



Energia Teager-Kaiser associada à transformada wavelet na geração de atributos sísmicos

Marcílio Castro de Matos*, Instituto Militar de Engenharia e PUC-Rio de Janeiro
Paulo Roberto Schroeder Johann, PETROBRAS

Copyright 2007, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 10th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 19-22 November 2007.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

A new method to estimate the instantaneous seismic traces energy is presented here. We propose to use the Teager-Kaiser energy associated with wavelet transform to generate a joint time-frequency representation, which can be used as a nonlinear energy tracking of the seismic waves. The method was applied to detect important geological marks and reservoir zones on synthetic seismic traces from well logs. It was also applied to real seismic data and has shown effective to reveal important geological features.

Introdução

Normalmente, a energia de qualquer tipo de sinal é estimada elevando-se ao quadrado a sua amplitude instantânea. Entretanto, esta forma não leva em conta a energia total do sinal, mas somente a energia no instante observado, não considerando a variação do sinal ao longo do tempo. Portanto, partindo deste pressuposto, Kaiser (1990) mostrou que a energia instantânea dos sinais discretos no tempo pode ser estimada em função da vizinhança de cada amostra da amplitude no tempo.

Neste trabalho, nós mostramos que a energia gerada pelo movimento das ondas sísmicas está diretamente relacionada à forma de obtenção da energia proposta por Kaiser (1990) para sinais discretos no tempo oriundos de fenômenos ondulatórios tais como o modelo físico de um sistema massa-mola. Mostramos também que a energia Teager-Kaiser, quando associada à transformada wavelet, pode ser aplicada a traços sísmicos para a detecção de marcos geológicos importantes. Quando a técnica proposta foi aplicada a traços sísmicos sintetizados a partir de dados de poço ou traços sísmicos reais, os resultados obtidos foram promissores revelando, inclusive, áreas de reservatório.

A densidade de energia sísmica

Uma forma de estimar a energia associada ao movimento da onda sísmica, enquanto ela passa pelo meio, é através do cálculo da energia por unidade de volume, que é chamada de densidade de energia. A densidade de energia sísmica pode ser expressa pela Equação (1) e é proporcional à primeira potência da densidade do meio, ρ , e à segunda potência da frequência, ω (em radianos)

ou f (em Hz), à amplitude da onda A . (Sheriff and Geldart, 1995, p.58)

$$E = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 = 2\pi^2 \rho f^2 A^2 \quad (1)$$

Utilizando um modelo físico massa-mola análogo, Kaiser (1990) provou que a energia de um sinal discreto no tempo associado a um sistema oscilatório pode ser estimada por:

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \cong x^2[n] - x[n+1]x[n-1] \quad (2)$$

Onde m é a massa do objeto suspenso pela mola e $x[n]$ as amostras do sinal discreto no tempo.

Comparando as Equações (1) e (2), observa-se claramente, com exceção do termo densidade para a onda sísmica e do termo massa para o sistema massa-mola, que as equações são idênticas. Para efeito de comparação, o Apêndice (1a) mostra como Sheriff e Geldart (1995) obtiveram a densidade de energia sísmica, o Apêndice (1b) mostra como Kaiser (1990) obteve a expressão da energia para um sistema massa-mola e o Apêndice 2 mostra a dedução da Equação (2) para sinais discretos no tempo.

A Equação (2) também é chamada de energia Teager-Kaiser (TK) e é usualmente associada a uma forma de rastreamento não linear da energia do sinal (Hamila et al., 1999). Também foi provado por Hamila et al. (1999) que a energia TK de sinais complexos pode ser obtida simplesmente através da soma da energia TK da parte real do sinal com a energia TK da parte imaginária.

O algoritmo original, como expresso na Equação (2), não é efetivo quando aplicado a sinais com múltiplas componentes instantâneas em frequência tais como os traços sísmicos. Assim, como sugerido por Kaiser (1990), o sinal deve ser filtrado, i.e., deve passar por um banco de filtros, separando as diferentes componentes em frequência antes da obtenção da energia TK.

A transformada wavelet associada à energia TK - WaveTeKE

Sabe-se que a transformada wavelet pode ser interpretada como uma representação no domínio conjunto tempo-frequência, onde as frequências estão associadas às dilatações e compressões da wavelet mãe e também pode ser implementada através de banco de filtros (Mallat, 1999). Seguindo esta idéia, propomos o cômputo da energia TK ao longo de cada escala, após o cálculo da transformada wavelet contínua (CWT). Desta forma, a energia Teager-Kaiser associada à transformada wavelet (WaveTeKE) é calculada após a passagem do

sinal por um banco de filtros, neste caso, representado pela CWT.

A Figura 1 ilustra esquematicamente o algoritmo WaveTeKE aplicado a um traço sísmico utilizando a wavelet real de Morlet. Especificamente, a Figura 1a ilustra a impedância acústica de um campo produtor de óleo da Bacia de Campos e a Figura 1b mostra o traço sísmico sintetizado correspondente. Comparando as Figuras 1b, 1c e 1e pode-se facilmente observar a capacidade do algoritmo WaveTeKE de acompanhar a

energia no tempo e na frequência, localizando os principais eventos no traço. Especificamente neste exemplo, pode ser observado na Figura 1e, a detecção de três importantes marcos geológicos, tipicamente encontrados nos perfis de poços da bacia de Campos (em torno de 1,46 s, 1,7 s e 1,86s). Particularmente, a WaveTeKE em torno de 1,86 s está associada a um importante sistema de óleo turbidítico da bacia de Campos.

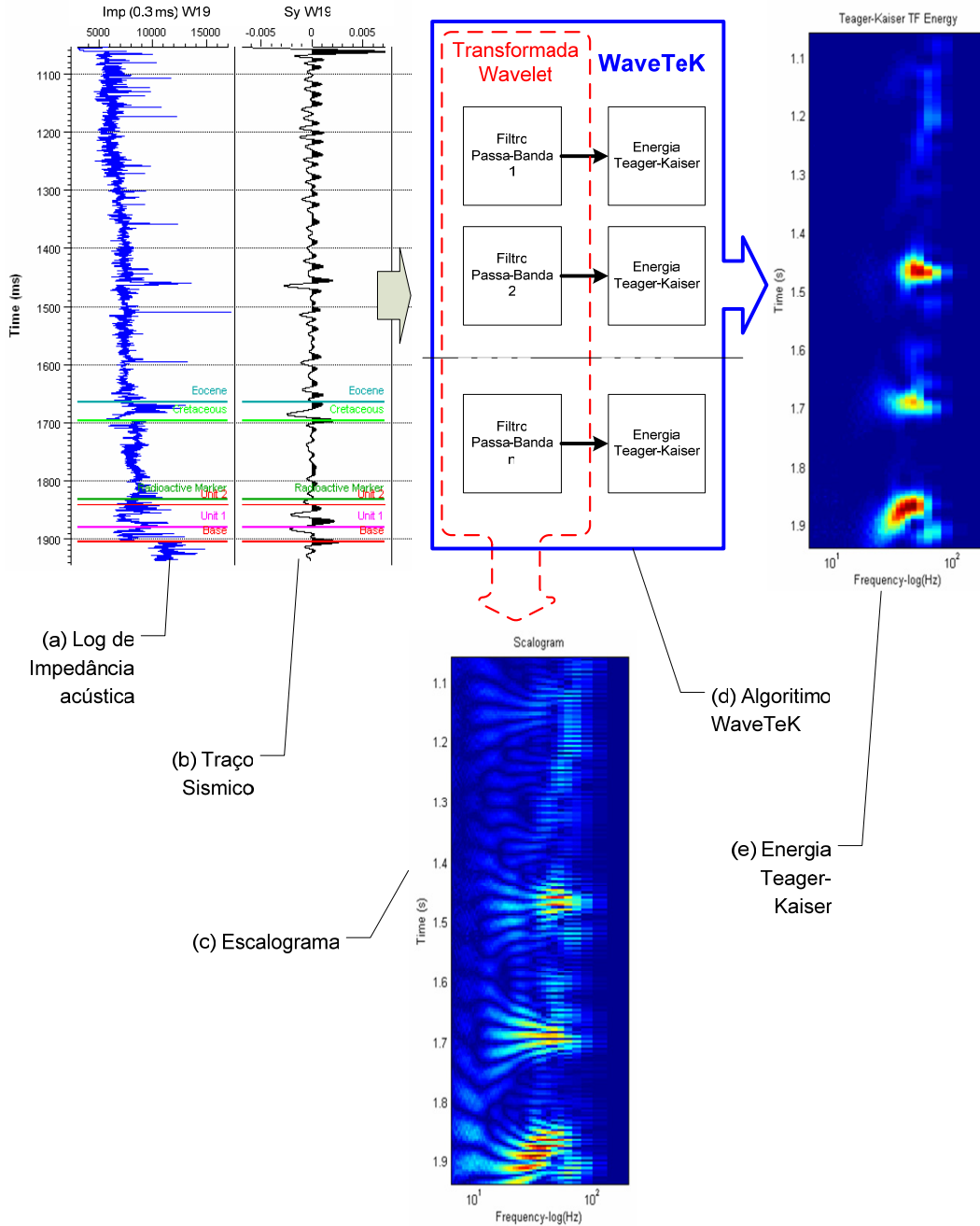


Figura 1: O algoritmo WaveTeKE: a) Impedância acústica; b) Traço sísmico sintetizado; c) Escalograma obtido elevando-se ao quadrado os coeficientes da CWT; d) Transformada wavelet representada por um banco de filtros seguidos por estimadores da energia Teager-Kaiser; e) A WaveTeKE; As cores próximas do azul representam valores positivos próximos de zero, enquanto cores próximas do vermelho representam os maiores valores positivos.

Aplicando a WaveTeKE a dados sísmicos

Para verificar a efetividade do algoritmo, a WaveTeKE foi aplicada a dados sísmicos reais. Especificamente, foi escolhido, de um dado sísmico 3D, o traço sísmico mais próximo do poço utilizado no exemplo ilustrado na Figura 1. A Figura 2a mostra o traço sísmico, enquanto as Figuras 2b e 2c ilustram o escalograma utilizando a wavelet de Morlet real e a WaveTeKE, respectivamente. Pode-se facilmente visualizar a detecção da área do reservatório em torno de 2,6s, com a mesma frequência dominante de aproximadamente 30 Hz.

Na Figura 3b, o escalograma do mesmo traço sísmico mostrado na Figura 2a foi obtido utilizando a wavelet complexa de Morlet. A WaveTeKE correspondente é mostrada na Figura 3c e é bastante similar à da Figura 2c, com a mesma frequência dominante de aproximadamente 30 Hz em torno de 2,6 s. Assim, deve ser observado a capacidade de localização da energia do evento sísmico no domínio conjunto tempo-frequência da WaveTeKE. Também deve ser observado que a energia instantânea detectada nas Figuras 2c e 3c são praticamente as mesmas para as diferentes wavelets utilizadas.

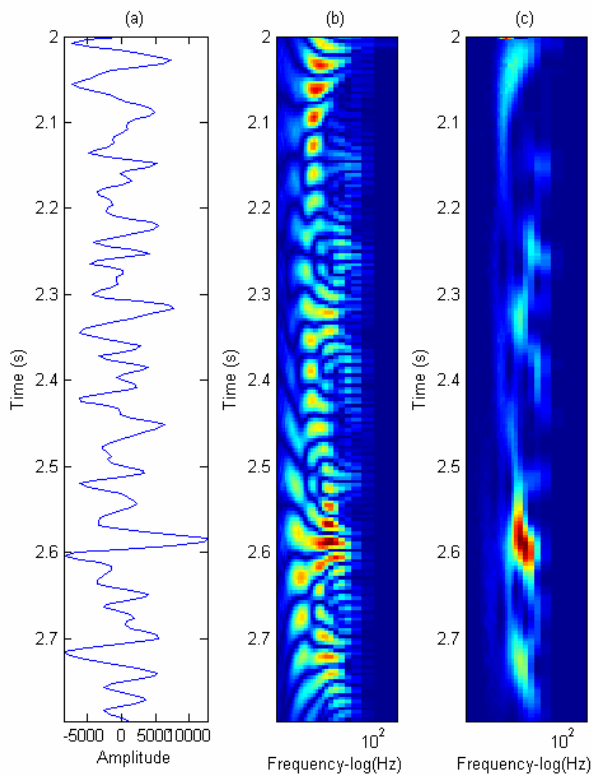


Figura 2: a) Traço sísmico próximo ao poço; b) Escalograma utilizando wavelet real de Morlet; c) WaveTeKE; As cores próximas do azul representam valores positivos próximos de zero, enquanto cores próximas do vermelho representam os maiores valores positivos.

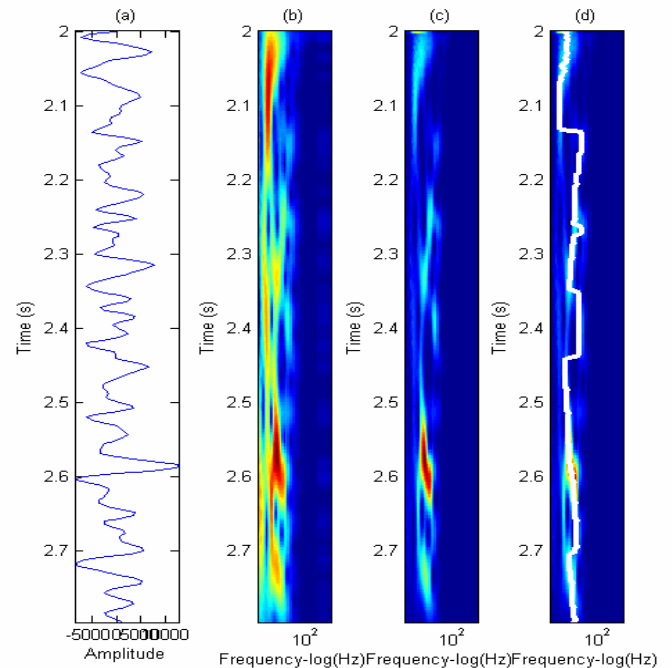


Figura 3: a) Traço sísmico próximo ao poço; b) Escalograma utilizando wavelet real de Morlet; c) WaveTeKE; d) WaveTeKE e a linha sólida na cor branca representando a frequência instantânea máxima; As cores próximas do azul representam valores positivos próximos de zero, enquanto cores próximas do vermelho representam os maiores valores positivos.

Utilizando o conceito de que a frequência instantânea máxima e sua amplitude associada podem ser relacionadas a detecção de camadas delgadas (Matos e Osório, 2005), (Matos et al., 2005) e (Liu e Marfurt, 2007), a WaveTeKE foi aplicada a traços sísmicos sintetizados a partir de modelos de acunhamento e também se mostrou efetiva na detecção de camadas delgadas (Matos et al., 2007).

Portanto, como pode ser observado nas Figuras 1e, 2c e 3c, a frequência instantânea máxima e sua amplitude associada podem ser extraídas da WaveTeKE e utilizadas como atributos sísmicos instantâneos. Especificamente, a Figura 3d ilustra a WaveTeKE e a frequência máxima representada por uma linha contínua branca.

Desta forma, como sugerido em Matos et al. (2005), as amplitudes relacionadas com as frequências instantâneas máximas foram extraídas para cada traço sísmico de duas linhas sísmicas 2D próximas ao poço utilizado na Figura 1 e os atributos resultantes foram plotados na Figura 4. Sendo mais específico, nas Figuras 4a e 4b as linhas pontilhadas brancas representam a base do reservatório, enquanto, as linhas verticais tracejadas pretas representam os traços sísmicos mais próximos ao poço utilizado na Figura 1. Estas linhas confirmam a capacidade de detecção de eventos sísmicos de interesse do atributo proposto.

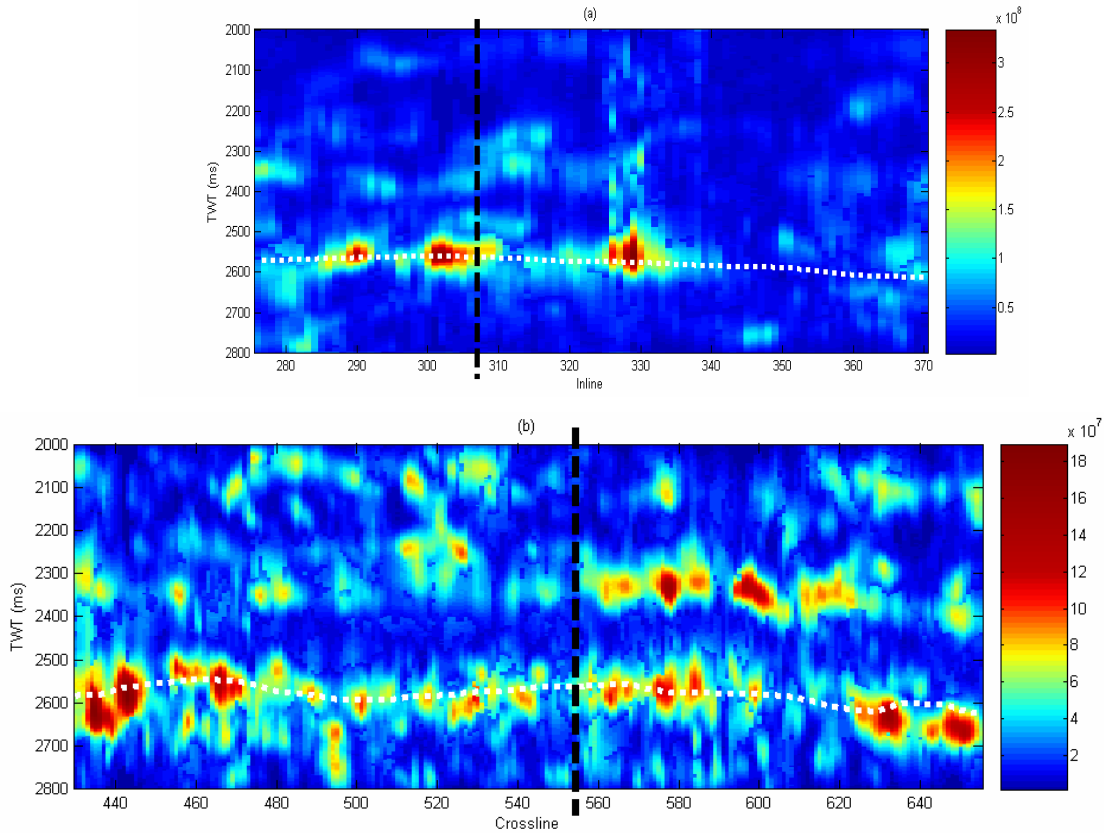


Figura 4: a) Amplitude da frequência instantânea máxima obtida através do topo da WaveTeKE aplicada a uma linha sísmica 2D; b) Amplitude da frequência instantânea máxima obtida através do topo da WaveTeKE aplicada a uma linha sísmica 2D; A linha tracejada vertical preta representa a localização do poço utilizado na Figura 1 e as linhas pontilhadas brancas representam a interpretação da base do reservatório.

Conclusões

Neste trabalho, foi mostrado que a energia Teager-Kaiser pode ser relacionada à densidade de energia sísmica e aplicada a detecção de feições geológicas quando combinada com a transformada wavelet. Mais especificamente, a técnica apresentada se mostrou efetiva para a detecção e acompanhamento de possíveis eventos sísmicos de interesse. Os resultados obtidos com dados sísmicos reais incentivam a utilização do algoritmo como uma ferramenta auxiliar na busca de possíveis marcos geológicos em atividades exploratórias.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao suporte financeiro da Petrobrás através do programa de pesquisas PRAVAP 19.

References

Hamila, R., Astola, J., Cheick, F.A., Gabbouj, M., and Renfors, M., 1999, Teager energy and the ambiguity function: *IEEE Transactions on Signal Processing*, 260-262.

Kaiser, J.F., 1990, On a simple algorithm to calculate the 'energy' of a signal: *Proceedings of the IEEE ICASSP*, 381-384.

Liu, J. and Marfurt, K.J., 2007, Instantaneous spectral attributes to detect channels: *Geophysics*, 72, P23-P31.

Mallat, S., 1999, *A wavelet tour of signal processing*, 2nd edition: Academic Press.

Matos, M.C., and P.L.M. Osorio, 2005, Characterization of thin beds through joint time-frequency analysis using the S transform: 67th Annual International Meeting, EAGE.

Matos, M.C., Osório, P.L.M., Mundim, E. C. and Moraes M.A.S., 2005, Characterization of thin beds through joint time-frequency analysis applied to a turbidite reservoir in Campos Basin, Brazil: 75th Annual International Meeting SEG, Expanded Abstracts.

Matos, M.C., Silva, D.C. e Johann, P.R.S., 2007, Wavelet transform Teager-Kaiser energy: a seismic attribute applied to reveal geological features, 69th Annual International Meeting, EAGE.

Partyka, G., Gridley, J.; and Lopez, 1999, Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization: *The Leading Edge*, 353-360.

Sheriff, R.E., and Geldart, L.P., 1995, *Exploration seismology*, second edition: Cambridge University Press.

Apêndice 1: Compara a obtenção da densidade de energia sísmica com a energia de um sistema modelo massa-mola.

Apêndice 1a: Densidade de Energia da onda sísmica segundo Sheriff e Geldart (pag 57 e 58, 1995)

A Densidade de Energia é a Energia por unidade de volume

Seja uma onda sísmica P esférica e harmônica, na qual o deslocamento radial u , a uma distância r da fonte, é dada por:

$$u(t) = A \cos(\omega t + \gamma)$$

O deslocamento radial é função do tempo e varia de $-A$ à $+A$. Assim, cada elemento do meio tem uma velocidade dada por:

$$\dot{u} = \frac{\partial u}{\partial t}$$

e a energia cinética, δE_k , de cada elemento de volume, δV , é dada por:

$$\delta E_k = \frac{1}{2} (\rho \delta V) \dot{u}^2$$

Desta forma, a energia cinética por unidade de volume é dada por:

$$\frac{\partial E_k}{\partial V} = \frac{1}{2} \rho \dot{u}^2 = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 \sin^2(\omega t + \gamma)$$

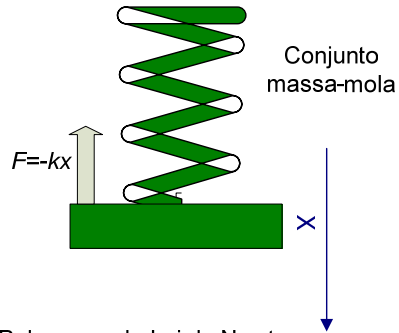
A energia cinética varia de:

$$0 \leftrightarrow \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2$$

Como a energia total é a soma da energia cinética com a potencial, pode-se afirmar que a Densidade de Energia total equivale ao valor máximo da energia cinética, que é dada por:

$$E = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 = 2\pi^2 \rho f^2 A^2$$

Apêndice 1b: Energia total de um sistema massa-mola suspenso (Kaiser, 1990)



Pela segunda Lei de Newton:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx$$

ou,
$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{k}{m} x = 0$$

A solução da equação diferencial é dada por:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \gamma)$$

A energia total do sistema massa-mola é dada por:

$$E = \frac{1}{2} kx^2 + \frac{1}{2} m\dot{x}^2$$

Como a energia total é a soma da energia cinética com a potencial, pode-se afirmar que a Energia total equivale ao valor máximo da energia cinética, que é dada por:

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$$

$$E \propto \omega^2 A^2$$

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \cong x^2[n] - x[n+1]x[n-1]$$

Apêndice 2: Derivação da Energia Teager para sinais discretos no tempo segundo Kaiser (1990)

válida para frequências menores que 62,5 Hz, valor bem acima da frequência dominante típica.

Seja $x[n]$ um sinal discreto no tempo cujas amostras representam o movimento oscilatório de um corpo. Assim:

$$x[n] = A \cos(\Omega n + \gamma)$$

Onde, Ω é a frequência digital em radianos/amostra que é dada por $\Omega = 2\pi f / f_s$, onde f é a frequência analógica e f_s é a frequência de amostragem, e γ é a fase inicial em radianos.

$$x[n] = A \cos(\Omega n + \gamma)$$

$$x[n+1] = A \cos(\Omega(n+1) + \gamma)$$

$$x[n-1] = A \cos(\Omega(n-1) + \gamma)$$

Utilizando a identidade trigonométrica:

$$\cos(\alpha + \beta)\cos(\alpha - \beta) = \frac{1}{2}[\cos(2\alpha) + \cos(2\beta)]$$

$$x[n+1]x[n-1] = \frac{A^2}{2}[\cos(2\Omega n + 2\gamma) + \cos(2\Omega)]$$

Utilizando a identidade trigonométrica:

$$\cos 2\alpha = 2 \cos^2 \alpha - 1 = 1 - 2 \sin^2 \alpha$$

$$x[n+1]x[n-1] = A^2 \cos^2(\Omega n + \gamma) - A^2 \sin^2(\Omega)$$

$$x[n+1]x[n-1] = x^2[n] - A^2 \sin^2(\Omega)$$

Ou

$$A^2 \sin^2(\Omega) = x^2[n] - x[n+1]x[n-1]$$

A expressão acima é exata e válida para Ω menor que $\pi/2$.

Para valores de Ω , em radianos, próximos de zero pode-se afirmar que $\Omega \approx \sin(\Omega)$. Pode-se também afirmar que quando:

$$\Omega < \frac{\pi}{4} = 0.7854, \text{ i.e., } \frac{f}{f_s} < \frac{1}{8}$$

Então, o erro da estimativa é menor que 11%, ou seja,

$$A^2 \Omega^2 \approx A^2 \sin^2(\Omega) = x^2[n] - x[n+1]x[n-1] = E_n$$

Para sinais sísmicos amostrados com 4 ms, esta aproximação é válida para frequências menores que 31,25 Hz, valor próximo e acima da frequência dominante típica. Entretanto, como atualmente as sísmicas são adquiridas com resolução mais alta, como por exemplo, com taxa de amostragem de 2 ms, a aproximação é