

4 - CLASSIFICAÇÃO DOS SINAIS

4.1 - Caracterização e análise espectral dos sinais

Um requisito importante para o algoritmo COGERA é a necessidade de classificar corretamente os três principais eventos sob o ponto de vista sistêmico para a interligação que são respectivamente : o curto-circuito, a oscilação eletromecânica e o ilhamento.

Para tal, procura-se pesquisar no trabalho uma ferramenta que possibilite essa classificação não só de uma forma correta e eficiente, mas no menor tempo possível.

Na Figura 4.1.1, simulou-se uma condição de curto-circuito com a utilização do *software* ATP. Nessa simulação, cuja falta foi aplicada no instante correspondente à amostra de número 600, nota-se uma significativa variação em módulo na amplitude da componente fundamental da corrente e a presença da componente exponencial amortecida. (As correntes dos eventos apresentadas são medidas nos secundários dos respectivos transformadores de corrente da Figura 6.2.1).

Observa-se também aspectos de altas frequências em alguns casos de curtos nos sinais de tensão da fase faltosa, em situações em que o curto ocorre no pico da tensão. Para essa forma de onda, nota-se uma grande variação na magnitude da componente fundamental de 60 Hz, antes e depois do evento de curto-circuito. Em seguida, para a análise espectral desse sinal, usou-se o comando FFT do *software* MATLAB, com uma janela de 2 ciclos antes e depois do evento, sendo os resultados obtidos apresentados na Figura 4.1.2.

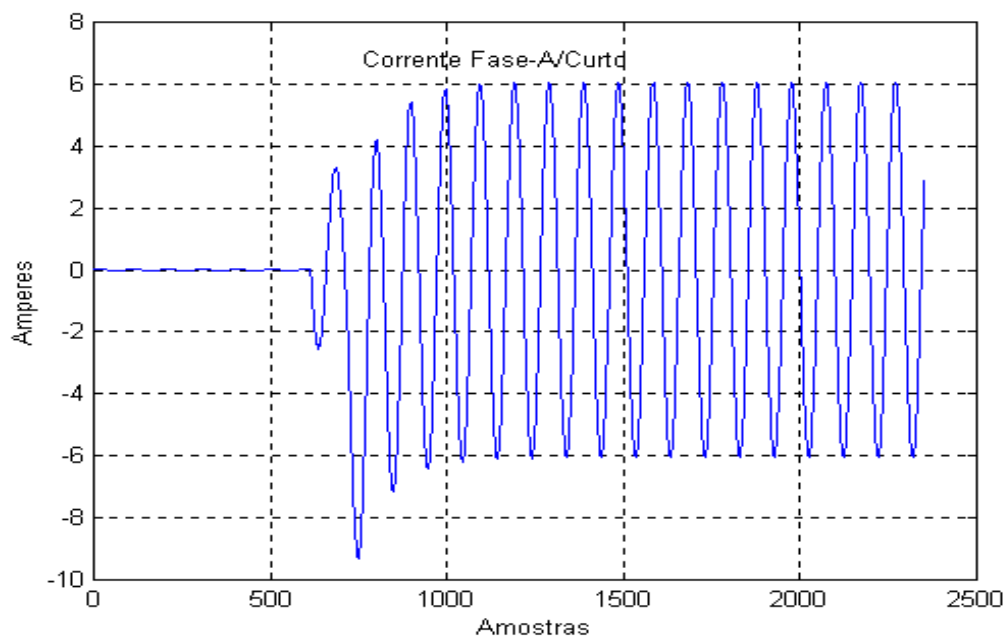


Figura 4.1.1 - Corrente de Curto - Circuito.

A situação de ilhamento, mostrada na Figura 4.1.3, corresponde à situação operativa, na qual, antes de se abrir o disjuntor da geração da concessionária (disjuntor 5 da Figura 2.1.1) não existe fluxo de potência ativa/reactiva trocada entre os dois sistemas.

Dessa forma, a corrente que circula pela linha de interligação consiste apenas na corrente de magnetização do transformador da alta-tensão na subestação da indústria, apresentando, portanto, harmônicas sobrepostas à componente fundamental de 60 Hz. Dado que no lado da linha o transformador está conectado em delta, a principal harmônica presente nessa corrente, além da fundamental, será a quinta harmônica.

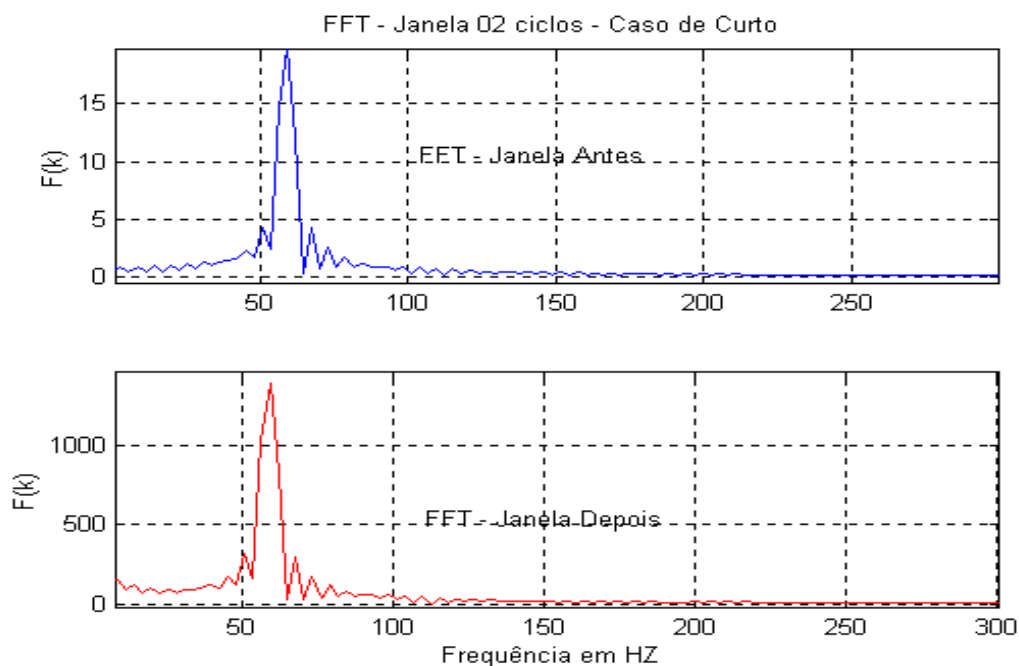


Figura 4.1.2 - Análise Espectral da Corrente de Curto - Circuito.

Após a abertura desse disjuntor, a carga de baixo valor da concessionária passará então a ser alimentada pelo gerador da indústria que energizará o transformador pelo lado da média tensão (13.8 KV), aparecendo, dessa forma, na alta - tensão uma componente de corrente, constituída basicamente da fundamental, alimentando as cargas da concessionária.

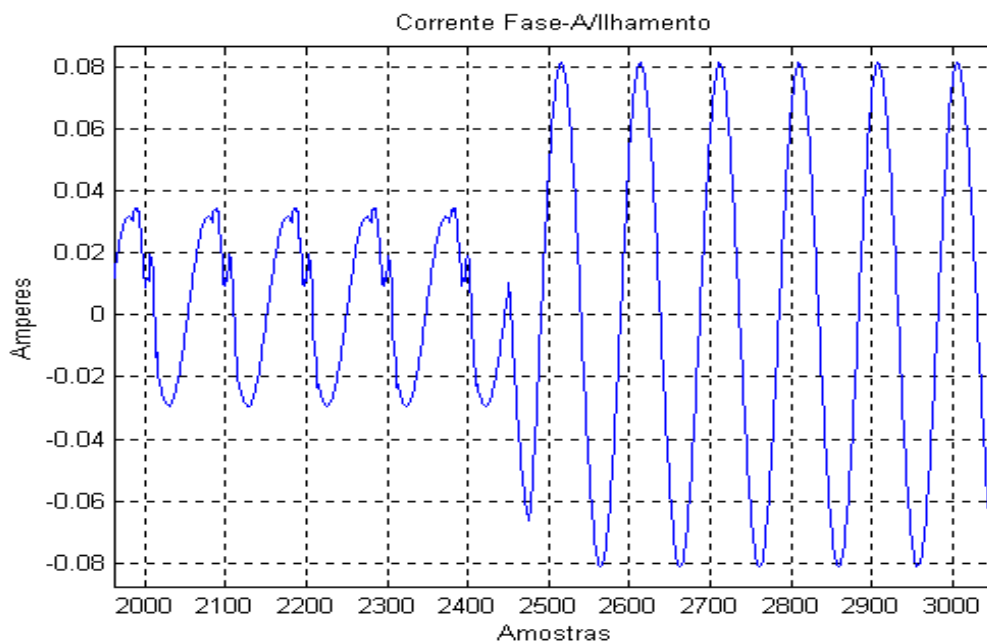


Figura 4.1.3 - Corrente de Ilhamento.

Também, para a análise freqüencial dessa forma de onda, definiu-se uma janela de 10 ciclos (objetivando-se obter uma maior quantidade de amostras e conseqüentemente uma melhor precisão nas medições) antes e depois da ocorrência do evento com o objetivo de visualizar-se a quinta harmônica antes e a freqüência fundamental de 60 Hz após o mesmo. O espectro de freqüências obtido para o sinal é mostrado na Figura 4.1.4 a seguir .

Para a condição de oscilação eletromecânica mostrada na Figura 4.1.5, simulou-se , no mesmo instante da simulação anterior, a inserção e remoção de blocos de carga na linha de interligação entre a concessionária e a indústria.

Os sinais de tensão e corrente observados nesse caso, apresentam-se modulados por baixas freqüências (1 a 10 Hz) típicas das oscilações eletromecânicas.

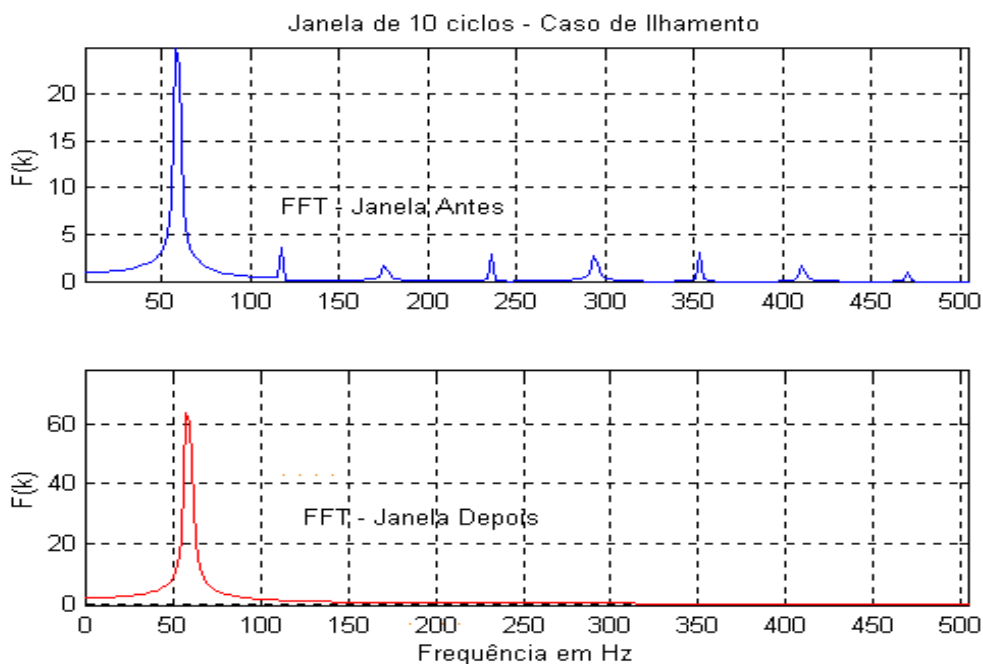


Figura 4.1.4 - Análise Espectral - Corrente de Ilhamento

Para a análise freqüencial do sinal apresentado na Figura 4.1.5, usou-se uma janela de 90 ciclos, bem maior do que nos casos anteriores, de forma a tentar-se capturar as baixas freqüências presentes no sinal. O respectivo espectro é apresentado na Figura 4.1.6.

Os resultados obtidos confirmam as expectativas de que na corrente de curto obtêm-se basicamente a componente fundamental de 60 Hz com grande variação em magnitude, e para o ilhamento a presença da quinta harmônica antes e somente a componente fundamental após o evento.

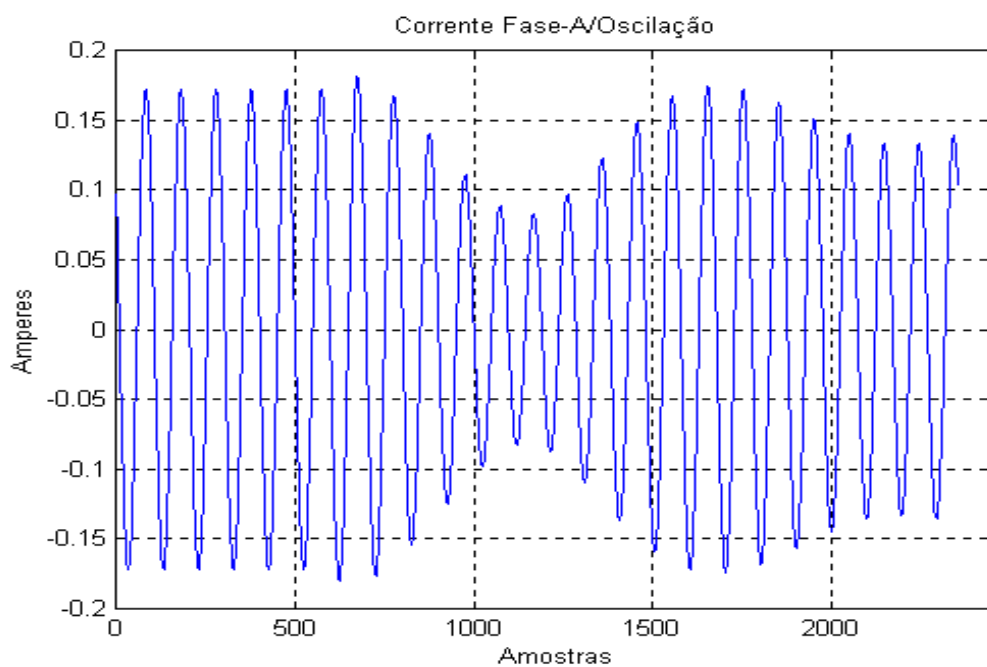


Figura 4.1.5 - Corrente de Oscilação Eletromecânica

Para os casos de oscilação, vale observar que as baixas frequências (1 a 10 Hz) correspondentes às oscilações eletromecânicas, não são observadas na análise espectral apresentada na Figura 4.1.6. Isto deve-se ao fato de que esse fenômeno é na verdade uma modulação da componente fundamental pela baixa frequência e não uma superposição dessas duas frequências.

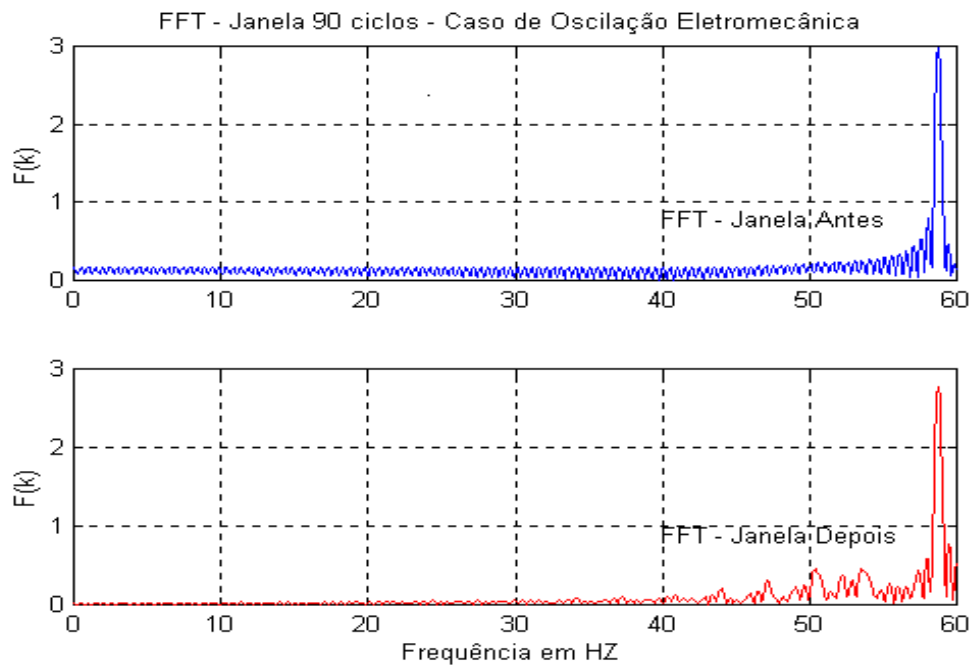


Figura 4.1.6 - Análise Espectral - Corrente de Oscilação

Neste ponto do trabalho, vale a pena investigar um pouco mais esse fenômeno, o qual pode ser melhor entendido usando-se o conceito de modulação em amplitude aplicado em telecomunicações, que consta basicamente de se multiplicar o sinal de baixa frequência (por exemplo 4 Hz) por um sinal de carrier com frequência mais alta (no nosso caso um sinal de 60 Hz), gerando um sinal modulado.

Essa multiplicação no tempo equivale a uma convolução em frequência com mostrado na Figura 4.1.7, onde se pode observar que o sinal modulado possui somente componentes de frequência nas proximidades da frequência de 60 Hz (Componentes de 56, 60 e 64 Hz para o exemplo apresentado).

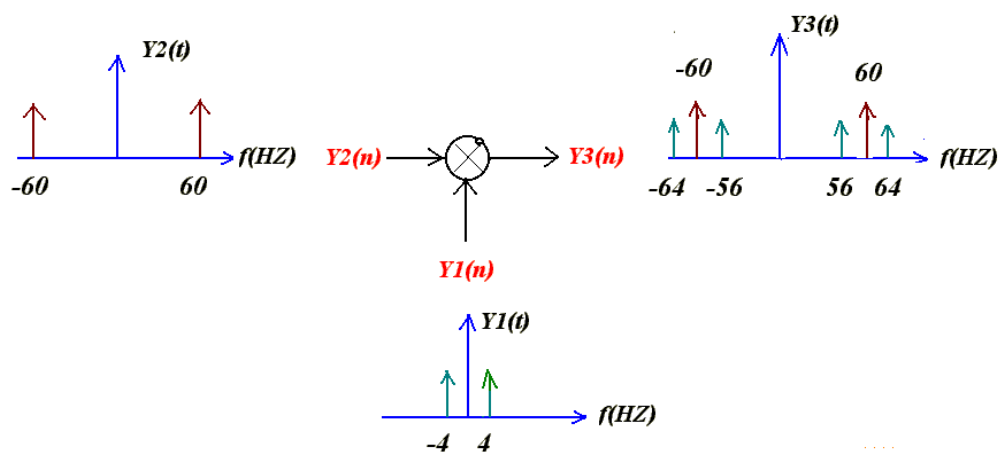


Figura 4.1.7 - Diagrama de Blocos - Modulação

Para se observar o sinal de baixa frequência de uma forma mais nítida e clara, é necessário demodular o sinal obtido anteriormente. Isso é alcançado, multiplicando-se o sinal modulado por um sinal de mesma frequência que o sinal de carrier (60 Hz), e em seguida passar o sinal obtido através de um filtro passa-baixa com frequência de corte ω_c um pouco maior do que a baixa frequência que se deseja obter. Esse procedimento está mostrado na Figura 4.1.8 a seguir e detalhado em [24] .

Para efeito de implementação em um algoritmo computacional, o processo de demodulação pode ser feito simplesmente aplicando-se ao filtro passa-baixa o sinal modulado elevado ao quadrado ou, alternativamente, esse sinal tomado em módulo. Em qualquer dos casos, obtém-se na saída do filtro a baixa frequência referente à oscilação eletromecânica superposta a uma componente DC.

Aplicando-se esse procedimento ao sinal apresentado na Figura 4.1.5, obtém-se o sinal mostrado na Figura 4.1.9, o qual corresponde somente à baixa frequência característica da oscilação eletromecânica. Nesse caso, no processo de filtragem, foi utilizado um filtro passa-baixa do tipo Butterworth de quinta ordem e frequência de corte de 10 Hz.

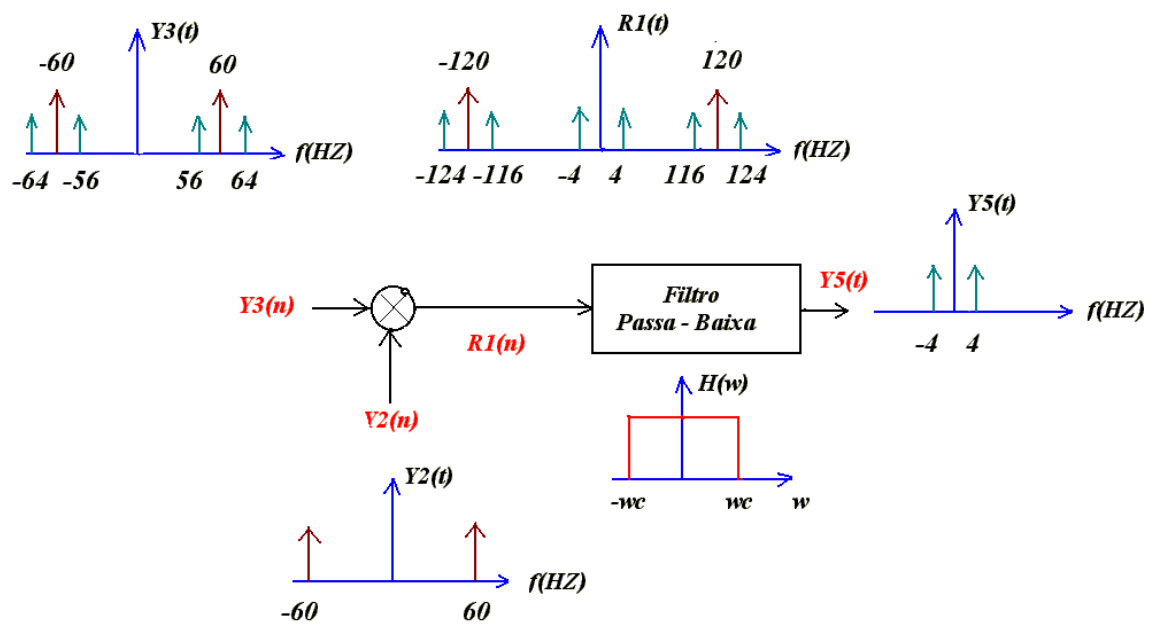


Figura 4.1.8 - Diagrama de Blocos - Demodulação do Sinal

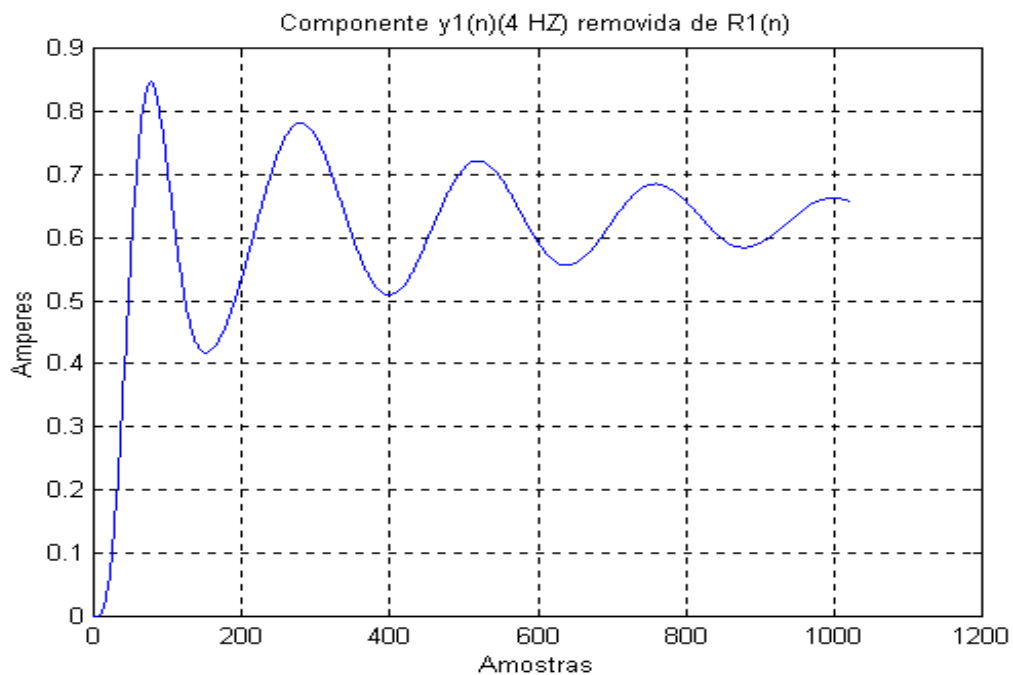


Figura 4.1.9 - Saída do Filtro Passa - Baixa - Sinal Demodulado $y_1(n)$

Portanto, fica explícito que, para a efetiva detecção do evento de oscilação eletromecânica de um sinal típico mostrado na Figura 4.1.5, o algoritmo proposto deverá primeiro demodular o sinal de corrente para, em seguida, poder identificar e classificar melhor essa condição operativa.

4.2 - A Transformada Wavelets como ferramenta de Análise Espectral

Na primeira tentativa de se classificar os eventos de curto, oscilação e ilhamento pesquisou-se a viabilidade da utilização de redes neurais através dos conceitos de análise dos agrupamentos (*clusters*) sobre os coeficientes da FFT e da DWT [19].

Esse procedimento apresentou uma forte sobreposição dos eventos a serem classificados, implicando na impossibilidade de sua utilização, o que motivou a procura de outras ferramentas que pudessem classificar corretamente esses três eventos sempre focando uma rápida e eficiente tomada de decisão.

Em seguida, no decorrer da pesquisa, foi analisada a proposta desenvolvida por Salama [34], que se mostrou atrativa por ser simples e de fácil implementação, e que baseia-se na utilização da Transformada Wavelets (está fora do escopo do trabalho uma abordagem matemática mais detalhada sobre essa ferramenta, podendo a mesma ser encontrada em vasta bibliografia como por exemplo em [26,27,28]). Essa transformada usa o conceito de que a energia de um sinal transitório pode ser dividida em diferentes níveis (escalas) de resolução, dependendo das características de cada sinal.

Outra razão específica para se tentar usar a ferramenta DWT no algoritmo COGERA é a possibilidade das escalas logarítmicas de resolução freqüencial permitirem visualizar, com uma precisão maior do que a alcançada com a STFT , tanto os transitórios rápidos (curto e ilhamento) quanto os lentos (oscilação).

A transformada wavelets utiliza uma operação de escalamento (parâmetro a) e translação (parâmetro b) sobre uma determinada função $g(x)$, chamada de wavelet “mã” como indicado na equação 9. Essa função, diferentemente da STFT que opera somente com as funções seno e cosseno, pode ser qualquer função que oscile e decaia rapidamente para zero em ambos os extremos da janela. Na Figura 4.2.1, tem-se como exemplo o gráfico típico de uma dessas funções, no caso a DAUBECHIES 10.

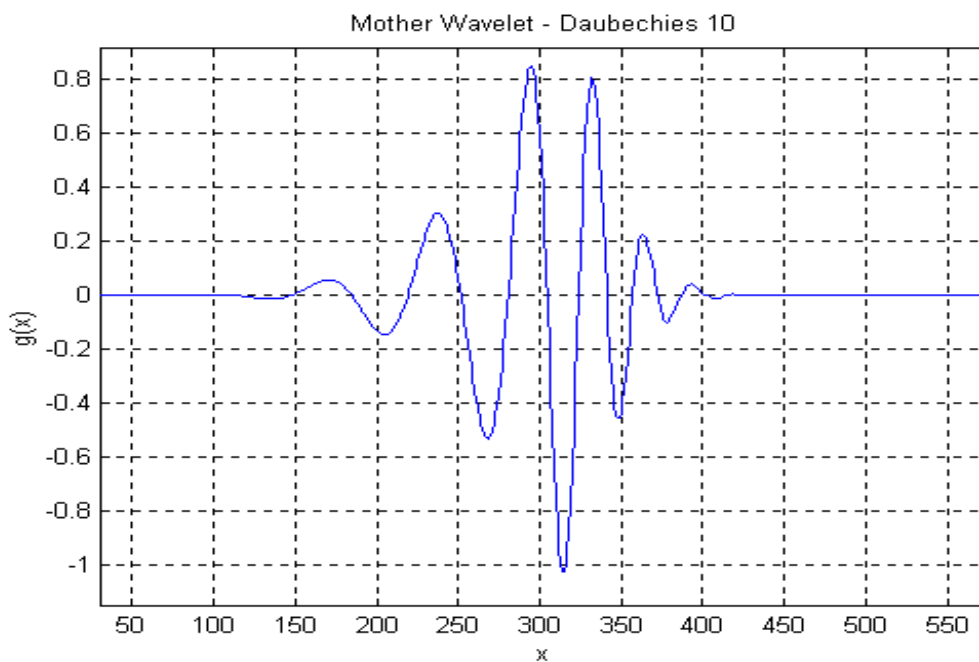


Figura 4.2.1 - Função Mãe - Daubechies 10

A operação de escalamento e translação sobre a wavelet mãe $g(x)$, define um grupo de funções $g_{a,b}$ como indicado :

$$g_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot g\left(\frac{x - b}{a}\right) \quad (09)$$

A Figura 4.2.2 apresenta exemplos de escalamento e translação efetuadas sobre a função $g(x)$ como descrito por meio da equação 9 acima, na qual percebe-se o efeito do escalamento (parâmetro a) na compressão ou dilatação da mesma, e a translação no tempo (parâmetro b) sobre a função $g(x)$.

Dessa figura, pode-se extrair alguns conceitos interessantes. O primeiro deles refere-se ao fato de que, para uma escala menor ($a = 0.5$), tem-se uma função $g(x)$ comprimida, o que localiza melhor os fenômenos no tempo, e inversamente ao expandirmos $g(x)$ para uma escala maior ($a = 1$), obtêm-se uma maior resolução em frequência em detrimento da resolução temporal.

Pode-se observar ainda que o parâmetro b referente à translação no tempo, pode ser interpretado como uma posição no tempo dos eventos a serem detectados.

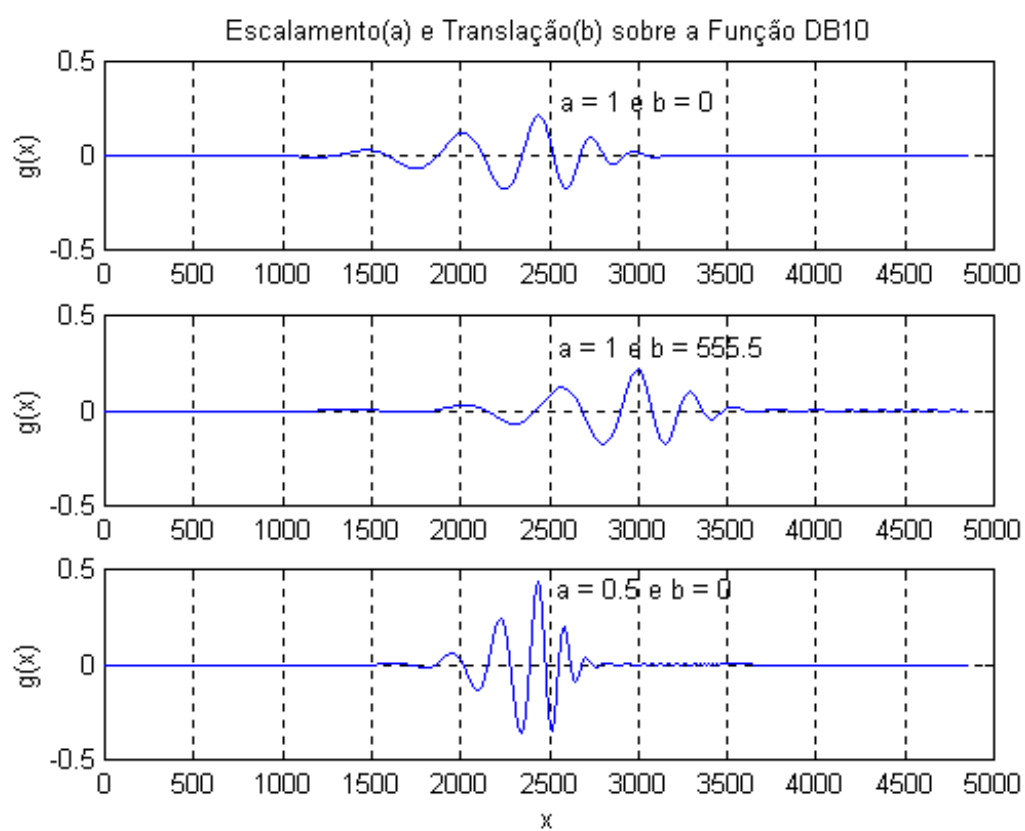


Figura 4.2.2 - Escalamento e Translação sobre a função $g(x)$

Para uma função ou sinal qualquer $f(x)$, define-se a transformada wavelets contínua como :

$$W_g[f(x)] = W_g f(a,b) = (a)^{1/2} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot g\left(\frac{x-b}{a}\right) \cdot dx \quad (11)$$

Onde $W_g f(a,b)$ representa o coeficiente wavelet em uma determinada escala e translação, e representa também o quanto a função ou sinal $f(x)$ se assemelha à função mãe $g(x)$, ou melhor, o quanto essas duas funções estão correlatadas.

O conjunto de todos os coeficientes wavelets constitui a representação da função ou sinal $f(x)$ no domínio wavelet .

Uma definição bastante usual para a transformada wavelet é que a mesma é uma operação de ruptura, ou seja , quebra a função $f(x)$ em muitos pedaços e esses pedaços são representados pelos coeficientes wavelet dados pela equação 11 , os quais representam um “casamento “ entre $f(x)$ e as funções “filhas” definidas pela equação 10.

Para os sinais de tempo discreto, define-se a Transformada Wavelet Discreta como indicado abaixo, em que apenas os parâmetros escala (a) e translação (b) são discretizados :

$a = a_o^m$, $b = n.a_o^m.b_o$, para m e $n \in \mathbb{Z}$, $a_o > 1$ e $b_o \neq 0$, transformando a equação 11 em :

$$W_g f(m,n) = \frac{1}{\sqrt{a_o^m}} \cdot \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f(k) \cdot g\left(\frac{k - n.a_o^m.b_o}{a_o^m}\right) \quad (12)$$

Onde a wavelet mãe e as funções filhas são funções discretas, sendo que a_o e b_o devem ser inteiros, e para manter a inversibilidade, a escolha desses valores deve ser feita de modo que as wavelets filhas formem uma base ortonormal para $\ell^2(\mathbb{R})$ (Para maiores detalhes ver [26], páginas 44 a 46).

No domínio da frequência, a função wavelet corresponde a um filtro passa-banda. Ocorre, no entanto, que sinais passa-baixo não podem ser representados eficientemente por esse tipo de filtro. Dessa forma, a representação de um sinal pela equação [12] exige um número infinito de filtros passa-banda (funções $g_{m,n}$), o que não é muito eficiente.

Esse problema foi solucionado pelo desenvolvimento do algoritmo piramidal MRA, bastante utilizado em processamento de imagens e de sinais de voz. Na teoria MRA um sinal é representado pela soma de uma parcela denominada “aproximação” (obtida através de um processo de filtragem passa-baixa) com uma parcela denominada “detalhe” (obtida através de filtragem passa-alta). O “detalhe” continua sendo representado pelas wavelets (filtro passa-alta), enquanto a “aproximação” é representada pela dilatação e translação de uma função passa-baixa $\Phi(t)$, associada à wavelet mãe, e denominada escalamento.

A escolha da função mãe a ser utilizada deve ser bastante criteriosa para cada problema que se deseja analisar. Neste trabalho, será utilizado como wavelet mãe a função DB10 da família Daubechies, que, segundo a bibliografia pertinente ao assunto, é a que apresenta melhor desempenho frente à sinais transitórios [27,28].

A Figura 4.2.3 a seguir mostra a correspondente função escalamento associada à função mãe DB10 mostrada na Figura 4.2.1. Um ponto importante do algoritmo MRA é o fato de que essas duas parcelas (“aproximação” e “detalhe”) podem ser obtidas através de um processo de filtragem.

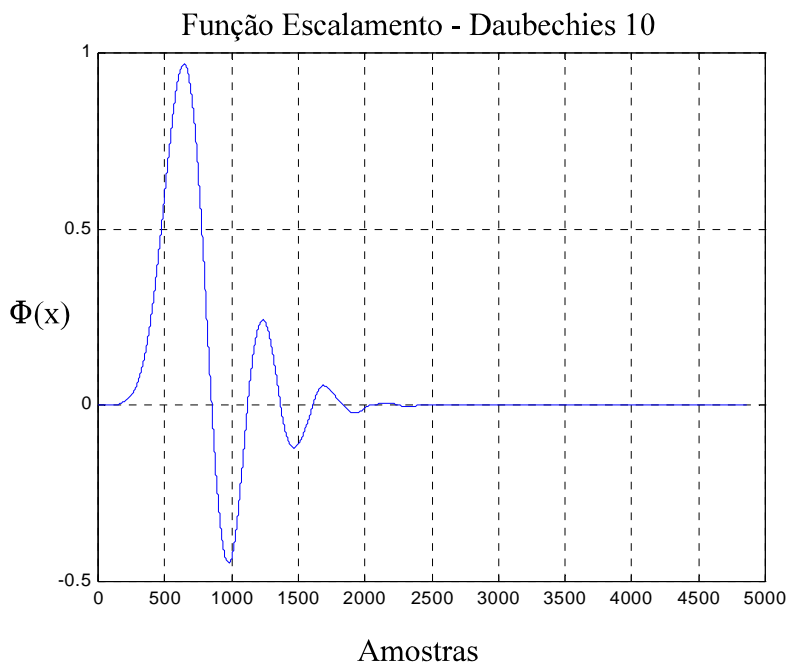


Figura 4.2.3 - Função Escalamento DB10.

A demonstração do algoritmo MRA não será abordada neste trabalho, podendo a mesma ser encontrada em [26,27,28]. Será discutido, no entanto, a implementação do algoritmo MRA, cujo diagrama de blocos é mostrado na Figura 4.2.6.

No MRA, a aproximação de um sinal é descrita, utilizando-se o conceito de resolução ou níveis, onde resoluções mais finas (níveis iniciais) possuem mais amostras por unidade de tempo. A passagem para um nível mais alto implica em uma maior resolução freqüencial, porém às custas de uma menor resolução temporal.

Neste trabalho, os sinais de tempo de discreto, os quais serão analisados pelo algoritmo MRA, são constituídos pelos sinais de corrente na interligação (i_a, i_b, i_c) amostrados com uma taxa de N amostras/ciclo de 60 Hz (na presente implementação adotou-se $N = 16$ amostras / ciclo). Para uma janela de dados de J ciclos da fundamental, resulta em um número total de amostras M igual a $M = J \cdot N$.

Por razões a serem comentadas no próximo item, para a classificação dos fenômenos de curto-circuito e ilhamento, será utilizada uma janela de 4 ciclos ($M = 64$ amostras) e, para a classificação dos fenômenos de oscilação, será utilizada uma janela de 20 ciclos ($M = 320$ amostras).

Referente à aplicação do algoritmo MRA, representado pelo diagrama da Figura 4.2.6, a esse sinal de tempo discreto, valem as seguintes observações:

A) - No algoritmo MRA, como já comentado, em cada nível (ou escala), o sinal é decomposto, através de um processo de filtragem utilizando filtros do tipo FIR, em duas parcelas: “aproximação” (filtragem passa-baixa) e “detalhe”(filtragem passa-alta).

B) - No primeiro nível, as M amostras iniciais do sinal de tempo discreto são filtradas por um filtro passa-baixa, com resposta ao impulso $h_0(n)$. A seguir, o sinal filtrado é decimado por 2 (de cada duas amostras consecutivas, armazena-se apenas a primeira) obtendo-se, dessa forma, os $M/2$ coeficientes da parcela “aproximação” do nível 1. De forma análoga, os coeficientes da parcela “detalhe” do nível 1 são obtidos, filtrando o sinal digital pelo filtro passa- alta, com resposta ao impulso $h_1(n)$, e em seguida decimando o resultado por 2.

C) - Em cada nível subsequente, os coeficientes das parcelas “detalhe” e “aproximação” são obtidos de forma idêntica ao descrito em (A), bastando para tanto substituir as M amostras iniciais do sinal de tempo discreto pelos coeficientes da parcela “aproximação”, calculados no nível anterior (Figura 4.2.6). Demonstra-se que os coeficientes da parcela “detalhe” correspondem aos coeficientes Wavelets fornecidos pela equação [12].

D) - Devido ao processo de decimação por dois, o número de coeficientes de um dado nível será sempre metade do número de coeficientes existente no nível anterior. Dessa forma, o processo pode ser continuado até um nível que possua apenas uma amostra. O número de níveis disponíveis w está, portanto, relacionado com o número de amostras M contidas na janela de observação através da relação:

$$w = \frac{\log(M)}{\log(2)} \quad (13)$$

E) - A resposta ao impulso dos filtros passa-baixas e passa-banda ($h_0(n)$ e $h_1(n)$) estão relacionados com as funções wavelet mãe e escalamento como indicado a seguir:

$$h_0(n) = \sqrt{2} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(t) \cdot \Phi(2t - n) \cdot dt \quad (14)$$

$$h_1(n) = \sqrt{2} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) \cdot \Phi(2t - n) \cdot dt \quad (15)$$

F) - Para a wavelet utilizada neste trabalho (DB10), as respostas a impulso dos correspondentes filtros passa-baixa e passa-banda, calculadas com a utilização das expressões acima, resulta nos valores fornecidos na tabela [1].

**TABELA 1 - RESPOSTA AO IMPULSO DOS FILTROS
PASSA-ALTA E PASSA - BAIXA.**

n	$h_0(n)$	$h_1(n)$
1	-1. 3264e-005	-2. 6670e-002
2	9. 3589e-005	1. 8818e-001
3	-1. 1647e-004	-5. 2720e-001
4	-6. 8586e-004	6. 8846e-001
5	1. 9924e-003	-2. 8117e-001
6	1. 3954e-003	-2. 4985e-001
7	-1. 0733e-002	1. 9595e-001
8	3. 6066e-003	1. 2737e-001
9	3. 3213e-002	-9. 3057e-002
10	-2. 9458e-002	-7. 1394e-002
11	-7. 1394e-002	2. 9458e-002
12	9. 3057e-002	3. 3213e-002
13	1. 2737e-001	-3. 6066e-003
14	-1. 9595e-001	-1. 0733e-002
15	-2. 4985e-001	-1. 3954e-003
16	2. 8117e-001	1. 9924e-003
17	6. 8846e-001	6. 8586e-004
18	5. 2720e-001	-1. 1647e-004
19	1. 8818e-001	-9. 3589e-005
20	2. 6670e-002	-1. 3264e-005

G) - Conhecida a resposta ao impulso, a saída de cada um dos filtros mostrados no diagrama da Figura 4.2.6 pode ser facilmente calculada por meio da convolução entre essa resposta a impulso e o sinal digital de entrada. Dessa forma, os coeficientes do nível k

($A_{k,n}$ e $d_{k,n}$) são calculados como indicado nas expressões 16 e 17 a seguir :

$$A_{k,n} = \frac{1}{2} \cdot \sum_{j=1}^N H_0(2n-j+1) \cdot A_{(k-1,j)} \quad (16)$$

$$d_{k,n} = \frac{1}{2} \cdot \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} H_1(j+2-2n) \cdot A_{(k-1,j)} \quad (17)$$

ambas válidas para $n = 1, \dots, N/2$.

As expressões acima mostram o algoritmo piramidal operando sobre um sinal de entrada de tamanho N , onde N é de preferência uma potência de 2, e j o índice que possibilita a operação de *folding* e *shifting* na convolução entre os sinais em questão. Por último, a variação de n indicada reduz a dimensão do sinal de entrada por 2, conforme mostrado no parágrafo B.

H) - As respostas em frequência dos filtros definidos no item E são mostradas nas Figuras 4.2.4 e 4.2.5 a seguir, dado que o eixo das ordenadas desses dois gráficos foram expressos em termos da frequência normalizada, definida como :

$$f_{normalizada} = \frac{2^k}{F_a} \cdot f \quad (18)$$

Onde F_a é a frequência de amostragem e $k (k > 0)$ é o nível de interesse. Os dois gráficos apresentados são válidos para qualquer nível. Observando as respostas em frequência desses gráficos, pode-se concluir que no nível k , os coeficientes wavelets (saída do filtro passa-banda) estão diretamente correlacionados com a magnitude das componentes do sinal, cuja frequência se localiza na faixa fornecida pela equação abaixo :

$$\frac{F_a}{2^{(k+1)}} \leq f \leq \frac{F_a}{2^k} \quad (19)$$

Nessa faixa, o filtro apresenta ganho maior ou igual a 1, enquanto que fora da faixa o ganho é pequeno. Assim, os coeficientes $d_{k,n}$ serão tanto maiores, quanto maior for a amplitude das componentes do sinal, cuja frequência se encontram na faixa indicada acima.

Os coeficientes da parcela aproximação $A_{k,n}$, por sua vez, estão correlacionados com magnitude das componentes do sinal, cuja frequência se encontra na faixa fornecida pela expressão a seguir:

$$0 \leq f \leq \frac{F_a}{2^{(k+1)}} \quad (20)$$

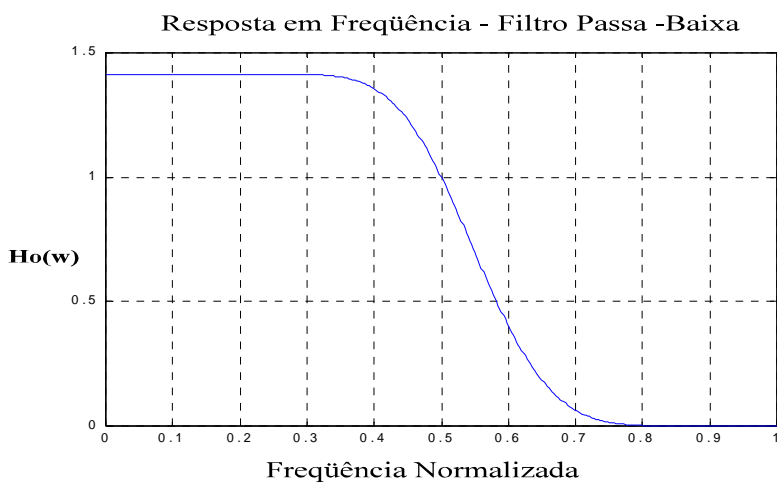


Figura 4.2.4 - Filtro Passa - Baixa

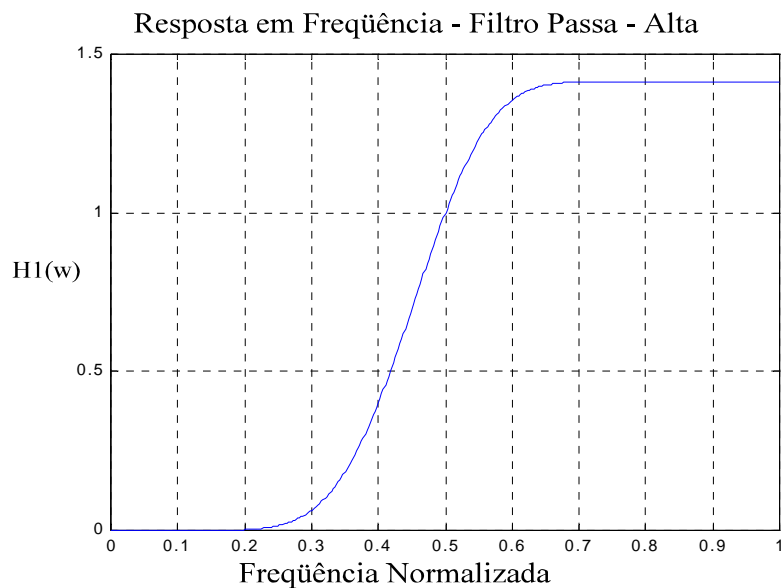


Figura 4.2.5 - Filtro Passa - Alta

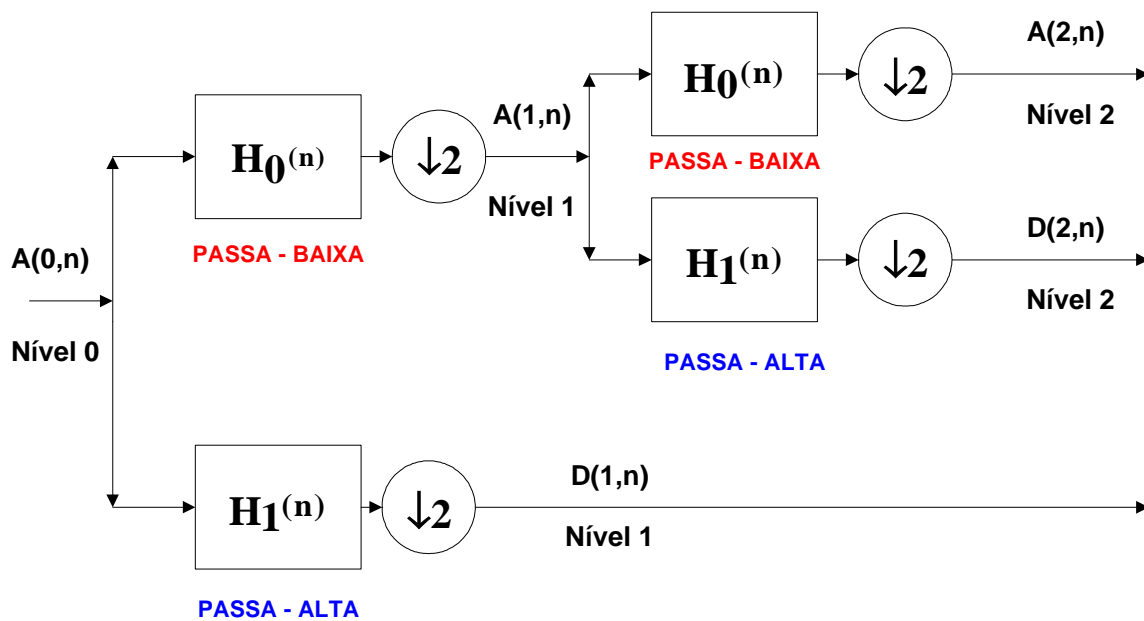


Figura 4.2.6 - Diagrama de Blocos do Algoritmo MRA

4.3 - Utilização da Transformada Wavelets no processo de classificação do algoritmo COGERA.

Para aplicação desses conceitos no algoritmo COGERA, foi mostrado no ítem 4.1 que os eventos de curto-circuito, ilhamento e oscilação podem ser identificados com base nas seguintes informações :

- O curto - circuito caracteriza-se por um brusco aumento de amplitude da componente fundamental de 60 Hz.
- Durante o ilhamento, há o desaparecimento da componente de quinta harmônica (300 Hz) presente na corrente de magnetização.
- A oscilação eletromecânica caracteriza-se pela modulação dos sinais por componentes de baixa frequência (< 10 Hz).

Nesta etapa do trabalho, será analisada a viabilidade de utilizar-se a DWT nos sinais de corrente de forma a se identificar as três situações descritas. Utilizando os conceitos já discutidos (vide pagina 50, ítem H), pode-se afirmar que, para a frequência de amostragem adotada (960 Hz), em cada um dos níveis, os coeficientes wavelets estão associados com as faixas de frequência mostradas na tabela [2] a seguir.

Dado que no curto-circuito a informação predominante é o 60 Hz, para a identificação desse evento deve-se observar os coeficientes do nível 3. Já no ilhamento a informação de interesse é o 300 Hz e, dessa forma, o nível a ser analisado é o 1. A oscilação eletromecânica, por sua vez, é caracterizada pelo aparecimento de baixas frequências, as quais podem ser detectadas através do nível 7.

Resta agora definir qual será o tamanho da janela de dados a ser utilizado na decomposição dos sinais através da DWT. Para esta grandeza, serão analisadas duas alternativas:

- Janela de dados de 20 ciclos (320 amostras na janela).
- Janela de dados de 4 ciclos (64 amostras na janela).

A equação 13 permite observar que, para se obter o nível 7 (nível de interesse para a detecção dos eventos de oscilação eletromecânica), é necessário uma janela de no mínimo 16 ciclos (256 amostras). Por medida de segurança, neste trabalho será utilizada uma janela de 20 ciclos para a classificação deste tipo de evento, a qual, como mostrado na tabela [2], irá fornecer três coeficientes wavelets no nível 7. Uma janela tão longa, no entanto, é inconveniente e desnecessária para a detecção dos fenômenos de curto e ilhamento.

Como pode ser observado na tabela [2], uma janela de 4 ciclos fornece, respectivamente, 32 e 8 coeficientes wavelets para os níveis 1 e 3, o que é mais que suficiente para a análise dessas duas situações. Dessa forma, o algoritmo propõe a utilização de uma janela de 4 ciclos para classificar os eventos de curto e ilhamento e outra de 20 ciclos para ser utilizada apenas na detecção da condição de oscilação eletromecânica

TABELA 2 - FAIXA FREQUÊNICAL DA DWT

Níveis	Faixa de frequência ($F_a=960$ Hz)		Nº de amostras em cada nível	
	Inferior	Superior	Janela de 20 ciclos	Janela de 4 ciclos
1	240 Hz	480 Hz	160	32
2	120 Hz	240 Hz	80	16
3	60 Hz	120 Hz	40	8
4	30 Hz	60 Hz	20	4
5	15 Hz	30 Hz	10	2
6	7.5 Hz	15 Hz	5	1
7	3.25 Hz	7.5 Hz	3	

A seguir nas Figuras 4.3.1 a 4.3.3 é apresentada uma decomposição wavelets dos sinais das Figuras 4.1.1, 4.1.3 e 4.1.5 usando-se o *software* MATLAB. Os sinais em questão foram gerados com frequência de amostragem de 960 Hz como na tabela [2] acima, e utilizou-se como função mãe para essa decomposição a função DAUBECHIES 10.

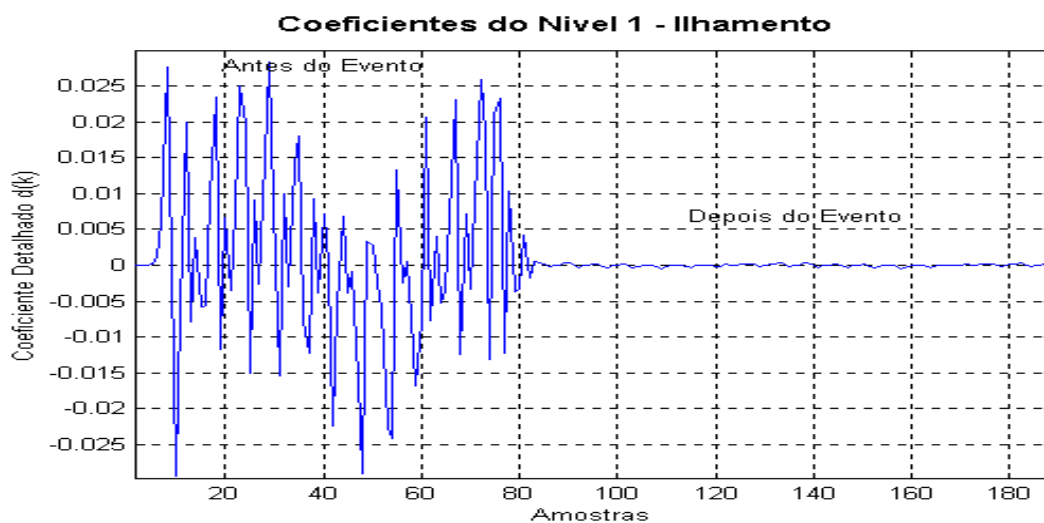


Figura 4.3.1 - Decomposição Wavelet para o Nível 1

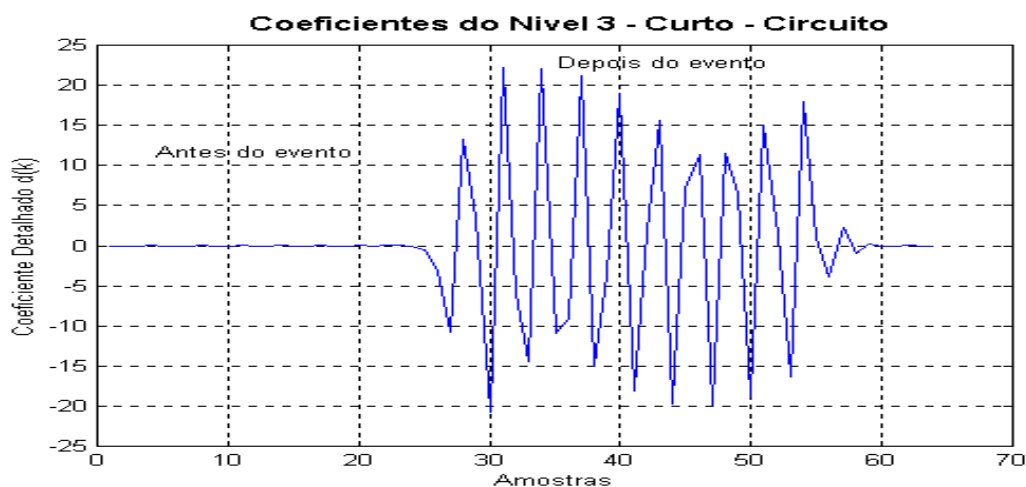


Figura 4.3.2 - Decomposição Wavelet para o Nível 3

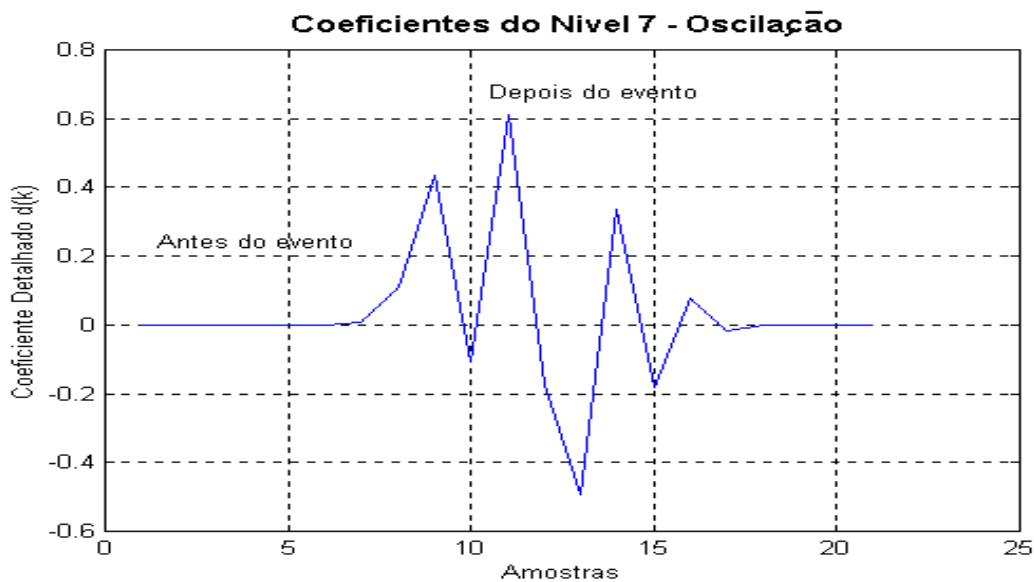


Figura 4.3.3 - Decomposição Wavelet para o Nível 7

As simulações acima demonstram a viabilidade de se detectar de uma forma bastante sensível e clara, a ocorrência dos três fenômenos de interesse utilizando-se a DWT. Por exemplo, no caso de ilhamento (Nível 1) verifica-se a perda da quinta harmônica após a abertura do disjuntor DI (Figura 2.1.1), independente do valor da magnitude da carga da concessionária que seria alimentada pelo gerador da indústria.

Essa variação na magnitude da quinta harmônica reflete-se em uma variação nos coeficientes do nível 1 (vide Figura 4.3.1).

Na condição de curto, a variação de energia nos coeficientes do nível 3 é observada sem maiores problemas. De forma similar, para a condição de oscilação eletromecânica, também se observa uma variação na amplitude dos coeficientes do nível 7.

Para quantificar a magnitude dos coeficientes wavelets obtidos em um determinado nível, será utilizado o procedimento proposto por Salama [34]. Admitindo-se que para um nível genérico j existam m coeficientes $d_{j,i} = (i = 1 \dots m)$ da versão detalhada, a magnitude desses coeficientes pode ser quantificada através de seu desvio - padrão, isto é :

$$D_j = \left(\frac{1}{m}\right) \cdot \left[\sum_{i=0}^m \left(d_{j,i} - \bar{d}_j \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

onde \bar{d}_j é o valor médio dos coeficientes da versão detalhada do nível j :

$$\bar{d}_j = \left(\frac{1}{m}\right) \cdot \sum_{i=0}^m d_{j,i} \quad (20)$$

Pode-se definir, portanto, nesse momento, o diagrama de blocos geral sobre a classificação do algoritmo, em que estão indicados o algoritmo de partida por variação de energia detalhado no capítulo 5 (Figura 5.1.7), que define a amostra N , no qual o evento se iniciou.

Uma vez partido o algoritmo pela variação de energia contida no sinal, define-se, a partir dessa amostra, os eventos de pré e pós ocorrência dos mesmos, capturando as amostras que irão compor as janelas de 4 e 20 ciclos de pré e pós evento que possibilitem os cálculos dos coeficientes conforme descrito a seguir.

Em seguida, são usados os valores de desvio - padrão dos coeficientes wavelets dos níveis 1 (Ilhamento), 3 (Curto) e 7 (Oscilação), conforme mostrado de (21) a (25).

O principal objetivo é uniformizar a faixa de variação dessas grandezas pela maior componente presente tanto nos eventos de pré como de pós ocorrência dos fenômenos em pauta. Toma-se portanto o número de coeficientes dados pelas equações 21 a 25 a seguir, para cada nível, e define-se para cada evento valores de ajustes que determinarão a classificação.

- Janela de 4 ciclos : (Grandezas para a detecção dos eventos de ilhamento).

Pré - Evento :

$$N_{1Pr} = D_{1,Pre} (32 \text{ amostras}) \quad (21)$$

Pós - Evento :

$$N_{1Po} = D_{1,Pos} (32 \text{ amostras}) \quad (22)$$

Grandeza para a detecção dos eventos de curto - circuito :

$$N_{3tot} = D_{3,Pos(8 amostras)} \quad (23)$$

Nota : Para a condição de curto-circuito não se mostrou necessária a normalização pela componente de pré - evento.

- Janela de 20 ciclos : (Grandezas para a detecção dos eventos de oscilação eletromecânica).

Pré - Evento :

$$D_{7Pr} = \frac{D_{7,Pre (3 amostras)}}{D_{3,Pre (40 amostras)}} \quad (24)$$

Pós - Evento :

$$D_{7Po} = \frac{D_{7,Pos (3 amostras)}}{D_{3,Pos (40 amostras)}} \quad (25)$$

Nota : Para as grandezas dos eventos de oscilação eletromecânica, normalizam-se os coeficientes do nível 7 pelas componentes de 60 Hz representadas pelo nível 3 dentro da mesma janela de 20 ciclos com o objetivo de se uniformizar as respectivas faixas de variação desses valores.

A seguir, no diagrama de blocos da Figura 4.3.4, é mostrado o procedimento geral da classificação do algoritmo COGERA, no qual se calcula primeiramente os fenômenos mais rápidos que são as janelas para os eventos deilhamento e curto e em seguida a oscilação eletromecânica, todos eles mutuamente exclusivos. Usam-se no algoritmo algumas características dos eventos sob análise tais como a de que os fenômenos deilhamento e oscilação são simétricos ou equilibrados, auxiliando no processo de classificação.

Os valores de ajustes das relações apresentadas podem ser obtidos das tabelas e simulações efetuadas nos *softwares* MATLAB e ATP, mostradas respectivamente no capítulo 6, levando-se em consideração as características de cada sistema, como os níveis de curto - circuito na concessionária para possibilitar uma maior sensibilidade para os curtos fase - terra na sua conexão em delta com a indústria, e as características de magnetização do transformador/transfomadores de alta tensão nos casos de ilhamento.

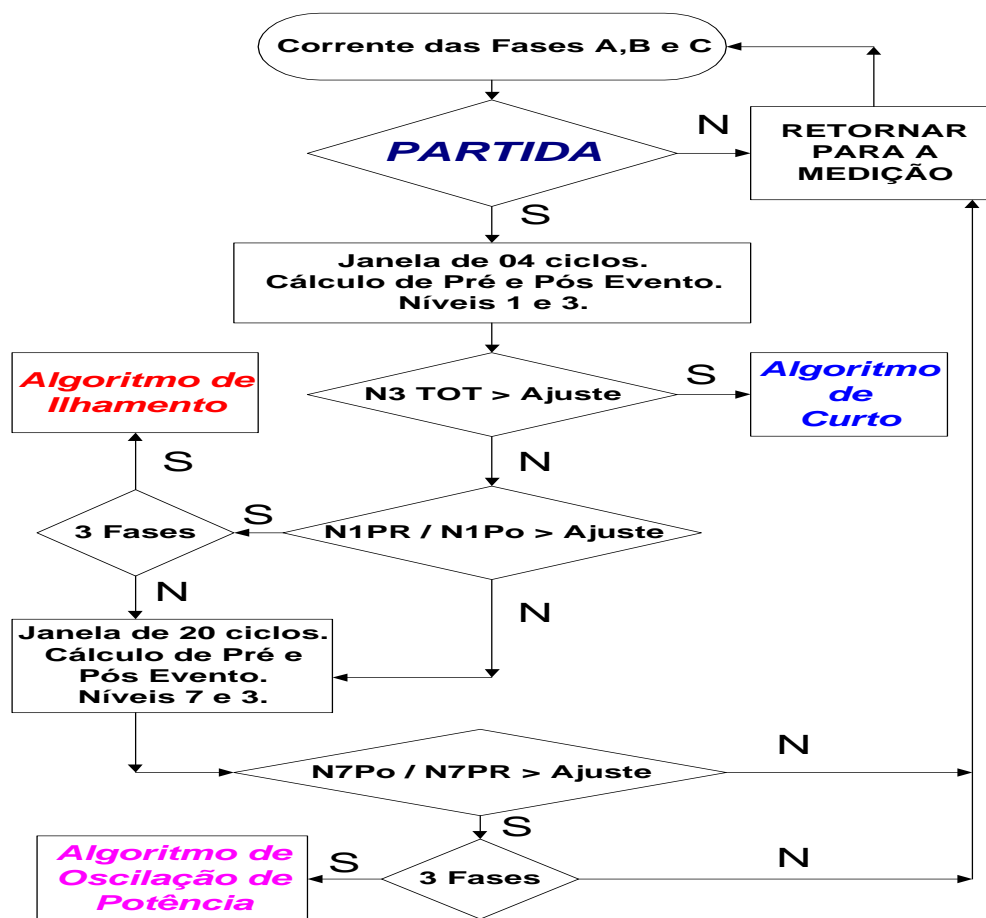


Figura 4.3.4 - Diagrama de Blocos - Classificação do Algoritmo COGERA