

Instrumentação Virtualizada para Tecnologias Rádio Emergentes

Pedro M. Cruz, Diogo C. Ribeiro, and Nuno Borges Carvalho

Abstract—Este artigo apresenta um novo conceito de medida totalmente direccionado para a caracterização de tecnologias rádio emergentes, como sejam, rádio controlados por software ou rádios cognitivos.

Este novo sistema de medida opera simultaneamente nos domínios analógico e digital, disponibilizando assim a completa correlação desta informação multi-domínio, bem como a possibilidade de extracção de modelos comportamentais completamente inovadores e necessários nas novas arquiteturas rádio cada vez mais suportadas numa operação analógica e digital comum.

Este instrumento de medida inovador caracteriza-se também pelo facto de admitir a sua virtualização, e assim proporcionar ao utilizador final um controlo do equipamento bastante simples, rápido e flexível. Esta funcionalidade permitirá a interligação de vários equipamentos de medida presentes no mesmo laboratório, com possibilidade de acesso/controlo remoto, podendo então ser interligados numa mesma bancada virtual e controlados por um tablet ou computador.

Index Terms—Analógico-digital, instrumentação multi-domínio, rádios controlados por software, rádios cognitivos, tecnologias rádio emergentes.

I. INTRODUÇÃO

A constante evolução das comunicações sem fios e sua integração numa rede de quarta geração (4G) originou o aparecimento de novas arquiteturas rádio capazes de se adaptarem e reconfigurarem automaticamente, alterando a sua frequência de operação, largura de banda, modulação, e uso de diferentes tecnologias sem fios através da execução de vários algoritmos em software. A estes rádios que se adaptam às condições de transmissão automaticamente dá-se o nome de rádios controlados por software que advém do termo inglês *Software Defined Radio* (SDR) [1].

A ideia base das tecnologias SDR é realizar a conversão analógico-digital (ADC) e digital-analógico (DAC) o mais próximo possível da antena. Disto resulta uma elevada capacidade de adaptação e reconfiguração no domínio digital, através do uso de vários processadores (por exemplo, FPGAs)

Documento submetido a 30 de Setembro de 2011. O trabalho do autor P. M. Cruz é suportado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (F.C.T.) através de uma bolsa de doutoramento (SFDR/BD/61527/2009).

Os autores deste trabalho pertencem ao Instituto de Telecomunicações, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal (phone: +351 234 377 900; fax: +351 234 377 901; e-mail: pcruz@av.it.pt, dcriste@ua.pt and nbcavalho@ua.pt).

capazes de tratar o sinal correctamente.

Na Figura 1 é apresentada uma configuração típica de um SDR, proposta em [1], onde se pode verificar claramente a constante presença em ambos os domínios analógico e digital.

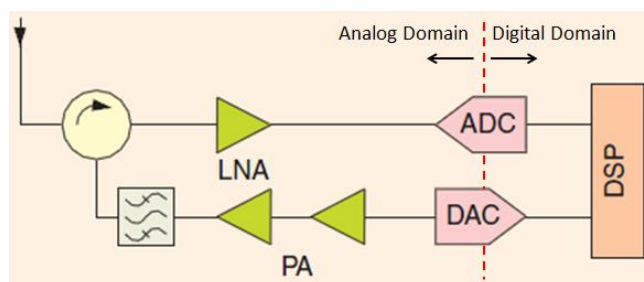


Figura 1 – Implementação típica do conceito SDR, [1].

Além disto, é mais ou menos aceite pela comunidade científica que estas tecnologias SDR serão a base para uma nova fronteira que assenta na implementação de arquiteturas de rádio cognitivas, que descendem do termo inglês *Cognitive Radio* (CR), [2].

Estes novos paradigmas de comunicação favorecem a criação de arquiteturas flexíveis, capazes da adaptação automática ao interface rádio (ar) via optimização das frequências das portadoras, modulações e máscaras espectrais, de modo a minimizar a interferência e simultaneamente manter a comunicação num determinado cenário.

Salienta-se ainda o facto de que o sucesso das comunicações a serem disponibilizadas no espectro que se libertará com o switch-off das emissões analógicas de televisão (*TV White Spaces*), está directamente relacionado com a evolução destes rádios inteligentes, que permitirão uma optimização real da ocupação espectral, tomando decisões sobre o seu funcionamento independentemente da sua implementação inicial.

Verifica-se assim que nas tecnologias SDR/CR existe sempre uma entrada/saída no domínio analógico e outra entrada/saída no domínio digital, o que faz com que nestes novos sistemas rádios a importância da medida e/ou caracterização do sinal analógico seja igualada, pela medida e/ou caracterização dos sinais no domínio digital. Estas medidas e/ou caracterizações em ambos os domínios são conhecidas como medidas multi-domínio que advém do termo em inglês, *mixed-domain measurement*. Por exemplo, gostaríamos de continuar a ter acesso a alguma informação do domínio analógico como sendo o factor de ruído de entrada ou o VSWR da cadeia de recepção, mas também a outras medidas

normalmente exclusivas do domínio digital, como sendo o INL/DNL do conversor A/D, a gama dinâmica isenta de espúrios, etc.

Em suma, nota-se que os actuais rádios evoluem para sistemas mais complexos e adaptativos, o que implica que também a instrumentação ainda em uso nos rádios que até agora operavam praticamente no domínio analógico terá de evoluir e crescer no sentido de facilitar a completa e rápida caracterização/teste destas novas arquitecturas rádio baseadas em tecnologias SDR/CR.

Tudo isto nos leva a dizer que um instrumento especificamente pensado para a caracterização de tecnologias rádio emergentes será uma mais-valia para esta área da instrumentação de medida.

Este artigo está organizado da seguinte forma, em primeiro lugar é realizado um breve resumo do estado da arte actual relativo a sistemas de medida para tecnologias rádio emergentes, seguindo-se a descrição do novo conceito de instrumentação multi-domínio aqui proposto. Após isto, é apresentado e descrito o protótipo laboratorial já em desenvolvimento, bem como, alguns exemplos de medições já efectuadas. Finalmente serão apresentadas as conclusões do trabalho.

II. ESTADO DA ARTE

Algumas empresas de instrumentação rádio [3 – 5] possuem já equipamentos que de algum modo são capazes de caracterizar/testar rádios para tecnologias actuais e emergentes. Os exemplos mais óbvios são conhecidos como *mixed-signal oscilloscopes* (MSO), Figura 2, que permitem o sincronismo temporal dos sinais no domínio analógico com os do domínio digital, diferenciando-se da solução aqui apresentada pelo não sincronismo com o dispositivo em teste (DUT), pois o MSO usa as suas próprias frequências de amostragem que normalmente não estão relacionadas com o DUT.

De acordo com os trabalhos publicados em [6] e [7], quando se pretende testar dispositivos SDR (incluindo ADCs), a correcta avaliação das funções de transferências em amplitude e fase requerem amostragem coerente (do termo em inglês *coherent sampling*) entre os sinais de entrada, de saída e de amostragem (*clock*). Assim, no caso de se aplicar uma amostragem assíncrona então poderão acontecer alguns fenómenos (como *spectral leakage*) que irão degradar por completo qualquer informação de medida de amplitude e/ou fase.

Por exemplo, o aparecimento de *spectral leakage* deve-se ao facto de na execução das transformadas de Fourier (DFT ou FFT) os diferentes sinais não partilharem uma mesma grid de tempos, tornando-se não correlacionados.

Outros potenciais problemas deste MSO incluem, por exemplo, o tamanho da memória necessária para se extrair um modelo comportamental de um qualquer dispositivo. Isto deve-se ao facto de que estes tipos de instrumento usam frequências de amostragem bastante elevadas, o que leva a necessidade de se capturar um grande número de pontos para

se poder observar as baixas/médias taxas de símbolo usadas nos sinais modulados constituintes da maioria das normas wireless.

Adicionalmente, comparando novamente com o equipamento aqui proposto, o MSO possui ainda outras lacunas, como por exemplo, a incapacidade de gerar os sinais de excitação necessários na caracterização dos sistemas rádio acompanhado pela incapacidade de caracterizar a adaptação da parte analógica do DUT.

Em suma, podemos afirmar que este MSO funciona mais como um leitor de informação requerendo outros equipamentos adicionais, para a geração de sinais e avaliação da adaptação da parte analógica, aquando da caracterização do dispositivo rádio emergente.



Figura 2 – *Mixed-Signal Oscilloscope* disponibilizado por uma empresa de instrumentação.

Outra solução apresentada pelas mesmas empresas de instrumentação rádio passa pela combinação de vários instrumentos [8 – 10], Figura 3, onde são incluídos analisadores lógicos, analisadores de sinal, osciloscópios, etc. para se poder efectuar o teste da cadeia completa do transmissor-receptor rádio.

De forma a se conseguir automatizar todo o processo de medida neste cenário é necessário o uso de vários sinais de referência, triggers e marcadores para que as medições efectuadas nos vários domínios (analógico-digital e tempo-frequência) estejam sincronizadas o mais possível.

Ainda assim, mesmo que tentemos efectuar o mais correcto e completo dos sincronismos, este revela-se uma tarefa bastante morosa e requer também um grande conhecimento e experiência na utilização de tais equipamentos. Na verdade, na grande maioria das situações não nos é possível efectuar a caracterização de um transmissor-receptor rádio com informação de amplitude e fase. Por exemplo, é bastante complicado extrair a função de transferência (S_{21}) como se faz num analisador de redes vectorial para um qualquer componente com duas portas analógicas.

Apesar de todas as limitações, esta solução acaba por ser bem mais completa que a solução apresentada anteriormente (MSO) no que concerne à capacidade de caracterizar um sistema de rádio emergente na sua totalidade.

Em resumo, esta solução revela-se inadequada para uma rápida e fácil caracterização das futuras tecnologias rádio emergentes.

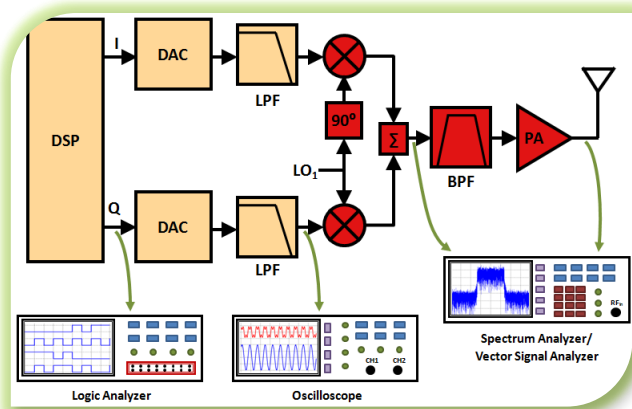


Figura 3 – Instrumentação aplicada no teste de um transmissor de SDR, onde são combinados vários equipamentos.

III. DESCRIÇÃO DA IDEIA

A ideia que iremos descrever de seguida centra-se nos novos paradigmas das comunicações rádio, ou seja, reside na implementação e construção de um sistema de medida (instrumentação) analógico-digital especificamente projectado para a caracterização/teste de tecnologias rádio emergentes (sistemas SDR/CR). Esta ideia assenta em alguns pressupostos que pensamos serem de um interesse acrescido para um equipamento desta natureza:

- Instrumentação especificamente projectada para a caracterização de tecnologias rádio emergentes
- Operação simultânea nos dois domínios (analógico e digital) de uma forma completamente síncrona
- Capacidade de se integrar, através da virtualização, com outros equipamentos de medida presentes numa mesma rede

Na Figura 4 é apresentado o conceito geral da ideia aqui discutida, tendo por base os pressupostos anteriores.

Tal como já foi mencionado na secção II, a instrumentação que é normalmente utilizada na caracterização de componentes analógicos, tipicamente, não providencia informação suficiente para uma adequada caracterização, visto que grande parte do sinal está agora no domínio digital.

O conceito do sistema de medida *mixed-domain* que aqui estamos a apresentar permite ao utilizador avaliar uma completa arquitectura rádio (parte de transmissão e parte de recepção) simultaneamente nos domínios analógico e digital. O equipamento idealizado pretende disponibilizar uma vasta panóplia de informação relativamente ao transmissor-receptor rádio (dispositivo em teste), tais como: qualidade da adaptação da entrada e/ou saída analógicas; função de transferência entre a entrada analógica e a saída digital e vice-versa; fornecer dados completamente síncronos com as frequências de operação e amostragem do dispositivo *mixed-domain*.

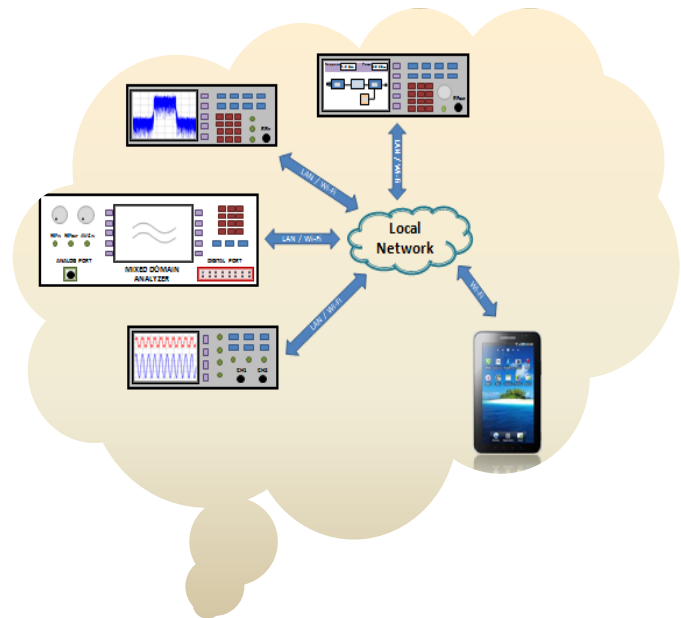


Figura 4 – Conceito base da ideia aqui proposta onde se inclui o novo sistema de medida inserido numa rede virtualizada com vários equipamentos.

De forma a ser possível a implementação deste equipamento de medida inovador são requeridos pequenos avanços em pontos singulares, tal como, o sincronismo temporal entre os sinais dos domínios analógico e digital. Outro avanço que por si só já representa uma grande inovação para a comunidade científica é, por exemplo, o desenvolvimento de um procedimento de calibração e análise de erros de medição para tal instrumentação.

É de referir que este equipamento *mixed-domain* estará habilitado para caracterizar vários tipos de dispositivos, desde uma completa arquitectura rádio a um simples conversor de dados (analógico-digital ou digital-analógico) necessitando para isso de apenas mais alguma instrumentação complementar, ao invés do que agora é oferecido pelo mercado de instrumentação rádio. Isto deve-se ao facto do equipamento possuir várias funcionalidades, como por exemplo, um gerador arbitrário de sinais que permite ao utilizador criar e gerar qualquer tipo de sinal com uma largura de banda limitada.

É ainda importante focar que a maioria das capacidades disponibilizadas nas soluções descritas na secção II são também cobertas pelo sistema de medida aqui proposto, bem como, outras capacidades que não são fornecidas nesses arranjos, como por exemplo, a possibilidade de extrair rapidamente a função de transferência de uma completa arquitectura rádio emergente. Actualmente este é um aspecto muito importante no desenvolvimento de modelos comportamentais capazes de permitir a simulação e subsequente avaliação de desempenho, e de uma forma eficaz se detectarem possíveis erros ou imperfeições na construção dessas arquitecturas em teste. Um diagrama de blocos base para o sistema a implementar é apresentado na Figura 5.

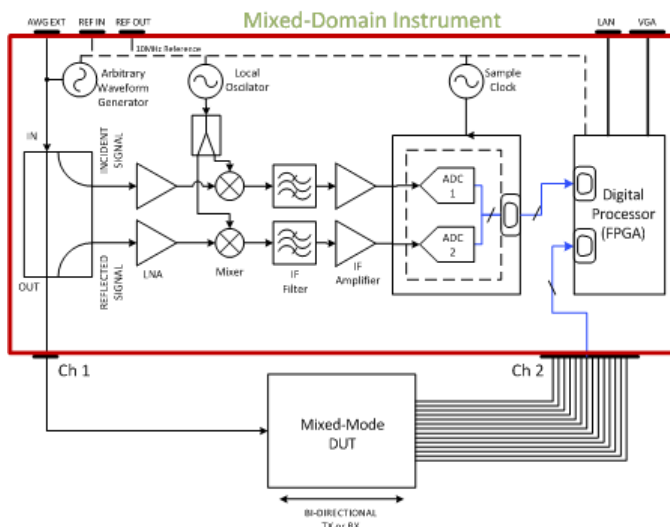


Figura 5 – Diagrama de blocos do equipamento de medida analógico-digital proposto.

Observando com algum cuidado o esquemático apresentado na Figura 5, poderá dizer-se que este sistema de medida é uma junção de partes específicas de outros sistemas de medida aliado a uma grande quota-parte de inovação. Esta associação de elementos irá permitir a caracterização e teste de tecnologias rádio emergentes (por exemplo, novos rádios adaptáveis como CRs para *TV White Spaces*), tornando-se bastante rápida mas ao mesmo tempo eficiente.

Pretende-se ainda que o sistema de medida proposto tenha a possibilidade de ser virtualizado. O conceito base da virtualização de instrumentação passa por permitir a partilha e uso de recursos de um dado equipamento de medida por vários utilizadores, ainda que não possa ser executado em simultâneo neste caso específico. Assim, o utilizador deste equipamento pode efectuar as medições desejadas directamente no instrumento, usando para o efeito os botões disponíveis no próprio equipamento, mas também poderá usá-lo através de um software específico que terá de ser instalado, por exemplo, num comum tablet ou portátil que tenha acesso remoto à rede onde o respectivo equipamento está instalado. Ora, a virtualização da instrumentação permite além do mencionado atrás, interligar de uma forma rápida e eficaz um grande número de equipamentos presentes num dado laboratório, o que aumenta a interoperabilidade.

Refira-se que nenhuma das soluções disponibilizadas pelas empresas de instrumentação rádio apresenta para já a funcionalidade de virtualização no seu sentido lato, estando apenas disponível na grande maioria dos casos a opção de acesso/controlo remoto.

Adicionalmente, este instrumento de medida multi-domínio poderá também ser uma grande ajuda para as autoridades competentes para uma mais eficaz certificação e/ou regulação de equipamentos rádio.

Esta assumption torna-se ainda mais óbvia tendo em conta

que se pretende libertar espectro para aplicações em *White Spaces*, onde a gestão do espectro poderá tornar-se completamente livre e sem recurso a regras rígidas de pré-alocação para um dado operador, obrigando a uma completa e exaustiva certificação da operação dos rádios habilitados para tais aplicações.

Tudo isto nos leva a constatar que a ideia aqui apresentada traz reduções nos custos e tempos de produção, assim como, na capacitação de funcionalidades inovadoras.

IV. PROTÓTIPO LABORATORIAL

A ideia aqui exposta encontra-se actualmente na fase de finalização de um protótipo laboratorial para que seja possível a sua demonstração em ambientes reais para a total validação da tecnologia aqui apresentada.

Apresenta-se na Figura 6 uma fotografia do estado actual do protótipo que inclui a implementação da parte de hardware do sistema de medida. Após isto será necessário fazer a integração desta parte com alguns blocos de software (já em desenvolvimento), sendo então controlados por um *graphical user interface* (GUI).

Para além de tudo isto não podemos esquecer que apenas equipamento ideais iriam funcionar correctamente e assim apresentar os resultados reais. No entanto, todos os equipamentos possuem as suas inerentes imperfeições que iriam degradar os resultados medidos, sendo que para se eliminar a maioria destas imperfeições e possíveis erros é necessário efectuar a calibração da instrumentação antes da medição.

Todos os instrumentos de medida (incluindo o instrumento *mixed-domain* aqui apresentado) são afectados por três tipos de erros, nos quais se incluem erros sistemáticos, erros aleatórios e erros de *drift*, [11]. Os erros sistemáticos acontecem devido a imperfeições no instrumento e no próprio setup de medida, podendo-se assumir invariantes no tempo logo previsíveis/corrigíveis através de calibração. Já os erros aleatórios variam de forma não previsível com o tempo (por exemplo, ruído inerente à própria instrumentação), logo impossíveis de serem compensados. Por último, os erros de *drift* devem-se ao facto do desempenho do sistema de medida se alterar após uma calibração e são principalmente causados por variações de temperatura, sendo passíveis de correcção através de uma re-calibração da instrumentação.

Este processo de calibração passa pela medida de componentes calibrados (tais como: *open*, *short*, *load* e *through*) profundamente conhecidos, e que permitem depois a eliminação dos erros nas medições subsequentes, [12]. De forma a se efectuar uma completa caracterização dos dispositivos a serem testados necessitamos de realizar a correcção de erros não só em amplitude mas também em fase. Relativamente a este ponto existem ainda alguns problemas em aberto que necessitam de mais alguma investigação e validação.

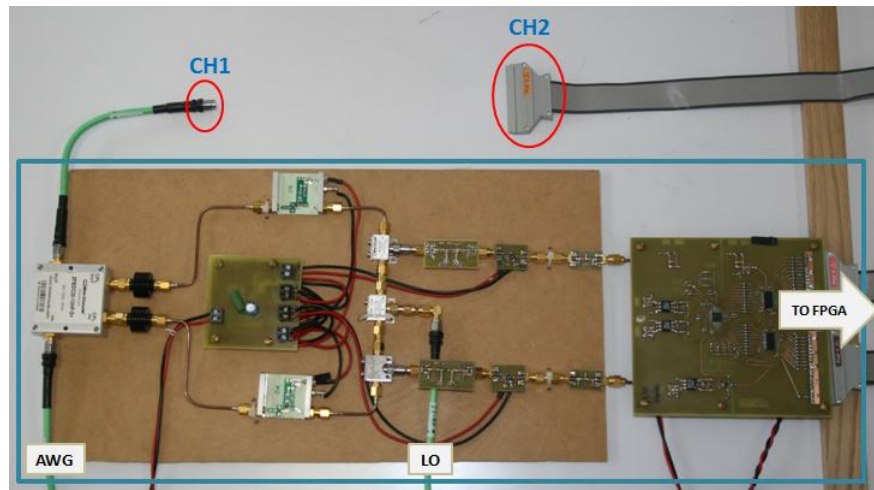
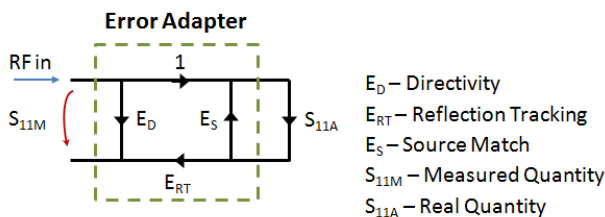


Figura 6 – Fotografia do protótipo actual do sistema de medida analógico-digital proposto.

São do conhecimento comum nesta área vários tipos de calibração dos quais podemos citar: calibração da resposta, calibração de um porto, calibração da resposta e de um porto (notada como calibração melhorada) e calibração de 2 portos (calibração completa).

Devido ao facto do sistema de medida apresentado possuir uma porta analógica (porta 1) e outra porta digital (porta 2) constatamos que a informação que será obtida na porta digital será constituída por uma palavra digital (conjunto de uns e zeros que equivalem a um dado nível cosoante o número de bits em uso). Assim, não faz sentido neste sistema de medida analógico-digital definirmos o coeficiente complexo de reflexão da porta 2 (S_{22}), pelo que lhe atribuímos o valor zero, ou seja, a porta 2 está totalmente adaptada. Pela mesma razão, considera-se também que o coeficiente complexo de transmissão inverso (S_{12}) é zero. Estas duas considerações impedem assim a realização de uma calibração de dois portos (dita completa), sendo que se opta então por efectuar uma calibração melhorada composta pela calibração do porto 1 e por uma calibração da resposta.

Na calibração do porto 1 utilizam-se componentes previamente conhecidos (*short, open e load*) para se resolver os *unknowns* (E_D ; E_{RT} ; E_S) presentes na equação exposta na Figura 7, e então obter-se a matriz de correcção de erros (*Error Adapter*).



$$S_{11M} = E_D + E_{RT} \cdot \left[\frac{S_{11A}}{1 - E_S \cdot S_{11A}} \right]$$

Figura 7 – Comparação de medidas da qualidade da adaptação a 50Ω (amplitude e fase) do porto 1 de um filtro passa-banda centrado a

60MHz.

Desta forma, em todas as medidas efectuadas o valor obtido (S_{11M}) vai ser corrigido usando a matriz de erros e o valor efectivo (S_{11A}) será obtido.

Por outro lado, na calibração da resposta por estarmos a lidar com um sistema que opera nos dois domínios seria necessário a existência de um *through* analógico-digital (ADC ideal). Ora como tal componente não existe pretende-se neste caso usar uma ADC com uma qualidade elevada, e sabendo previamente o seu desempenho para se compensar nas medidas subsequentes. Por exemplo, poderia ser usada uma ADC de alta largura de banda mas utilizando uma frequência de amostragem baixa (baseado no conceito de *band-pass sampling* [13]) conjugada com um medidor de potência para atingir uma calibração da resposta em termos de amplitude e fase.

De seguida vão ser apresentados alguns exemplos da aplicação do protótipo apresentado em medidas de vários componentes.

A. Exemplo de Aplicação Nº 1

Neste primeiro exemplo de aplicação vamos apresentar os resultados obtidos para a adaptação da porta 1 (analógica) de um filtro passa-banda centrado a 60MHz. Estas medidas foram baseadas numa medida de 2 tons tal como foi proposto em [14] e efectuando a calibração melhorada descrita na secção anterior. Os resultados obtidos (Figura 8) são comparados para efeito de validação com medidas efectuadas no Network Analyzer de referência E8361C da Agilent [15].

Apresenta-se também na Figura 9 as medidas e respectivas comparações para um amplificador da Mini-Circuits disponível no mercado com referência “ERA-4-SM+”, [16].

Como se pode verificar em ambas as situações os resultados são bastante coincidentes o que de alguma forma valida o sistema proposto.

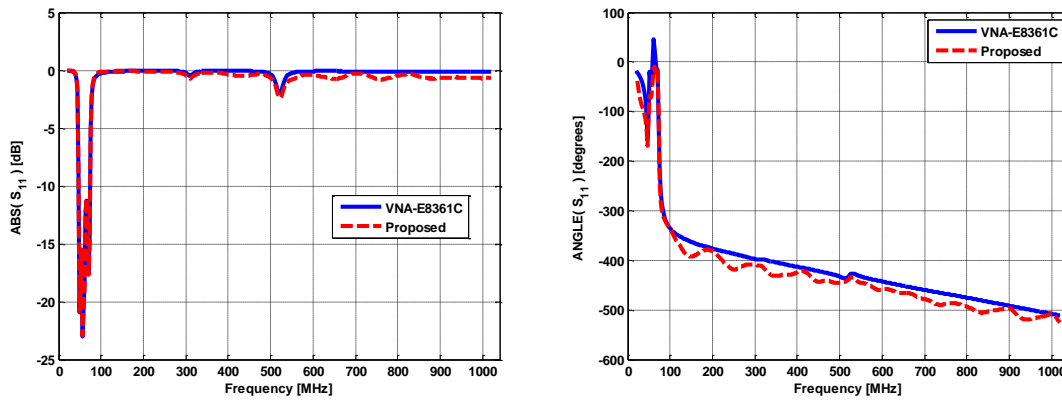


Figura 8 – Comparação de medidas da qualidade da adaptação a 50Ω (amplitude e fase) do porto 1 de um filtro passa-banda centrado a 60MHz.

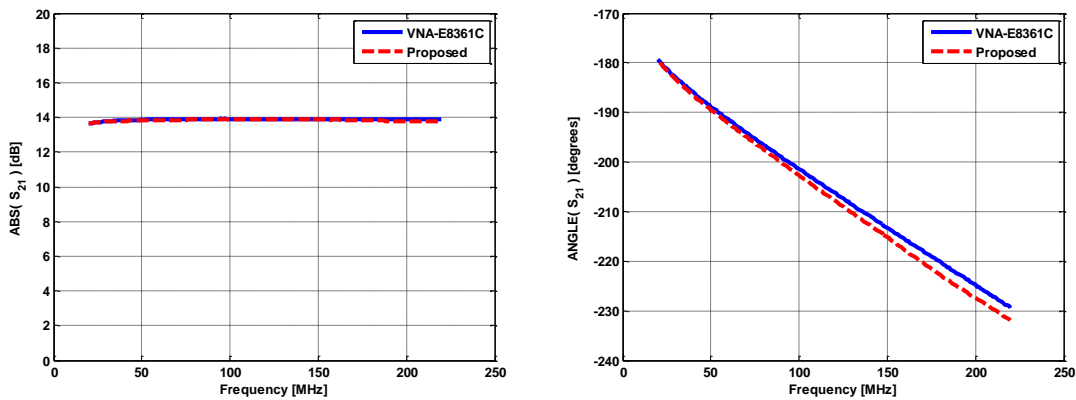


Figura 9 – Comparação de medidas da função de transferência (amplitude e fase) de um amplificador (ERA-4-SM+).

B. Exemplo de Aplicação Nº 2

Neste segundo exemplo apresentamos medidas para a função de transferência de uma ADC de banda larga. Nesta situação comparamos os dados obtidos com a informação dessa mesma função de transferência disponibilizada pela empresa produtora. Na Figura 10 é apresentado um gráfico comparativo dos resultados para medidas efectuadas com o sistema proposto entre 75MHz e 170MHz, onde se pode verificar que são bastante coincidentes.

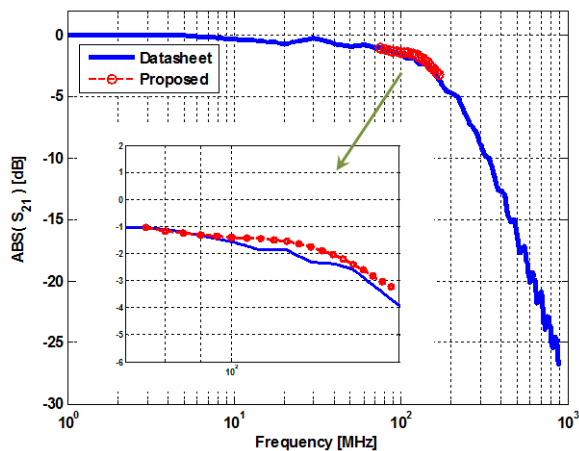


Figura 10 – Função de transferência de uma ADC de 12-bits (ADS5521-EVM) comparando os valores presentes no respectivo datasheet com medidas do sistema proposto.

V. SUMÁRIO E CONCLUSÕES

A ideia apresentada representa um produto inovador para o mercado da instrumentação rádio pelo que se prevê que o potencial da sua aplicação em produtos/serviços inovadores (tecnologias de rádio emergentes como sejam SDRs e CRs) seja bastante grande.

É notório também que o sistema de medida proposto necessita ainda de alguns avanços e complementos de forma a se tornar um instrumento válido e funcional.

Para além disso, a utilização desta instrumentação virtualizada permitirá a criação/alteração de outros produtos/serviços, como por exemplo, o desenvolvimento de novos tipos de modelos comportamentais para tecnologias rádio emergentes a operar simultaneamente nos domínios analógico e digital, assim como, validar soluções técnicas para os novos sistemas 4G (LTE, LTE-advanced), quer do ponto de vista das estações rádio, quer do ponto de vista dos terminais móveis.

Outra das vantagens prende-se com o facto de o teste de tecnologias de rádio emergentes poder ser executado de uma forma mais rápida e eficaz, o que levaria a melhorias no respectivo processo de produção.

Finalmente, será possível reduzir os custos de aquisição de equipamento de medida necessário para caracterizar e testar os equipamentos rádio.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Mitola, "The software radio architecture", *IEEE Communications Magazine*, vol. 33, no. 5, pp. 26-38, May 1995.
- [2] J. Mitola, and G.Q. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal," *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, Aug 1999.
- [3] Agilent Technol., Inc., "Debugging embedded mixed-signal designs using mixed signal oscilloscopes," Agilent Application Note no. 5989-3702EN, Santa Clara, CA, March 2008.
- [4] Rohde & Schwarz, Munich, "Software defined radios – overview and hardware (1)," *The Rohde & Schwarz News Magazine*, no. 182, pp. 58-61, 2004.
- [5] Tektronix, Beaverton, OR, "Introduction to mixed signal test solutions," Tektronix Application Note no. 3GW-20213-0, Sept. 15, 2006.
- [6] Waveform Measurement and Analysis Technical Committee of the IEEE Instrumentation and Measurement Society, *1241-2000-IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters*, IEEE Standard 1241-2000, June 13, 2001.
- [7] P.M. Cruz, N.B. Carvalho, and K.A. Remley, "Designing and Testing Software-Defined Radios," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 11, no. 4, pp. 83-94, June 2010.
- [8] Agilent Technol., Inc., "Software defined radio measurement solutions," Agilent Application Note no. 5989-6931EN, Santa Clara, CA, July 13, 2007.
- [9] Tektronix, "Testing modern radios," Tektronix Application Note no. 37W-21488-1, Beaverton, OR, Nov. 12, 2007.
- [10] Tektronix, "Software defined radio testing using real-time signal analysis," Tektronix Application Note no. 37W-19680-0, Beaverton, OR, May 12, 2006.
- [11] Agilent Technol., Inc., "Network analyzer basics," Agilent Application Note no. 5965-7917E, Santa Clara, CA, August 31, 2004.
- [12] Agilent Technol., Inc., "Applying error correction to network analyzer measurements," Agilent Application Note no. 5965-7709E, Santa Clara, CA, March 27, 2002.
- [13] R. Vaughan, N. Scott, and D. White, "The Theory of Bandpass Sampling," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 39, no. 9, pp. 1973-1984, Sept. 1991.
- [14] T. Bednorz, "Group delay and phase measurements at converters and multistage converters without LO access", Proc. IEEE Int. Conf. Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems, Israel, pp. 1-5, November 2009.
- [15] Agilent Technol., Inc., "E8361A/C - PNA Microwave Network Analyzer – Technical Specifications", January 8, 2010.
- [16] Mini-Circuits, "ERA-4-SM+ Monolithic InGaP HBT MMIC Amplifier – Datasheet".



Pedro M. Cruz (S'07) was born in Ovar, Portugal in 1982. He received a five years degree in Electronics and Telecommunications Engineering in July 2006 and M.Sc. degree in July 2008, both from Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal. He is now a PhD student on Electrical Engineering at the same university.

He has worked at Portugal Telecom Inovação, Aveiro, Portugal as trainee in a project of localization systems based in wireless devices from Sept. 2006 to April 2007. Currently, he is a researcher with Instituto de Telecomunicações, Aveiro, Portugal enrolled in the characterization and modeling of software-defined radio front ends. His main research interests are connected to software-defined radio and cognitive radio fields giving great attention to high-speed wideband data converters (A/D and D/A).

Mr. Cruz was a finalist in the student paper competition of the IEEE MTT-S International Microwave Symposium 2008. He was recognized with the 3rd place in the GAAS Association PhD Student Fellowship for EuMIC 2009.



Diogo C. Ribeiro was born in Ferreira do Zêzere, Portugal in 1988. He received a degree in Electronics and Telecommunications Engineering Science in July 2009 at Universidade de Aveiro and he is now a finalist in M.Sc. at the same university.

Mr. Ribeiro has as main interest software-defined radio measurement and characterization. He has scored in 2nd place at National Competition of Micro-Rato 2009.



Nuno B. Carvalho (S'92-M'00-SM'05), was born in Luanda, Angola, in 1972. He received the diploma and doctoral degrees in Electronics and Telecommunications Engineering from the Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal in 1995 and 2000 respectively. He is an Associate Professor at the same University, and a Senior Research Scientist at the Instituto de Telecomunicações.

His main research interests include CAD for nonlinear circuits/systems, nonlinear distortion analysis in microwave/wireless circuits and systems and measurement of nonlinear phenomena, recently he has also been involved in design of dedicated radios and systems for newly emerging wireless technologies. He was the recipient of the 1995 University of Aveiro and the Portuguese Engineering Association Prize for the best 1995 student at the Universidade de Aveiro, the 1998 Student Paper Competition (third place) presented at the IEEE International Microwave Symposium, the 2000 IEE Measurement Prize. He is also the co-inventor of four registered national patents.

He is a reviewer and author of more than 100 papers in several magazines and conferences and the vice-chair of the IEEE MTT-11 Technical Committee and the chair of the URSI-Portugal Metrology group. Dr. Borges Carvalho is co-author of the book "Intermodulation Distortion in Microwave and Wireless Circuits" from Artech House, 2003.