

PÓS-PROCESSAMENTO DE ESPECTROS DE RPE DE SUBSTÂNCIAS DOSIMÉTRICAS POR FILTRAGEM DA TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER

Fábio P. B. Vieira¹, Joyce S. Bevilacqua² e Orlando Rodrigues Jr.³

¹ Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo (IME-USP)
Rua do Matão, 1010, Cidade Universitária
05508-090 São Paulo, SP
fpbvieira@gmail.com

² Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo (IME-USP)
Rua do Matão, 1010, Cidade Universitária
05508-090 São Paulo, SP
joyce.bevilacqua@gmail.com

³ Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP)
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242, Cidade Universitária
05508-000 São Paulo, SP
rodrijr@ipen.br

RESUMO

O uso de espectrômetros de ressonância paramagnética eletrônica – RPE – na dosimetria das radiações é conhecido há mais de 4 décadas, sendo uma importante ferramenta na determinação retrospectiva de doses absorvidas [5]. Para se estimar a dose absorvida pela amostra, é necessário conhecer a amplitude pico a pico da assinatura da substância no seu espectro de RPE, mas essa informação pode ser comprometida pela presença de informações espúrias: o ruído, de natureza aleatória e baixa intensidade; e o comportamento da linha de base, resultado do acoplamento entre o ressonador, o tubo e a amostra analisada. Devido às características intrínsecas das três componentes principais do sinal, ou seja, assinatura, ruído e linha de base, a análise no domínio das frequências permite que, através de técnicas de pós-processamento, as informações espúrias sejam filtradas. Neste trabalho, um algoritmo que recupera a assinatura de uma substância foi implementado. A Transformada Discreta de Fourier é aplicada ao sinal e, sem a intervenção do usuário, filtra-se o ruído. A partir do sinal filtrado, recupera-se a assinatura por Transformada Inversa Discreta de Fourier. A amplitude pico a pico e, conseqüentemente, a dose absorvida, são calculadas com erro inferior a 1% para sinais em que a linha de base tem formato linear. Alguns casos mais gerais estão sendo estudados e, com pouca intervenção do usuário, é possível obter a mesma margem de erro.

1. INTRODUÇÃO

Os espectros fornecidos por espectrômetros de RPE podem ser considerados como a soma de três componentes: a assinatura, o ruído e a linha de base.

A assinatura, característica do material e da dose por ele absorvida, é a informação de fato relevante para a estimativa dosimétrica. O ruído, típico de todos os mecanismos eletrônicos, é de natureza aleatória e de baixa intensidade, quando comparado à amplitude pico a pico da assinatura. A linha de base, comum na área de espectrometria, não é de natureza aleatória, e seu formato depende tanto do espectrômetro, quanto da substância analisada. Pode assumir diversos formatos mas, em muitas situações, o espectro pode ser obtido de modo que a linha

de base tenha formato linear [1]. A Fig. 1 ilustra um espectro simulado e identifica cada componente.

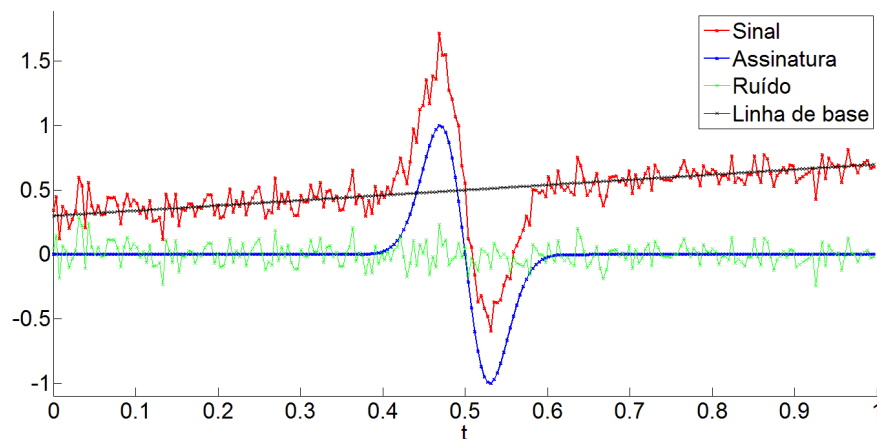


Figura 1. Espectro simulado com as componentes destacadas

O ruído aleatório pode ser diminuído com melhoria do hardware, mas essa opção está restrita aos fabricantes dos espectrômetros e exige altos investimentos. Outra forma de diminuí-lo é através de repetidas varreduras, o que pode tomar grandes períodos de tempo. Uma terceira forma é o pós-processamento matemático, a qual será explorada nesse trabalho.

A linha de base é intrínseca à espectrometria de RPE, sendo causada, entre outros motivos, pela interação entre a cavidade do ressonador e a substância analisada. Sua forma depende do espectrômetro e da substância analisada, de modo que o pós-processamento matemático também se mostra uma forma viável de tratamento.

De particular interesse para a área de dosimetria das radiações é a amplitude h pico a pico da assinatura, como exibido na Fig. 2. Em algumas substâncias paramagnéticas com características dosimétricas, é possível associar a variação da amplitude h com a dose absorvida pela amostra, sendo que essa relação é linear para um grande intervalo de doses. A alanina, por exemplo, é um aminoácido com características dosimétricas comumente utilizado em dosimetria, para um intervalo de doses de 1 Gy até 10^5 Gy [4].

Com o intuito de se obter, a partir do sinal amostrado, uma estimativa da amplitude da assinatura com erro inferior a 1%, o pós-processamento matemático deve suprimir o ruído e a linha de base, ao mesmo tempo preservando o máximo possível da assinatura.

Essa tarefa pode ser executada no mesmo domínio da variável controlada pelo espectrômetro ou em outro, através de transformadas. No grupo das técnicas que fazem o processamento no mesmo domínio da variável controlada pelo espectrômetro, destacam-se as de interpolação polinomial e as de inferência Bayesiana. No grupo das técnicas que se valem de transformadas, a Transformada Discreta de Fourier – TDF, assim como sua versão janelada, e a Transformada Wavelet Discreta - TWD são as mais representativas.

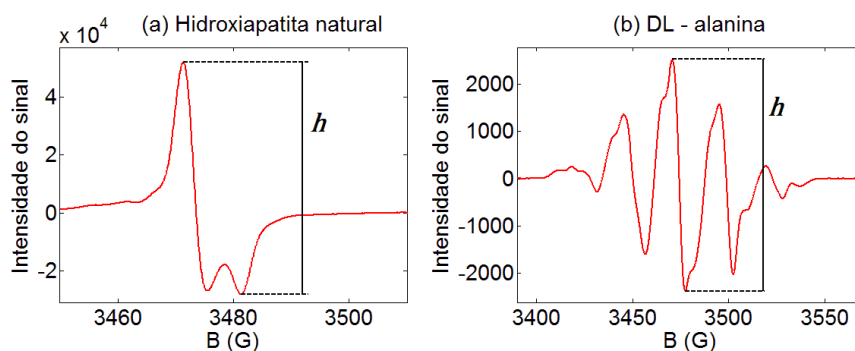


Figura 2. Espectros experimentais de (a) hidroxiapatita natural e de (b) DL-alanina

Levando-se em conta as características físicas dos sinais de RPE, as transformadas são de particular interesse. Devido às propriedades do ruído no domínio das frequências e à simplicidade da Transformada Discreta de Fourier, essa técnica foi escolhida para a elaboração do algoritmo.

Na análise de Fourier, o significado físico da variável independente do sinal não é relevante. Não obstante, é muito comum que os autores dessa área denominem essa variável por tempo [2], de modo que a transformada de Fourier tem como variável independente o inverso do tempo, ou seja, a frequência. Dessa forma, mesmo que a variável do problema não seja temporal, os termos domínio do tempo e domínio das frequências são utilizados para se referir, respectivamente, ao domínio do sinal e de sua transformada.

No caso particular deste trabalho, baseado em espectrometria de RPE não pulsada, será adotada a seguinte nomenclatura: o domínio do campo se refere à variável independente do sinal, que é a intensidade do campo magnético aplicado; o domínio de sua transformada, que se refere ao inverso de uma intensidade de campo magnético, não tem significado físico, e será chamado de domínio das frequências.

Quando analisadas no domínio do campo, as componentes do espectro não são facilmente distinguíveis, já que tanto o ruído quanto a linha de base estão presentes em todos os campos em que a assinatura também está. Porém, quando analisadas no domínio das frequências, as diferenças ficam mais evidentes: o ruído se distribui, de maneira também aleatória, por todas as frequências do espectro, com pequenas intensidades para cada frequência; a linha de base ocupa apenas as frequências mais baixas do espectro, com coeficientes de grande magnitude; e a assinatura se expressa de maneira relevante nas frequências médias/baixas do espectro. A Fig. 3 permite visualizar as características de cada componente do sinal através do valor absoluto da TDF.

O comportamento descrito sugere uma abordagem para a eliminação do ruído: identificar a frequência de corte, aplicar um filtro passa-baixa na TDF e reconstruir o sinal pela TIDF.

Neste trabalho, uma técnica de filtragem automática do ruído foi desenvolvida, testada em espectros simulados e aplicada em espectros experimentais obtidos por um espectrômetro Bruker, modelo EMX, operando na banda X.

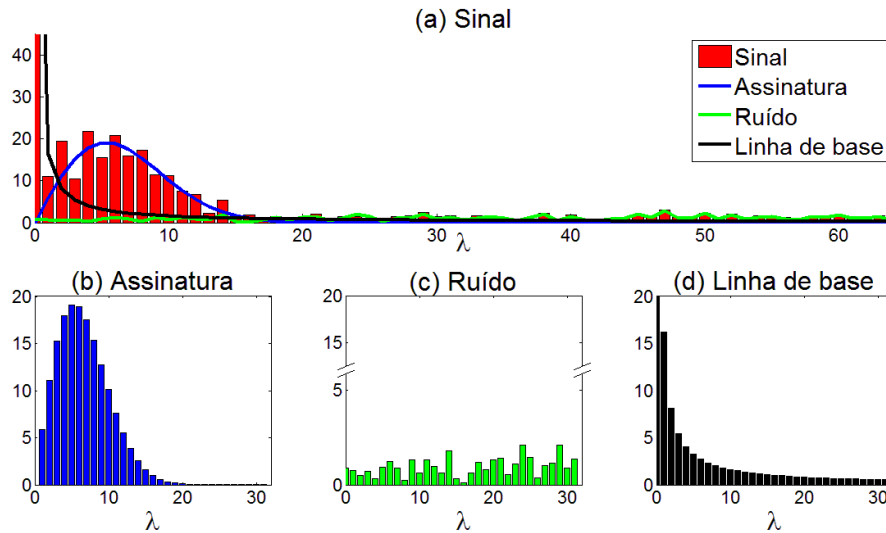


Figura 3. Valor absoluto da TDF do (a) sinal simulado na Fig. 1 e de suas componentes (b) assinatura, (c) ruído e (d) linha de base

Na seção 2, é feita a modelagem matemática do sinal, que dará origem ao algoritmo, descrito na seção 3. Na seção 4, o algoritmo é aplicado sobre diversos sinais, tanto simulados quanto experimentais, e os resultados são discutidos.

2. MODELAGEM DO SINAL

Como a variável independente de um sinal de RPE não é relevante para a análise feita neste trabalho, todos os sinais simulados são amostragens de uma função S de domínio $[0,1[$, escrita como a soma de três componentes: w , a assinatura do material, r , o ruído AWGN, de caráter aleatório e de baixa intensidade relativamente à amplitude da assinatura; e b , a linha de base. Pode-se escrever

$$S(t) = w(t) + r(t) + b(t) \quad (1)$$

A escolha do domínio $[0,1[$ é feita sem perda de generalidade, e permite que alguns resultados clássicos sobre TDF sejam utilizados sem fatores de escala nem translações. Como a TDF atua sobre uma sequência de valores, a escolha das extremidades t_i e t_f do domínio $[t_i, t_f[$ não é relevante para a análise.

A amostragem da função S pode ser feita em qualquer quantidade N de valores t_k , com $k = 0, 1, \dots, (N - 1)$, igualmente espaçados ou não. Porém, escolhendo-se $N = 2^m$, com $m \in \mathbb{N}$, e valores de t_k igualmente espaçados, o algoritmo pode utilizar a Transformada Rápida de Fourier – TRF para calcular a TDF, acelerando os cálculos.

Mesmo que o sinal fornecido por um dado espectrômetro não tenha essas duas características, basta que se utilize um algoritmo para interpolar os dados, completando uma malha igualmente espaçada de 2^m pontos. Na discussão a seguir, será presumido que todas as amostragens são desse tipo, sendo

$$t_k = \frac{k}{2^m} \quad (2)$$

com $k = 0, 1, \dots, (2^m - 1)$.

O ruído r , quando amostrado, produz uma distribuição normal de média nula e variância σ^2 :

$$r_i \sim N(0, \sigma^2) \quad (3)$$

A linha de base b pode assumir diversas formas, dependendo da substância analisada, do recipiente que a contém e da cavidade do ressonador. Fazendo-se a hipótese de que ela tem formato de reta [1], pode-se escrever

$$b(t) = A \cdot t + B \quad (4)$$

com $A, B \in \mathbb{R}$.

A assinatura w depende da substância analisada. Considerando-se uma substância com apenas um centro paramagnético, sem se levar em conta o acoplamento hiperfino, o espectro de RPE tem o formato de derivada de gaussiana [3], como pode ser visto na Fig. 1.

Para uma derivada de gaussiana centrada em $t = 0$ com máximo igual a 1 e mínimo igual a -1, consequentemente com amplitude pico a pico igual a 2, tem-se

$$w(t) = -\frac{t}{c} \cdot e^{-\frac{c^2 - t^2}{2c^2}} \quad (5)$$

Para todo $t \in [0, 1]$, tem-se que $w(t) > 0$, ou seja, a assinatura está presente em todos os instantes. Porém, se $|t| > 3,04 \cdot c$, tem-se que $w(t) < 0,05$, de modo que o parâmetro c está relacionado à largura do intervalo tal que a assinatura se mantenha, em módulo, superior a 5% de seu valor máximo. A Fig. 4 exibe os gráficos de $w(t - 0,15)$, $w(t - 0,35)$ e $w(t - 0,75)$, respectivamente para $c = 0,01$, $c = 0,04$ e $c = 0,07$.

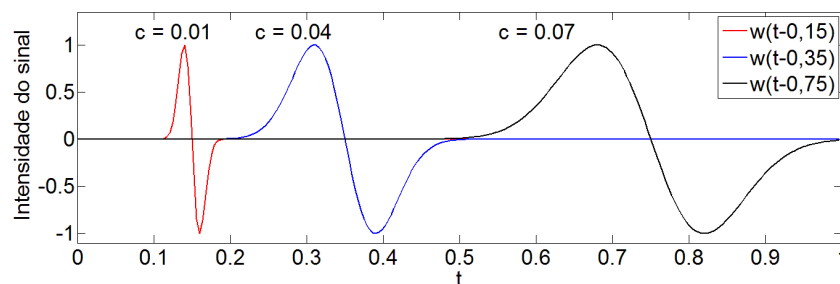


Figura 4. Gráfico da assinatura variando-se t_1 e c

Nas condições acima, o sinal proveniente de uma substância com um único centro paramagnético, sem o acoplamento hiperfino, com ressonância em $t = t_1$, é dado por uma amostragem da função

$$S(t) = -\frac{t - t_1}{c^2} \cdot e^{\frac{c^2 - (t - t_1)^2}{2c^2}} + r(t) + A \cdot t + B \quad (6)$$

No caso de mais de um centro paramagnético, considerando-se o acoplamento hiperfino, o espectro exibe n linhas em t_1, t_2, \dots, t_n , com amplitudes pico a pico respectivamente iguais a h_1, h_2, \dots, h_n , e o sinal é uma amostragem da função

$$S(t) = \sum_{j=1}^n \frac{h_j}{2} \cdot \left[-\frac{t - t_j}{c^2} \cdot e^{\frac{c^2 - (t - t_j)^2}{2c^2}} \right] + r(t) + A \cdot t + B \quad (7)$$

A Fig. 5 exibe duas amostragens de (7) com diferentes valores de $n, t_j, h_j, c, \sigma, A$ e B .

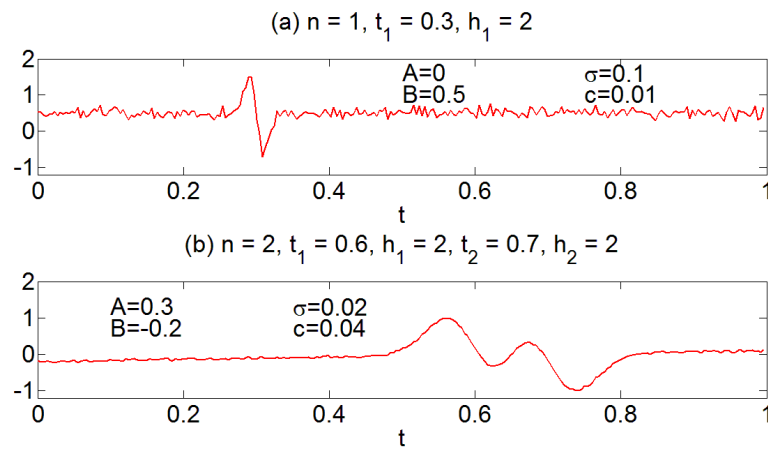


Figura 5. Amostragens de (7) com (a) $t_1 = 0,3$ e $h_1 = 2$ e (b) $t_1 = 0,6, t_2 = 0,7$ e $h_1 = h_2 = 2$.

3. ALGORITMO

Inicialmente, considere $A = 0$ e $B = 0$, ou seja, a linha de base é nula. A Fig. 6 exibe uma amostragem de apenas um centro paramagnético e sem o acoplamento hiperfino nessas condições, com $\sigma = 0,1, c = 0,03$ e ressonância em $t_1 = 0,5$, assim como o módulo da TDF do sinal e de cada componente.

Percebe-se que, para frequências superiores a 20 Hz, os valores do módulo da TDF do sinal são influenciados, praticamente, apenas pelo ruído. Uma filtragem na TDF, eliminando os coeficientes referentes a essas frequências, fará com que o sinal filtrado, reconstruído por TDIF, seja menos influenciado pelo ruído. Dessa forma, dá-se relevância às informações de baixa frequência do espectro, predominantemente referentes à assinatura.

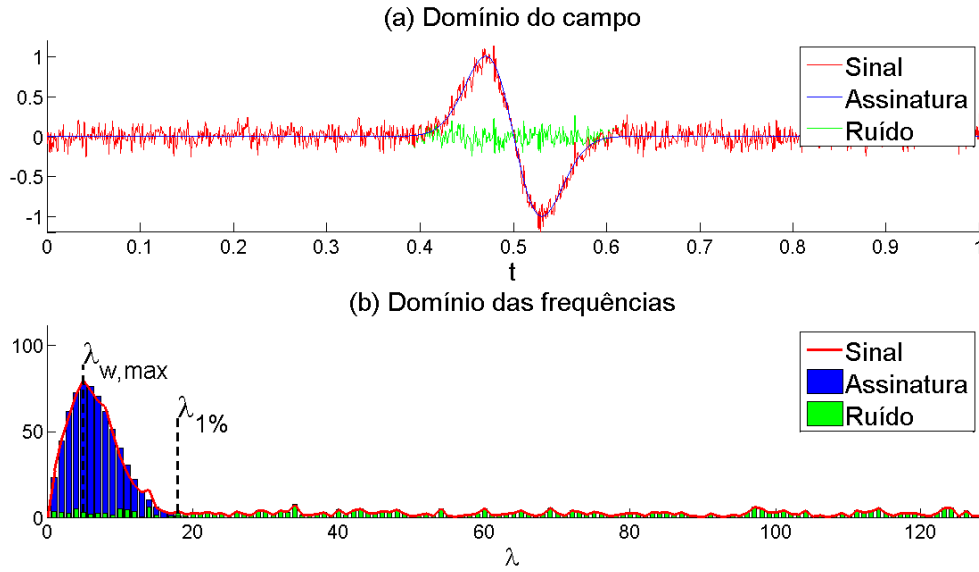


Figura 6. Sinal simulado sem linha de base no (a) domínio do campo e no (b) domínio das frequências (módulo da TDF)

Para se decidir a frequência de corte do filtro, relacionar-se-á a frequência referente ao maior coeficiente, em módulo, da Transformada de Fourier - TF da assinatura, denominada $\lambda_{w,max}$, com a frequência $\lambda_{1\%}$ a partir do qual o módulo da TF assume valores inferiores a 1% do seu máximo. Ainda na Fig. 6, estão ilustradas essas frequências.

Para se relacionar $\lambda_{1\%}$ e $\lambda_{w,max}$, são necessárias algumas propriedades da TF. Na descrição a seguir, utiliza-se a definição de [2] de TF, denota-se por $\mathcal{F}[f(t)](\lambda) = \hat{f}(\lambda)$ a TF de uma função f integrável em \mathbb{R} , de classe C^∞ e i representa a unidade imaginária.

Se f for uma gaussiana, $f(t) = e^{-\alpha \cdot t^2}$, $\alpha \in \mathbb{R}_+^*$, sua TF também é uma gaussiana, dada por

$$\hat{f}(\lambda) = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \cdot e^{-\frac{\lambda^2}{4\alpha}} \quad (8)$$

A TF da derivada f' de f é

$$\mathcal{F}[f'(t)](\lambda) = i \cdot \lambda \cdot \hat{f}(\lambda) \quad (9)$$

A TF da translação $f(t - t_0)$ é

$$\mathcal{F}[f(t - t_0)](\lambda) = e^{-i \cdot \lambda \cdot t_0} \cdot \hat{f}(\lambda) \quad (10)$$

Combinando-se essas propriedades, conclui-se que a TF da assinatura da equação (5), com ressonância em t_0 , é

$$\mathcal{F}[w(t - t_0)](\lambda) = i \cdot \lambda \cdot e^{-i \cdot \lambda \cdot t_0} \cdot \sqrt{2\pi} \cdot e^{-\frac{\lambda^2 c^2}{2}} \quad (11)$$

e seu valor absoluto é

$$|\mathcal{F}[w(t - t_0)](\lambda)| = \lambda \cdot \sqrt{2\pi} \cdot e^{-\frac{\lambda^2 c^2}{2}} \quad (12)$$

Por cálculo elementar, conclui-se que o valor de (12) é máximo para $\lambda_{w,max} = \frac{1}{c}$, e por cálculo numérico é possível estabelecer que

$$\lambda_{1\%} = 3,5716 \cdot \lambda_{w,max} \quad (13)$$

Em um sinal S , porém, não é possível identificar $\lambda_{w,max}$, já que o maior coeficiente do módulo de sua TDF também possui uma parcela devida ao ruído. Ainda assim, a frequência relativa ao maior coeficiente do módulo da TDF de S , denotada por $\lambda_{S,max}$, é um bom estimador de $\lambda_{w,max}$, dadas as baixas intensidades do ruído relativamente a S . A frequência $\lambda_{calc} = 3,5716 \cdot \lambda_{S,max}$ será usada como frequência de corte do filtro, dando origem ao seguinte algoritmo, ilustrado na Fig. 7.

1. Calcula $|\hat{S}(\lambda)|$ (módulo da TDF de S , Fig. 7.b)
2. Calcula $\lambda_{S,max}$
3. Calcula $\lambda_{calc} = 3,5716 \cdot \lambda_{S,max}$
4. Exclui as frequências acima de λ_{calc} em \hat{S} (Fig. 7.c)
5. Calcula a TIDF de \hat{S}

O sinal filtrado é a parte real da TIDF de \hat{S} após a filtragem (Fig. 7.d).

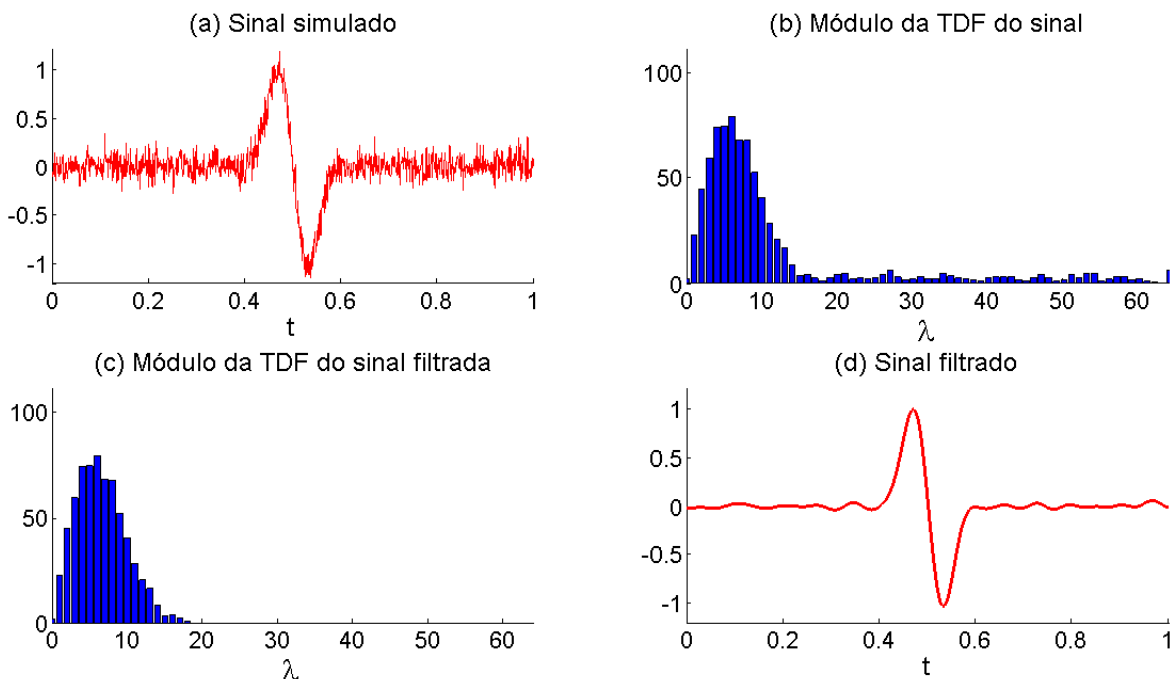


Figura 7. (a) Sinal simulado; (b) Módulo da TDF do sinal; (c) Módulo da TDF do sinal, filtrada; (d) Sinal reconstruído após a filtragem

Cada execução do algoritmo retorna o valor h da assinatura e o valor $h_{rebuild}$ do sinal filtrado.

As amplitudes pico a pico h da assinatura e $h_{rebuild}$ do sinal filtrado são calculadas pela diferença entre o máximo e o mínimo da assinatura e do sinal filtrado, respectivamente.

Fixados os valores de n , t_j , h_j , c , σ , A e B , a assinatura e a linha de base terão sempre o mesmo formato para cada execução do algoritmo. O ruído é calculado novamente a cada execução pelo gerador pseudoaleatório do software Matlab, versão R2012b, 64-bits.

Com $A \neq 0$, os termos da TDF do sinal relativos às baixas frequências passam a ter, em sua composição, uma parcela referente à linha de base. Se o valor de A for suficientemente alto, isso pode fazer com que as frequências de maior intensidade do espectro não mais sejam referentes à assinatura, e sim à linha de base, como pode ser visto na Fig. 8.

Se isso ocorrer, o valor de $\lambda_{w,max}$ é subestimado por $\lambda_{s,max}$, e a frequência de corte obtida é mais baixa que a ideal, fazendo com que partes significativas da assinatura, localizadas nas baixas frequências, sejam também eliminadas.

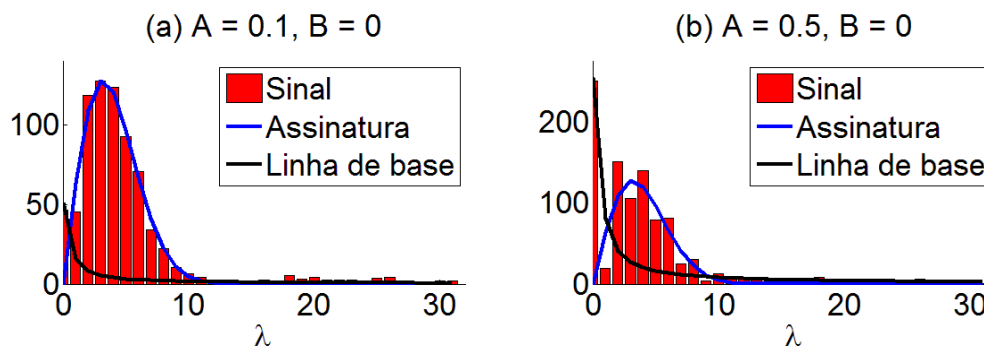


Figura 8. Módulo da TDF de um sinal simulado e suas componentes, com ressonância em $t_1 = 0,5$, assinatura com $c = 0,05$, ruído com $\sigma = 0,07$ e linha de base com parâmetros (a) $A = 0,1$ e $B = 0$ e (b) $A = 0,5$ e $B = 0$.

Para que o algoritmo tenha resultados satisfatórios, é necessário se remover, antes, a linha de base. Dados os possíveis formatos e o compartilhamento de frequências com a assinatura, o método da filtragem da TDF não se mostra adequado para essa tarefa.

Optou-se por um método de remoção não automático, porém muito utilizado na área. Um operador escolhe um determinado número de pontos, no mínimo 3, que ele julga fazerem parte da linha de base e, por ajuste polinomial, ela é subtraída do sinal, ainda no domínio do campo. O sinal resultante é, então, submetido à aplicação do algoritmo.

4. RESULTADOS

4.1. Espectros Simulados com Linha de Base Nula

Nesses casos, $A = 0$ e $B = 0$. Garante-se, portanto, que todos os termos de alta intensidade nas baixas/médias frequências do módulo da TDF são predominantemente referentes à assinatura.

Como as transformadas de Fourier de $w(t)$ e $w(t - t_1)$ têm o mesmo módulo, o valor de t_1 não influencia a análise, e todos os sinais simulados terão ressonância em $t_1 = 0,5$. A amplitude pico a pico foi fixada em $h_1 = 2$.

Os dois parâmetros das simulações serão o desvio-padrão σ do ruído e o valor c da assinatura. O algoritmo foi aplicado para valores $c \in \{0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,09\}$ e $\sigma \in \{0,01; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4\}$.

Para cada execução do algoritmo, calculou-se o erro relativo $\Delta h = \left(\frac{h_{rebuild}}{h} - 1\right)$. Feitas 40 execuções, computou-se a média $\overline{\Delta h}$ dos erros relativos. A Tabela 1 exhibe os valores $\overline{\Delta h}$ de cada caso e a Fig. 9 mostra o sinal simulado para os valores mínimo e máximo de σ e c , assim como o sinal filtrado obtido após a aplicação do algoritmo. Estão destacados em negrito os valores do erro relativo, em módulo, inferiores a 0,5%; sem negrito, de 0,5% a 1%; em vermelho, superiores a 1%.

Tabela 1. Erro relativo médio $\overline{\Delta h}$ para cada caso após 40 execuções do algoritmo

		c				
		0,005	0,01	0,02	0,05	0,09
σ	0,01	0,07%	0,16%	0,12%	0,26%	0,02%
	0,05	0,06%	0,18%	0,20%	0,38%	0,02%
	0,1	0,06%	-0,56%	0,24%	0,39%	-0,01%
	0,15	1,58%	0,36%	0,06%	0,28%	-0,24%
	0,2	3,29%	0,40%	0,03%	0,67%	0,17%
	0,25	4,14%	0,61%	-0,91%	0,05%	0,45%
	0,3	12,31%	2,37%	1,20%	0,86%	0,05%
	0,35	13,26%	3,13%	0,82%	-0,59%	0,15%
	0,4	11,01%	1,60%	-0,61%	0,51%	0,86%

Percebe-se que a recuperação do valor de h é tão mais eficaz quanto menor for o ruído e mais larga for a assinatura. Isso era esperado, já que valores baixos de c fazem com que a assinatura tenha componentes de alta frequência, que são eliminados na filtragem, e sinais muito ruidosos fazem com que a assinatura se confunda com o próprio ruído.

Sinais típicos de RPE localizam-se na porção superior direita da tabela, em que os resultados são satisfatórios. Para valores de c superiores a 0,01 e valores de σ inferiores a 0,1, a recuperação foi feita com erro inferior a 0,5%.

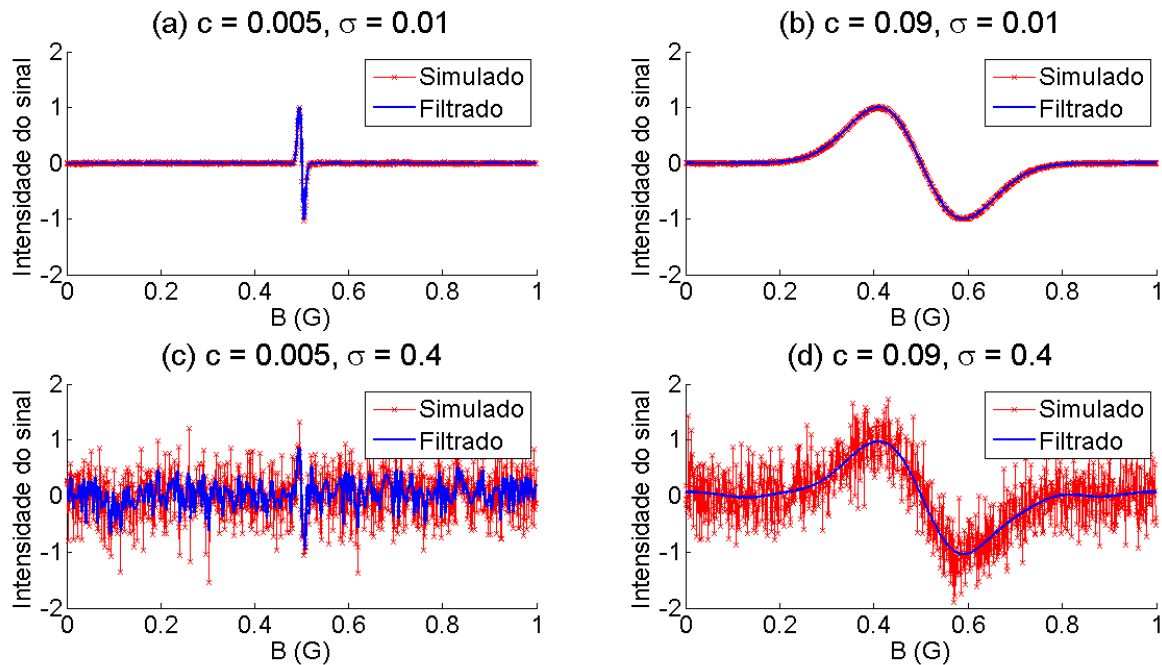


Figura 9. Simulações com os valores mínimo e máximo dos parâmetros σ e c , exibindo o sinal simulado e o filtrado obtido após a aplicação do algoritmo

4.2. Espectros experimentais

A Fig. 10 exibe os espectros experimentais de dosímetros de alanina padronizados irradiados com Co-60 e a Fig. 11 exibe as respectivas filtragens obtidas após a aplicação do algoritmo. São exibidos quatro espectros, referentes a doses de 5 Gy, 10 Gy, 20 Gy e 50 Gy.

O formato permite supor que $A = 0$, de modo que o algoritmo pode ser aplicado diretamente. Após a aplicação, os valores da amplitude pico a pico recuperados, respectivamente referentes às doses de 5 Gy, 10 Gy, 20 Gy e 50 Gy, foram resumidos na Tabela 2.

Tabela 2. Amplitude pico a pico recuperada pelo algoritmo

Dose (Gy)	Amplitude pico a pico
5	227,0
10	274,9
20	437,0
50	966,4

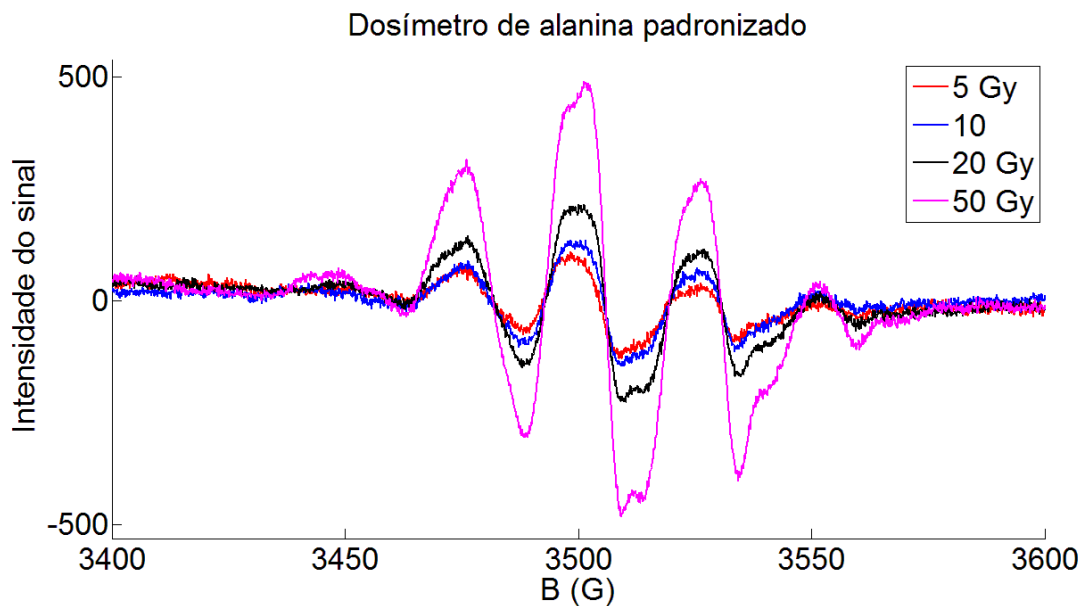


Figura 10. Dosímetro de alanina padronizado irradiado com Co-60, submetido a doses de 5 Gy, 10 Gy, 20 Gy e 50 Gy.

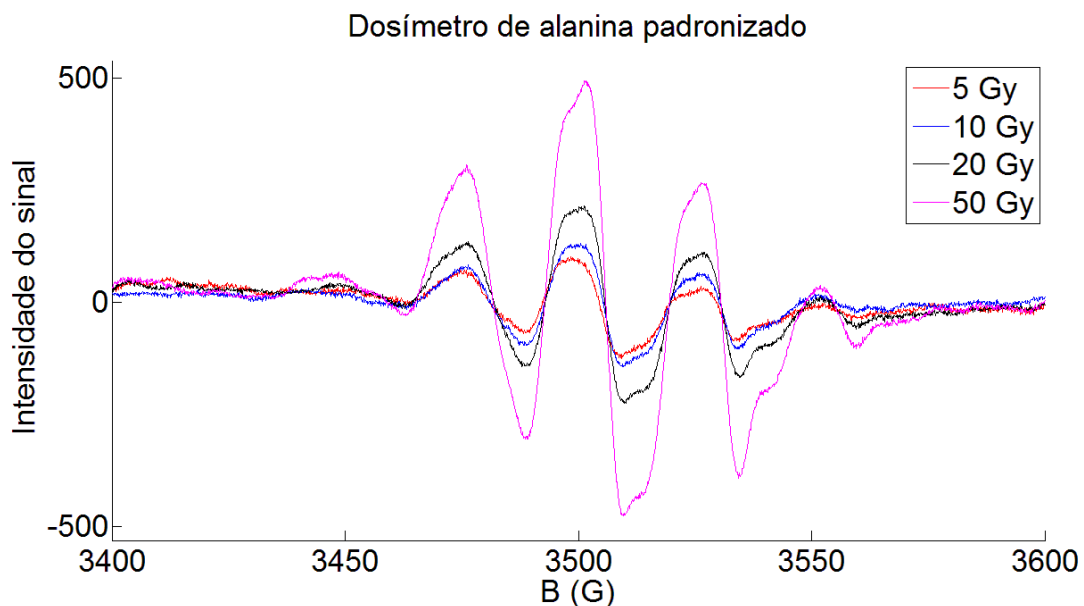


Figura 11. Espectros filtrados do dosímetro de alanina padronizado irradiado com Co-60, submetido a doses de 5 Gy, 10 Gy, 20 Gy e 50 Gy.

Calculando-se o valor de R^2 desses dados, obtém-se 0,9968. Isso significa que os pontos são bem ajustados por uma reta, o que confirma uma hipótese central da dosimetria das radiações: há um intervalo de doses tal que existe proporcionalidade entre a dose recebida e a variação da amplitude pico a pico da assinatura.

5. CONCLUSÕES

Foi possível concluir que a filtragem da TDF é eficaz na eliminação do ruído, desde que a frequência de corte seja adequadamente estimada, o que ocorre se a linha de base não estiver presente. Caso esteja, é necessária a sua remoção prévia com a intervenção de um operador humano.

A análise multirresolução é necessária para o tratamento automático da linha de base, o que sugere o uso da Transformada de Fourier Discreta Janelada ou da Transformada Discreta Wavelet; devido ao formato característico das assinaturas mais recorrentes em espectrometria de RPE na área de dosimetria das radiações, essa última se mostra mais promissora.

A aplicação do algoritmo permitiu confirmar uma hipótese consagrada na área de dosimetria das radiações, de que há proporcionalidade entre a dose recebida e a variação da amplitude pico a pico da assinatura, para um dosímetro de alanina padronizado irradiado com Co-60.

REFERÊNCIAS

- [1] Banwell, C. N., *Fundamentals of Molecular Spectroscopy*, 4a ed., p. 11, McGraw-Hill, Berkshire, Inglaterra (1994)
- [2] Damelin, S. B., Miller Jr., W., *The Mathematics of Signal Processing*, Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra (2012)
- [3] Hollas, J. M., *Modern Spectroscopy*, 4a ed, p. 34, John Wiley & Sons, Hoboken, Estados Unidos (2004)
- [4] International Organization for Standardization, ASTM International, **International Standard ISO/ASTM 51607:2013(E)**, *Practice for use of an alanine-EPR dosimetry system*, Genebra, Suíça (2013)
- [5] “Use of electron paramagnetic resonance dosimetry with tooth enamel for retrospective dose assessment,” http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1331_web.pdf (2002)