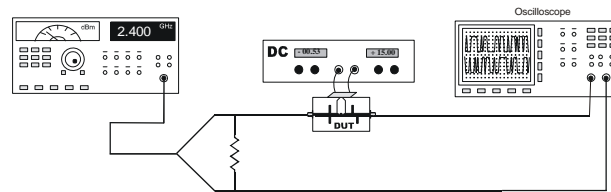
Real Time Spectrum Analyser (RTSA)



Copyright: Tektronix

2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF

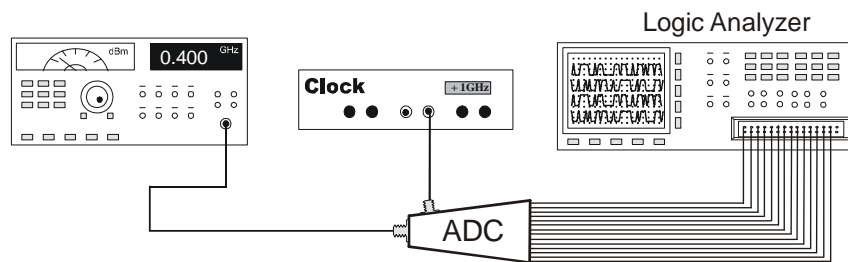
Osciloscópios – para o domínio analógico



Permite simultaneidade de medida dos sinais de entrada e saída

2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF

Analisadores Lógicos



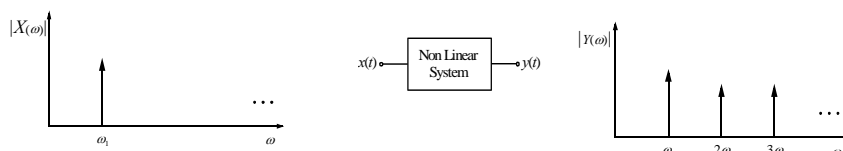
Analisa a sequência de bits num sistema digital

Índice

1. Introdução
2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF
- 3. A Importância do Sinal de Excitação**
4. Novos Paradigmas – SDR
5. Instrumentação para SDR
6. Cenários de Medida Reais

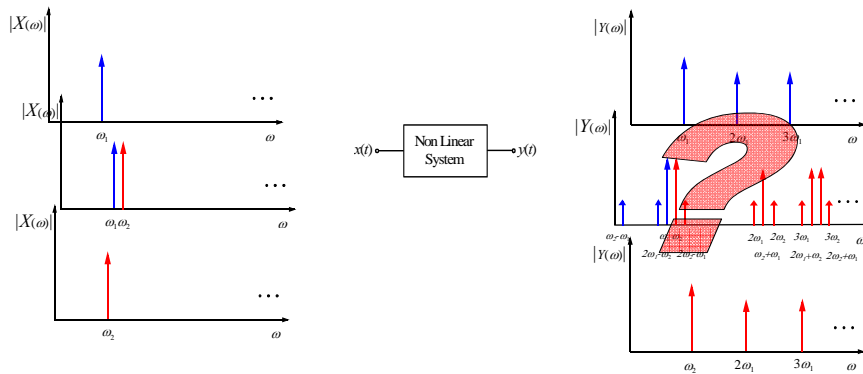
3. A Importância do Sinal de Excitação

Um sistema não linear não goza da propriedade da sobreposição, por isso a resposta de um sistema não linear a uma certa excitação de entrada, não pode ser obtida da sobreposição de qualquer outra.



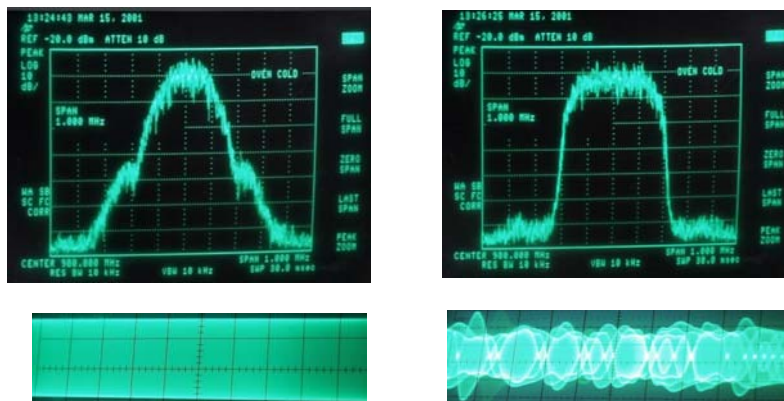
3. A Importância do Sinal de Excitação

Um sistema não linear não goza da propriedade da sobreposição, por isso a resposta de um sistema não linear a uma certa excitação de entrada, não pode ser obtida da sobreposição de qualquer outra.

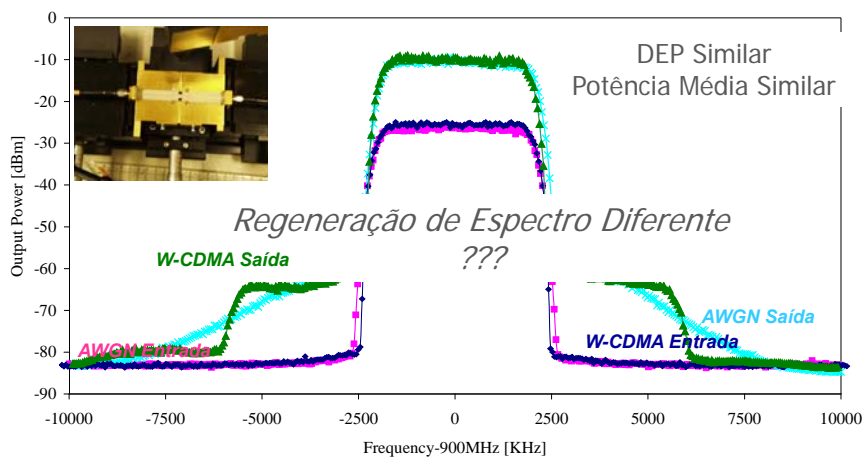


3. A Importância do Sinal de Excitação

O melhor sinal para utilizar como excitação de um sistema não linear é o sinal para o qual o sistema foi projectado para operar numa situação real.



3. A Importância do Sinal de Excitação



3. A Importância do Sinal de Excitação

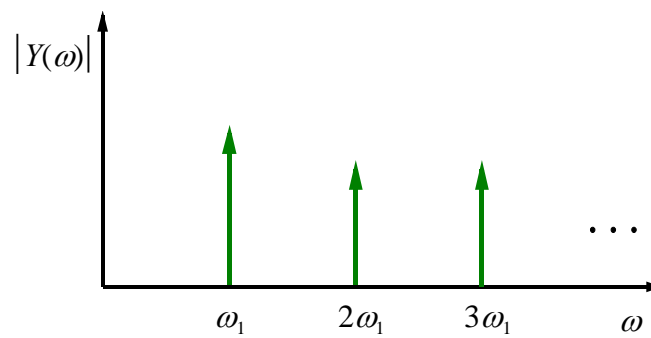
Qual deverá ser então o sinal de excitação a utilizar num laboratório para caracterização de sistemas rádio genéricos?

- Uma única sinusóide (Um tom ?)
- Duas sinusóides (Dois tons ?)
- Ruído Gaussiano ?
- Sinais Multi-seno ?
- Outros sinais ?

3. A Importância do Sinal de Excitação

Um seno, normalmente referido como um tom

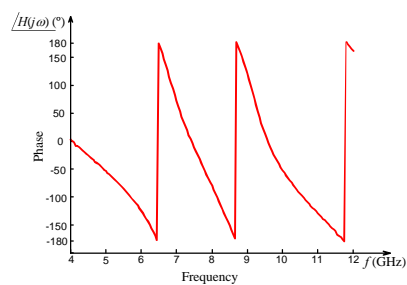
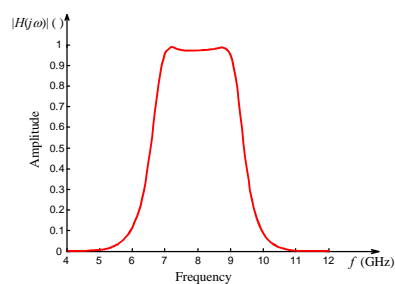
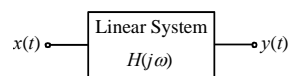
$$A \cos(\omega t)$$



3. A Importância do Sinal de Excitação

Num sistema linear, um tom é suficiente para a sua completa caracterização

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| e^{j\phi(j\omega)}$$

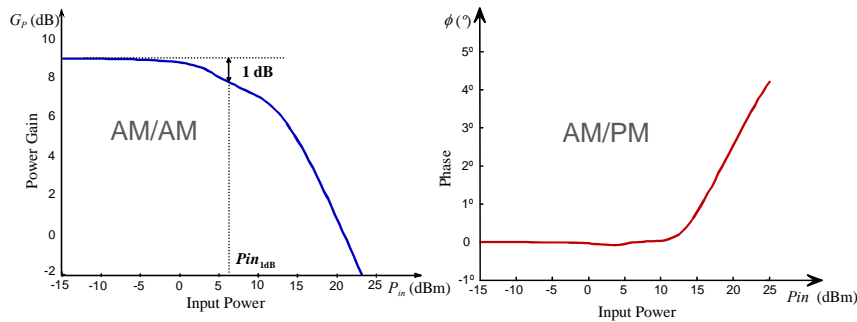


3. A Importância do Sinal de Excitação

Num sistema não linear, pode-se seguir a mesma estratégia para um nível de potência constante. Quando o nível de potência varia, então a função transferência também variará, a esta nova função de transferência chama-se Função Descritiva Sinusoidal de Entrada

$$H(A, j\omega)$$

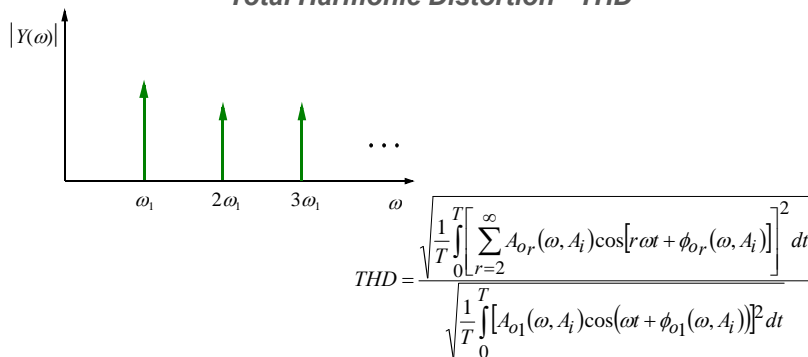
Esta função é agora dependente da frequência e da potência de entrada.



3. A Importância do Sinal de Excitação

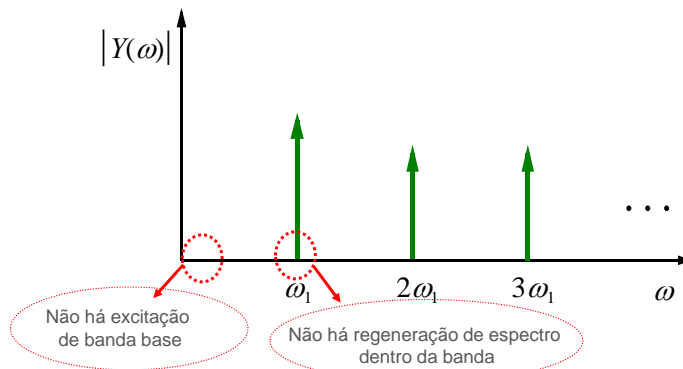
No entanto o método de sinusóide simples, apenas excita a portadora a RF variando a potência e a frequência. O Sistema não linear vai criar distorção harmónica que pode ser caracterizada por:

Total Harmonic Distortion - THD



3. A Importância do Sinal de Excitação

No entanto o método de sinusóide simples, apenas excita a portadora a RF variando a potência e a frequência.



3. A Importância do Sinal de Excitação

Em sumário um teste de um tom pode:

- ❖ *Caracterizar a compressão de ganho e o desvio de fase (Função Descritiva Sinusoidal)*
- ❖ *Caracterizar o grau da distorção harmónica*



Mas não consegue:

- ❖ *Apresentar nenhuma regeneração de espectro dentro da banda*
- ❖ *Excitar componentes de banda base*



3. A Importância do Sinal de Excitação

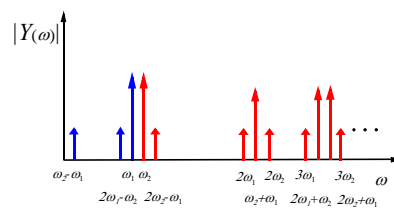
No caso de dois tons, o sinal de entrada consiste em:

$$x(t) = A_{i1} \cos(\omega_1 t) + A_{i2} \cos(\omega_2 t)$$

A saída será :

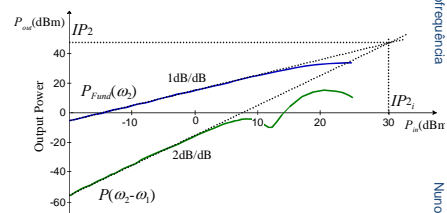
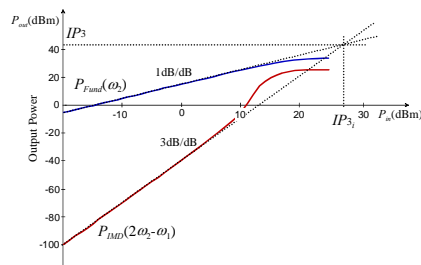
$$y_{NL}(t) = \sum_{r=1}^{\infty} A_{o,r} \cos(\omega_r t + \phi_{o,r}) \quad \text{where } \omega_r = m\omega_1 + n\omega_2 \quad \text{and } m, n \in \mathbb{Z}$$

Permite assim caracterizar as grandezas que um tom já permitia e além disso todas as componentes dentro da banda.



3. A Importância do Sinal de Excitação

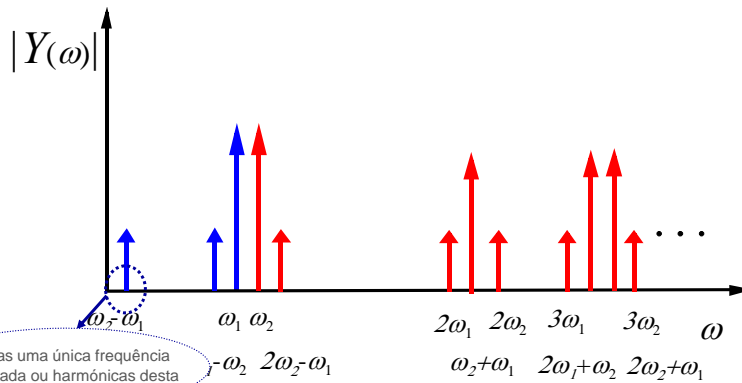
A caracterização com variação de potência é extremamente importante num teste a **dois** tons, pois permitem obter informação detalhada sobre a distorção de intermodulação, IMD. Especialmente para sinal fraco, pode-se obter por exemplo o ponto de intercepção de 3ª ordem.



$$IMR \equiv \frac{P_{fund}}{P_{IMD}} = \frac{P(\omega_1)}{P(2\omega_1 - \omega_2)} = \frac{P(\omega_2)}{P(2\omega_2 - \omega_1)}$$

3. A Importância do Sinal de Excitação

Neste cenário apenas se excita uma única frequência de banda base por cada teste de dois tons. Se o sistema for dinâmico, pode-se tentar estudá-lo fazendo uma variação da frequência de separação dos dois tons, **esperando que o teorema da sobreposição funcione...**



3. A Importância do Sinal de Excitação

Em sumário um teste de dois tons pode:

- ❖ Além do que já se tinha com um tom
- ❖ Medir os a Função Descritiva de Dois Tons
- ❖ Obter informação de dentro da banda
- ❖ Excitar os efeitos de memória lenta a uma frequência determinada



Mas não consegue:

- ❖ Excitar toda a memória lenta
- ❖ Apresentar valores de pico da envelope diferentes

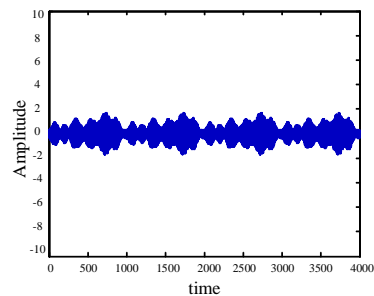


3. A Importância do Sinal de Excitação

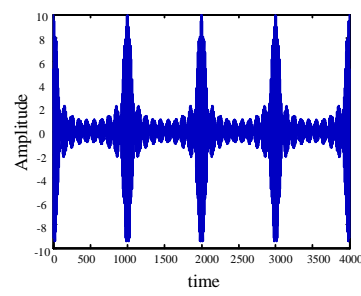
Um teste muito popular para sistemas dinâmicos é a excitação multi-seno.

$$x(t) = \sum_{q=1}^Q A_q \cos(\omega_q t + \theta_q) \quad \text{em que} \quad \omega_q = \omega_0 + (q-1)\Delta\omega$$

Neste caso não só a amplitude e a separação entre tons na frequência é importante, mas também a relação de amplitude e fase de cada tom conta.



10 Tons de Fases Aleatórias



10 Tons de Fases Iguais

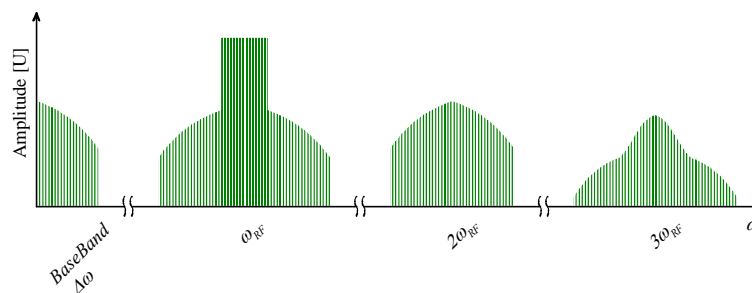
3. A Importância do Sinal de Excitação

Neste caso a saída será uma combinação de todos os tons de entrada:

$$y(t) = \sum_{r=1}^R A_r \cos(\omega_r t + \phi_r)$$

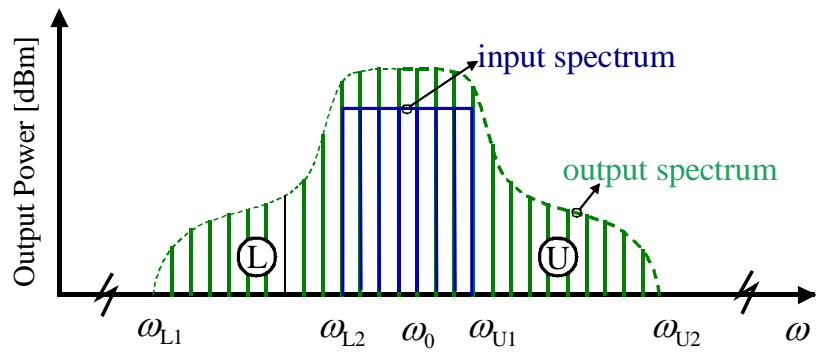
onde $\omega_r = m_0 \omega_0 + \dots + m_q \omega_q + \dots + m_{Q-1} \omega_{Q-1}$, $|m_0| + \dots + |m_q| + \dots + |m_{Q-1}| \leq \text{Ordem}_{\text{Max}}$

Um sinal típico de saída será:



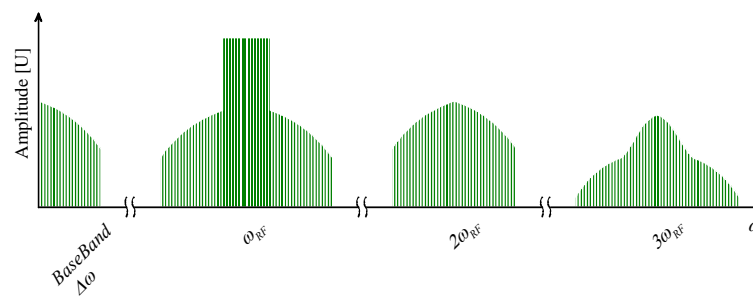
3. A Importância do Sinal de Excitação

O sinal dentro da banda, permitir-nos-á caracterizar a regeneração de espectro e por isso medir factores como **Adjacent Channel Power Ratio, ACPR**, ou **Noise Power Ratio, NPR**.



3. A Importância do Sinal de Excitação

À banda base, uma selecção cuidada da separação entre tons deve ser realizada de forma a excitar as características mais importantes do sistema.



3. A Importância do Sinal de Excitação

Em sumário um teste multi-seno pode:

- ❖ Além do que já se conseguia com dois-tons
- ❖ Excitar efeitos de memória lenta de forma mais eficiente
- ❖ Criar sinais com relações de pico diferentes

Deveremos ter cuidado com:

- ❖ A definição do número de tons e da separação entre eles
- ❖ A definição da relação de fase entre os tons



3. A Importância do Sinal de Excitação

Nem só sinais com amostragem discreta na frequência foram utilizados, sinais com espectro contínuo também, um desses exemplos é o Ruído Branco com Distribuição Gaussiana, (White Gaussian Noise, WGN). Estes testes permitiram concluir:

- 1 – Um teste com WGN é suficiente para obter toda a informação comportamental que permite extrair um modelo não linear dinâmico completo. [Schetzen, 1980].
- 2 – A não periodicidade dos estímulos de ruído colocam diversos problemas ao uso de técnicas de processamento digital do sinal. Por isso prefere-se os sinais periódicos.
- 3 – Felizmente provou-se que a resposta a sinais ruidosos é comparável à resposta do sistemas a diversas realizações de excitações multiseno, nas quais as fases são aleatoriamente alteradas de realização para realização [Schouckens & Pintelon, 2001].
- 4 – No entanto a excitação Gaussiana pode por vezes não ser a solução ótima para a excitação de alguns sistemas [Apparin, 2001].

3. A Importância do Sinal de Excitação

A função densidade de probabilidade, $pdf_x(x)$

Como as medidas típicas no laboratório são valores médios, exemplo da potência de saída, espectro de potência etc. :

$$P_{in} = E\{x(s)^2\} = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 pdf_x(x) dx$$

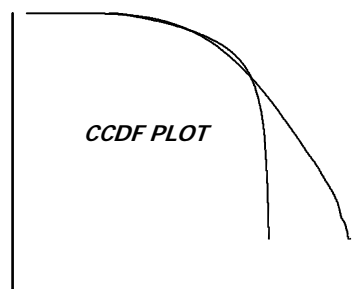
$$P_{out} = E\{y(s)^2\} = \int_{-\infty}^{\infty} y^2 pdf_y(y) dy = \int_{-\infty}^{\infty} f_{NL}(x)^2 pdf_x(x) dx$$

É intuitivo pensar que mais importante do que a media, será a trajetória que esses mesmos sinais de excitação realizam e a sua distribuição estatística, ou seja a probabilidade com que cada valor é atingido, i.e., a função $pdf_x(x)$ ou $ccdf_x(x)$.

3. A Importância do Sinal de Excitação

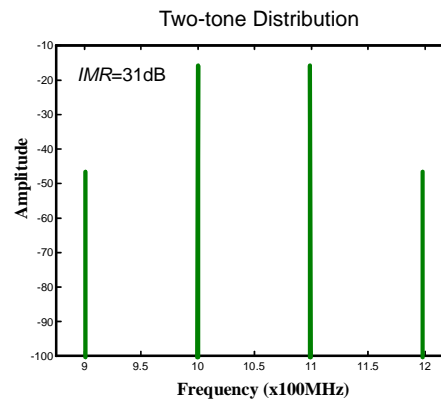
A conclusão anterior levou a que muitos engenheiros abandonassem a medida de *Peak-to-Average Ratio* como uma métrica fiável para distorção não linear;

e levou a que os fabricantes de equipamento fornecessem informação sobre a estatística dos sinais gerados, tipicamente a função de distribuição cumulativa complementar, $ccdf_x(x)$.



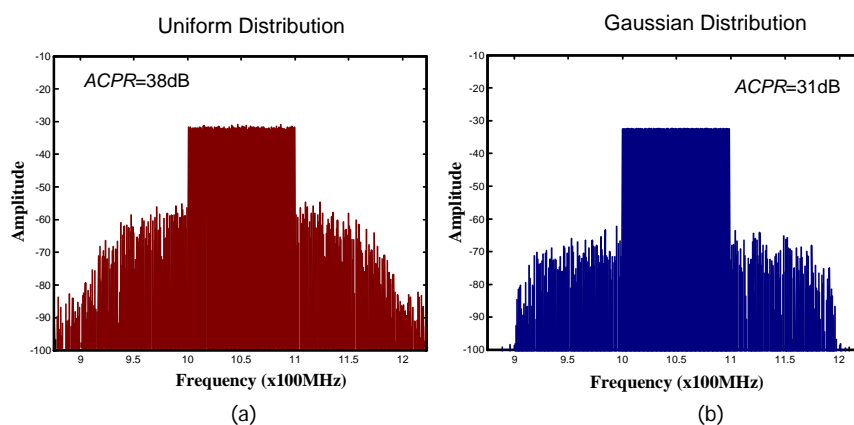
3. A Importância do Sinal de Excitação

Impacto da estatística numa não linearidade



3. A Importância do Sinal de Excitação

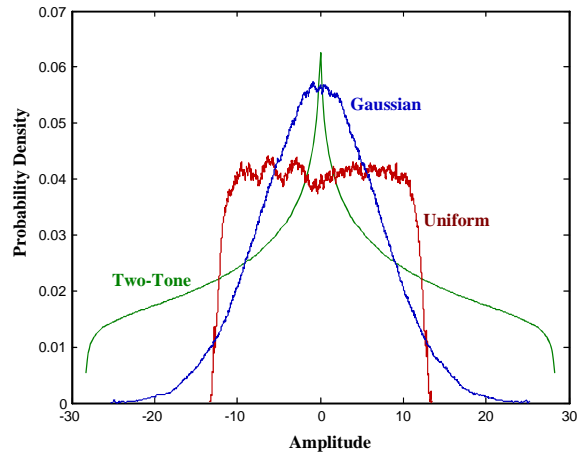
Impacto da estatística numa não linearidade



Densidade espectral de potência de um sinal multi-seno quando atravessa uma não linearidade, (a) sinal multi-seno de distribuição uniforme e (b) sinal multi-seno de distribuição normal.

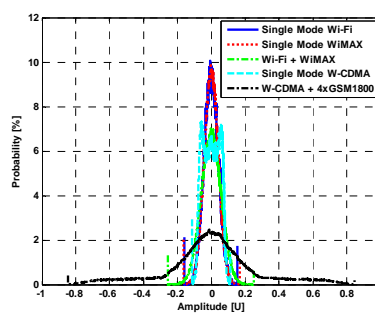
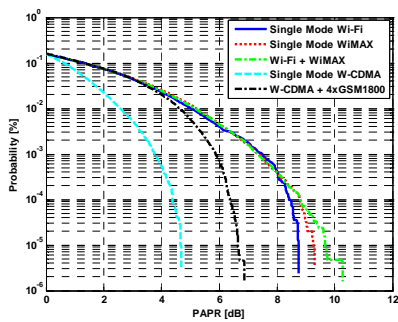
3. A Importância do Sinal de Excitação

Diferentes sinais de excitação apresentam diferentes comportamentos estatísticos.



3. A Importância do Sinal de Excitação

O mesmo acontece para sinais reais de telecomunicações sem fios.



3. A Importância do Sinal de Excitação

Padrões estatísticos de multi-senos

Se considerarmos um multi-seno como:

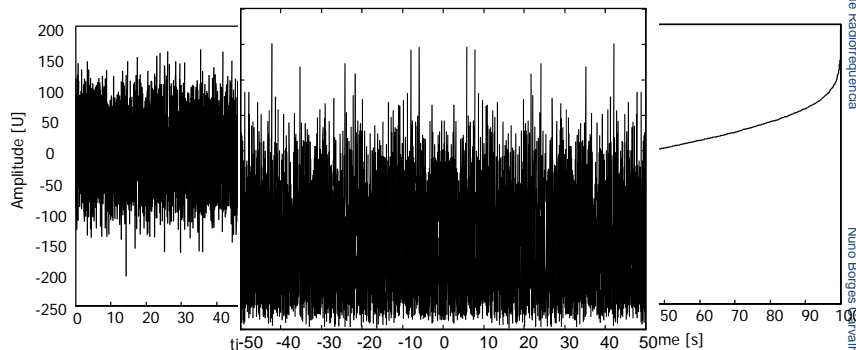
$$x(t) = \sum_{k=1}^K A_k \cos(\omega_k t + \phi_k); \quad A_k = A: \forall k$$

As fases podem ser escolhidas de forma a obter um sinal multi-seno com uma pdf pré-determinada.

3. A Importância do Sinal de Excitação

Criação de multi-senos com *pdfs* específicas

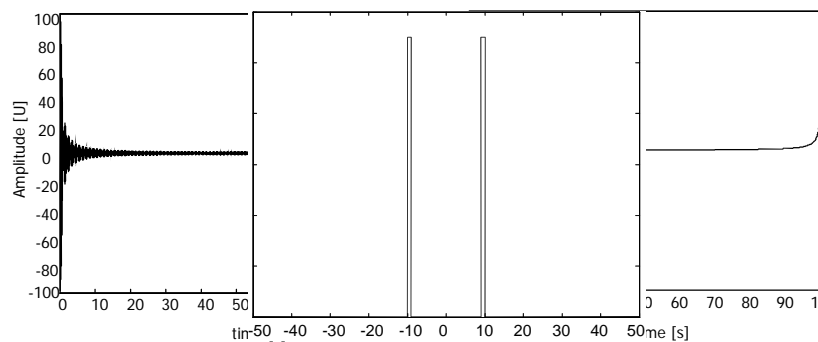
- 1 – Sintetize-se um sinal ruidoso com uma estatística pré-determinada, *pdf*, e reordene-se os valores de amplitude instantâneos por ordem crescente. Este vector representa um sinal com uma estatística pré-determinada [J. Schouckens and T. Dobrowiecki, 1998]



3. A Importância do Sinal de Excitação

Criação de multi-senos com *pdfs* específicas

- 2 – Sintetize-se um sinal multi-seno com valores de amplitude por tom iguais e com um número de tons pré-determinado.
- 3 – Reordene-se a sua amplitude por ordem crescente, guardando as posições temporais de onde vieram. Este é o vector das amplitudes da multi-seno.

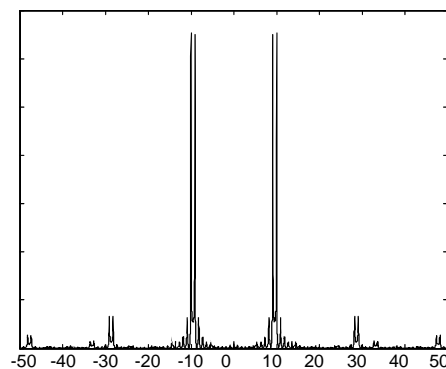


65

3. A Importância do Sinal de Excitação

Criação de multi-senos com *pdfs* específicas

- 4 – Substitua-se agora as amplitudes do sinal multi-seno pelas do sinal estatístico pretendido, mantendo o padrão temporal anteriormente guardado. Este é o sinal com a estatística pretendida.

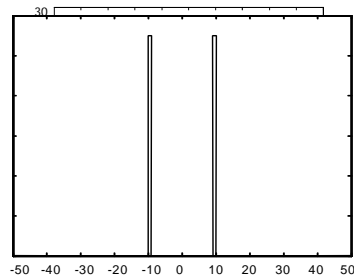


66

3. A Importância do Sinal de Excitação

Criação de multi-senos com *pdfs* específicas

- 5 – Calcule-se a DFT deste sinal, e restaure-se as amplitudes do sinal multi-seno guardando as fases que se obtiveram. A potência integrada é assim igual à pretendida. Este passa a ser o sinal multi-seno pretendido.



- 6 – Repita-se o processo até um erro aceitável da estatística pretendida.

Índice

1. Introdução
2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF
3. A Importância do Sinal de Excitação
- 4. Novos Paradigmas – SDR**
5. Instrumentação para SDR
6. Cenários de Medida Reais

4. Novos Paradigmas – SDR

RADIO CONVENCIONAL

- Suportam um número fixo de sistemas.
- A capacidade de reconfiguração é decidida no projecto inicial.
- Podem suportar múltiplos serviços, mas estes são escolhidos no design.
- Arquitectura de RF e Banda base tradicional.
- Não são actualizáveis

SOFTWARE DEFINED RADIO

- Suportam dinamicamente vários sistema, protocolos e interfaces.
- Capacidade de interface com diversos sistemas.
- Arquitectura de RF convencional e de Software.
- Reconfiguráveis.
- Mecanismos de actualização (Upgrade)

COGNITIVE RADIO

- Podem criar as suas próprias formas de onda.
- Pode negociar novos interfaces.
- Ajusta-se de modo a garantir a QoS requerida pelo serviço.
- Arquitectura Software.
- Inteligente
- Atento
- Aprende
- Observa
- Mecanismos de actualização

4. Novos Paradigmas – SDR

SOFTWARE DEFINED RADIO

- ≧ *Rádio no qual o processamento dos sinais é totalmente digital.*
- ≧ *Rádio no qual uma série de parâmetros de transmissão são definidos por software*
- ≧ *Rádio que tem capacidade para operar em multi-banda e multinorma*
- ≧ *Rádio reconfigurável por software.*

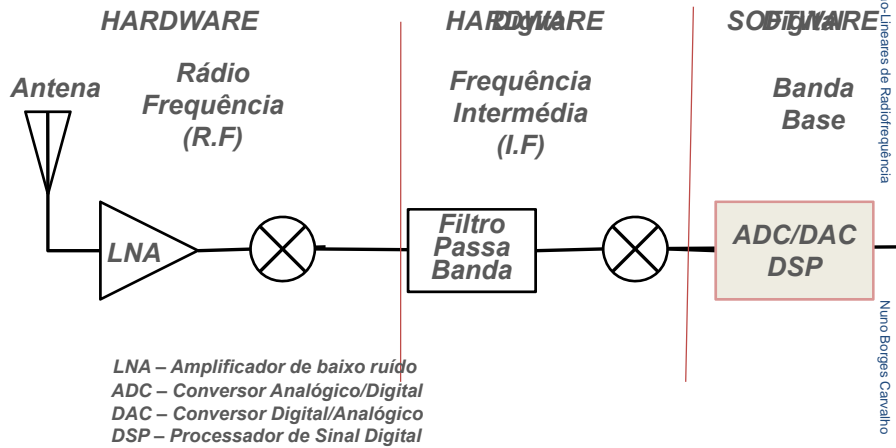
Definição original de Joseph Mitola¹:

“A software radio whose channel modulation waveforms are defined in software. That is, waveforms are generated as sampled digital signals, converted from digital to analog via a wideband DAC and then possibly upconverted from IF to RF. The receiver, similarly, employs a wideband Analog to Digital Converter (ADC) that captures all of the channels of the software radio node. The receiver then extracts, downconverts and demodulates the channel waveform using software on a general purpose processor.”

¹ Joe Mitola, “The software radio architecture,” *IEEE Communications Magazine*, vol.33, n°5, pp. 26-38, May 1995

4. Novos Paradigmas – SDR

Sistemas Cognitivos Definidos por Rádio



4. O Cognitive Radio - CR

CONCEITO COGNITIVE RADIO

- ≧ Rádio que tem capacidade de “sentir” o ambiente espectral.
- ≧ Tem capacidade de se adaptar às alterações do canal de forma automática e dinâmica.

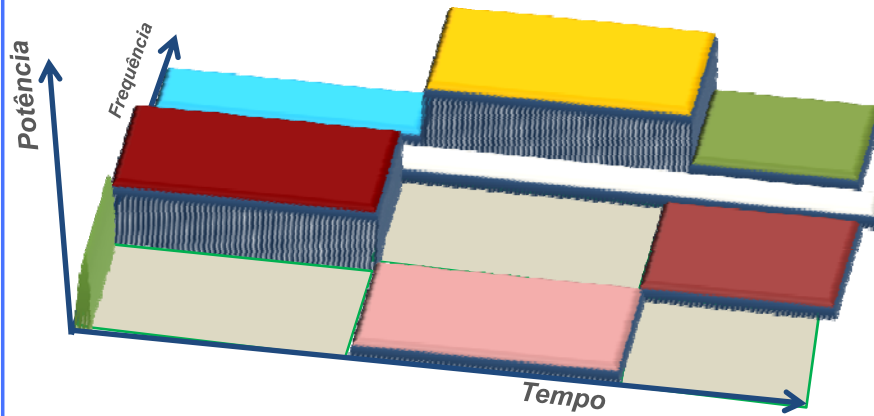
Para isso deve:

- 👉 SENTIR o ambiente espectral.
- 👉 DETECTAR a presença/inexistência de utilizadores.
- 👉 ADAPTAR-SE aos níveis de potência, banda de frequência e esquema de modulação de modo a evitar interferir noutros sistemas e garantir a qualidade de serviço (QoS) pretendida.

Definição original de Joseph Mitola (1999):
“A radio that employs model based reasoning to achieve specified level of competence in radio-related domains”

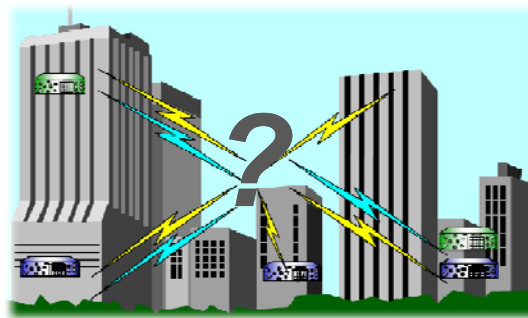
4. O Cognitive Radio - CR

**OPORTUNISTA NA UTILIZAÇÃO DO ESPECTRO
UTILIZAÇÃO MAIS EFICIENTE DO ESPECTRO**



4. O Cognitive Radio - CR

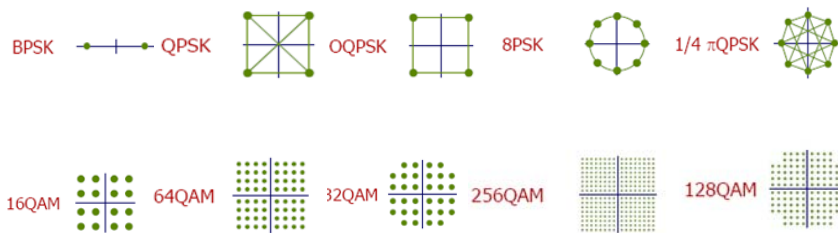
- ➔ *Identificação de fontes de sinal* ➔ *Interferentes*
- ➔ *Verificação de conformidades* ➔ *Não autorizadas*



4. Novos Paradigmas – SDR

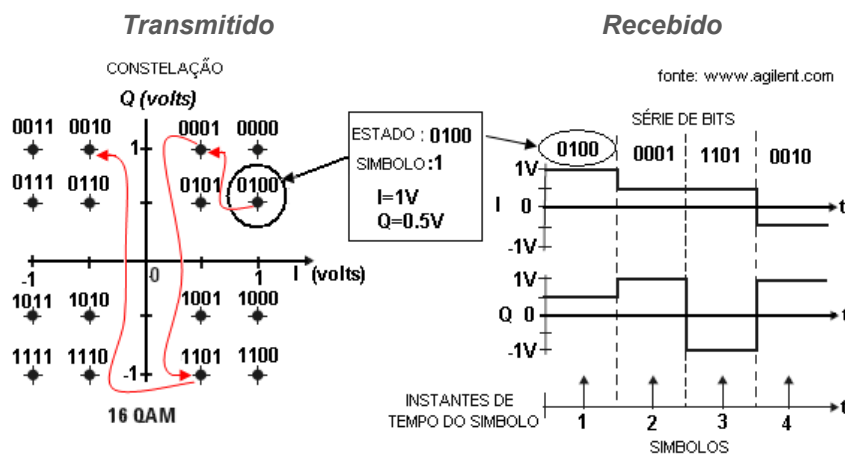
Sinais tipicamente digitais

- A sua configuração varia de acordo com o esquema de modulação
- Problemas graves de relação potência pico valor médio



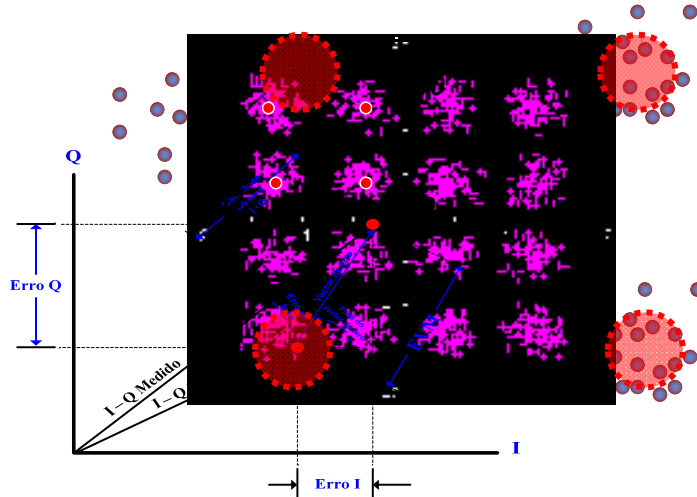
4. Novos Paradigmas – SDR

Conversão I/Q-Tensão



4. Novos Paradigmas – SDR

ERROR VECTOR MAGNITUDE (EVM)



4. Novos Paradigmas – SDR

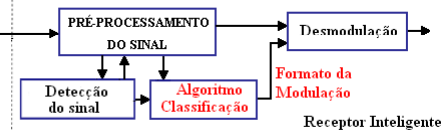
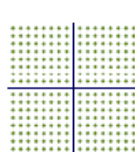
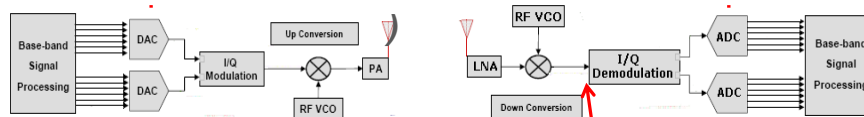
TRANSMISSÃO

RECEPÇÃO

Digital

Analógico

Digital

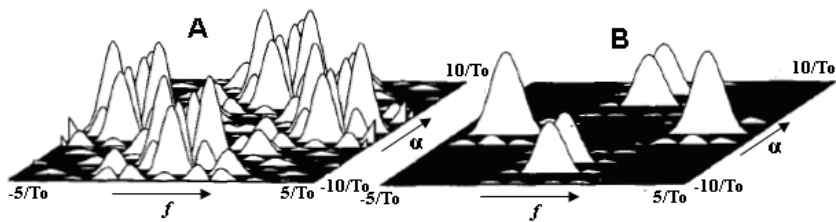


Pré-processamento do sinal:
 • Estimar Largura de Banda
 • Estimar Frequência da portadora
 • Nivel de sinal/Nivel de ruído

Classificação

4. Novos Paradigmas – SDR

Cicloestacionariedade



Magnitude da superfície da correlação espectral para:

A) BPSK com código Manchester.

B) MSK

Índice

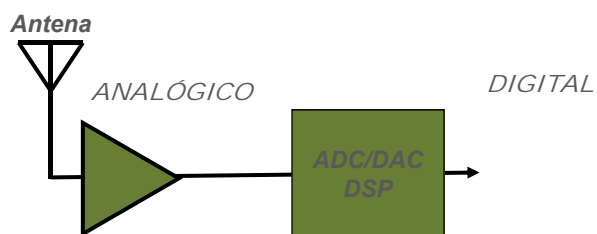
1. Introdução
2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF
3. A Importância do Sinal de Excitação
4. Novos Paradigmas – SDR
- 5. Instrumentação para SDR**
6. Cenários de Medida Reais

5. Instrumentação para SDR

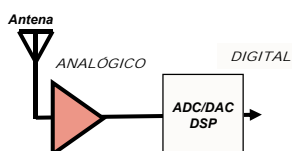
As propostas para SDR implicam o uso de conversores Analógico-Digitais e Digitais-Analógicos para a conversão entre domínios..

Por isso no novos rádios deve-se medir não só no domínio analógico, mas também no domínio digital.

Num receptor de SDR ideal teremos:

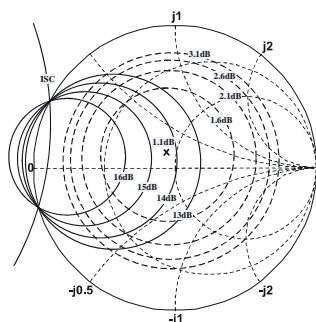


5. Instrumentação para SDR



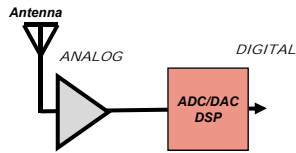
A parte analógica inclui um amplificador e por vezes um filtro sintonizável.

Por isso factores de mérito tradicionais continuam a ser importantes, exemplo:

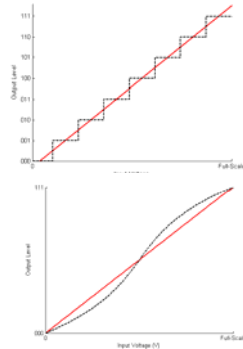


- ≧ Factor de Ruído
- ≧ Largura de Banda
- ≧ VSWR de Entrada
- ≧ Ganho
- ≧ IMD, IP3

5. Instrumentação para SDR



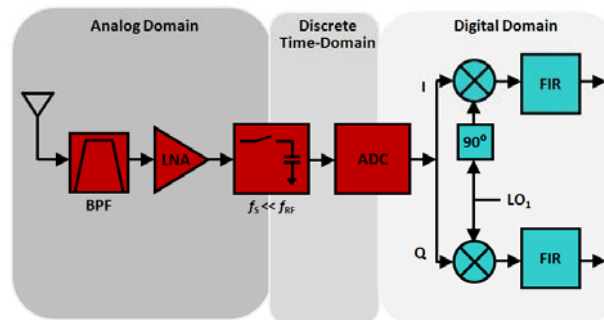
Conversores tipo ADC's e DAC's impõem factores de mérito diferentes como:



- ≧ **Ganho estático e Offset**
- ≧ **Não linearidade diferencial e integral**
- ≧ **Histerese,**
- ≧ **Distorção harmónica**
- ≧ **Espúrias**
- ≧ **SFDR, SINAD, IMD**

5. Instrumentação para SDR

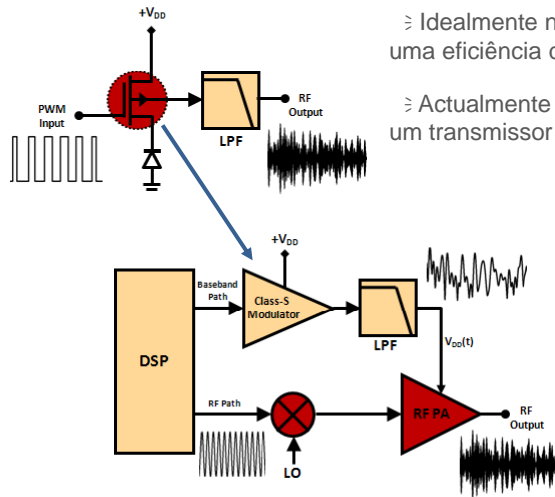
Receptor de sub-amostragem passa banda



- ≧ **Utiliza o circuito de amostragem para transladar o sinal para a 1ª zona de Nyquist ;**
- ≧ **Maximização das capacidades de processamento de sinal → Recepção multi-banda;**
- ≧ **Utilização obrigatória para sistemas passa-banda → banco de filtros sintonizáveis;**
- ≧ **Largura de banda analógica do amostrador deve incluir a portadora de RF.**

5. Instrumentação para SDR

Soluções visionárias apontam para a utilização de PWM para a construção de um transmissor completamente digital



≥ Idealmente não consome DC, obtendo uma eficiência de 100%.

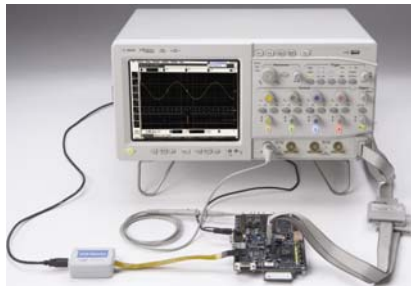
≥ Actualmente não é possível implementar um transmissor a frequências elevadas.

≥ *No entanto tem sido utilizado em versões de transmissores EER, conhecidos como transmissores polares;*

5. Instrumentação para SDR

A indústria de metrologia para SDR criou algumas soluções de medida às quais chamou Mixed Signal Oscilloscopes (MSOs):

- ≥ Operam como um osciloscópio com a vantagem de ter canais digitais;
- ≥ Permitem a correlação temporal dos sinais analógicos e digitais num mesmo instrumento;
- ≥ Neste momento apenas permitem amostragem assíncrona e utilizam um relógio interno para amostragem.



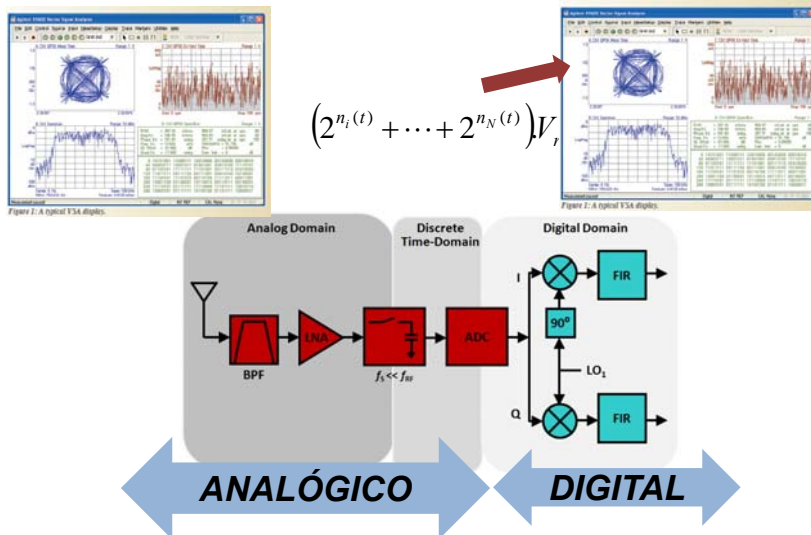
• Agilent Technologies Inc., www.home.agilent.com



• Tektronix Inc., www.tek.com

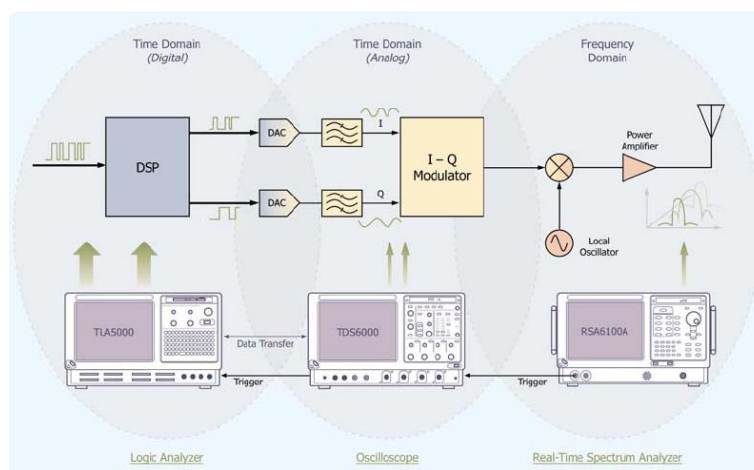
5. Instrumentação para SDR

Grande parte dos factores de mérito podem ser medidos utilizando combinações de instrumentação digital e analógica.



5. Instrumentação para SDR

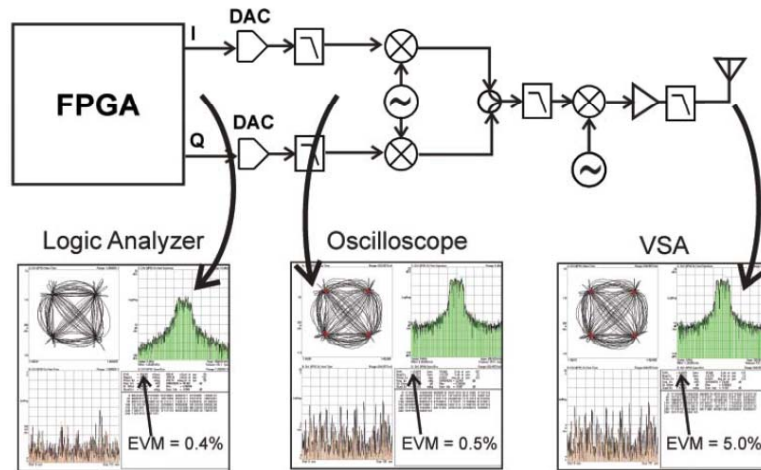
Alguma soluções passam pela combinação de equipamento



• Tektronix Inc., www.tek.com

5. Instrumentação para SDR

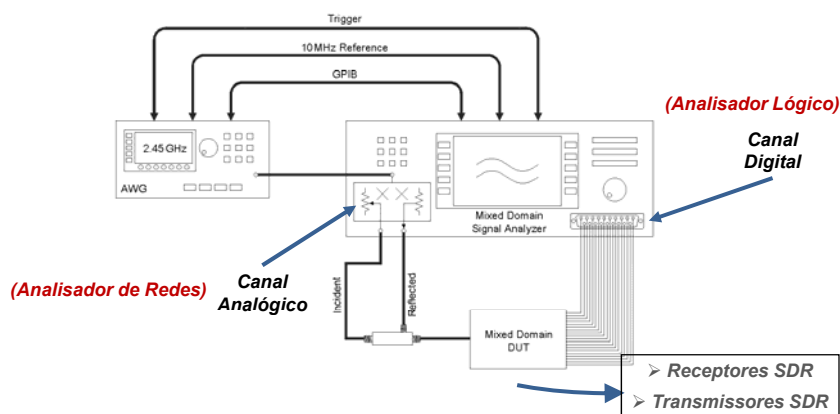
Alguma soluções passam pela combinação de equipamento



• Agilent Technologies Inc., www.home.agilent.com

5. Instrumentação para SDR

No entanto é ainda possível de utilizar sistemas de domínio misto analógico-digital.

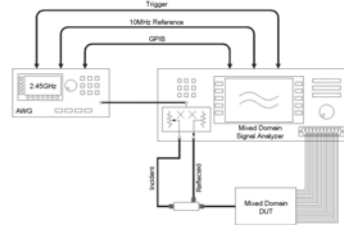


• P. Cruz, N.B. Carvalho, K.A. Remley, and K.G. Gard, "Mixed Analog-Digital Instrumentation for Software Defined Radio Characterization", IEEE Intl. Microwave Symp., Atlanta, June 2008

5. Instrumentação para SDR

Os factores de mérito usuais podem ser medidos como usualmente

$$\rho(\omega) = \frac{V_{ref}(\omega)}{V_{inc}(\omega)} = S_{11D}(\omega)$$



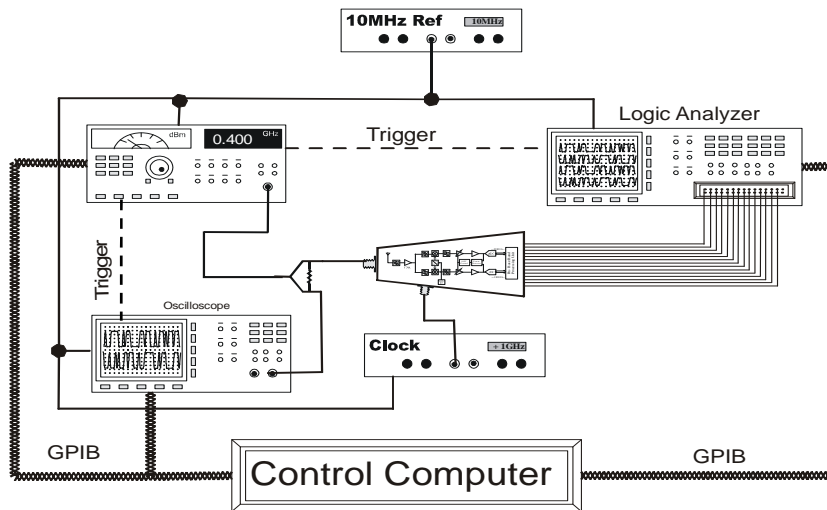
$$H_L(\omega) = \frac{V_{dig}(\omega)}{V_{inc}(\omega)} = \frac{\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} [2^{n_i(t)} + \dots + 2^{n_N(t)}] \cdot V_{ref} \cdot e^{-j\omega t} dt}{\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} v_{inc}(t) \cdot e^{-j\omega t} dt}$$

Índice

1. Introdução
2. Instrumentação Usual para Sistemas de RF
3. A Importância do Sinal de Excitação
4. Novos Paradigmas – SDR
5. Instrumentação para SDR
- 6. Cenários de Medida Reais**

5. Medidas Reais

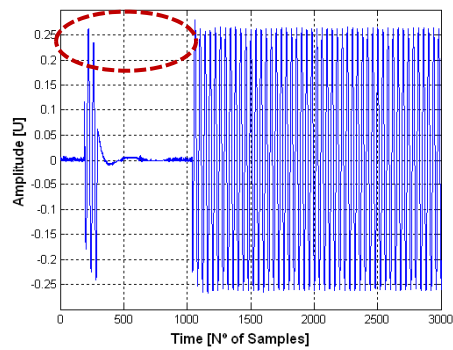
Implementação Laboratorial



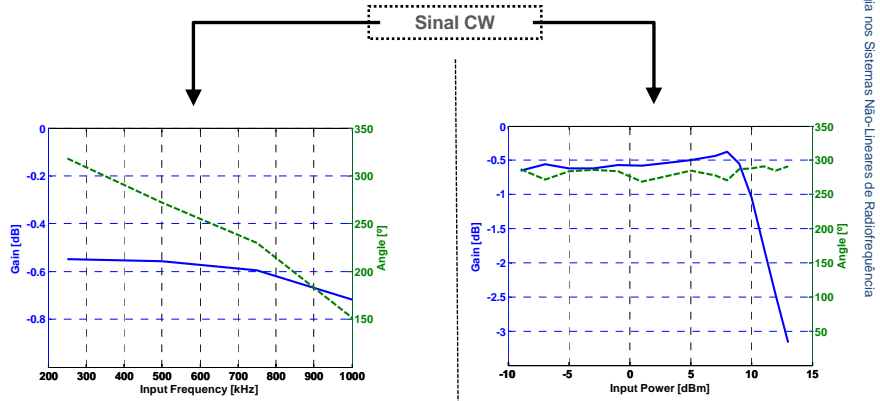
5. Medidas Reais

Solução para sincronização (Trigger):

- O sinal de trigger sofre de arrastamento (drift) temporal
- Erros costumam surgir pela utilização de sinais não síncronos
- Solução: Utilização de um trigger embestado no sinal de excitação



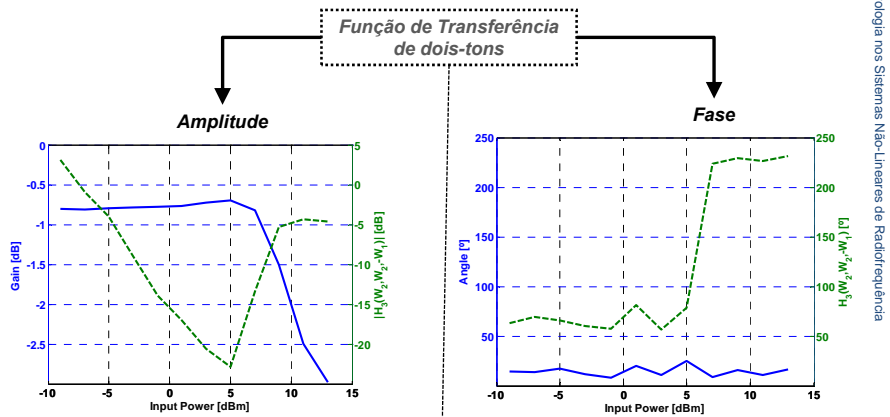
5. Medidas Reais



- Ganho é constante com a frequência
- Fase decresce de forma contínua

- Pode-se representar curvas AM-AM (azul) e curvas AM-PM (verde)

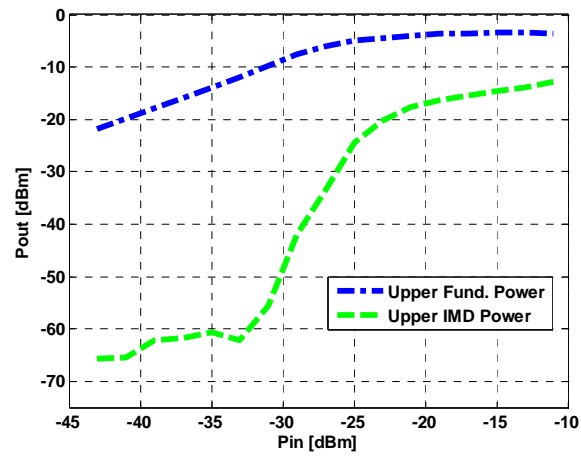
5. Medidas Reais



- A FT de primeira ordem é equivalente às curvas AM-AM / AM-PM
- A FT de terceira ordem apresenta um aumento significativo da distorção na compressão da ADC

5. Medidas Reais

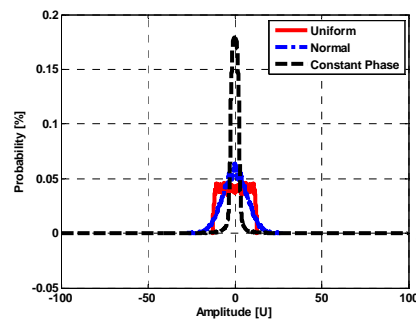
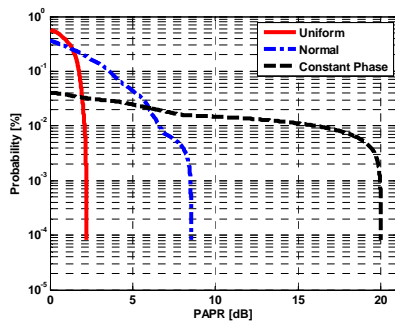
Medidas de dois tons



5. Medidas Reais

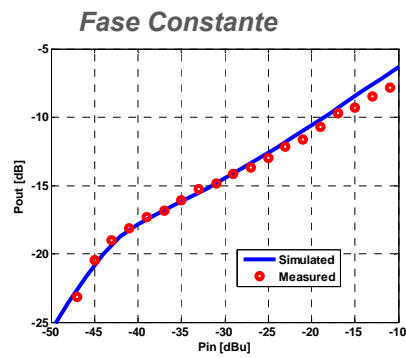
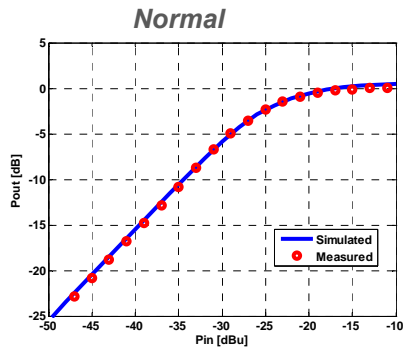
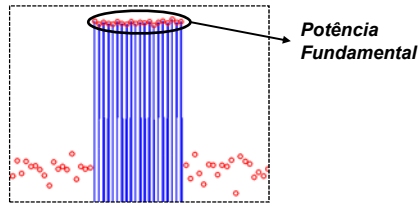
Utilização de multi-senos

Tipo de Sinal	PAPR [dB]
Uniforme	2.1266
Normal	8.5184
Fase Constante	20.0000



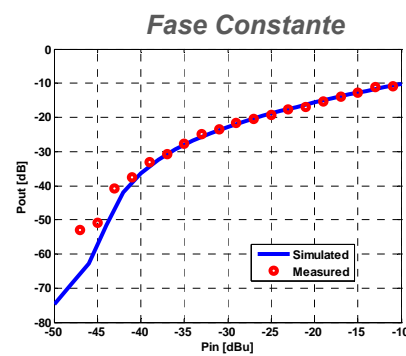
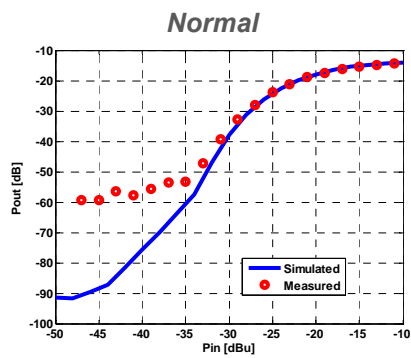
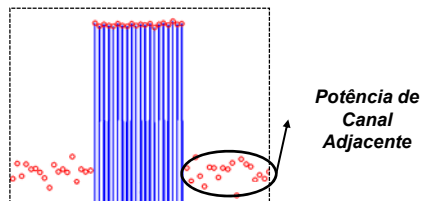
5. Medidas Reais

Medidas Multi-seno



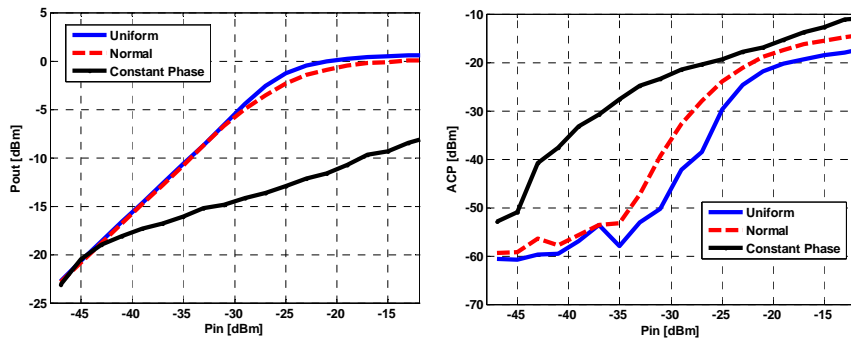
5. Medidas Reais

Medidas Multi-seno



5. Medidas Reais

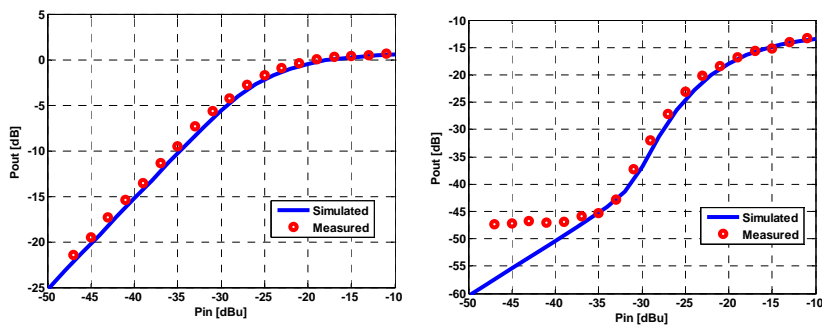
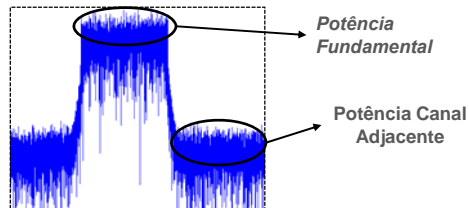
Medidas Multi-senso



5. Medidas Reais

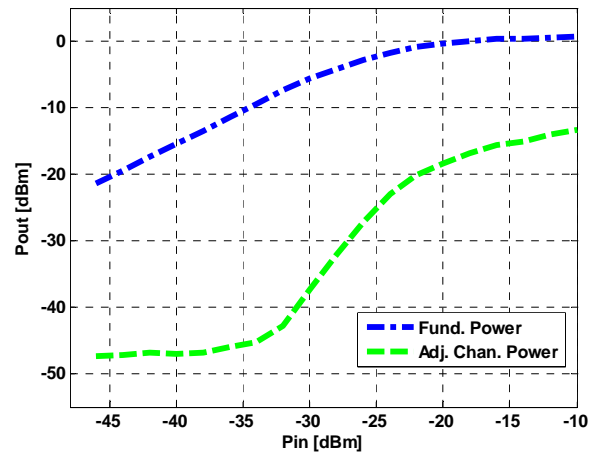
Medidas WiMax

- 64-QAM ($\frac{3}{4}$)
- BW = 3 MHz
- PAPR = 9.5266 dB



5. Medidas Reais

Medidas WiMAX



Agradecimentos

Carlos Baptista – ANACOM
Hugo Gomes – IPL
João Paulo Martins – IT
José Carlos Pedro - UA
José Pedro Borrego – ANACOM
Kate Remley – NIST
Kevin Gard – NCSU
Michael Steer – NCSU
Pedro Cabral – UA
Pedro Cruz – IT
Pedro Lavrador – UA

