

Novos Desafios à Monitorização e Controlo do Espectro, na Perspetiva dos Sistemas de Medida

José Pedro Borrego^{1,2}, Sérgio Antunes¹, Octavian Postolache³, Nuno Borges Carvalho² e José Neto Vieira⁴

¹ ICP-Autoridade Nacional de Comunicações, Direção de Gestão do Espectro, Alto do Paimão, Barcarena, Portugal

² Instituto de Telecomunicações, Polo de Aveiro, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal

³ Instituto de Telecomunicações, Polo de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal

⁴ Instituto de Engenharia Eletrónica e Telemática de Aveiro, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal

Sumário — Esta comunicação pretende caracterizar a evolução dos sistemas de medida usados na monitorização e controlo do espectro radioelétrico, em Portugal, nomeadamente, dando conta dos projetos em curso no ICP-ANACOM, tendo em vista a adequação das suas infraestruturas tecnológicas aos novos desafios do presente e do futuro, perspetivando desde logo cenários previsíveis de neutralidade tecnológica e de flexibilidade de utilização do espectro.

Palavras-Chave — Analisador de Espectros de Tempo Real, Análise Conjunta Tempo-Frequência, Análise de Fourier, Dividendo Digital, Espectro Radioelétrico, Flexibilidade, Monitorização e Controlo do Espectro, Neutralidade Tecnológica.

I. INTRODUÇÃO

A natural evolução dos sistemas de radiocomunicações tem vindo a exigir uma constante adaptação das técnicas e dos equipamentos de medida, usados na monitorização e controlo do espectro. Se no passado, a maioria das emissões radioelétricas podia ser restringida a um grupo limitado de modulações analógicas, para as aplicações mais comuns; hoje em dia, já predominam as digitais, circunstancialmente até combinadas com as mais diversas técnicas de acesso múltiplo ao meio rádio partilhado.

Não alheio às mutações ditadas pelos novos paradigmas, o ICP-ANACOM tem vindo a ajustar-se às realidades emergentes, sendo de realçar o esforço de integração dos seus centros de monitorização e controlo do espectro (Açores, Barcarena, Madeira e Porto).

Pretende-se por isso, nesta comunicação, caracterizar não só o salto qualitativo que foi dado entre a forma como era desenvolvida a monitorização de emissões radioelétricas no passado e os ganhos atualmente já alcançados, mas também deixar, no final, uma ponte para abordagens futuras, em cenários de utilização flexível do espectro e de neutralidade tecnológica.

II. SISTEMAS DE MEDIDA TRADICIONALMENTE USADOS NA MONITORIZAÇÃO E CONTROLO DO ESPETRO

A. Meios Fixos

1) Posições de Medida

Dada a preponderância das modulações analógicas no passado, os primeiros equipamentos de receção dos Centros de Monitorização e Controlo do Espectro (CMCE) do ICP-ANACOM encontravam-se fortemente vocacionados para a análise espectral que, durante muitos anos, revelou um enorme potencial na identificação e localização de sinais radioelétricos, assim como, na medição de parâmetros associados às modulações respetivas, permitindo verificar a conformidade, ou não, com a legislação e normas internacionais vigentes.



Fig. 1. Posição de análise espectral.

Fruto da evolução tecnológica, nomeadamente com o advento da miniaturização dos componentes eletrónicos e do aumento da capacidade de processamento, foi possível tornar os recetores mais compactos e de tamanho reduzido, e transferir o seu controlo e visualização dos resultados para os computadores e dispositivos periféricos. Este salto qualitativo veio permitir tirar partido da elevada capacidade de cálculo computacional, com a automatização dos processos de medição de diversos parâmetros, agilizando as tarefas de monitorização do espectro. [1]

2) Radiogoniometria HF/VHF/UHF

A radiogoniometria tem sido uma capacidade tecnológica fundamental na deteção de interferências e de emissões não autorizadas, uma vez que permite obter a direção de chegada de um dado sinal radioelétrico, orientando os técnicos para o local de origem da emissão em causa. Caso o sinal de interesse chegue em boas condições de receção a, pelo menos, três radiogoniómetros é possível efetuar a triangulação das diretividades correspondentes, num mapa, delimitando-se por essa via a zona de emissão, possibilitando uma intervenção mais seletiva e rápida.



Fig. 2. Radiogoniómetro de HF.

Atualmente, os radiogoniómetros possibilitam, quer a análise do sinal, quer a sua direção de origem, e, no caso dos dedicados às faixas de HF, o seu ângulo de chegada, i.e., a sua elevação relativamente ao solo. Desta maneira, conhecendo-se as características de reflexão da ionosfera, indexadas à atividade solar, consegue-se, através dos algoritmos de SSL (Single Site Location) implementados nos recetores dedicados, com apenas uma direção determinar uma zona provável de origem da emissão, para um ou dois saltos (reflexões do sinal na ionosfera).

3) SINCRER

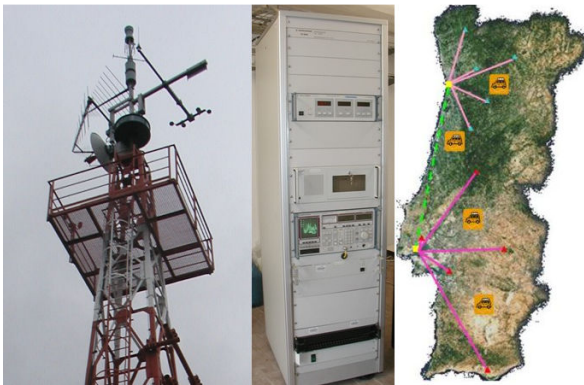


Fig. 3. Sistema SINCRER.

A necessidade de monitorar zonas com elevada atividade radioelétrica, geograficamente afastadas dos centros de monitorização, impulsionou a criação, à escala nacional no território continental, do **S**istema Nacional de **C**ontrolo **R**emoto do **E**spetro **R**adioelétrico (SINCRER), que veio introduzir uma nova forma de abordar as ações de monitorização, dado que, eram agora disponibilizados, em tempo real, os meios de análise e audição remota de sinais

radioelétricos, noutras regiões, para além de Lisboa e Porto. Desta forma, era possível evitar ou reduzir as deslocações de técnicos a esses locais, o que se traduziu não só na diminuição de custos, mas também em assinaláveis ganhos de eficiência, nas ações levadas a cabo em zonas mais afastadas dos CMCEs, uma vez que, enquanto as equipas se deslocavam para o terreno, o sinal a analisar podia ser imediatamente monitorado.

O SINCRER é, atualmente, constituído por uma infraestrutura com onze estações remotas fixas, quatro das quais, dotadas de meios de radiogoniometria, dispendo da capacidade adicional de se interligarem com os dois radiogoniómetros móveis de V/UHF e com as duas estações móveis de monitorização.

B. Meios Móveis

1) Radiogoniometria

Funcionando segundo uma lógica complementar com os demais radiogoniómetros fixos de V/UHF, e em interligação com o sistema SINCRER, o equipamento móvel permite, após a chegada ao local provável da emissão determinada por triangulação, auxiliar na identificação expedita da origem do sinal. Este tipo de equipamentos dispõe de uma elevada capacidade intrínseca de análise e processamento de sinal.



Fig. 4. Radiogoniómetro Móvel de V/UHF com as antenas dissimuladas.

2) Estações Móveis

As estações móveis de monitorização do espectro radioelétrico funcionam como um CMCE itinerante, para tarefas de monitorização e controlo nas localizações em que, nem os centros de monitorização, nem as estações remotas, conseguem rececionar os sinais radioelétricos. Estas unidades possuem uma capacidade de análise semelhante à dos CMCE, um conjunto de antenas ativas e passivas, e um mastro que permite efetuar medições às alturas requeridas pelas normas internacionais, habitualmente a 10 metros de altura.



Fig. 5. Estação Móvel de Monitorização.

Dada a sua polivalência e funcionalidades, as estações móveis são utilizadas para diversos estudos de cobertura, nomeadamente, de televisão digital terrestre (TDT).

III. INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO DO ESPETRO

A. PMI – Projeto de Monitorização Integrada

Na senda de aumentar a eficácia e a eficiência do trabalho desenvolvido ao nível da monitorização e controlo do espectro, assim como de automatizar algumas das tarefas, racionalizar e partilhar as infraestruturas disponíveis, foi criado o Projeto de Monitorização Integrada (PMI), em parceria com o Instituto de Telecomunicações (IT), o qual permitiu interligar os equipamentos já existentes nos diversos CMCE. De realçar que, as tecnologias e os sistemas em operação eram de fabricantes diferentes, com interfaces distintos, tendo sido necessário adaptar alguns deles que, nem sequer tinham quaisquer interfaces para ligação em rede, mas que eram imprescindíveis ou de substituição muito onerosa. Foram ainda projetados e concebidos novos equipamentos, tendo em vista a substituição de unidades já obsoletas ou em fim de vida útil [2].

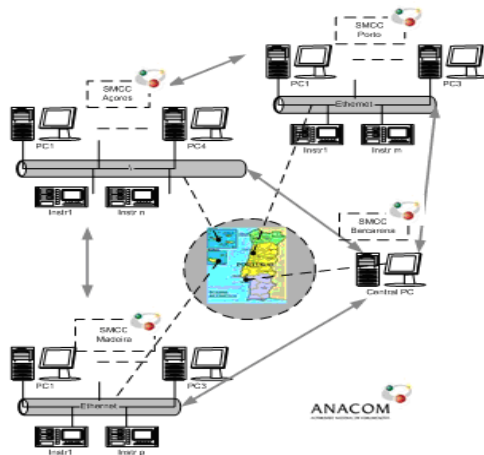


Fig. 6 Arquitetura da Rede de Instrumentação da ANACOM.

A integração e interligação dos diversos sistemas de medida e dos CMCE foi essencialmente suportada pela rede de dados do ICP-ANACOM, o que exigiu, nalguns casos, a substituição de equipamentos recetores que não dispunham de capacidade de controlo remoto, ou por ser inatamente inexistente, ou por incluírem comandos proprietários não disponibilizados pelos fabricantes.

Adquiriram-se seletores de comutação de antenas, que passaram a permitir o acesso a todas as antenas, disponíveis em todas as posições de monitorização, sendo a sua seleção efetuada através de monitores táteis.

Construíram-se novos equipamentos de descodificação de tons subacústicos do tipo CTCSS (Continuous Tone-Coded Squelch System) e adaptaram-se os controladores de rotores e de polarização existentes.

O acesso a todos os equipamentos de monitorização, à

disposição, passou a ser possível através da utilização de um *software* especialmente desenvolvido para o seu controlo e que se encontra disponível em cada CMCE, a partir de qualquer um dos restantes centros, suportado pelo protocolo de comunicação Ethernet, que é de baixo custo e muito flexível. Localmente, através dos monitores táteis é possível selecionar as antenas, bem como a sua polarização e rotação, caso tal seja permitido.

Com esta interligação, foi possível melhorar significativamente as capacidades de intervenção do ICP-ANACOM, mormente, nos Açores e Madeira, cujos centros só funcionavam nas horas normais de expediente. Além disso, teve a virtude de introduzir um grau de flexibilidade altamente desejável em termos de gestão mais eficientemente dos recursos humanos disponíveis, aproveitando mais racionalmente os equipamentos disponíveis, como especial enfoque para o único radiogoniómetro de HF existente em Barcarena, que passou a ser partilhado por todos os outros centros.

B. Estações Remotas ("2.ª Geração" - Madeira e Açores)

Nos arquipélagos dos Açores devido ao número de ilhas e à distância entre mesmas, as necessárias deslocações são difíceis, dispendiosas e nunca rápidas. Já na Madeira, devido à sua orografia, o centro de monitorização e controlo do espectro do Funchal apenas consegue rececionar satisfatoriamente as emissões mais próximas. A introdução de estações remotas, disseminadas pelos arquipélagos, seria uma importante mais-valia e um salto qualitativo nas suas capacidades de atuação.

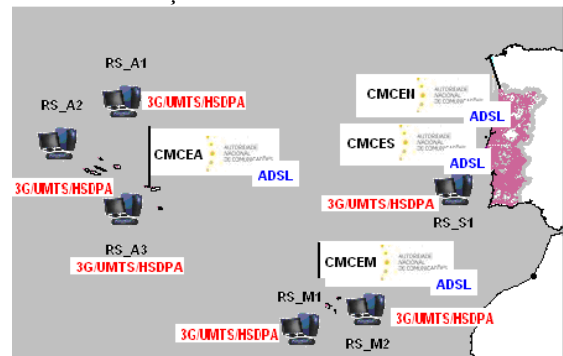


Fig. 7. Distribuição das Estações Remotas.

No entanto, a implementação de novas estações remotas, semelhantes às do sistema SINCRER, seria muito onerosa e, em muitos casos, colocar-se-iam previsíveis dificuldades relativamente à escolha dos respetivos locais de instalação, pois as localizações mais adequadas já estão a ser utilizadas por diferentes centros de difusão rádio, que ultrapassam os patamares de ruído e os requisitos de compatibilidade electromagnética impostos às estações de monitorização.

Dadas as limitações encontradas, optou-se pelo projeto, conceção e implementação de estações remotas simples, tirando partido das sinergias resultantes da parceria firmada com o IT. Os protótipos desenvolvidos integraram um computador pessoal (PC), de uso comum, mas com elevada capacidade de cálculo, um recetor de Software-defined radio

(SDR) com interface PCI para PC, e respetivo *software*, cobrindo a faixa de frequências desde 9 kHz a 1800 MHz. Apesar de mais simples do que os habitualmente utilizados nos CMCE, este recetor SDR possui características técnicas mais do que suficientes para garantir a adequada análise de sinais com as mais variadas modulações convencionais, incorporando ainda alguma capacidade adicional de desmodulação de emissões digitais específicas e de descodificação de tons de proteção subacústicos do tipo CTCSS. [3]

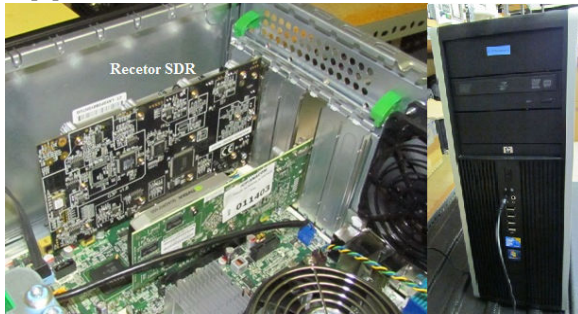


Fig. 8. Recetor SDR.

Aliando as dimensões compactas do *hardware* com a possibilidade de utilização de interfaces de comunicações móveis 3G, do tipo *pen USB*, para o estabelecimento de comunicações entre a estação remota e os centros de monitorização, garante-se um elevado grau de mobilidade e flexibilidade, só condicionados pela instalação da antena de receção e ponto de energia para alimentação.

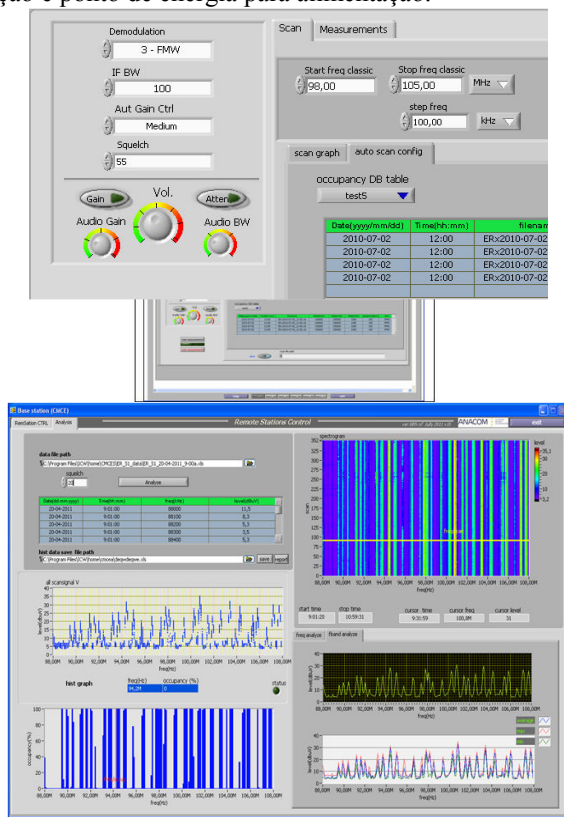


Fig. 9. Interface gráfica das medições de ocupação de espectro (topo) e diagramas de análise dos sinais.

O recetor SDR selecionado para este projeto é bastante versátil, dado que permite o seu controlo direto através de

software próprio, frequentemente atualizado pelo fabricante com novas funcionalidades. Além disso, possibilita ainda o controlo remoto, através de uma aplicação, desenvolvida pelo IT, para tarefas mais específicas, como por exemplo, a programação de rotinas de análise a determinadas faixas de frequências, durante períodos previamente definidos, para posterior análise.

Após a transferência dos dados recolhidos pela estação remota para um computador de controlo, no centro, é possível tratar a informação coligida de diversos modos, estando disponíveis, entre outros, a criação de espectrogramas, a análise espectral à faixa, a uma única frequência, ao longo do tempo de recolha, a obtenção de diagramas de ocupação, ou das frequências mais utilizadas, etc.

IV. DESAFIOS FUTUROS À MONITORIZAÇÃO E CONTROLO DO ESPETRO

A. Flexibilidade e Neutralidade Tecnológica

No passado, a atribuição de espectro era fortemente condicionada pela tecnologia, ou seja, uma determinada faixa de frequências era reservada para um serviço de radiocomunicações específico, e todos os parâmetros técnicos relevantes eram bem conhecidos de antemão (e.g., modulação, largura de faixa ocupada, potência transmitida, etc.). Isso permitia conhecer com elevado detalhe e precisão o comportamento esperado dos sistemas rádio, não só dos que operavam na mesma faixa, como também os dos das faixas adjacentes, com a grande vantagem de poder prever, com a necessária confiança, o desempenho desses sistemas. O que, facilitava os processos de planeamento do espectro.

Porém, os organismos europeus, responsáveis pelas políticas do espectro, creem que estes modelos tradicionais de atribuição espectral, orientados para a maximização da eficiência técnica, são altamente penalizadores, quando analisados do ponto de vista económico. A alternativa seria flexibilizar, tanto quanto possível, os modelos de gestão do espectro, de maneira a obter ganhos ao nível da sua atribuição e utilização, tirando partido de sinergias associadas ao comércio secundário de espectro e à sua liberalização. [4]

É no entanto consensual que um aumento desmesurado e descontrolado do grau de flexibilidade a introduzir poderá acarretar evidentes consequências em termos de risco de interferência. Impõe-se, por isso, a ponderação de um importante compromisso entre a flexibilidade necessária e o risco de interferência que se pretende aceitar, concorrendo para que a utilização do espectro se traduza numa maior eficiência económica, para que daí se consiga retirar o máximo valor para a sociedade. Este é, aliás, o argumento mais forte para justificar a adoção de regras regulatórias mais flexíveis e liberais.

Como tal, isto permitiria a introdução de uma ampla variedade de tecnologias (neutralidade tecnológica) e de aplicações e serviços (neutralidade de serviços), coexistindo numa mesma faixa de espectro, desde que se garantam as

condições de utilização adequadas, para uma coexistência livre de interferências.

As tendências mais recentes, no que concerne às políticas do espectro, apontam precisamente para que se adote a neutralidade tecnológica como princípio basilar, visando uma utilização mais flexível. Nesse sentido, foram identificadas faixas de frequências, consideradas aptas para acolherem a introdução de regras flexíveis de utilização do espectro, sendo que, algumas dessas faixas serão libertadas com a cessação das atuais emissões analógicas de televisão, o que vulgarmente se designa por “Dividendo Digital”.

Naturalmente que esta mudança exigirá uma análise cuidada das condições técnicas associadas aos direitos de utilização, nestas faixas, devendo ser, para o efeito, identificadas especificações genéricas restritivas a aplicar aos sistemas que virão a utilizar estas faixas. Neste âmbito, foi adotada uma abordagem baseada em máscaras espectrais, denominadas “Block Edge Masks” (BEM), para impor tais condições técnicas de utilização dentro das faixas de frequências selecionadas. [5]

B. Verificação das Condições de Utilização do Espectro Radioelétrico com base em Máscaras Espectrais

Um dos grandes desafios, decorrente da introdução das BEM, reside precisamente na forma de validar, na prática, emissões que as possam verificar. Este é um assunto que concentra, atualmente, especial atenção por parte dos reguladores europeus, não havendo para já uma metodologia de medida harmonizada que reúna um amplo consenso.

Refira-se que uma BEM pode ser especificada em termos de uma Potência Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) que deverá estar confinada numa dada largura de faixa, ou seja, tratar-se-á de delimitar uma determinada densidade espectral de PIRE, impondo uma máscara espectral adequada.

Daqui resulta que, a medição de uma potência radiada não é propriamente simples, nem direta; em particular, quando uma dada estação de radiocomunicações, a verificar, se encontra integrada num ambiente real, longe de ser controlado (como o de uma câmara blindada e/ou anecóica). Num cenário real, muitos são os fatores que poderão contribuir para degradar a “qualidade” e integridade da medida, e que se refletirão com a devida preponderância no tratamento das respetivas incertezas associadas a essa medida.

C. Monitorização de Sinais Variantes no Tempo

Muitos dos sistemas de radiocomunicações emergentes nem sempre transmitem ou recebem sinais de RF de forma contínua ao longo do tempo. Na realidade, muitos deles são mesmo variantes no tempo, como é o caso do GSM (Global System for Mobility) que implementa um mecanismo de TDD (Time Division Duplex) e/ou técnicas de saltos na frequência para reforçar a sua resiliência face a interferências. Outros exemplos podem ser encontrados, não só nos chamados dispositivos eletrónicos “verdes” que visam a otimização de consumos energéticos, e como tal, as restrições que lhes estão associadas fazem com que nem sempre transmitam sinais em modo contínuo; mas também nas formas de onda resultantes

de sistemas baseados em paradigmas oportunisticos, de que são exemplo, os rádios cognitivos, cujo princípio de operação origina necessariamente um padrão de saltos na frequência, resultante da ocupação de intervalos temporais, na circunstância, livres (“white spaces”).

Contudo, as técnicas convencionais, usadas para monitorizar e controlar o espectro, assentam predominantemente na análise de Fourier, recorrendo a analisadores espectrais. Não surpreende por isso que muitas das restrições, impostas aos sistemas rádio que utilizam o espectro, sejam definidas a partir de máscaras espectrais. Deve notar-se, porém, que este tipo de abordagem tem implícita a assunção de condições de regime estacionário.

Considerando a expressiva variedade de formas de onda variantes no tempo, introduzida pelos novos sistemas de radiocomunicações, deverá avaliar-se, com o devido critério, a adequabilidade das ferramentas tradicionais aos novos cenários de utilização do espectro.

D. Técnicas de Processamento de Sinal para Análise Conjunta: Tempo-Frequência

Ultimamente, tem surgido no mercado instrumentação específica, especialmente concebida para análise de sinais de RF variantes no tempo, ou transitórios. Estes dispositivos de medida, denominados Analisadores de Espectros de Tempo Real (RTSA), permitem avaliar, de forma integrada, esse tipo de sinais, nos domínios do tempo, da frequência ou da modulação. [12]

A representação conjunta: tempo-frequência é uma das formas possíveis de analisar sinais de RF transitórios ou em regimes não-estacionários, usando, para o efeito, um gráfico a duas dimensões, do tipo “cascata”, em que se representa a distribuição de energia do sinal, codificada segundo uma escala de cores, no plano tempo-frequência. [13]

Esta é uma solução muito intuitiva de visualizar as características tempo-espectro do sinal. Existem muitas técnicas possíveis para gerar este tipo de gráfico, usualmente denominado espectrograma.

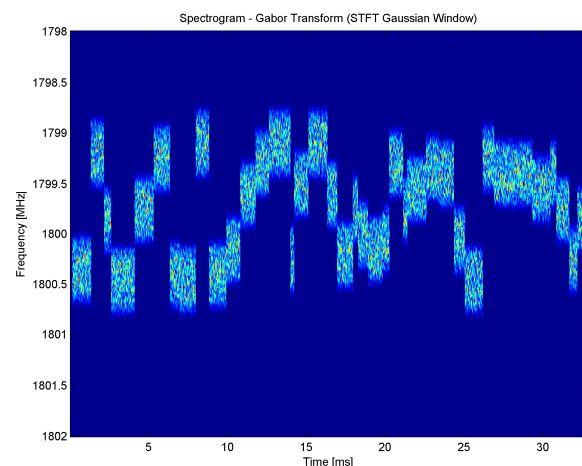


Fig. 10. Espectrograma de um sinal de RF modulado (QPSK) a saltar de frequência ao longo do tempo.

Os RTSA, para este efeito, implementam um algoritmo digital baseado na Transformada de Fourier de Curta Duração (STFT), mas existem outras técnicas de processamento de sinal alternativas, como a Transformada de Gabor, a Distribuição de Wigner-Ville, Wavelets ou Classes de Cohen.

Os CMCE do ICP-ANACOM estão já equipados com este tipo de analisadores, prevendo-se uma utilização intensiva das suas capacidades num futuro imediato.

V. CONCLUSÃO

Pretendeu-se apresentar uma perspetiva evolutiva, global e integrada, dos sistemas de medida usados nas atividades de monitorização e controlo do ICP-ANACOM, com destaque para um dos grandes desafios do presente, e aqui referimo-nos concretamente ao PMI; mas também apresentando desafios vindouros que importa dar respostas apropriadas. Aqui, cabe o desenvolvimento de ferramentas adequadas para análise de sinais nos domínios agregados: tempo-frequência, assim como a definição de metodologias de validação das características das emissões a usar em cenários de utilização do espetro flexíveis e tecnologicamente neutros.

REFERENCES

- [1] Girão, P.M.; Postolache, O.; S.J. Antunes; F.L. Tavares; "Automated and Remote Operated System for Spectrum Monitoring and Control in Portugal", *ProcIEEE International Conf. on Industrial Technology*, Vina del Mar, Chile, March, 2010.
- [2] O. Postolache, P.M. Girão, S.J. Antunes, F.L. Tavares, "Global Instrumentation Network for Broadband RF Spectrum Monitoring ", *Proc Conf. on Telecommunications - ConfTele* , Santa Maria da Feira , Portugal, Vol. 1, pp. 1 - 4, May , 2009.
- [3] Postolache, O.; Girão, P.M.; S.J. Antunes; F.L. Tavares; "RF Spectrum Monitoring and Management System Based on an RF Receiver Multi-server Architecture", *Proc International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems*, Prague, Czech Republic, Vol. 1, pp. 176 - 179, September, 2011.
- [4] CEPT, Report from CEPT to the European Commission in response to the Mandate to develop Least Restrictive Technical Conditions for frequency bands addressed in the context of WAPECS, CEPT Report 19, 2008.
- [5] ECC/CEPT, "Derivation of a Block Edge Mask (BEM) for Terminal Stations in the 2.6 GHz Frequency band (2500-2690 MHz)", ECC Report 131, 2009.
- [6] CEPT, "Technical considerations regarding harmonisation options for the digital dividend in the European Union, Frequency (channelling) arrangements for the 790-862 MHz band", CEPT Report 31, 2009.
- [7] [4] Mazzaro, G., Steer, M., Gard, K. and Walker, A., Response of RF Networks to Transient Waveforms: Interference in Frequency-Hopped Communications, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 56, No. 12, pp. 2808-2814, Dec. 2008.
- [8] Allen, R. and Mills, D., *Signal Analysis – Time, Frequency, Scale and Structure*, IEEE Press / Wiley Inter-science, 2004.
- [9] Portnoff, M., Time-Frequency Representation of Digital Signals and Systems Based on Short-Time Fourier Analysis, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. ASSP-28, No. 1, pp. 55-69, Feb. 1980.
- [10] Cohen, L., Time-Frequency Distributions – A Review, *Proceedings of the IEEE*, vol. 77, No. 7, pp. 941-981, Jul. 1989
- [11] Mazzaro, G., Time-Frequency Effects in Wireless Communication Systems, PhD Thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC, USA, 2009.
- [12] Tektronix, "Transient RF Signal Analysis in R&D Environments", *Technical Brief Notes*, Nov. 2004.
- [13] S. Gupta, S. Abielmona and C. Caloz, "Microwave Analog Real-Time Spectrum Analyzer (RTSA) Based on the Spectral-Spatial

Decomposition Property of Leaky-Wave Structures", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 57, No. 12, pp. 2989-2999, Dec. 2009.