

3.3.3 Classificação dos distúrbios múltiplos

Para a correta classificação dos diversos distúrbios é necessário estudar o comportamento dos níveis de detalhamento Wavelet, para cada coeficiente de primeira ordem identificado anteriormente, conforme mostrado nas Figuras 3.12.a, 3.12.b e 3.12.c, para o sinal de referência e sinal real. Tomando como base o comportamento dos níveis de detalhamento, para os sinais envolvidos na análise, podem-se estabelecer critérios para a classificação dos distúrbios múltiplos por meio da energia dos diversos níveis de detalhamento.

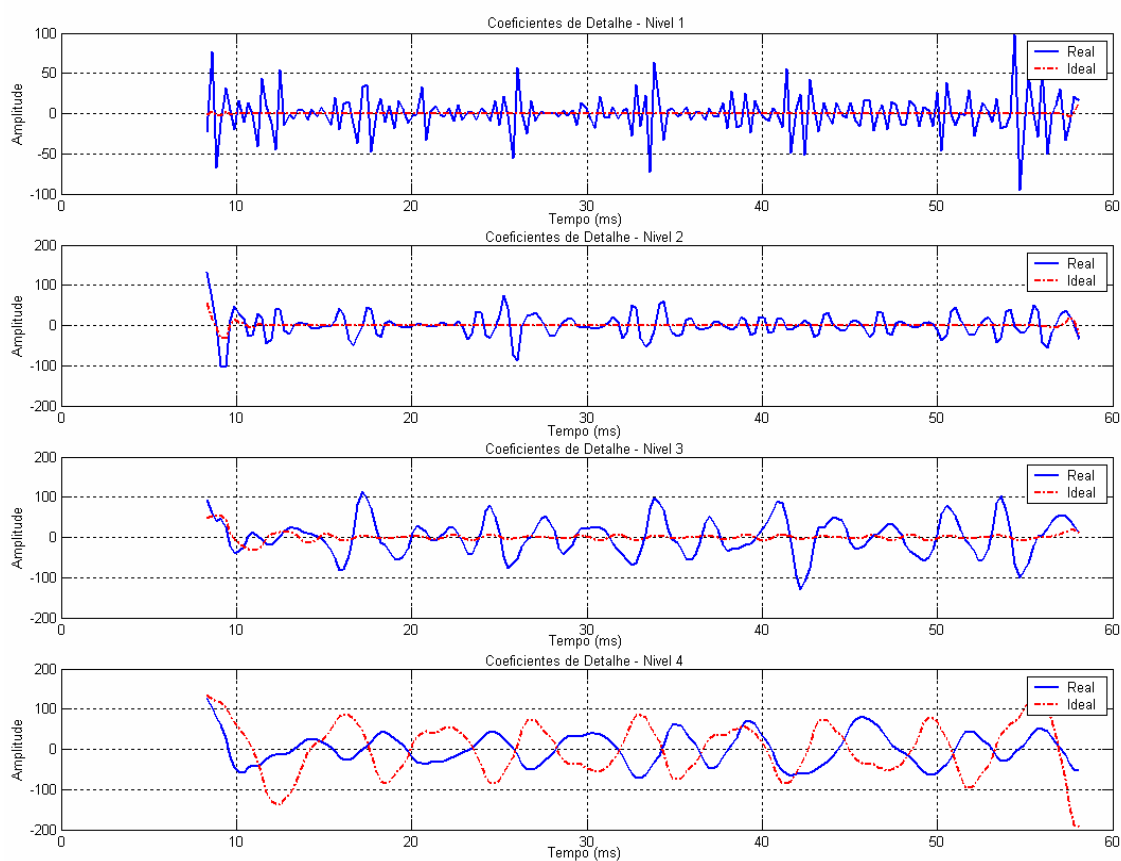


Figura 3.12.a - Coeficientes de detalhamento 1, 2, 3 e 4.

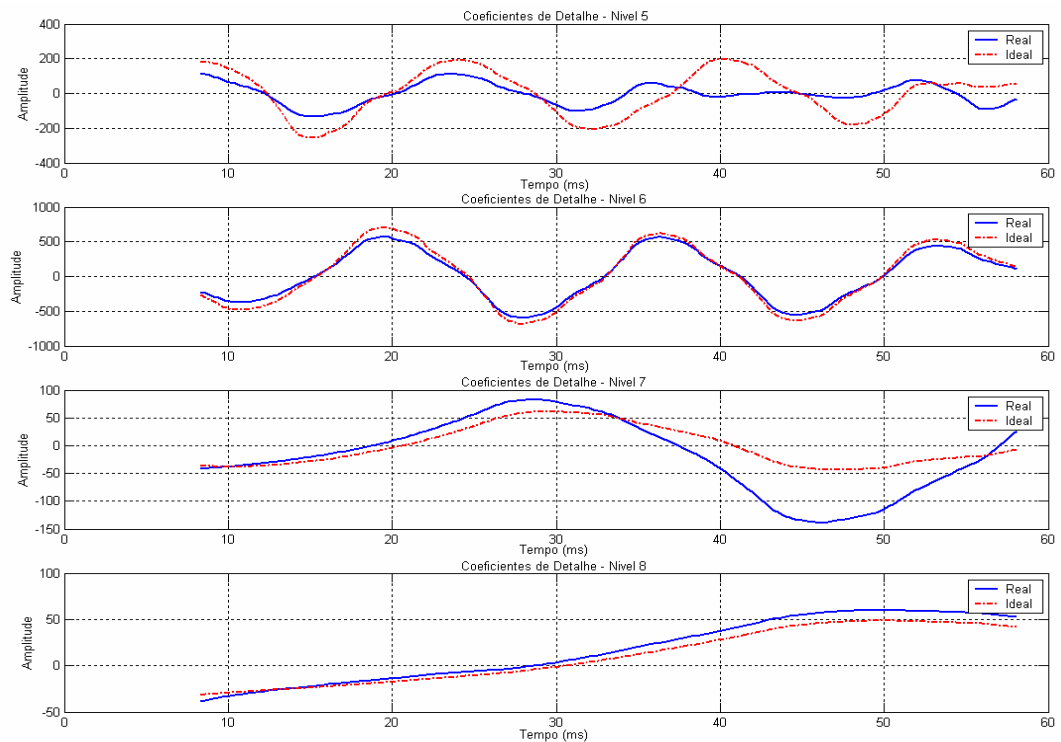


Figura 3.12.b - Coeficientes de detalhamento 5, 6, 7 e 8.

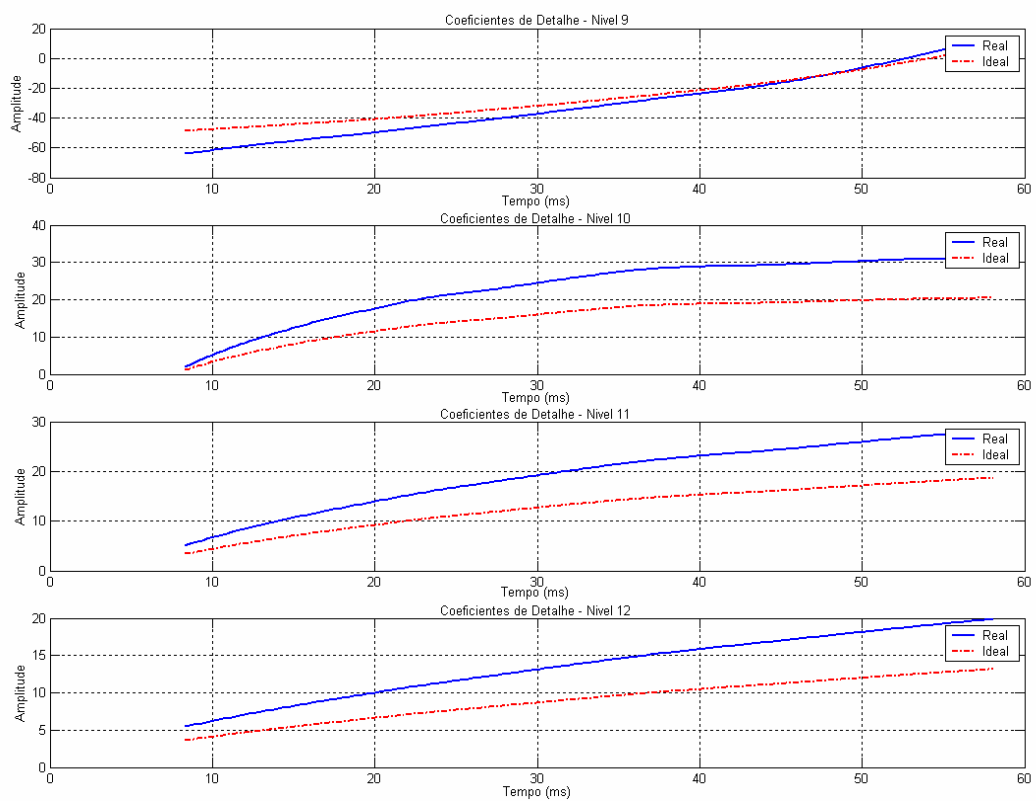


Figura 3.12.c - Coeficientes de detalhamento 9, 10, 11 e 12.

Foi feito o cálculo da energia, para cada um dos níveis de detalhamento Wavelet, tanto para o sinal real quanto para o sinal de referência (ideal), visando à obtenção de parâmetros de comparação para a fase de classificação de cada um dos diversos distúrbios.

Cada tipo de distúrbio possui uma determinada característica específica de energia ao longo dos 12 níveis de detalhamento. A Figura 3.13 mostra o comportamento de todos os níveis para os sinais: real e de referência.

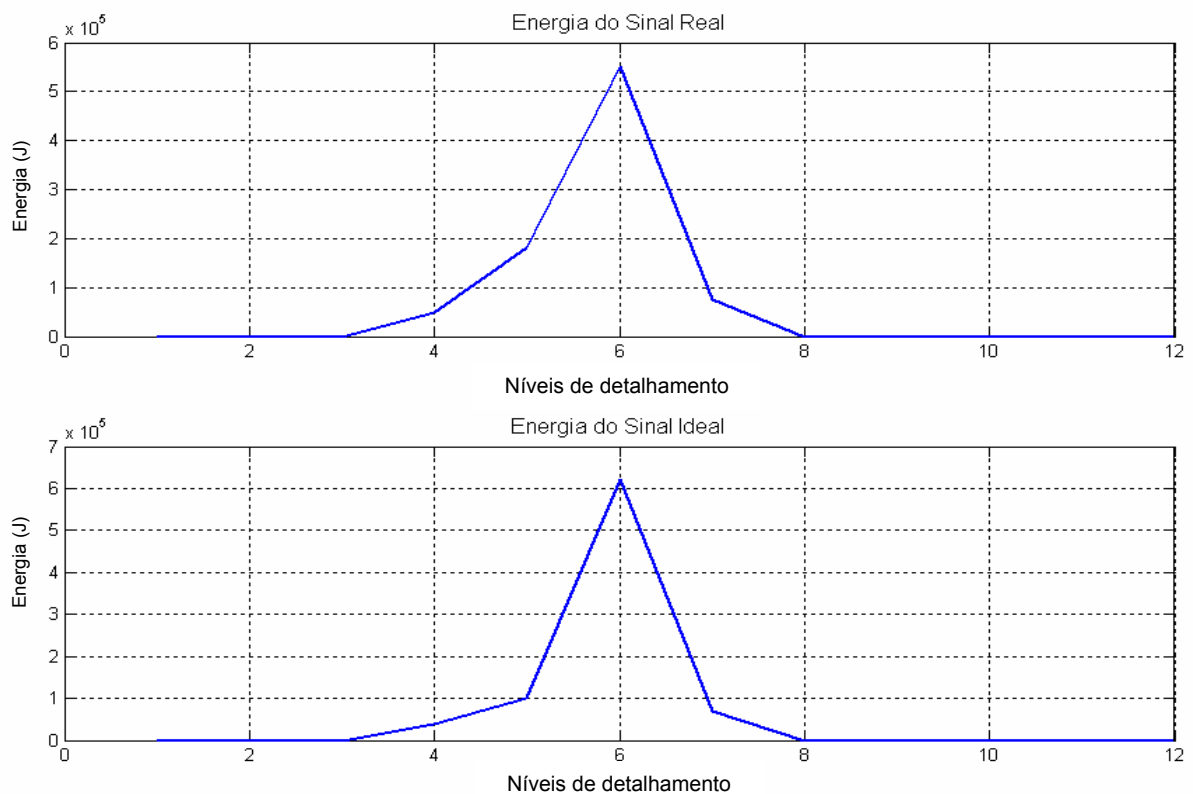


Figura 3.13 - Energia dos 12 níveis de detalhamento dos sinais real e de referência.

Para a obtenção dos critérios de classificação dos distúrbios múltiplos, observou-se a necessidade de avaliação da diferença percentual de energia, para o sinal real e de referência (GAOUDA et al., 2000b).

Nesta etapa, realizou-se o cálculo da diferença percentual de energia entre o sinal real e o sinal de referência segundo a equação (8). O resultado pode ser visto na Figura 3.14.

$$\Delta E\% = \frac{E_{\text{sinal}} - E_{\text{referência}}}{E_{\text{sinal}}} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

$E_{\text{sin}} -$ energia do sinal real de cada nível de detalhamento Wavelet;

$E_{\text{referência}}$ - energia do sinal de referência de cada nível de detalhamento Wavelet.

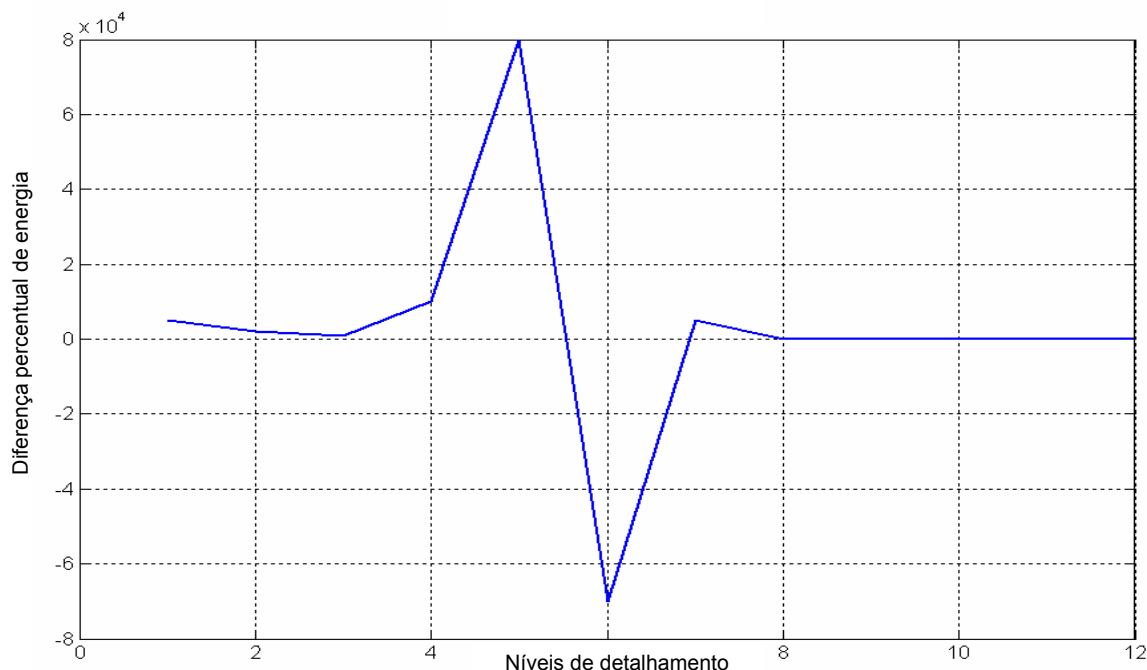


Figura 3.14 - Diferença percentual de energia entre os diversos níveis de detalhamento (real x referência).

3.4 ANÁLISE DE DISTÚRBIOS MÚLTIPLOS EM SINAIS IDEALIZADOS

A validação da técnica desenvolvida foi feita em duas etapas. Na primeira, utilizou-se um sinal teórico contendo vários distúrbios distintos, tais como: afundamento, elevação, “*spike*”, etc. O objetivo dessa fase foi caracterizar e padronizar as curvas de diferença de energia relativa a cada tipo de distúrbio presente no sinal teórico.

Como primeiro exemplo, pode-se observar a ocorrência de um afundamento teórico, ilustrado na Figura 3.15, tomando como base os critérios de classificação adotados pela ANEEL. Ainda na Figura 3.15, pode-se observar a identificação do instante exato de início e término do distúrbio, por meio dos coeficientes.

A Figura 3.16 apresenta o espectro da diferença de energia característica do

início e fim do distúrbio. Pode-se destacar neste espectro, o percentual negativo do nível de detalhamento 6, presente no distúrbio analisado.

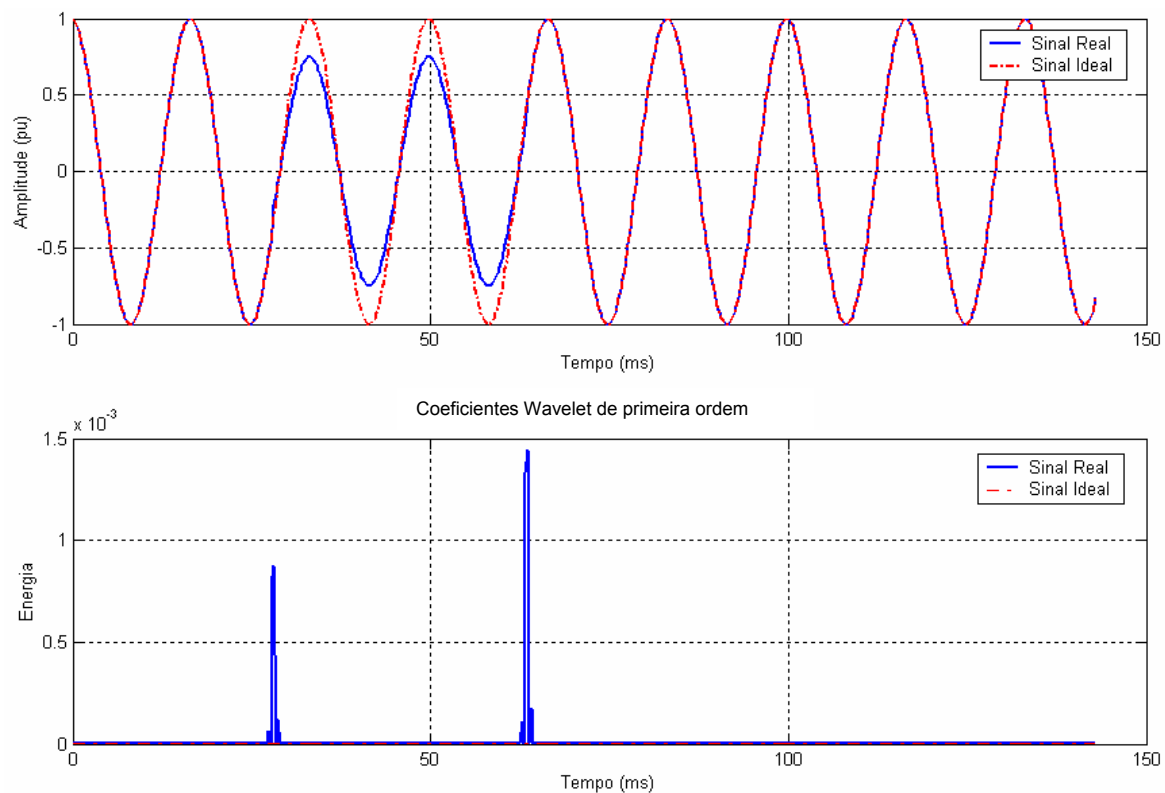


Figura 3.15 - Afundamento teórico e identificação do instante de ocorrência: início ($t = 28,65$ ms) e término ($t = 64,07$ ms).

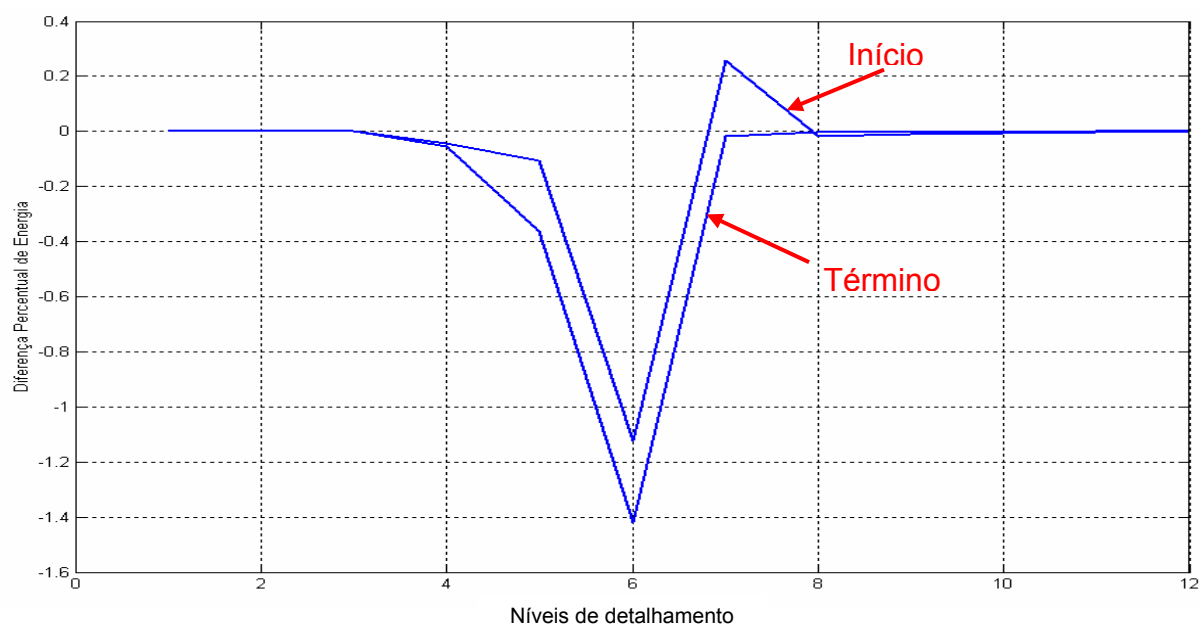


Figura 3.16 - Espectro da diferença de energia para o início e término do afundamento teórico.

No segundo exemplo, será feita uma análise, tomando como base um distúrbio do tipo elevação teórica, mantendo-se os mesmos critérios adotados pela ANEEL, conforme ilustrado na Figura 3.17.

A Figura 3.17 mostra também a identificação do instante de início e término deste distúrbio. Na Figura 3.18, é mostrado o espectro de diferença de energia característico deste distúrbio. Neste espectro, observa-se o percentual positivo do nível 6.

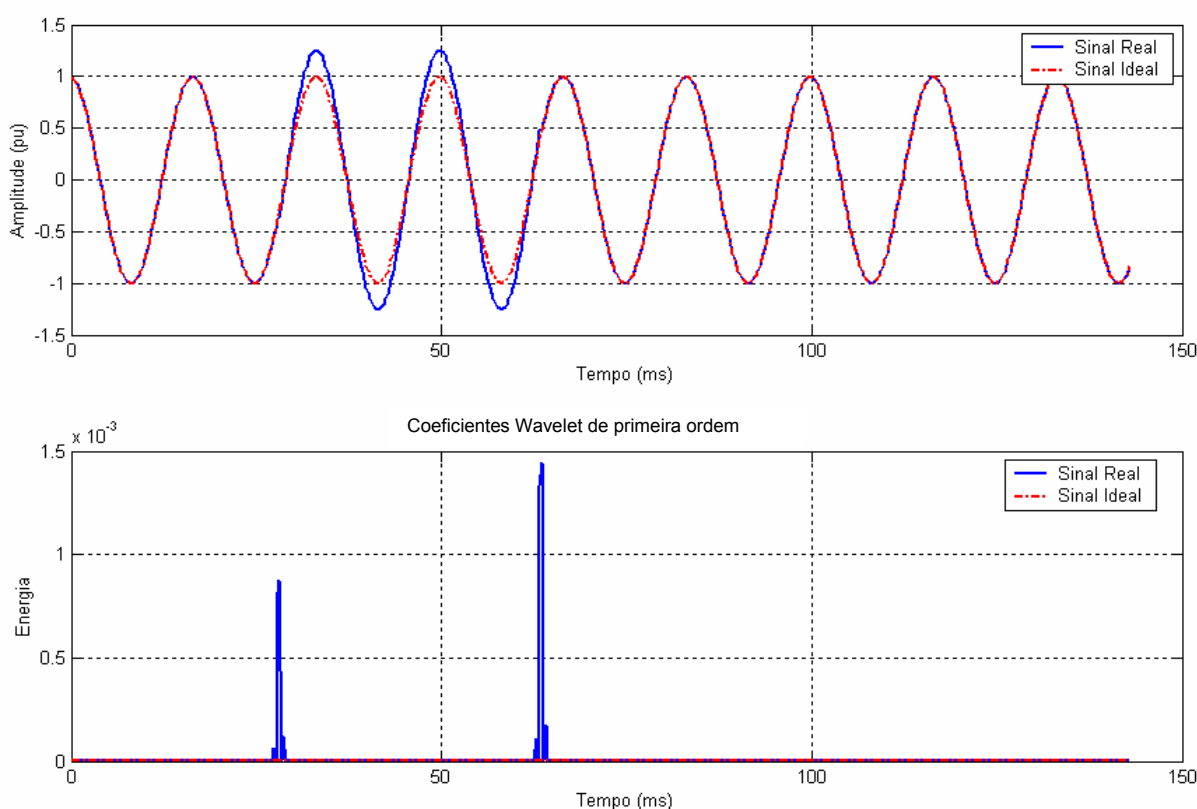


Figura 3.17 - Elevação teórica e identificação do instante de ocorrência: início ($t = 28,65$ ms) e término ($t = 64,07$ ms).

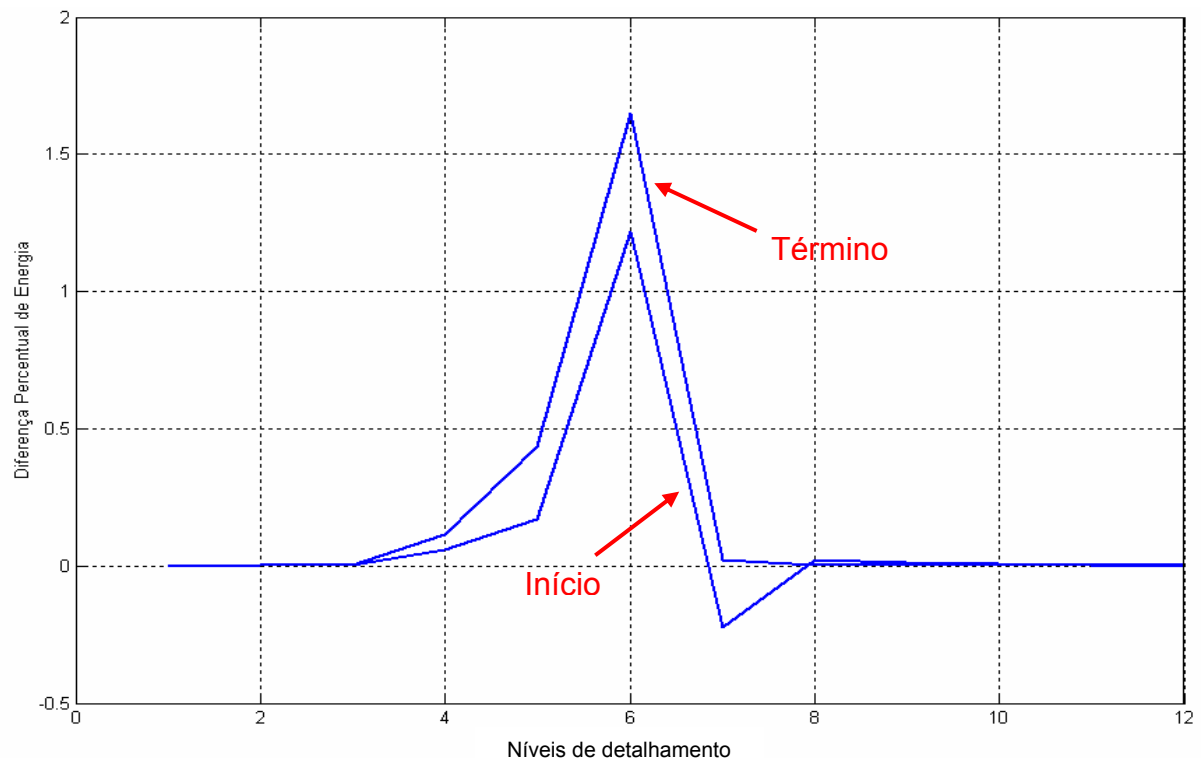


Figura 3.18 - Espectro de diferença de energia para uma elevação teórica.

O terceiro exemplo de aplicação da nova técnica desenvolvida, está apresentado na Figura 3.19 contendo o evento de um “notching” teórico, bem como o instante de identificação da ocorrência do distúrbio e, na Figura 3.20, o espectro da diferença de energia característico deste evento.

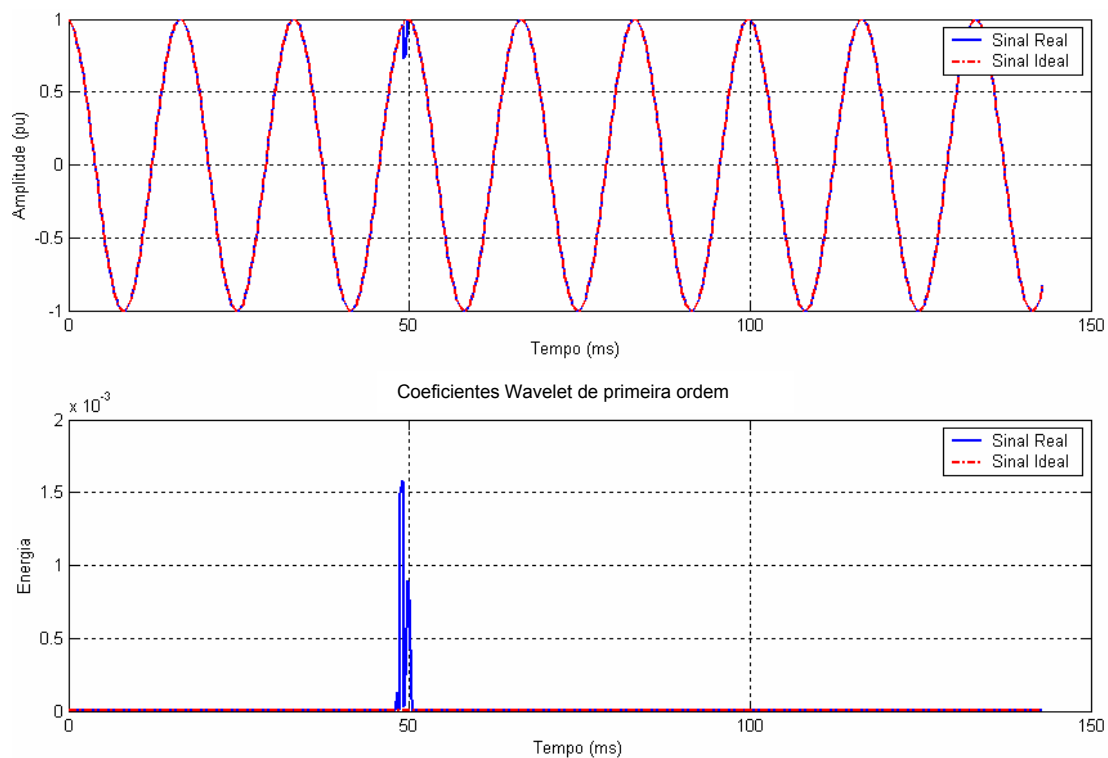


Figura 3.19 - “Notching” teórico e identificação do instante de ocorrência ($t = 49,49$ ms).

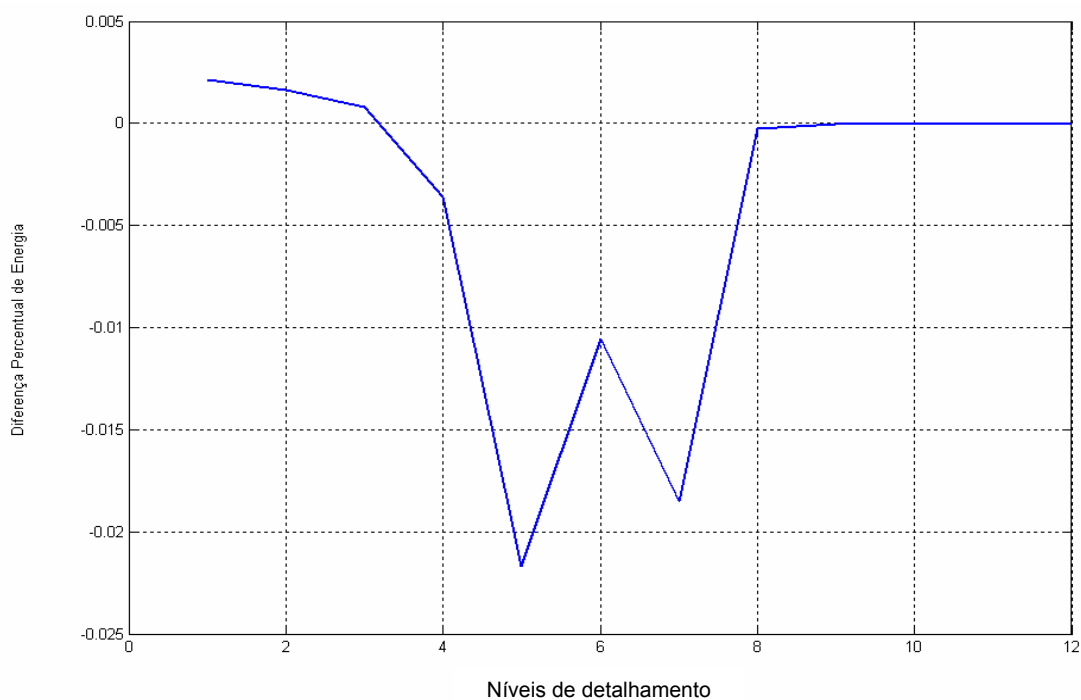


Figura 3.20 - Espectro da diferença de energia para um “notching” teórico.

A Figura 3.21 apresenta o próximo exemplo de aplicação, podendo-se observar a ocorrência de um “*spike*” teórico. Pode-se também observar, na Figura 3.21, o instante de ocorrência deste distúrbio. Na Figura 3.22, é mostrado o espectro da diferença de energia característico deste evento.

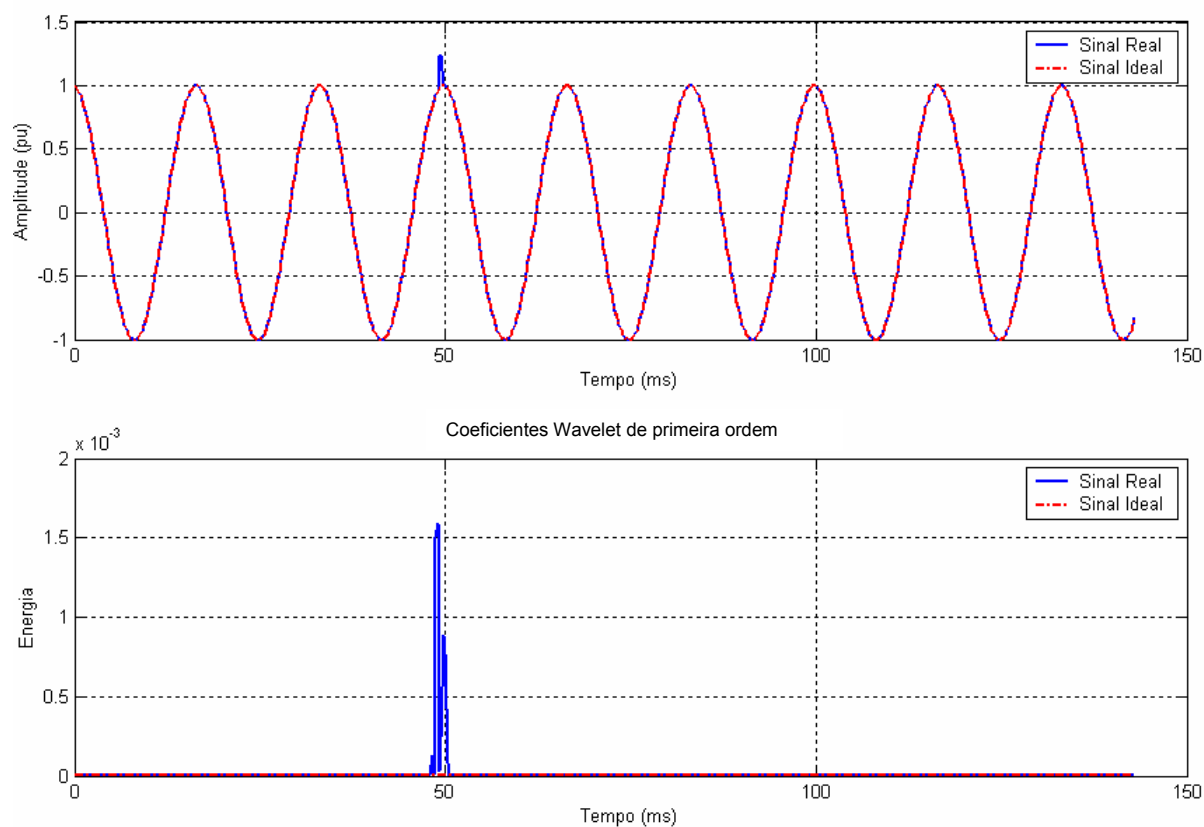


Figura 3.21 - “*Spike*” teórico e identificação do instante de ocorrência ($t = 49,49$ ms).

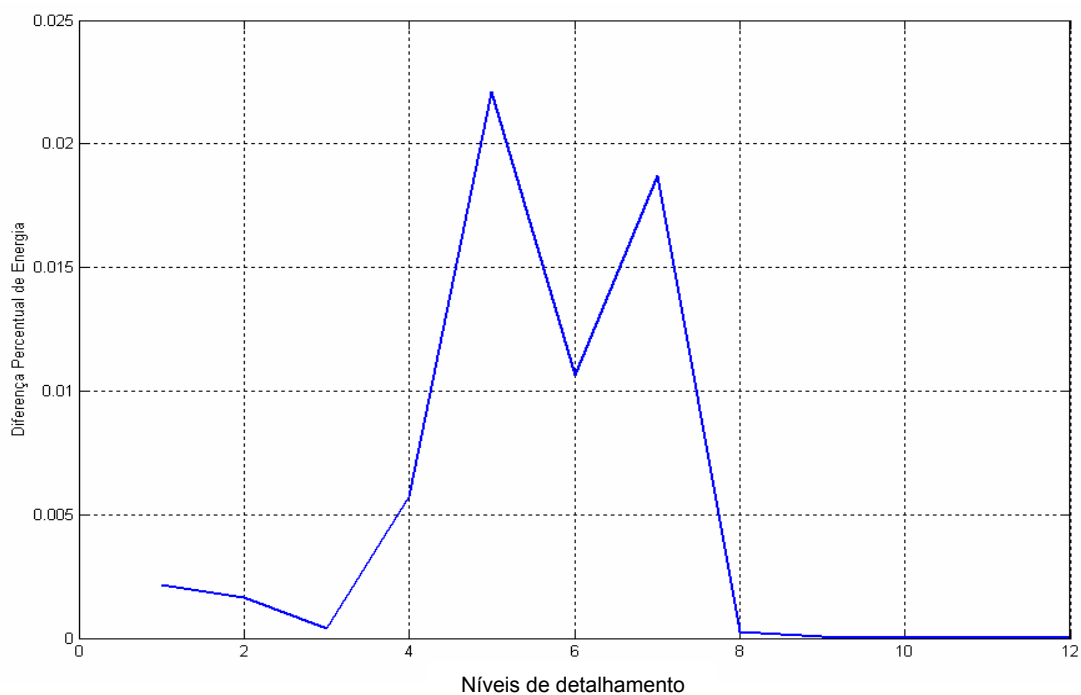


Figura 3.22 - Espectro de energia para um “*spike*” teórico.

No quinto exemplo de aplicação, associam-se dois tipos de distúrbios, conforme a Figura 3.23, o primeiro sendo um afundamento e posteriormente uma elevação em um sinal teórico. Observa-se, na Figura 3.24, os instantes de identificação das ocorrências (início e término) de cada um dos distúrbios. Na Figura 3.25, é mostrado o espectro da diferença de energia característico para estes eventos.

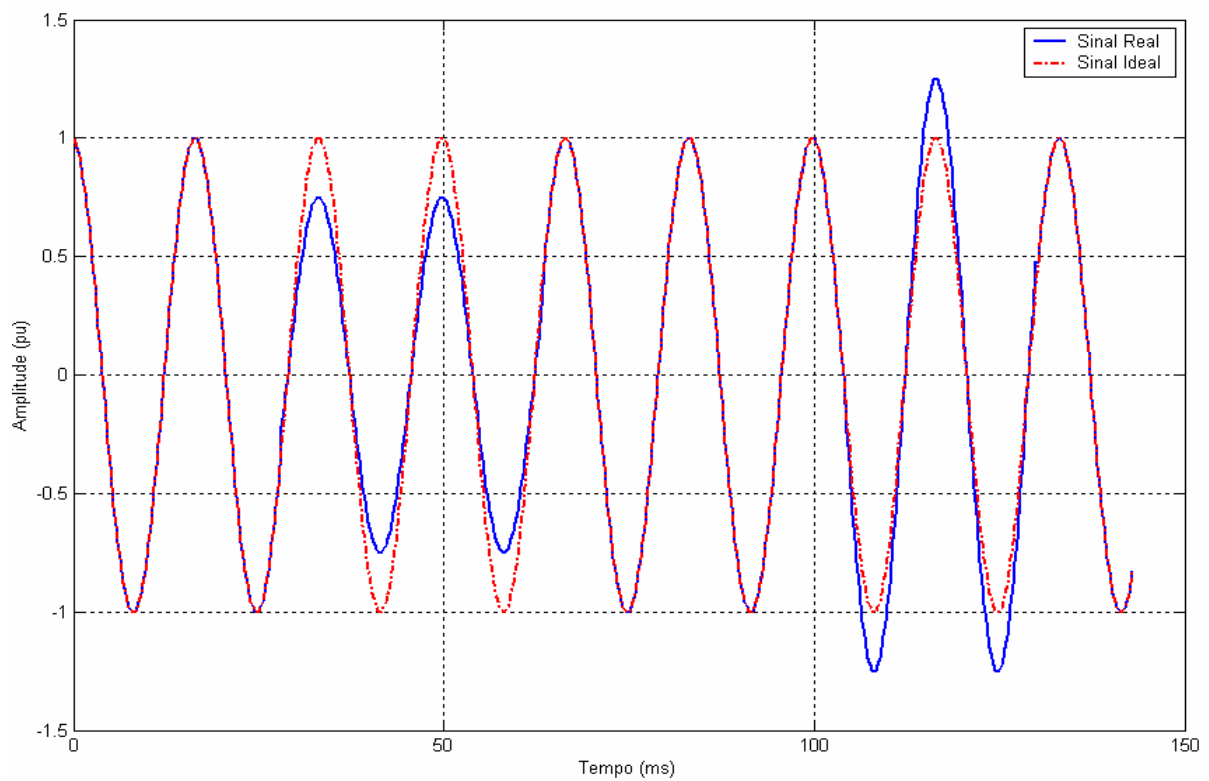


Figura 3.23 - Sinal com a presença de afundamento e elevação teóricos.

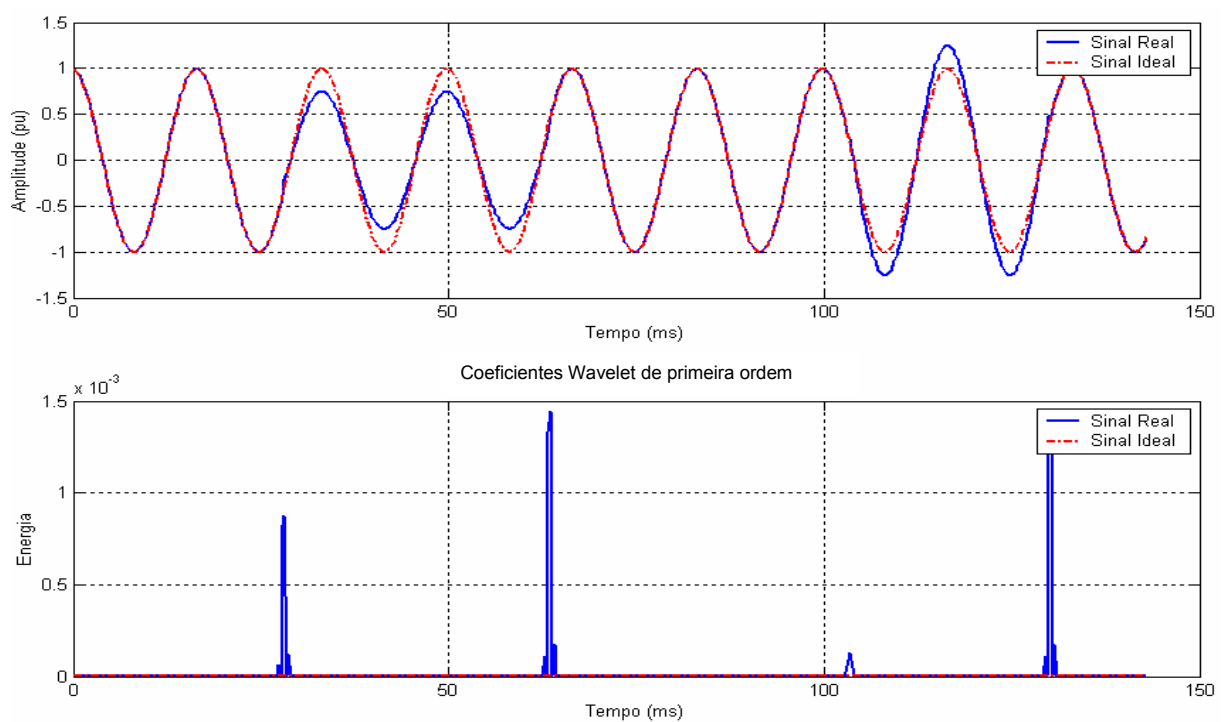


Figura 3.24 - Identificação do instante de ocorrência de cada distúrbio.

Afundamento: início ($t = 28,65$ ms) e término ($t = 64,07$ ms) Elevação: início ($t = 103,91$ ms) término ($t = 130,73$ ms).

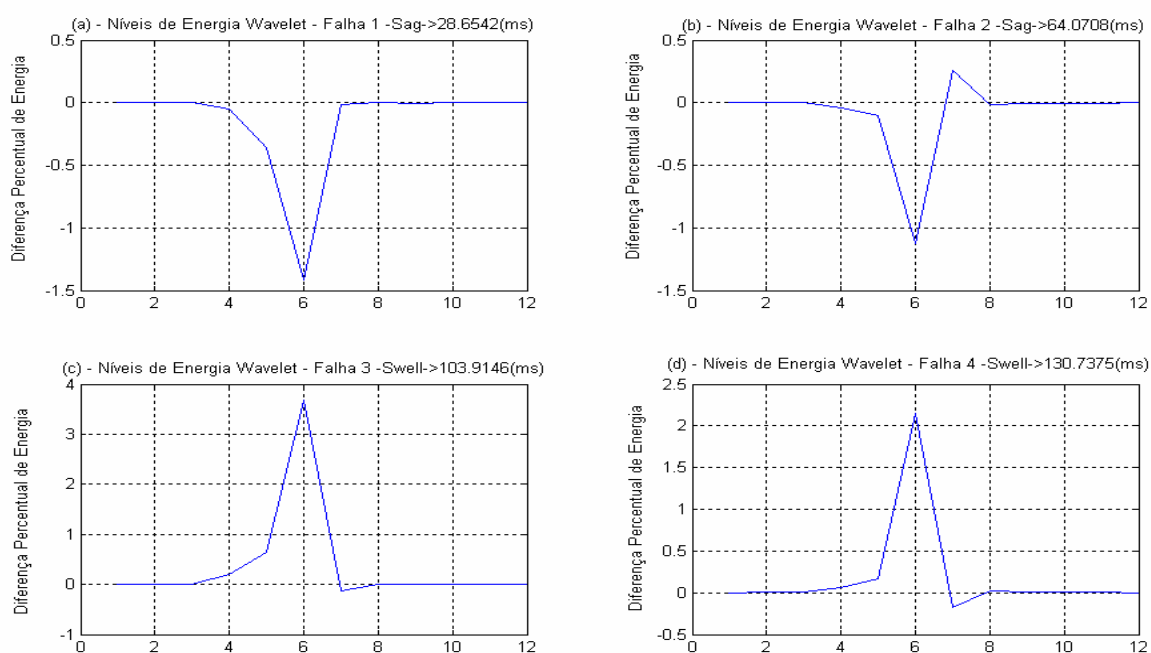


Figura 3.25 - Espectro da diferença de energia para o afundamento e elevação teóricos.

A segunda etapa do processo de validação da técnica desenvolvida será feita utilizando sinais teóricos, contendo vários distúrbios múltiplos mostrados na Figura 3.26. Nesta mesma Figura, pode-se observar a identificação do instante de ocorrência de todos os distúrbios. Na Figura 3.27, é mostrado o espectro da diferença de energia característico para estes eventos. Tomando como base as curvas de diferenças de energia, anteriormente identificadas para cada tipo de distúrbio, podem-se então classificar os diversos distúrbios presentes nesse sinal.

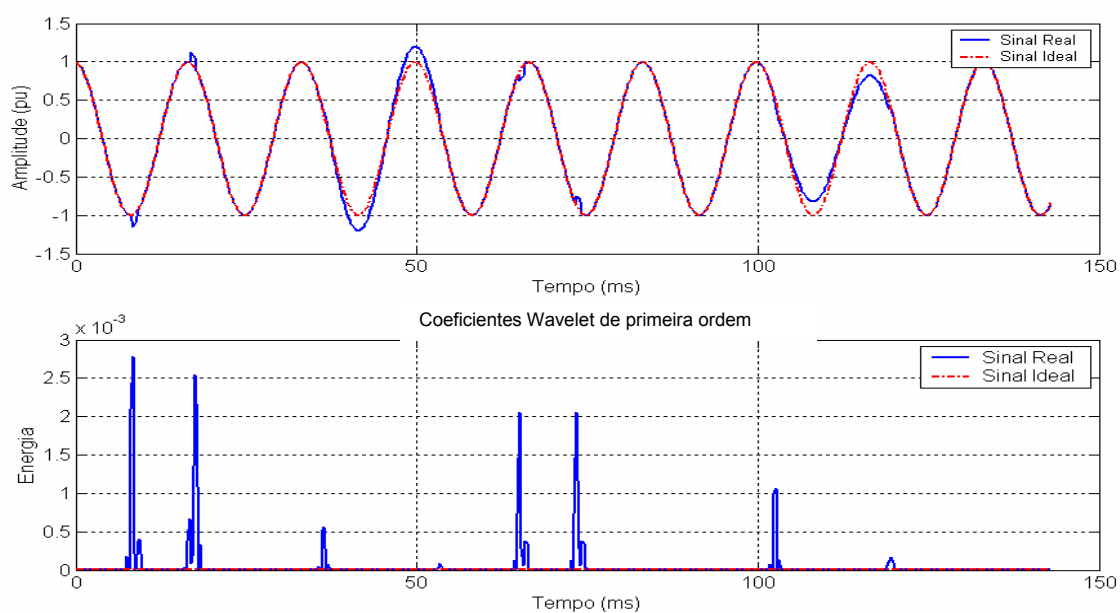


Figura 3.26 - Sinal ideal com distúrbios múltiplos e localização dos instantes de ocorrência:

- 1) $t = 9,63\text{ms}$, 2) $t = 17,7\text{ms}$, 3) Entre $t = 37,24\text{ms}$ e $t = 54,17\text{ms}$,
- 4) $t = 66,41\text{ms}$, 5) $t = 74,74\text{ms}$, 6) Entre $t = 103,39\text{ms}$ e $t = 120,31\text{ms}$.

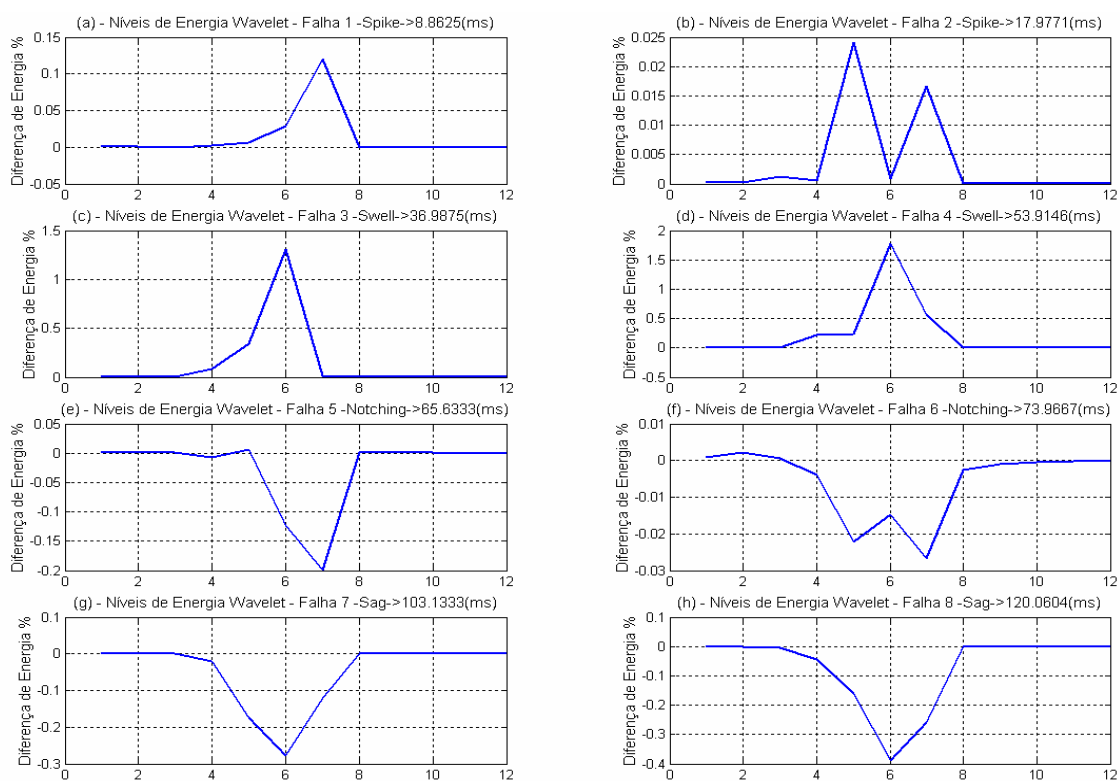


Figura 3.27 - Classificação de diversas falhas através da diferença percentual de energia para os diversos níveis de detalhamento Wavelet: (a) e (b) “spike”; (c) e (d) elevação; (e) e (f) “notching”; (g) e (h) afundamento.

Pode-se observar que tomando como base o desenvolvimento e validação da nova técnica para sinais teóricos, observa-se que o algoritmo desenvolvido conseguiu classificar de forma automática todos os distúrbios múltiplos contidos no sinal em análise mostrados na Figura 3.27.

Na Figura 3.28, pode-se observar o gráfico da diferença percentual de energia para todos os níveis de resolução analisados ocorridos na forma de onda do sinal teórico.

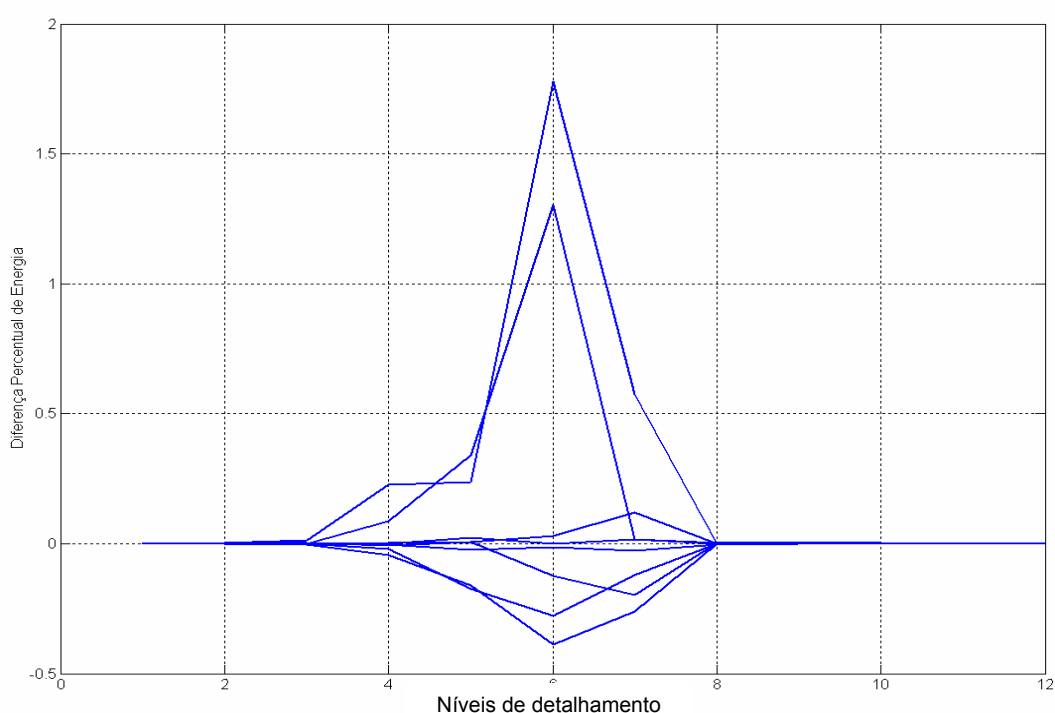


Figura 3.28 - Distribuição da diferença percentual de energia para todos os distúrbios teóricos.

3.5 CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO DE DISTÚRBIOS MÚLTIPLOS

Tomando como base os sinais coletados em campo e a aplicação da técnica desenvolvida neste trabalho, pode-se construir a Tabela 3.1, que caracteriza a relação de existência entre os diversos distúrbios e seus respectivos níveis de detalhamento Wavelet. Cada tipo de distúrbio possui uma determinada característica que pode ser identificada pela análise de cada perfil específico.

Tabela 3.1 - Níveis de detalhamento Wavelet para classificação de distúrbios múltiplos
Tipos de Distúrbio

Tipos de Distúrbio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Afundamento					X	X	X					
Elevação					X	X	X					
"Spike"					X	X	X					
"Notching"					X	X	X					
Sinal Ideal						X						

Para a classificação dos diversos distúrbios, foram feitas diversas simulações computacionais, a fim de caracterizar a variação percentual dos níveis de energia para cada nível de detalhamento e sua correlação com as diversas falhas. A referência ideal do sinal em análise também é obtida automaticamente pelo algoritmo desenvolvido. Os diversos distúrbios que afetam a qualidade de energia foram simulados separadamente no software Matlab, tomando como base os procedimentos do setor elétrico (ANEEL). A classificação mostrada, na Tabela 3.2, ilustra o resultado de tais simulações.

Tabela 3.2 - Critérios para classificação de distúrbios

Tipo de Distúrbio	Critério – Análise $\Delta E\%$
AFUNDAMENTO	$\Delta E\%$ do nível de detalhamento 6 < - 0,25
	e $\Delta E\%$ do nível de detalhamento 5 < - 0,1
ELEVAÇÃO	$\Delta E\%$ do nível de detalhamento 6 > 0,25
	e $\Delta E\%$ do nível de detalhamento 5 > que 0,1
"SPIKE"	$\Delta E\%$ do nível de detalhamento 6 entre 0 e 0,25
	ou $\Delta E\%$ do nível de detalhamento 5 > 0,1
"NOTCHING"	$\Delta E\%$ do nível de detalhamento 6 entre 0 e -0,25
	ou $\Delta E\%$ do nível de detalhamento 5 < -0,1

3.6 ANÁLISE DE DISTÚRBIOS MÚLTIPLOS EM UM SISTEMA REAL

A análise dos distúrbios múltiplos presentes em um sistema elétrico industrial, contendo fornos elétricos a arco, foi feita aplicando-se o algoritmo desenvolvido. Na Figura 3.29, é mostrada parte da forma de onda de tensão obtida através de medição no secundário do T-047 do FEA1 e do sinal de referência ideal utilizado.

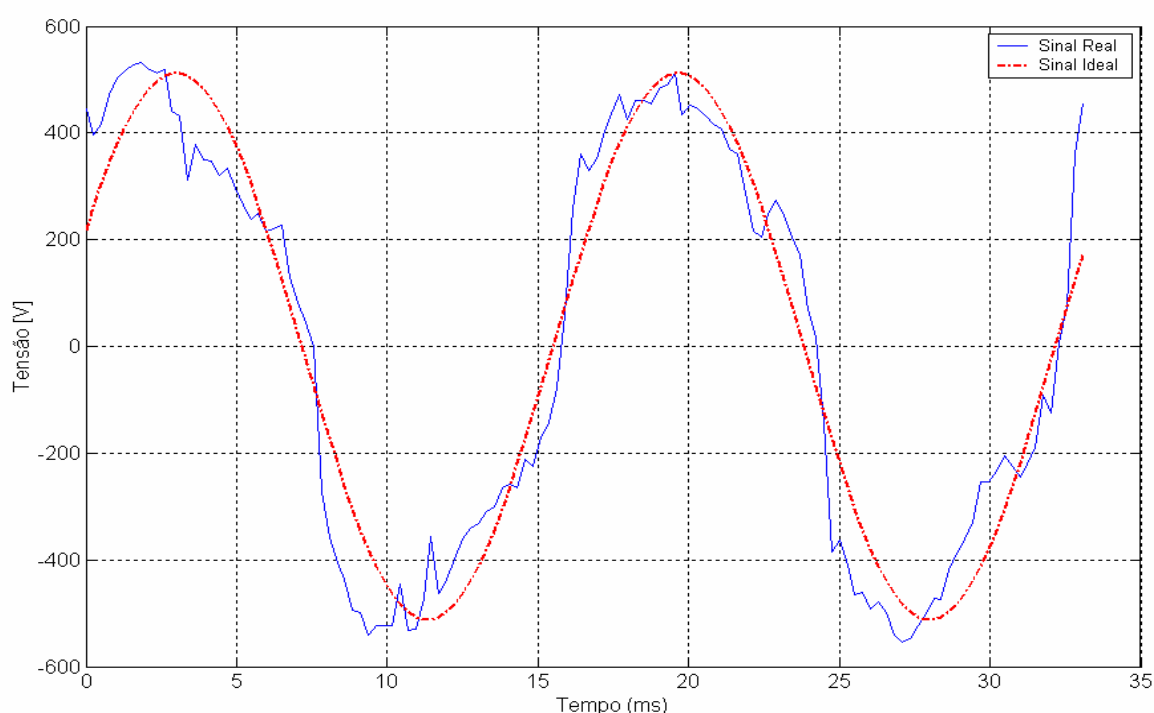


Figura 3.29 - Registro do sinal de tensão obtido do forno a arco e o sinal de referência ideal.

Para aplicar a técnica desenvolvida no sinal coletado em campo, utilizou-se parte do registro de tensão de uma das fases do forno elétrico a arco mostrado na Figura 3.4. Na Figura 3.30, analisou-se o sinal no intervalo de 8 a 24 ms.

Na Figura 3.31, o período de análise foi de 32 a 48 ms. O intervalo de análise da Figura 3.32 foi de 48 a 64 ms. Pode-se notar que, para toda mudança no comportamento do sinal real, existe uma identificação automática através dos coeficientes Wavelet de primeira ordem.

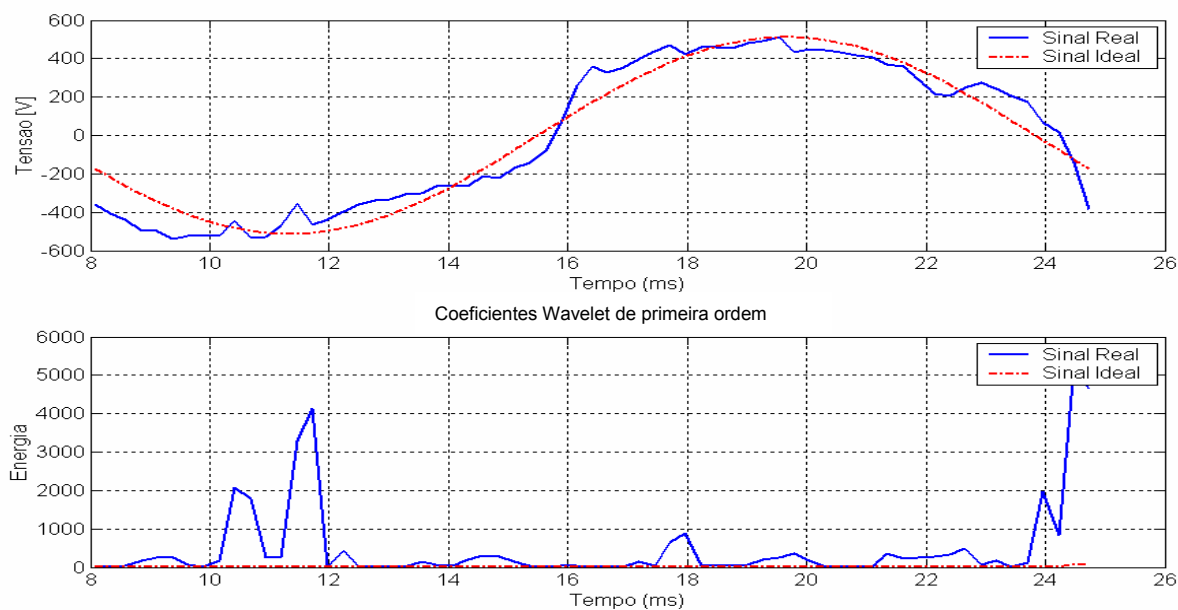


Figura 3.30 - Forma de onda em análise e a identificação do instante de ocorrência dos distúrbios múltiplos (período: 8 a 24 ms). 1) $t = 9,1$ ms (fim), 2) $t = 11,7$ ms, 3) $t = 12,5$ ms, 4) $t = 13,55$ ms, 5) $t = 15,11$ ms, 6) $t = 15,89$ ms, 7) $t = 16,93$ ms (início), 8) $t = 18,49$ ms (início), 9) $t = 22,51$ ms.

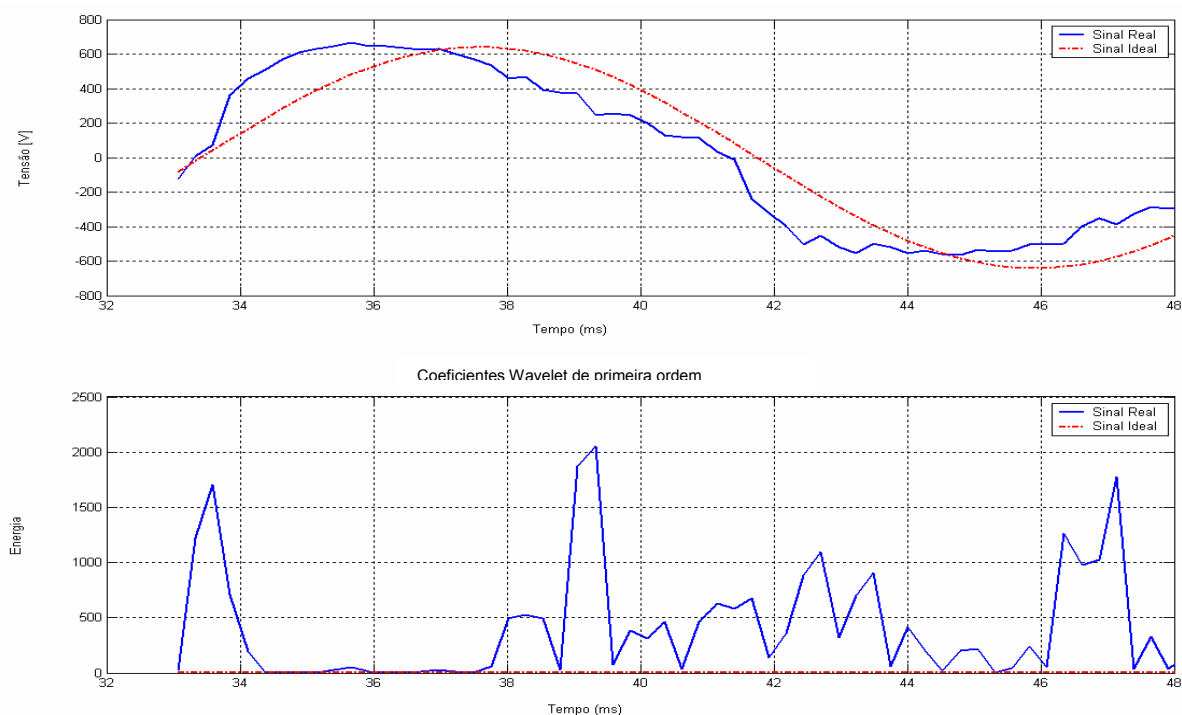


Figura 3.31 - Forma de onda em análise e a identificação do instante de ocorrência dos distúrbios múltiplos (período: 32 a 48 ms). 1) $t = 33,19$ ms (fim), 2) $t = 38,67$ ms (início), 3) $t = 39,52$ ms, 4) $t = 40,34$ ms, 5) $t = 41,00$ ms (início), 6) $t = 42,83$ ms, 7) $t = 44,18$ ms (início), 8) $t = 46,48$ ms.

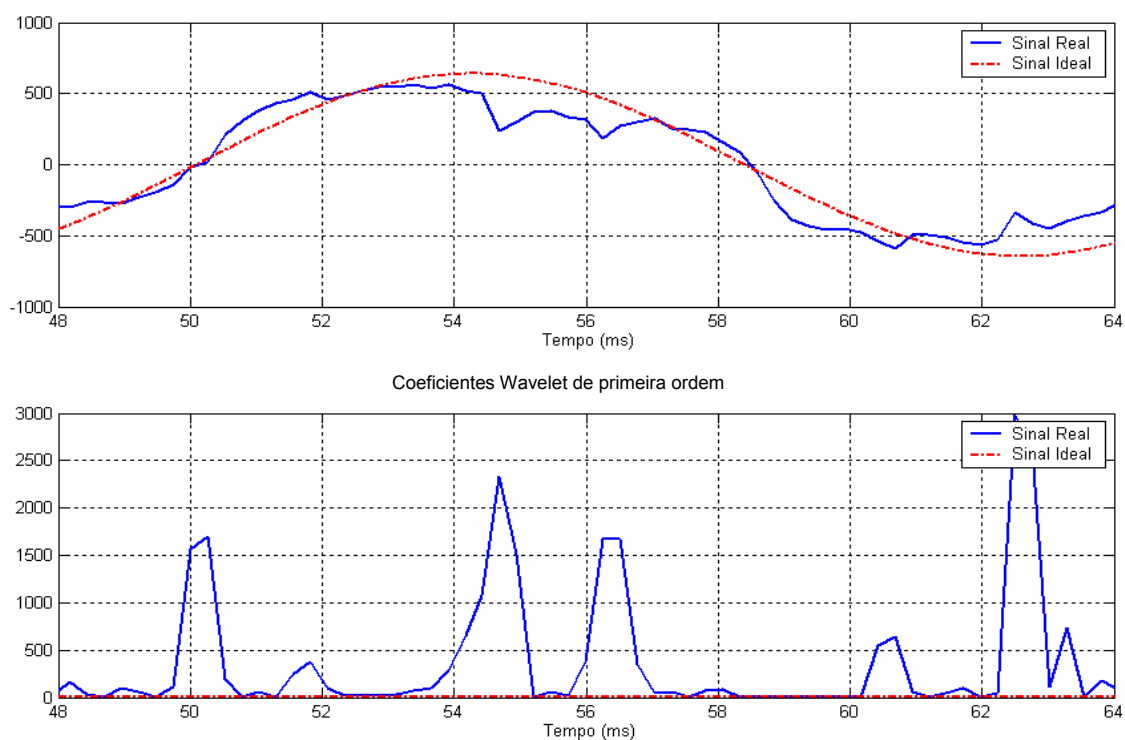


Figura 3.32 - Forma de onda em análise e a identificação do instante de ocorrência dos distúrbios múltiplos (período: 48 a 64 ms). 1) $t = 48,29$ ms (fim), 2) $t = 49,03$ ms, 3) $t = 49,98$ ms, 4) $t = 51,89$ ms (início), 5) $t = 54,55$ ms, 6) $t = 55,85$ ms, 7) $t = 57,76$ ms, 8) $t = 60,69$ ms (início).

Aplicando-se os critérios desenvolvidos para cada tipo específico de distúrbio e com o resultado da diferença de energia entre os diversos níveis de resolução, foi possível a classificação dos distúrbios múltiplos como pode ser visto nas Figuras 3.33 (período: 8 a 24 ms), 3.34 (período: 32 a 48 ms) e 3.35 (período de 48 a 64 ms).

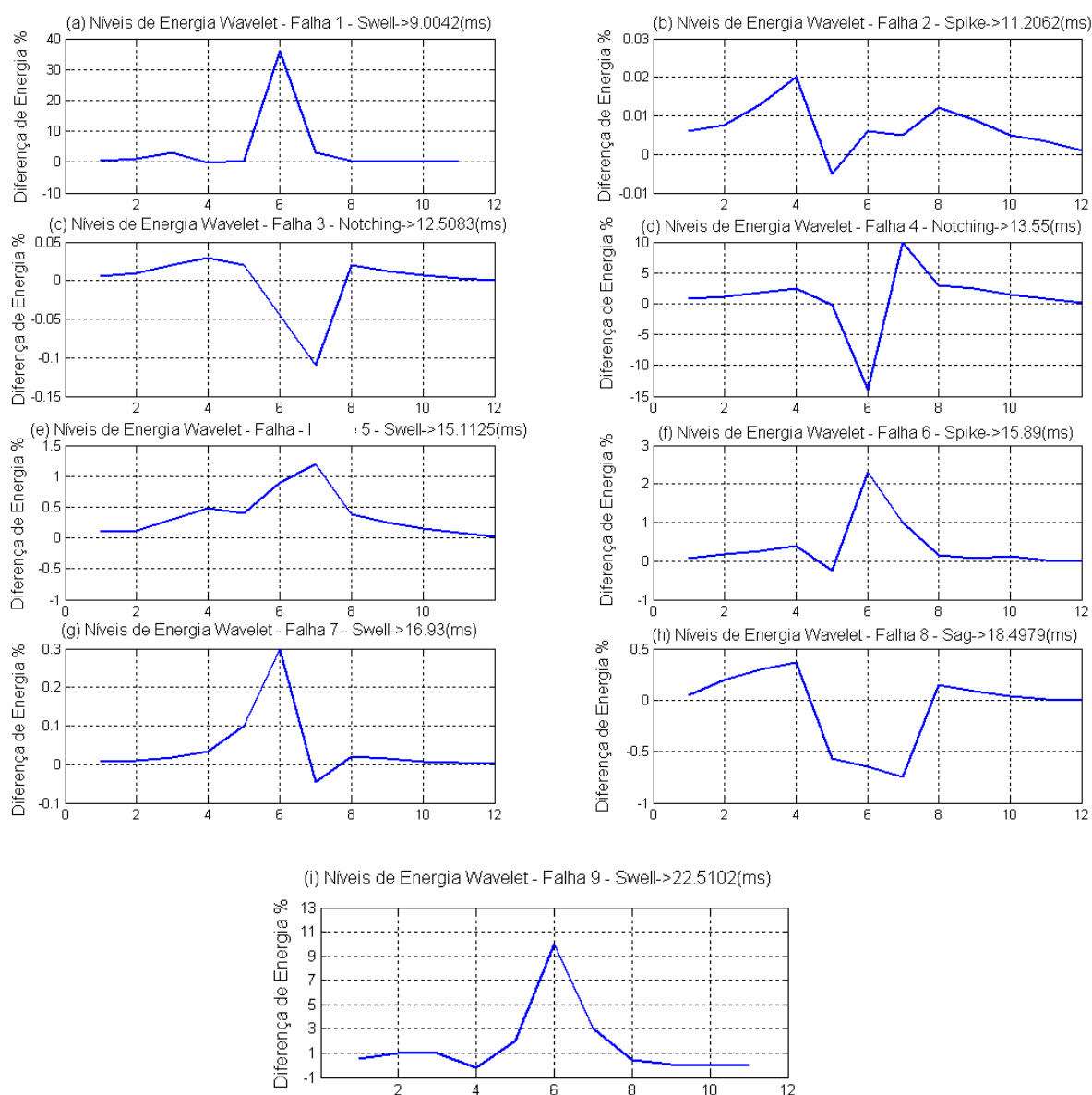


Figura 3.33 - Distribuição de energia ao longo dos níveis de detalhamento Wavelet para os distúrbios (período de 8 a 24 ms): (a), (e) e (g) - elevação; (b) e (f) “spike”, (c) e (d) “notching”, (h) afundamento; (i) elevação.

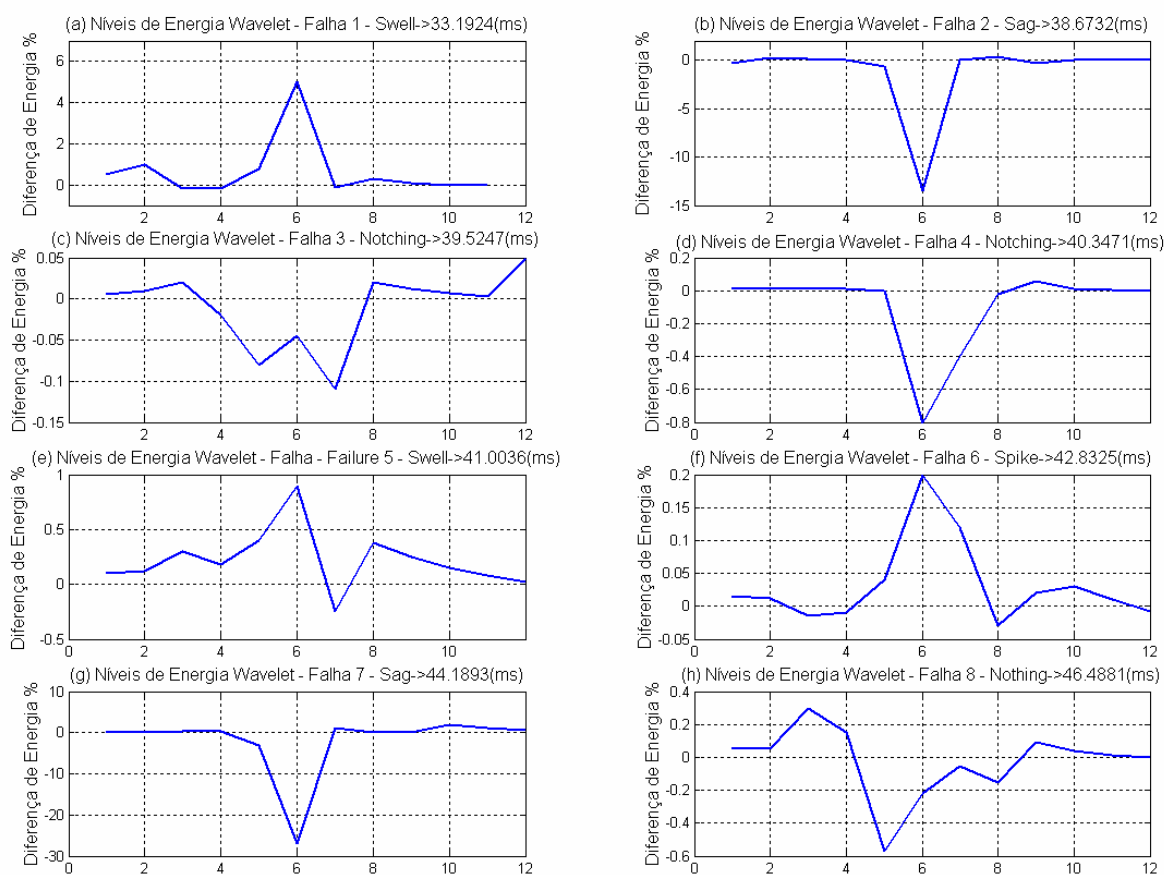


Figura 3.34 - Distribuição de energia ao longo dos níveis de detalhamento Wavelet para os distúrbios (período de 32 a 48 ms): (a), (e) - elevação; (b) e (g) afundamento; (c), (d) e (h) “notching”; (h) “spike”.

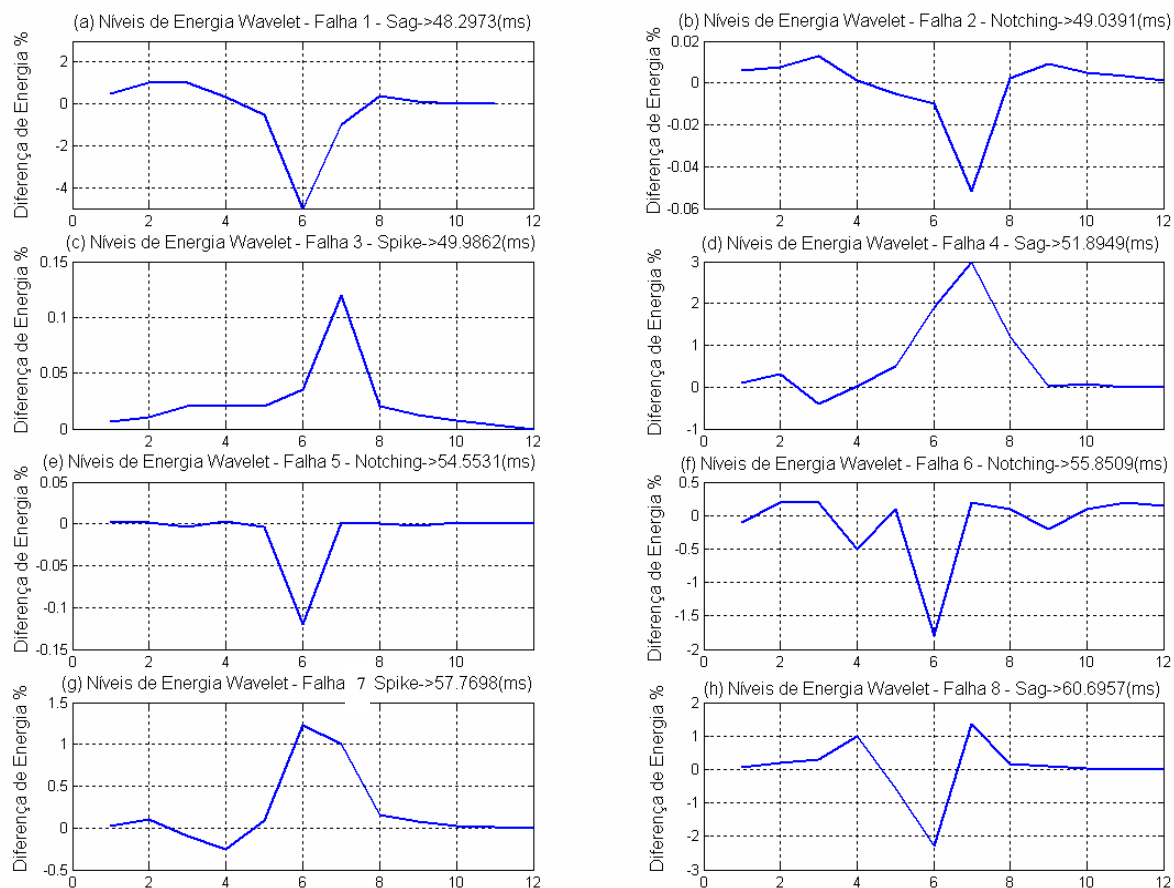


Figura 3.35 - Distribuição de energia ao longo dos níveis de detalhamento Wavelet para os distúrbios (período de 48 a 64 ms): (a),(d) e (h) - afundamento; (b),(e) e (g) “notching”; (c)e (g) “spike”.

Na Figura 3.36, o exemplo do perfil da diferença percentual de energia dos 12 níveis de resolução, para todas as falhas ocorridas na forma de onda do sinal real no primeiro período de análise (8 a 24ms).

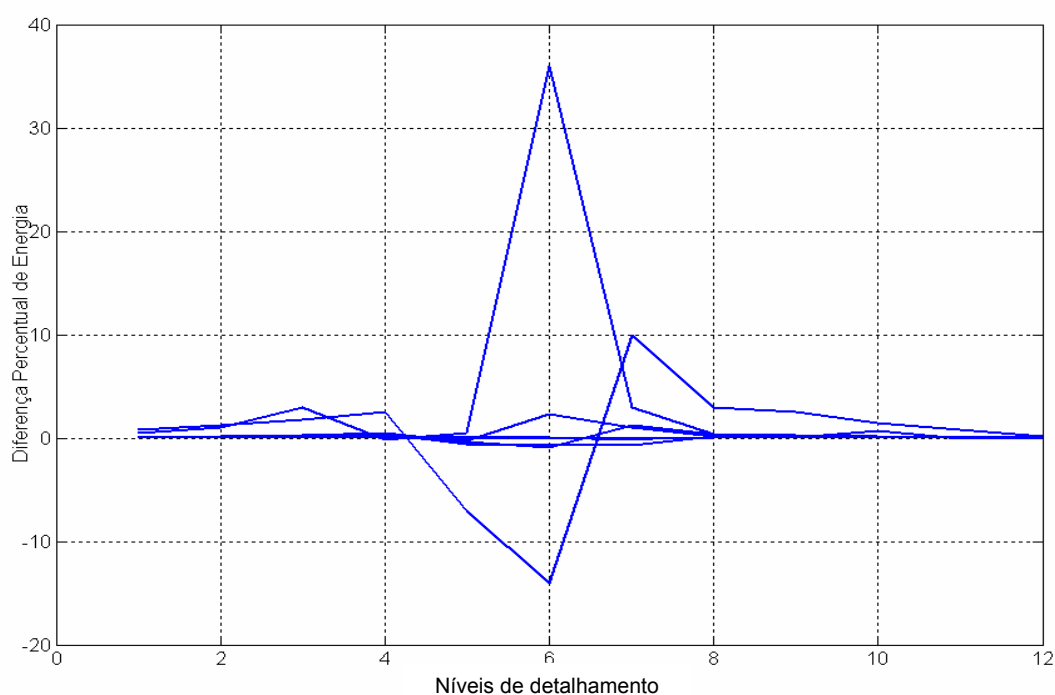


Figura 3.36 - Distribuição da diferença percentual de energia total nos diversos níveis de resolução Wavelet.

Os resultados anteriores, obtidos diante de diferentes condições de tensões coletadas em campo, com a correta identificação de distúrbios múltiplos, demonstram a eficiência do algoritmo apresentado neste trabalho, levando em consideração todas as condições e critérios simulados nos casos anteriores (sinais teóricos e sinal coletado do FEA1). Pode-se ainda verificar que os critérios desenvolvidos durante a análise e estruturação da nova técnica mostrou-se eficaz, caracterizando-se como uma opção para definição dos diversos distúrbios, gerados pela operação de fornos elétricos a arco podem provocar nos sistemas elétricos, nos quais estão instalados.

3.7 VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DO ALGORITMO EM SINAIS DE LONGA DURAÇÃO

Com o objetivo de se verificar o desempenho do algoritmo desenvolvido, na identificação e classificação de fenômenos ocorridos em registros de longa duração

em fornos a arco, como por exemplo afundamento e elevações nas condições operativas previamente discutidas, alteraram-se os valores das amplitudes dos sinais coletados em campo em 25% de seu valor original, tanto para baixo quanto para cima, levando em consideração um dos ciclos de tensão, de uma das fases da operação do FEA1.

Pode-se observar, na Figura 3.37, que tanto visualmente como através dos resultados obtidos pela técnica desenvolvida neste trabalho, o período de 33,58 a 86,76ms corresponde ao início e fim de uma elevação. Da mesma forma, verifica-se a ocorrência de um afundamento no período compreendido entre 118,91 e 166,92ms. A Classificação do início e fim dos distúrbios está mostrado na Figura 3.38.

Além dos distúrbios de longa duração detectados e classificados, nota-se ainda na Figura 3.37, a identificação do instante de ocorrência de diversos distúrbios ao longo do período analisado.

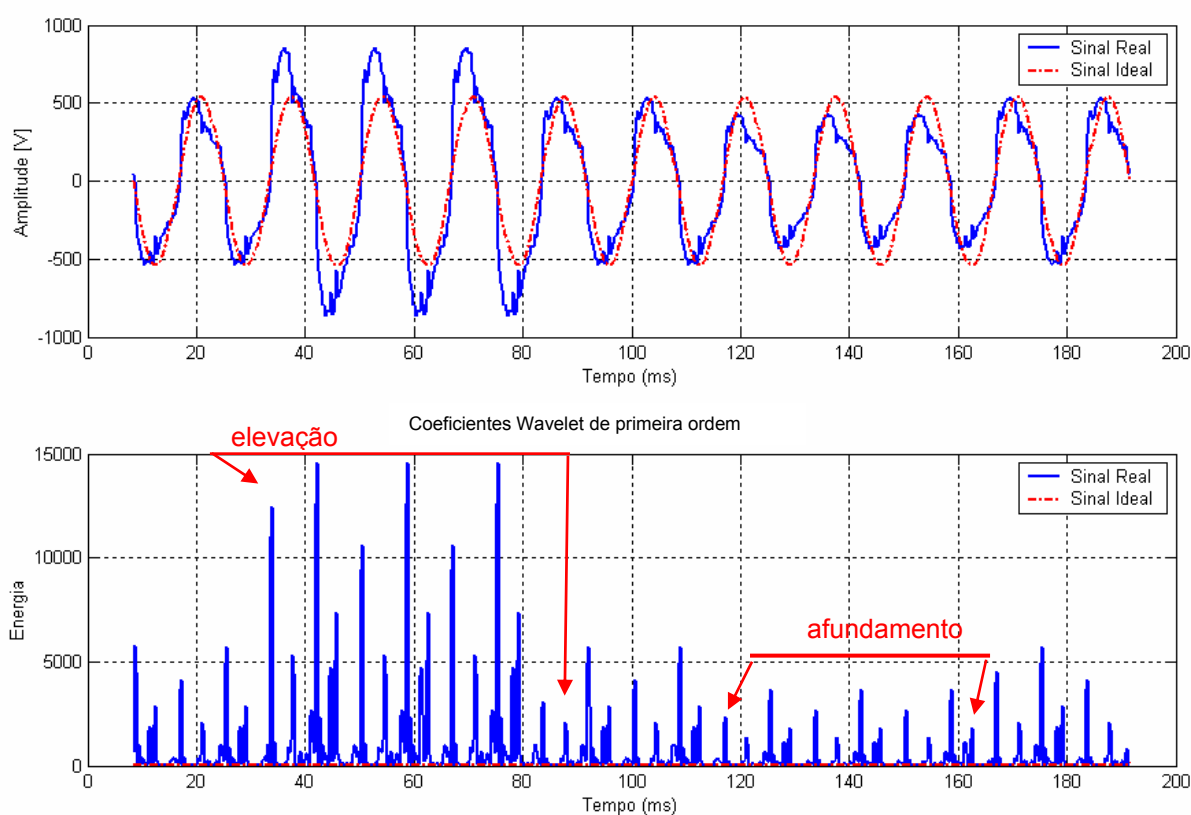


Figura 3.37 - Forma de onda em análise com elevação e afundamento, com incremento positivo e negativo na amplitude, e diversos distúrbios. 1) $t = 33,58\text{ms}$ (início - elevação), 2) $t = 86,76\text{ms}$ (término - elevação), 3) $t = 118,91\text{ms}$ (início - afundamento), 4) $t = 166,92\text{ms}$ (término - afundamento).

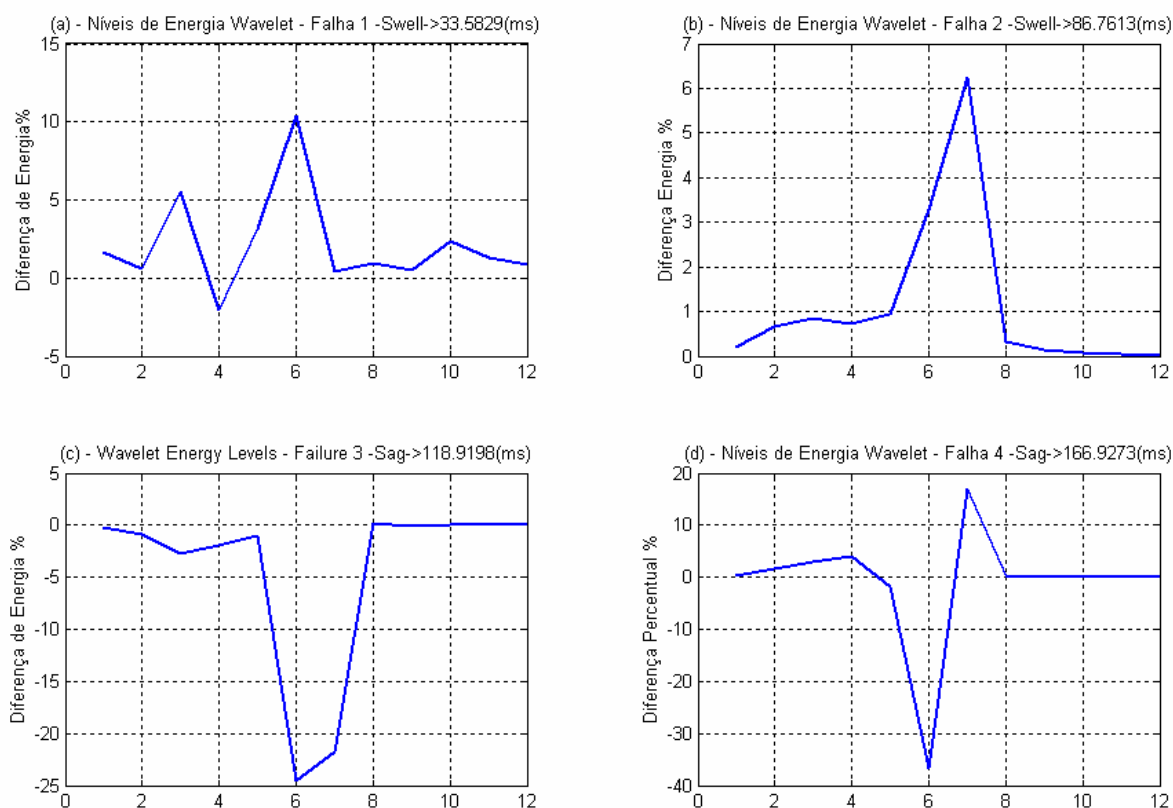


Figura 3.38 - Distribuição de energia ao longo dos níveis de detalhamento Wavelet para os distúrbios: (a) e (b) - elevação; (c) e (d) afundamento.

A Tabela 3.3 mostra a evolução dos diversos distúrbios detectados e classificados nos sinais coletados no secundário do transformador T-047 do FEA1, durante cinco ciclos a 60 Hz e apresentados nas Tabelas C.3 até C.7 do Apêndice C, na fase de fusão do forno a arco.

Tabela 3.3 - Estatísticas dos Distúrbios Múltiplos em 5 ciclos em um Sistema Real

Tipo de Distúrbio	Número de Distúrbios para cada um dos ciclos				
	1°	2°	3°	4°	5°
"Spike"	3	2	1	2	1
Afundamento	1	-	-	1	-
"Notching"	3	1	1	1	2
Elevação	1	-	-	-	-
Alta Frequência	-	-	-	-	-
Baixa Frequência	-	-	-	-	-
Total de distúrbios por ciclo	8	3	2	4	3

A análise dos resultados dos distúrbios múltiplos, aplicada as outras fases do processo de produção do aço (fusão e refino), poderá ser utilizada futuramente na elaboração de um algoritmo de controle automático mais complexo, que permita identificar e controlar o processo metalúrgico como um todo. Para tanto, pode-se desenvolver um sistema de controle, utilizando como base dispositivos do tipo *Programmable Logic Device* (PLD) para a programação de toda lógica desenvolvida.

O desenvolvimento de um sistema de hardware mínimo contendo um PLD apresenta uma série de vantagens:

- 1) Baixo custo;
- 2) Flexibilidade de programação;
- 3) Aumento da confiabilidade do processo.

Esse sistema poderá ser adicionado ao sistema de controle existente apresentado na Figura 2.5. Através da identificação da exata duração de cada fase do processo de fabricação do aço, será possível ao operador do forno tomar a decisão sobre o melhor ponto de operação com conseqüente redução no tempo total de cada corrida e do custo com a energia elétrica necessárias para esse processo.