

Custódio Dias

A. Almeida do Vale

FEUP/Departamento de Engenharia Electrotécnica

Rua dos Bragas, 4099 Porto Codex; E mail: c. dias@ieee.org

Aspectos Particulares da Representação Tempo-Frequência das Ondas de Choque de Alta Tensão

Resumo

A representação tempo-frequência das ondas de choque de alta tensão facilita o processamento das mesmas na medida em que proporciona uma informação mais completa sobre o seu conteúdo, tanto no domínio temporal como no frequencial. No entanto, essa informação só será revelada se for feita uma selecção criteriosa de alguns dos parâmetros influenciadores desse tipo de representação. O objectivo deste artigo consiste em apresentar diferentes representações tempo-frequência, obtidas por variações dos parâmetros definidores deste tipo de representação, para diversas ondas de choque simuladas e reais, de modo a salientar a importância assumida por alguns dos referidos parâmetros na informação que se obtém através deste tipo de representação.

1. Introdução

As dificuldades sentidas no desenvolvimento de *software* para análise e processamento das tensões impulsivas registadas durante os ensaios de choque de alta tensão (AT) conduziram à procura de novas formas de representação dos referidos impulsos [1]. A investigação levada a cabo pelos autores, sobre este assunto, conduziu à utilização de uma técnica avançada de representação, conhecida como representação tempo-frequência [2].

A representação tempo-frequência, sendo mais sofisticada do que a representação temporal, permite obter informação do conteúdo das formas de onda, quer relativamente à sua evolução temporal, quer relativamente ao seu conteúdo espectral [3], o que a torna particularmente adaptada para a análise e posterior processamento das ondas de choque AT através do recurso a *software* desenvolvido especificamente para esse fim. Contudo, a eficácia da representação tempo-frequência está muito dependente de alguns parâmetros que deverão ser criteriosamente definidos.

O objectivo deste trabalho é apresentar, ainda que de forma sumária, os parâmetros que influenciam a eficácia da

referida representação e mostrar, através do recurso a exemplos, de que forma esses parâmetros condicionam os resultados obtidos. Desta forma, serão apresentados resultados relativos à representação de ondas de choque sintéticas e reais, utilizando definições diferentes para os parâmetros influenciadores, discutindo-se posteriormente a qualidade daquela representação e a sua relação com o parâmetro influenciador.

2. A importância da "janela" na representação tempo-frequência.

A representação tempo-frequência de uma forma de onda permite observar a evolução temporal do espectro da mesma, possibilitando a identificação de determinados componentes espectrais e, simultaneamente, a determinação da sua posição temporal na onda. Basicamente, tal é conseguido através da utilização de uma "janela" que limita a onda a um dado intervalo de tempo. O espectro relativo a essa porção da onda é avaliado. Ao fazer deslizar a "janela" ao longo da onda, avaliando o espectro relativo às porções da onda contidas nas sucessivas posições que ela ocupa, obtém-se a evolução temporal do espectro.

A referida "janela" é caracterizada através da função matemática que lhe dá forma, da sua largura e do passo utilizado para fazer o seu avanço no deslizamento. É essencialmente destes três parâmetros que depende a eficácia da representação tempo-frequência. A discussão relativa à função matemática mais adaptada às formas de onda impulsivas utilizadas nos ensaios AT foi já feita [2]. No entanto, a influência dos outros dois parâmetros caracterizadores da "janela", a sua largura e o passo de deslizamento, ainda não foi apresentada em pormenor.

Muito sumariamente pode-se afirmar que a largura da "janela" utilizada define, através de uma proporcionalidade inversa, o limite inferior da frequência característica dos componentes espectrais que podem ser detectados pela representação. Desta forma, quanto mais estreita for a "jane-

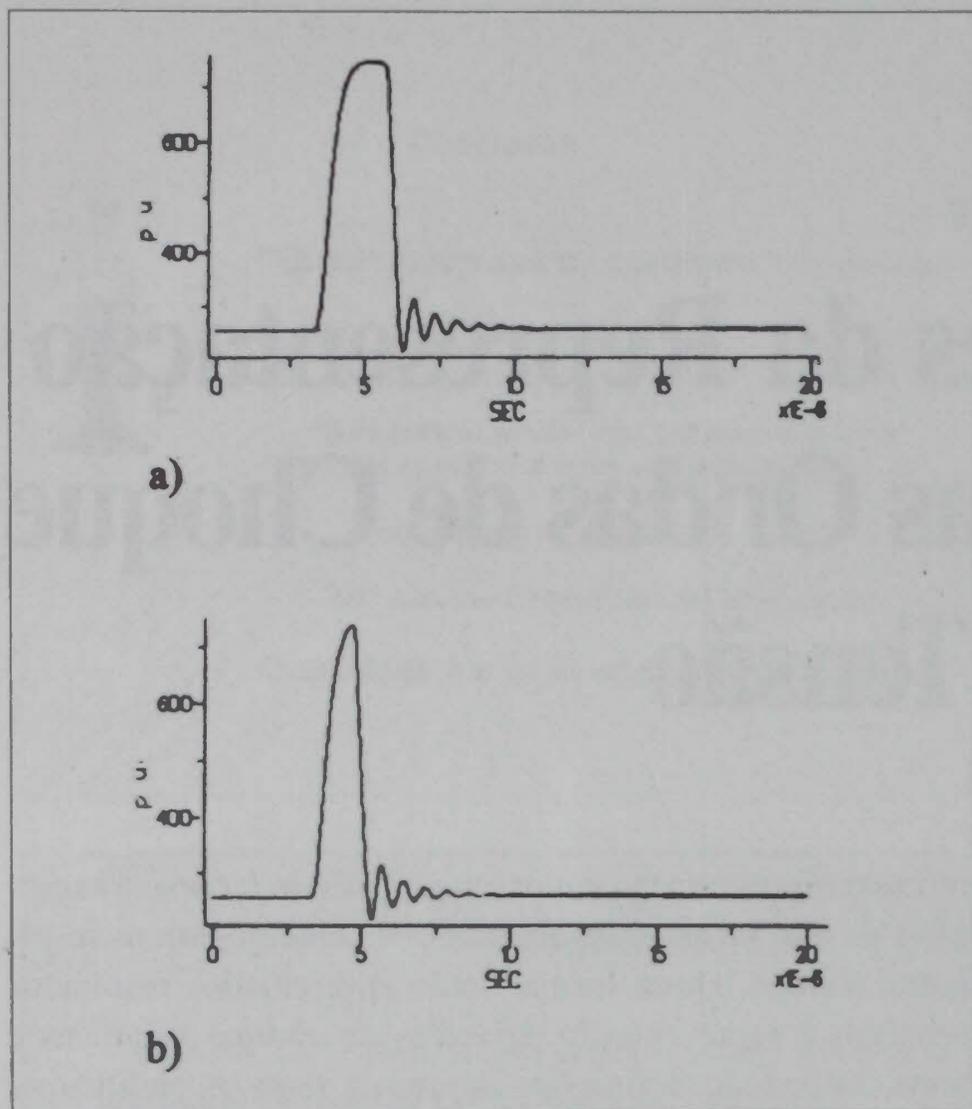


Fig.1 - Impulso cortado.
 a) Logo após o pico.
 b) No pico.

la" usada, mais elevado será o valor da menor frequência detectável, ou seja, menor será a resolução frequencial da representação. Por outro lado, o aumento da resolução frequencial implica a utilização de "janelas" mais largas, o que conseqüentemente diminui a resolução temporal da representação. Nos casos mais críticos, onde é impossível conciliar uma suficiente resolução temporal com uma suficiente resolução frequencial, assume especial importância a definição do passo utilizado no avanço da "janela" durante o deslizamento. A utilização de uma "janela" mais larga, que melhora a resolução frequencial, associada a uma sobreposição parcial das posições sucessivas da mesma, que melhora a resolução temporal, conduz a uma representação eficiente nos dois domínios.

3. Influência dos parâmetros da "janela" na representação tempo-frequência

A investigação feita com o objectivo de escolher a função "janela" a utilizar para a representação tempo-frequência dos impulsos AT baseou-se em estudos genéricos relacionados com as propriedades apresentadas por diferentes funções matemáticas para a análise espectral [4]. O resultado apontou para a utilização de uma "janela" denominada de *Blackman-Harris de 4 termos*, cuja expressão é a seguinte:

$$h(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2}{N} n\right) + a_2 \cos\left(\frac{2}{N} 2n\right) - a_3 \cos\left(\frac{2}{N} 3n\right)$$

em que $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ sendo N a largura da "janela".

Os exemplos de representação tempo-frequência que irão ser apresentados nesta secção foram todos obtidos com este tipo de "janela". As diferentes representações que se apresentam, para o mesmo impulso AT, foram obtidas utilizando diferentes larguras de "janela" e/ou sobreposição das diversas posições consecutivas que ela ocupa.

O primeiro exemplo a apresentar envolve duas ondas cortadas, figuras 1a e 1b, que possuem uma oscilação de alta frequência após o corte.

Os dois impulsos são muito similares, residindo a única diferença no facto de no primeiro o corte ocorrer após o pico, embora muito próximo dele, enquanto que no segundo o corte ocorre mesmo no pico.

As figuras 2a e 2b apresentam as correspondentes representações tempo-frequência, obtidas com recurso a uma "janela" de 512 amostras, com uma sobreposição a 75% entre posições consecutivas.

Ao analisarmos as duas representações tempo-frequência da figura 2 podemos ver no início da evolução dos espectros o conteúdo espectral dos impulsos e após algumas posições da "janela", já só se nota o efeito da oscilação de alta frequência. Comparando as duas representações podemos verificar que são muito similares, mas existe uma ligeira diferença entre elas. Na figura 2a a presença da oscilação torna-se realmente evidente apenas após a quarta posição, 6,4 μ s, enquanto que na da figura 2b a oscilação aparece após a terceira posição, 5,12 μ s. Esta diferença, devida aos diferentes tempos de corte dos impulsos, não está suficientemente clara e não pode, nestas representações, ser me-

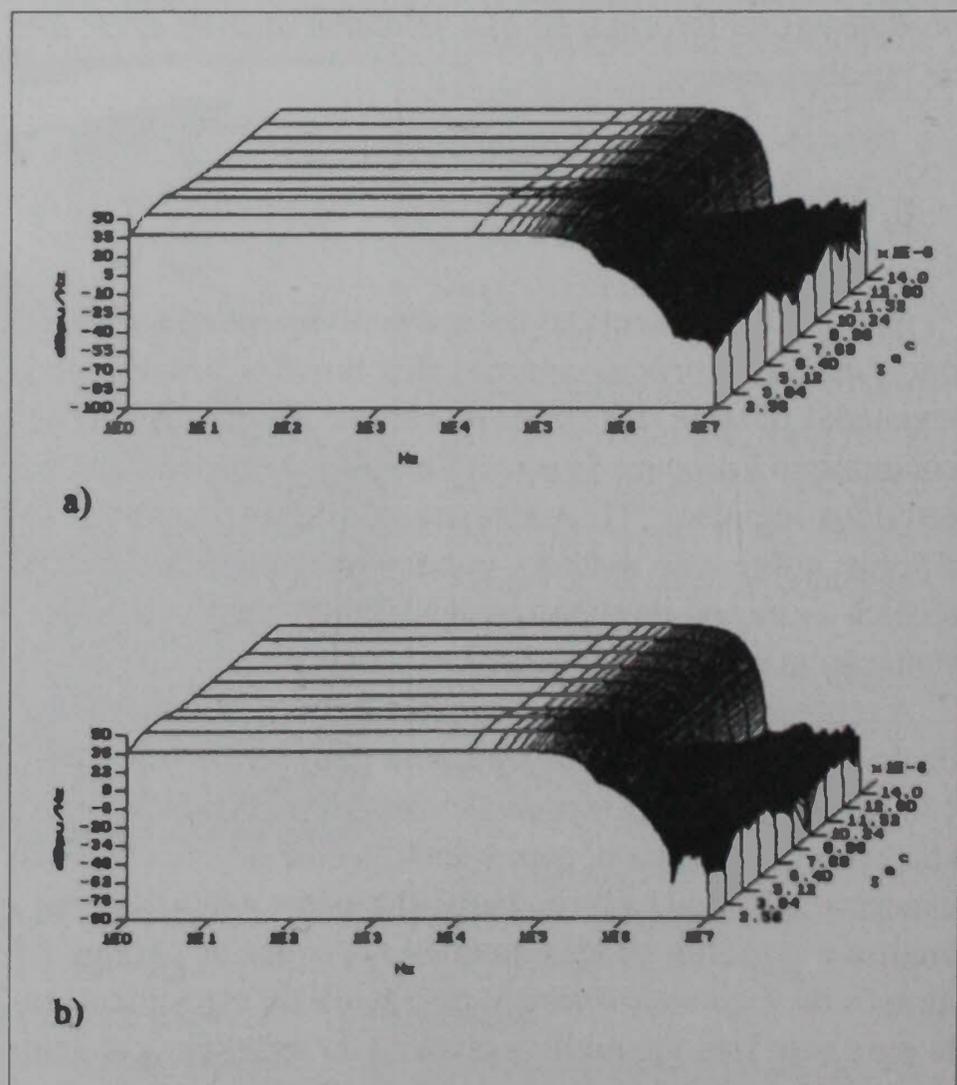


Fig.2 - Representação tempo-frequência, obtida com 75 % de sobreposição das posições sucessivas da "janela".
 a) Do impulso da figura 1a.
 b) Do impulso da figura 1b.

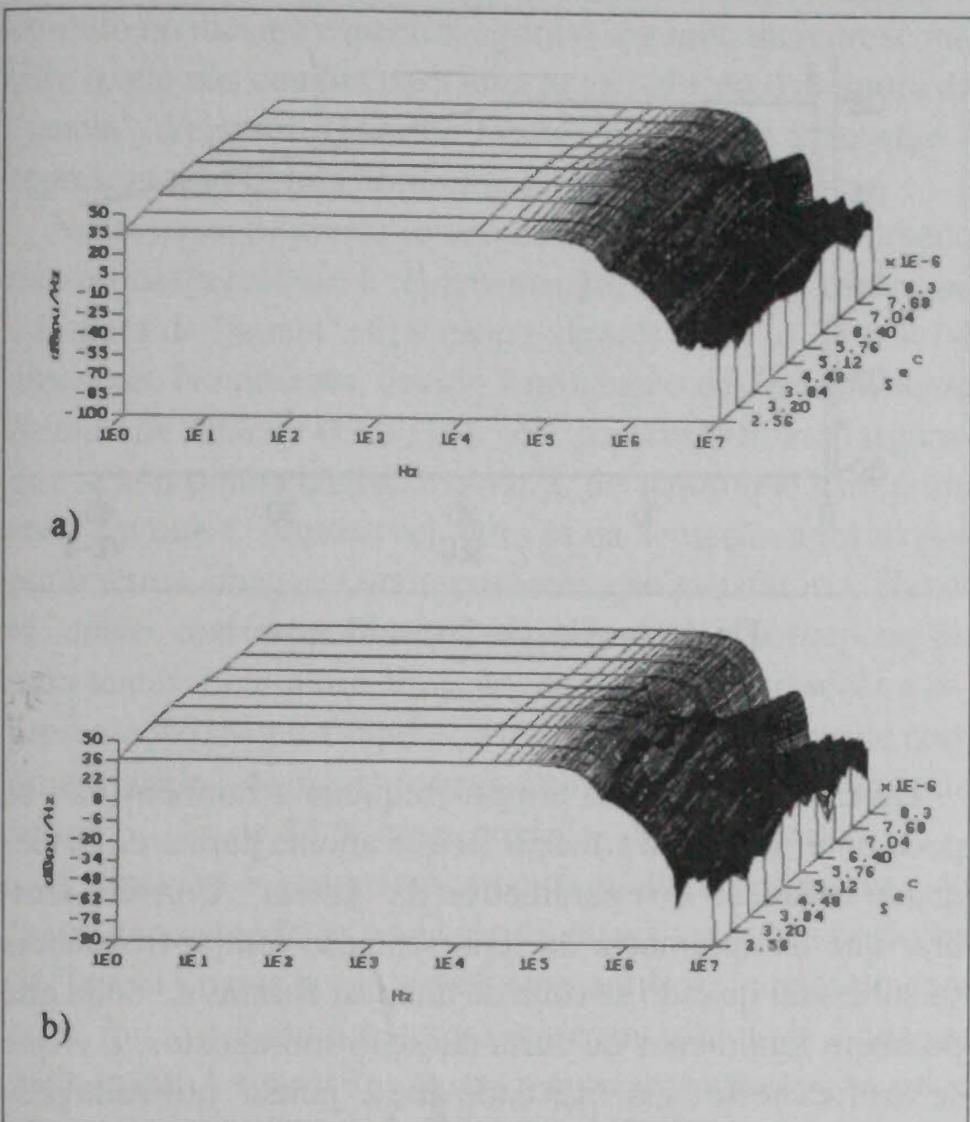


Fig. 3 - Representação tempo-frequência, obtida com 87,5 % de sobreposição das posições sucessivas da "janela".
 a) Do impulso da figura 1a.
 b) Do impulso da figura 1b.

lhor definida em termos de localização temporal. Assim, os parâmetros da "janela" têm de ser modificados de modo a adaptá-los às características dos impulsos.

Dado que é necessária uma melhor resolução temporal, uma alteração possível é o aumento da sobreposição entre posições consecutivas da "janela". As figuras 3a e 3b apresentam as representações tempo-frequência correspondentes aos impulsos da figura 1, mas agora obtidas utilizando uma sobreposição de 87,5 % entre posições consecutivas.

Comparando as duas representações da figura 3, pode-se observar mais claramente as diferenças entre os impulsos. Na figura 3a a oscilação pode ser notada apenas após a oitava posição da "janela", 7,04 μs, enquanto que na figura 3b ela torna-se evidente após a sexta posição, 5,76 μs. Desta forma, a diferença entre os tempos de corte dos impulsos pode ser determinada com mais rigor. Contudo, se ainda for necessária uma maior precisão, poder-se-á aumentar a sobreposição utilizada.

A "janela", com largura de 512 amostras, utilizada neste exemplo, pode ser considerada demasiado grande relativamente às características dos impulsos a representar. Dado que os impulsos foram registados utilizando uma frequência de amostragem de 100 mega-amostras por segundo, uma "janela" com aquelas características permite detectar fenómenos que se caracterizem por possuir frequência de 200 kHz ou superior. A detecção de fenómenos de tão baixa frequência não é muito útil na análise e processamento dos impulsos de choque AT, pelo que se poderá pensar em utili-

zar uma "janela" mais estreita. Desta forma, em alternativa ao aumento da sobreposição que foi feito, a resolução temporal de representação tempo-frequência pode ser aumentada através da utilização de uma "janela" mais estreita. As figuras 4a e 4b apresentam a representação tempo-frequência dos impulsos da figura 1, agora obtidas por recursos a uma janela de 256 amostras com 75 % de sobreposição das posições sucessivas, a qual permite observar fenómenos com frequência característica igual ou superior a 400 kHz.

Nas representações da figura 4 pode-se avaliar com maior exactidão os instantes de corte dos impulsos. Na figura 4a pode-se observar o efeito do corte no espectro correspondente à oitava posição do espectro, 5,76 μs, seguido pela presença da oscilação de alta frequência nas duas posições seguintes. Na figura 4b o corte pode ser detectado na sexta posição da "janela", à qual corresponde um tempo de 4,48 μs. A imprecisão na determinação dos tempos é, nestes casos, reduzida a metade da que se verifica nas representações apresentadas nas figuras 2 e 3, dado que a largura da "janela" foi também reduzida a metade.

Pode-se obter uma maior resolução temporal reduzindo ainda mais a largura da "janela". A figura 5 apresenta a representação tempo-frequência do impulso da figura 1a obtido com uma "janela" de 128 amostras, sem sobreposição. Nela pode-se observar o efeito da frente do impulso na quinta posição, 3,2 μs, e o efeito do corte na nona posição, 5,76 ms. O único problema reside no facto de, com uma tal largura de "janela", só ser possível à representação detectar fenómenos com frequência igual ou superior a 800 kHz, o que

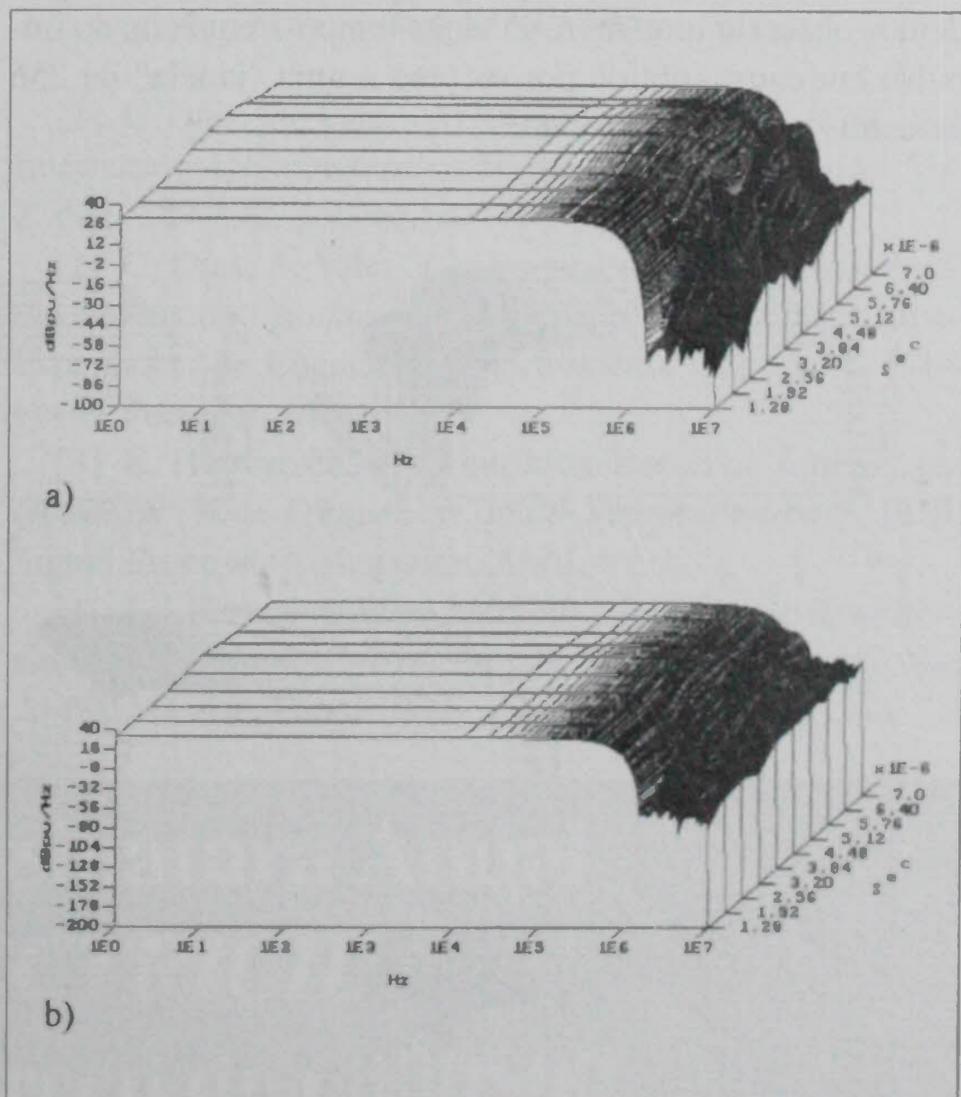


Fig. 4 - Representação tempo-frequência, obtida com uma "janela" de 256 amostras.
 a) Do impulso da figura 1a.
 b) Do impulso da figura 1b.

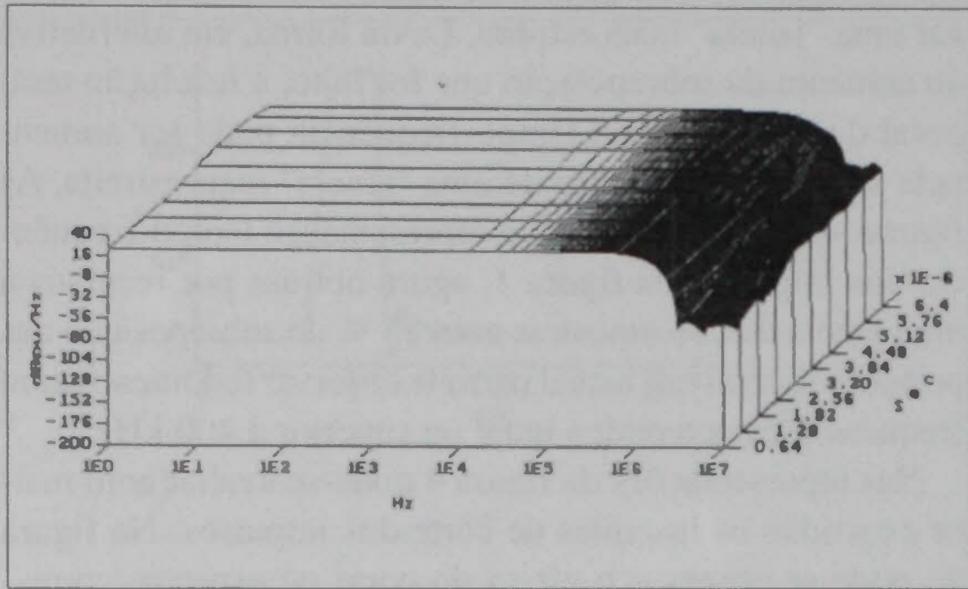


Fig. 5 - Representação tempo-frequência, obtida com uma "janela" de 128 amostras, do impulso da figura 1a.

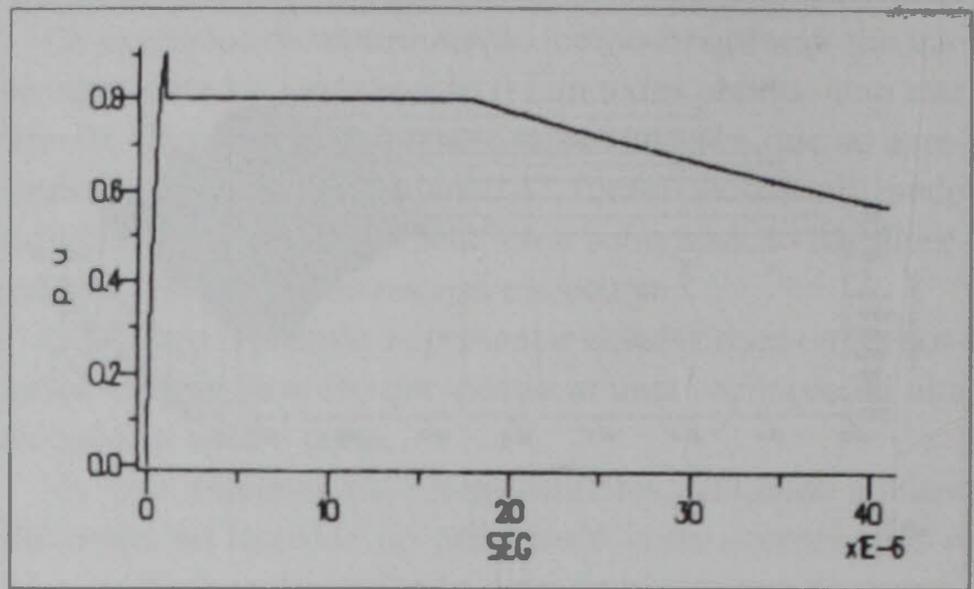


Fig. 6 - Impulso de choque AT aplanado.

pode ser insuficiente em muitos casos. Nessas situações, a largura da "janela" não pode ser reduzida. Caso contrário, a "janela" será tão estreita que não poderá "ver" a totalidade da frente do impulso ou do corte e, como tal, a representação deixará de dar informação relativa ao tipo de impulso em causa. Assim, a partir desta situação, a única possibilidade para se obter uma maior resolução temporal que permita uma maior exactidão na avaliação do tempo de corte só pode ser obtida por recurso à sobreposição das posições consecutivas da "janela".

O segundo exemplo a apresentar é o da análise dos impulsos de choque AT aplanados. A figura 6 apresenta um impulso aplanado a 80 % do valor de pico do impulso de choque de base. Como se pode verificar, a zona inicial do corte da onda é de difícil análise, dado envolver tempos muito pequenos e fenómenos de alta frequência. Na figura 7a podemos observar uma representação tempo-frequência, do impulso em causa, obtida por recurso a uma "janela" de 256 amostras sem sobreposição.

Desta representação tempo-frequência também não se pode obter muita informação, o que aponta para uma inadequada definição dos parâmetros da "janela". Convém lembrar que a supremacia da representação tempo-frequência só sobressai quando se trata de analisar formas de onda que possuem fenómenos de curta duração sobrepostos. É o que se verifica neste caso, mas dado que a "janela" utilizada possuía uma largura de 2,56 μ s todo o fenómeno de curta duração ficou contido numa única posição da "janela", afectando assim apenas um único espectro, o primeiro da representação. Para melhorar o desempenho desta representação deve-se-á então reduzir a largura da "janela" para valores próximos do correspondente à duração do fenómeno a analisar. Na figura 7b pode-se observar a representação tempo-frequência obtida com uma "janela" de 64 amostras, ou seja, com uma largura de 0,64 μ s.

A análise desta representação também não nos revela o fenómeno em pormenor, dado que ele continua a estar todo

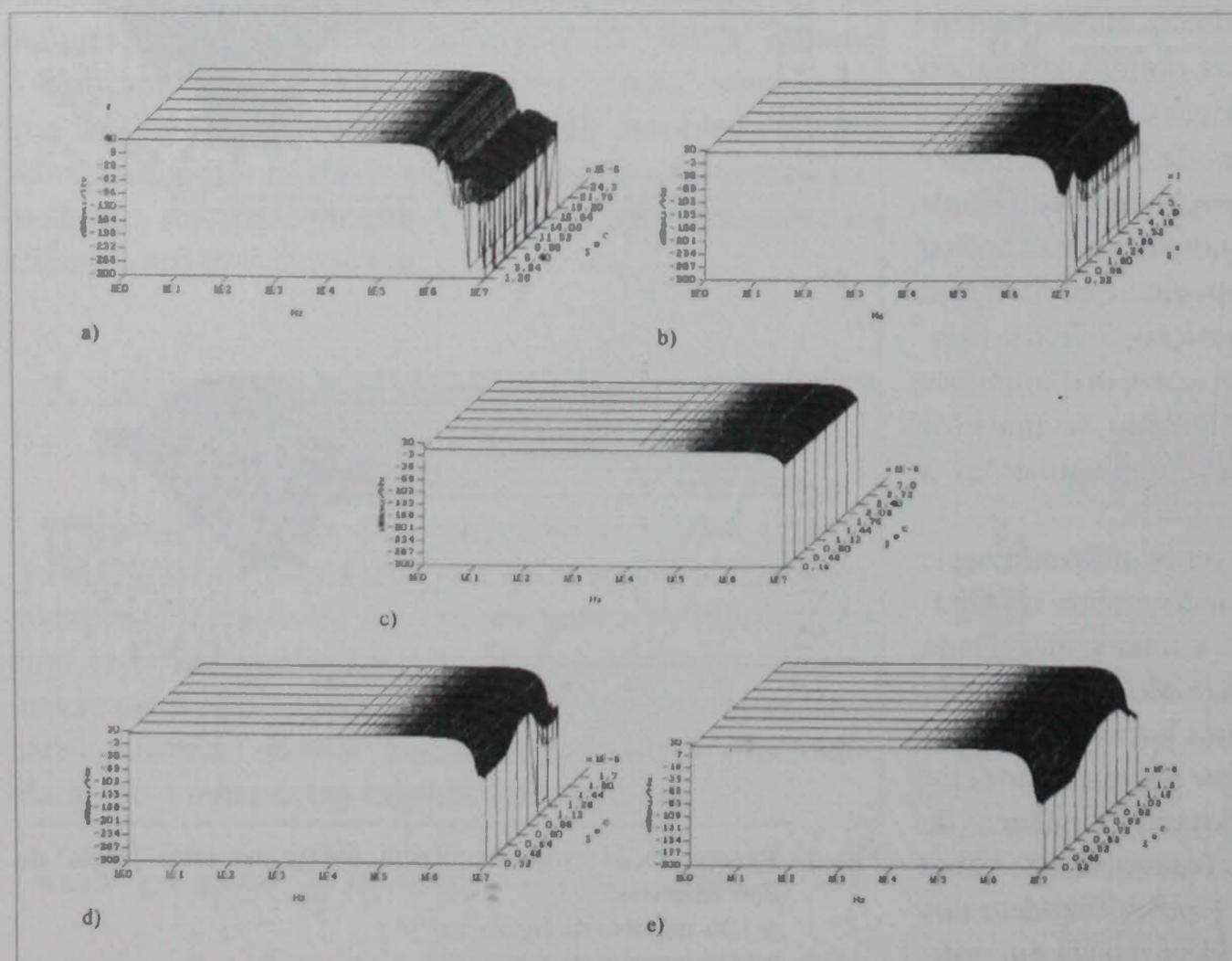


Fig. 7 - Representação tempo-frequência do impulso da figura 6.

- a) Obtida com "janela" de 256 amostras sem sobreposição.
- b) Obtida com "janela" de 64 amostras sem sobreposição.
- c) Obtida com "janela" de 32 amostras sem sobreposição.
- d) Obtida com "janela" de 64 amostras com 75 % de sobreposição.
- e) Obtida com "janela" de 64 amostras com 84 % de sobreposição.

contido no mesmo espectro, agora o segundo da representação, o que nos conduz para uma nova redução da largura da "janela". Vejamos agora na figura 7c como se apresenta a representação obtida com uma janela de 32 amostras.

Neste caso, a "janela" é demasiado estreita e o fenómeno passou despercebido à representação, o que quer dizer que a largura de "janela" ideal estará algures entre as 32 e as 64 amostras. No entanto, devido à utilização da *Transformada Rápida de Fourier* (FFT) [4], só é possível utilizar larguras que sejam potências inteiras de 2, de modo que este é um caso em que é impossível, através da actuação num só dos parâmetros, chegar a uma representação satisfatória. Haverá, então, que actuar no outro parâmetro, a sobreposição, para tentar melhorar a situação. A figura 7d apresenta a representação tempo-frequência que se obtém novamente com uma "janela" de 64 amostras, mas agora utilizando uma sobreposição de 75 % entre posições consecutivas.

A situação é agora francamente melhor. A presença do fenómeno estende-se nesta representação por três posições da "janela", o que permite melhor quantificar temporalmente o seu início e o seu fim, mas a representação pode ainda ser melhorada. A figura 7e mostra a representação que se pode obter com uma "janela" de largura idêntica, mas agora aumentando a sobreposição de 75% para cerca de 84 %, aproximadamente 54 amostras.

Nesta representação, a presença do fenómeno de curta duração estende-se por um maior número de posições de "janela", começando a verificar-se na quinta posição e deixando de notar-se na última, o que, traduzido temporalmente, quer dizer que ele se situa, aproximadamente, entre 0,4 μ s e 1,44 μ s. Relativamente ao seu conteúdo frequencial, pode-se verificar que se caracteriza por uma frequência da ordem de alguns megahertz, atingindo mesmo a dezena de megahertz. Finalmente, será de salientar que uma melhor definição temporal pode ser obtida aumentando ainda mais a sobreposição.

4. Conclusões

Neste trabalho pretendeu-se mostrar a grande sensibilidade que apresenta o desempenho da representação tempo-frequência dos impulsos de choque AT relativamente à definição dos parâmetros da "janela" (largura e sobreposição entre posições consecutivas) que é utilizada para a obtenção dessa representação.

Para tal foram apresentados dois exemplos, um relacionado com a análise de ondas cortadas e outro relacionado com ondas aplanadas. Esses exemplos constituem casos críticos de análise dos impulsos de choque AT, tendo sido mostradas diferentes representações tempo-frequência, obtidas por variações dos parâmetros definidores da "janela".

Dos resultados obtidos pode-se facilmente concluir que é fundamental, para a eficácia do desempenho da representação tempo-frequência, uma criteriosa escolha dos parâmetros da "janela". Ficou também demonstrado que, mesmo em situações em que parece impossível melhorar o resultado da representação, a actuação conjugada nos dois parâmetros em causa conduz a uma melhoria na representação. No primeiro exemplo, começou-se por actuar na sobreposição e actuou-se depois na largura da "janela" de modo a obter uma melhor definição temporal. No segundo exemplo, foi precisamente o contrário, a redução da largura da "janela", ao princípio benéfica, conduziu a uma situação limite, na qual o fenómeno a analisar deixou de ser detectado, tendo a situação sido ultrapassada através de um aumento da largura da "janela" acompanhado do aumento da sobreposição, o que conduziu a bons resultados e que poderiam ainda ser melhorados aumentando de novo a sobreposição. Obviamente que o aumento da sobreposição implica, para o mesmo intervalo de observação, a avaliação do espectro de um maior número de posições, com o correspondente aumento do tempo de cálculo. É então necessário gerir a relação qualidade da representação *versus* tempo de cálculo, de acordo com as exigências de qualidade e rapidez que se coloquem em cada utilização desta representação.

Referências

- [1] C Dias, A. Vale, "Assisting HV Impulse Tests", 8th International Symposium on High Voltage Engineering, Vol. 2, pág. 289-292, Yokohama, Japão, Agosto, 1993.
- [2] C. Dias, A. Vale, "Representação Tempo-Frequência das Ondas de Choque de Alta Tensão", 4^{as} Jornadas Luso-Espanholas de Engenharia Electrotécnica, pág. 1410-1417, Porto, Portugal, Julho, 1995.
- [3] F. Hlawatsch, G. Boudreux-Bartels, "Linear and Quadratic Time-Frequency Signal Representations", IEEE Signal Processing Magazine, Abril, 1992.
- [4] J. Lifermann, "Les Méthodes Rapides de Transformation du Signal: Fourier, Walsh, Hadamard, Haar", pág. 20-60, Masson, Paris, 1979.

**Renove a sua Assinatura Anual
da Revista *ELECTRICIDADE*
para 1998 pelo preço de 6000\$00
Envie cheque ou vale de correio à Redacção**