

CAPÍTULO VI

Procedimento Experimental

6.1 Introdução

O procedimento experimental tem como objetivo validar as simulações numéricas e as conclusões obtidas nestas. Para tais validações, o filtro foi testado com sinais de engrenamento reais, obtidos no Banco de Prova Câmbio da FIAT Automóveis S/A unidade de Betim. Tais sinais foram escolhidos pelo corpo técnico responsável pelo controle de qualidade na linha de fabricação e montagem dos câmbios, sendo divididos em três grupos de dados:

- Sinais de engrenamento de câmbios bons;
- Sinais de engrenamento de câmbios com não conformidades inseridas na quinta marcha em níveis aceitáveis;
- Sinais de engrenamento de câmbios com não conformidades inseridas na quinta marcha em níveis não aceitáveis.

Uma análise estatística destes grupos de dados foi realizada para se escolher os limites de aceitação e parâmetros utilizados no filtro adaptativo, bem como os sinais a serem tratados e estudados.

Neste capítulo é descrito o procedimento experimental do trabalho proposto, bem como apresentação dos resultados obtidos e análise dos mesmos.

Inicialmente foram analisados os sinais de vibração e posteriormente os sinais de pressão sonora.

6.2 Bancada Experimental

Segundo Barreto (2003), o banco de prova câmbio (Fig. 6.1.a) tem como objetivo executar o teste nos câmbios da mesma forma como são utilizados nos veículos pelos seus usuários. Estes bancos de prova câmbio são constituídos de 03 motores elétricos de corrente contínua que simulam o veículo quanto ao funcionamento da caixa de câmbio. O primeiro motor elétrico, chamado de principal, faz a função do motor do veículo executando a rotação de todo o conjunto e fazendo o arraste pelo eixo primário do câmbio. Já os motores elétricos 02 e 03, chamados de secundários, fazem a função dos semi-eixos (rodas) e tem a função de manter a rotação destes semi-eixos na rotação prevista conforme a relação do diferencial e das marchas que o câmbio é composto.

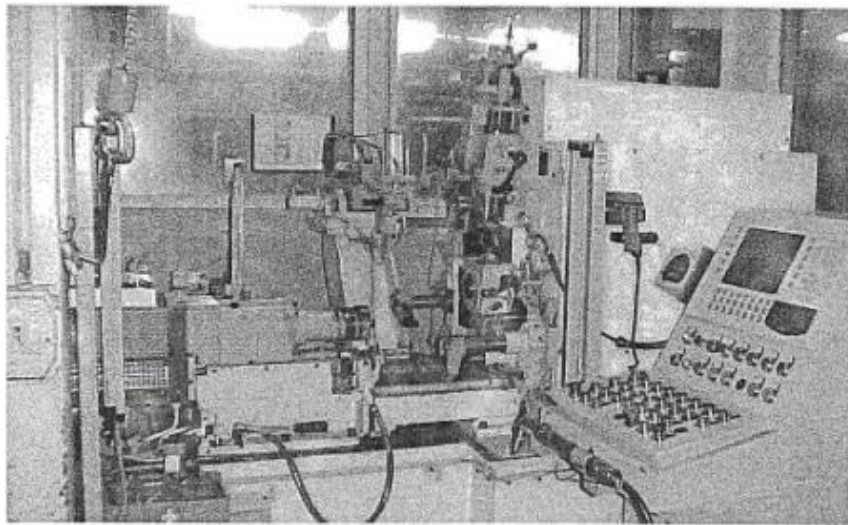


Figura 6.1.a - Estrutura completa do banco de prova.

Existe ainda, um sistema de embreagem que proporciona as trocas de marchas, de forma semelhante ao que ocorre nos veículos. Possuem um computador e um sistema de CLP (Controlador Lógico Programável) que comanda todo o ciclo de prova do câmbio, o qual define a marcha a ser testada, o ponto em que se inicia a aceleração, o intervalo onde a rotação deve se manter constante, e a desaceleração para que se execute a troca de marcha. Ainda no computador e no CLP, está agregado um sistema de controle e análise de vibração e ruído (Fig. 6.1.b), constituído de um acelerômetro e um microfone, utilizados para a aquisição dos sinais.

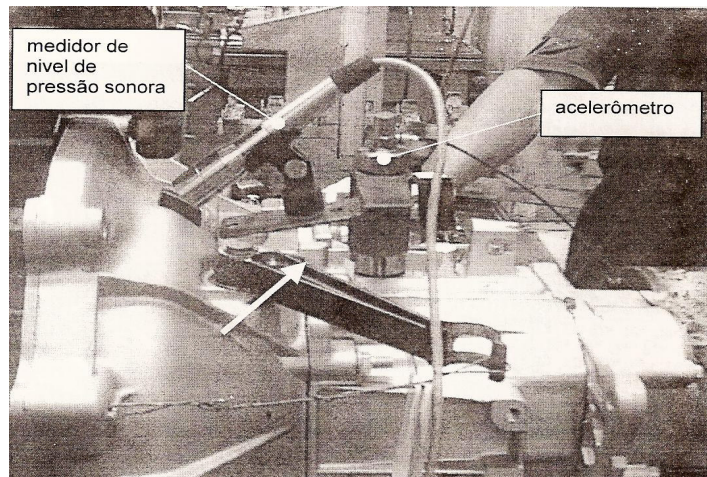


Figura 6.1.b – Localização do microfone e do acelerômetro.

A instrumentação necessária para a amostragem dos dados consiste de um acelerômetro, ligado um pré-amplificador de sinais, um medidor de pressão sonora, que são posicionados nos banco de prova. Os dados de saída destes instrumentos são conectados a uma placa de aquisição analógico-digital, que por sua vez está interligada a um microcomputador para a aquisição dos dados e execução em tempo real do software destinado ao controle de qualidade de cada câmbio testado. As características de cada instrumento utilizado são:

- Acelerômetro Bruel & Kjaer Type 4383 – Sensibilidade: $3,16 \pm 2\%$ pCms^{-2} ;
- Amplificador Bruel & Kjaer Charge Amplifier Type 2634;
- Placa e Aquisição Analógico-Digital Wavebook – Resolução 12 bits;
- Microfone Bruel & Kjaer Type 4188 – $31,6\text{mV/Pa}$;
- Medidor de Pressão Sonora Bruel & Kjaer Type 2236;
- Medidor de Rotação Dínamo Tarquimétrico Modelo WEG - IRC/60;
- Microcomputador Pentium III 750 MHz – 256Mb RAM;
- Banco de Prova Câmbio IMPES 7015, fabricado em 1976.

Tanto o medidor de nível de pressão sonora quanto o acelerômetro foram calibrados utilizando calibradores da Bruel & Kjaer. Pela Fig. 6.2 pode-se verificar o esquema conforme os equipamentos foram montados.

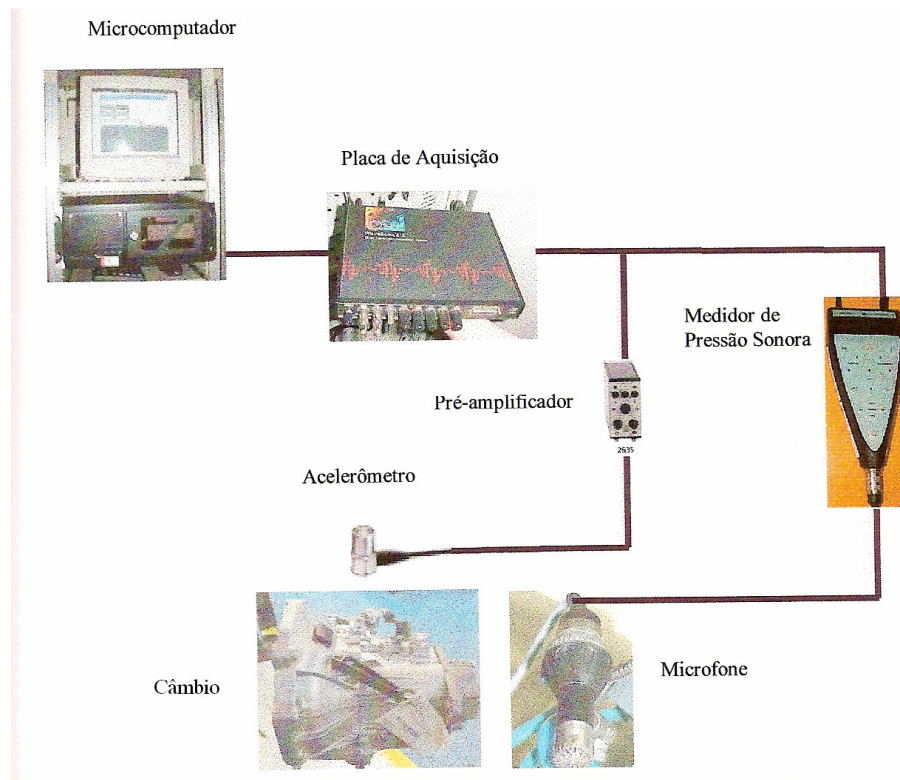


Figura 6.2 – Esquema de montagem dos equipamentos para coleta de dados.

Para os procedimentos experimentais, a frequência de amostragem utilizada foi de 16384 Hz, 1024 pontos, com um intervalo de amostragem de 8 segundos.

6.3 Análise dos Sinais de Vibração

6.3.1 Escolha dos Parâmetros do Filtro Adaptativo

6.3.1.1 Escolha do Sinal de Referência

O procedimento adotado nesta etapa foi a comparação entre os níveis RMS dos sinais. Foram coletados sinais de engrenamento de onze (11) câmbios bons, e dentre estes foi escolhido o sinal de referência para o filtro LMS. Para tal escolha, traçaram-se as curvas de valor absoluto (RMS) (Fig. 6.3) e a curva de valor médio dentre eles (Fig. 6.4).

Com o intuito de não divulgar os resultados numéricos dos testes realizados pela FIAT Automóveis, todos os sinais analisados foram multiplicados por um coeficiente, sendo os valores, em $[\text{mm/s}^2]$, em $[\text{RPM}]$ ou em $[\text{dB}]$ nos gráficos e tabelas, apenas para fins de comparação.

Analisando a Fig. 6.4, verifica-se que a curva do câmbio B9 é a que mais se aproxima do valor médio, funcionando como um bom demonstrativo da curva característica de um engrenamento sem defeito, sendo escolhido como sinal de referência.

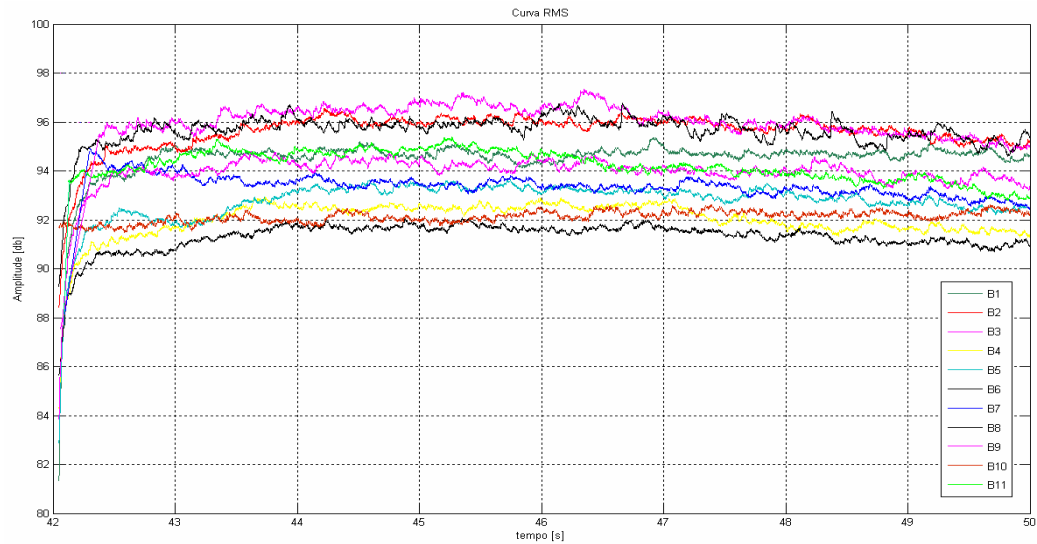


Figura 6.3 – Curvas RMS dos sinais de engrenamento bons.

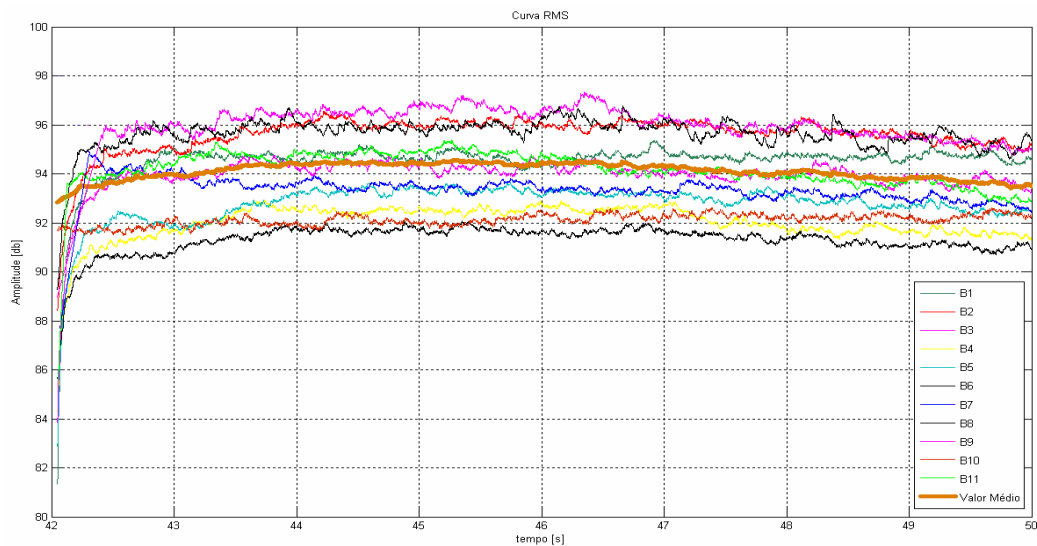


Figura 6.4 – Curvas RMS e de Valor Médio dos sinais de engrenamento bons.

6.3.1.2 Ajuste dos Parâmetros do Filtro Adaptativo

Antes de iniciar o procedimento de filtragem dos sinais, foram determinados os parâmetros a serem utilizados no filtro, de modo que o mesmo apresentasse um bom desempenho com os dados experimentais.

Os parâmetros do filtro adaptativo dependem das características dos sinais utilizados. Quando se diz parâmetros do filtro, está se referindo aos parâmetros iniciais do algoritmo LMS, ou seja, números de pesos do filtro (L), razão de convergência (μ) e fator de esquecimento (α).

Para o ajuste dos parâmetros do filtro, adicionou-se ao sinal de referência, como sinais de interferência, um ruído branco de mesmo nível RMS.

A escolha dos parâmetros μ , α e L para utilização no filtro adaptativo foi feita após um processo de otimização randômica, onde a função objetivo foi a minimização do erro entre o sinal de engrenamento estimado (obtido com a utilização do filtro adaptativo) e o sinal de referência.

A Fig. 6.5-a compara o sinal de referência com o sinal primário. A Fig. 6.5-b compara o sinal de engrenamento estimado pelo filtro com o sinal de referência. Apesar de estarem no domínio do tempo, é possível verificar a minimização da interferência do ruído adicionado.

Nas Fig. 6.6 e 6.7, podem-se comparar respectivamente as densidades espectrais de potência e as curvas de valor absoluto (RMS) dos sinais de referência, primário e estimado, para os parâmetros otimizados $L = 8$, $\mu = 0,01$ e $\alpha = 0,001$.

Através das análises dos gráficos das Fig. 6.5, 6.6 e 6.7, constata-se que o filtro age de maneira eficaz, aproximando o sinal primário do sinal de referência com um erro médio de aproximadamente 0,125 dB, valor este calculado pela máxima diferença entre os valores RMS dos sinais Estimado e de Referência da Fig. 6.7.

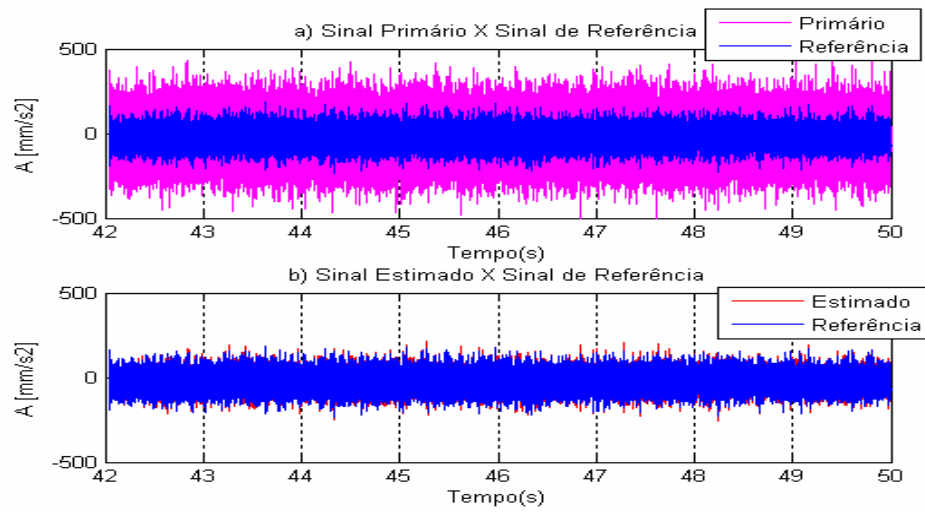


Figura 6.5 - a) Sinal de Referência X Sinal Primário. b) Sinal de Referência X Sinal Estimado.

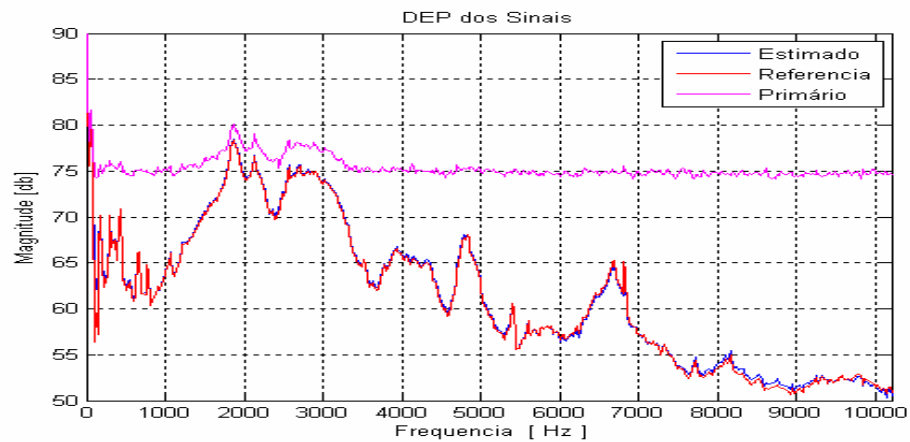


Figura 6.6 – Comparação entre as densidades espectrais de potência dos sinais.

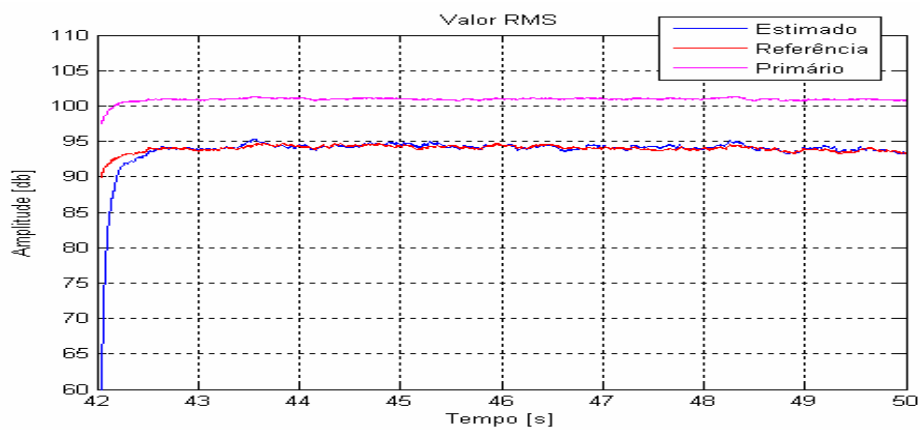


Figura 6.7 – Comparação entre as curvas de valor absoluto (RMS) dos sinais.

Para uma melhor verificação do desempenho do filtro, adicionou-se ao sinal de ruído, além do ruído branco, três senóides:

- Uma com frequência 4000 Hz e amplitude variável;
- Outra com frequência de 2500 Hz, amplitude de 30% do valor da amplitude do sinal de referência e defasada de 60°;
- Outra com frequência de 3000 Hz, amplitude de 40% do valor da amplitude do sinal de referência e defasada de 45°.

Analisando as Fig. 6.8 e 6.9, que compararam as densidades espectrais de potência e as curvas de valor absoluto (RMS) dos sinais respectivamente, constata-se que o filtro ainda age de maneira eficaz, aproximando o sinal primário do sinal de referência com um erro médio de aproximadamente 0,5 dB, sendo então confirmado o uso dos parâmetros já estipulados. A diferença entre as curvas apresentada ao redor da frequência de 4000 Hz da Fig. 6.8 é explicada devido à grande amplitude desta frequência, que ainda assim foi minimizada com a utilização do filtro adaptativo em cerca de 35 dB.

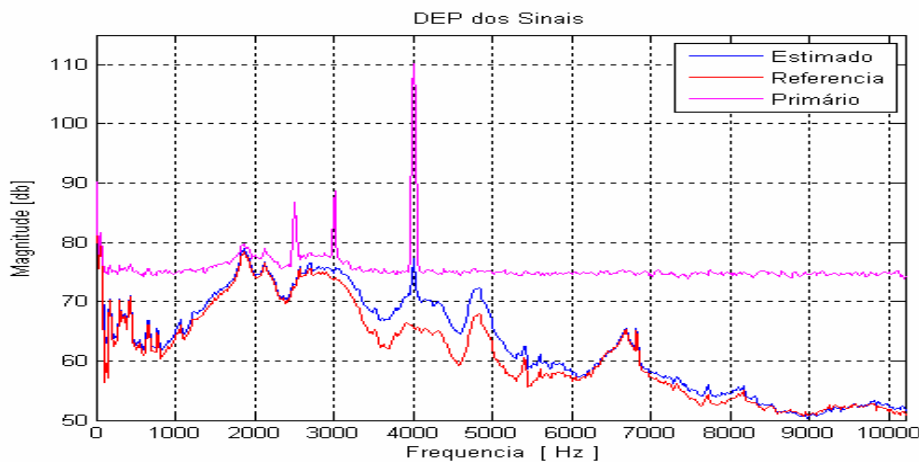


Figura 6.8 – Comparação entre as densidades espectrais de potência dos sinais.

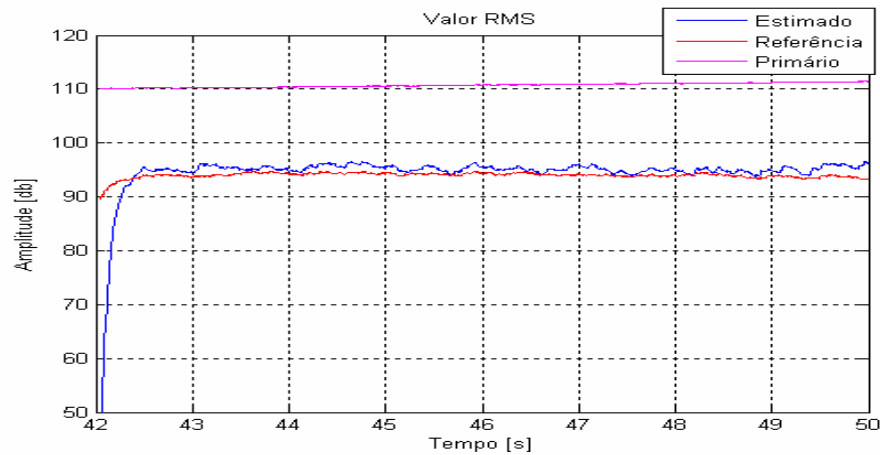


Figura 6.9 – Comparação entre as curvas de valor absoluto (RMS) dos sinais.

6.3.2 Tratamento dos Sinais de Engrenamento

Os sinais adquiridos no banco prova câmbio apresentam o ciclo completo de engrenamento, desde a ré até a quinta marcha. Contudo, como os defeitos a serem considerados aparecem somente na quinta marcha, se fez necessário separar a parcela do sinal referente à marcha de interesse.

Nos gráficos de Aceleração x Tempo (Fig. 6.10a) e Rotação x Tempo (Fig. 6.10b) de um sinal de engrenamento, é possível estimar o instante de início e término do engrenamento da 5ª marcha, por volta do instante 42 segundos (conforme indicado pela seta) e 50 segundos (final do gráfico), respectivamente.

No sistema a ser implantado no banco de prova, o início e o término de cada ciclo são controlados via CLP, ou seja, o início dos ciclos é determinado com grande precisão.

Para que o filtro adaptativo seja eficiente, o início do ciclo do sinal que será filtrado deve coincidir com o início do ciclo do sinal de referência. Sendo assim, foi necessário desenvolver um procedimento de otimização via algoritmo genético, através de análises de correlação entre as rotações dos sinais que serão filtrados e de referência.

Foi definido o intervalo de restrição lateral de menos e mais um segundo (41 e 43 segundos) em relação ao início do ciclo da quinta marcha (42 segundos) e escolhido o ponto de maior correlação entre os sinais, sendo este o ponto de partida para a aquisição dos sinais que serão analisados.

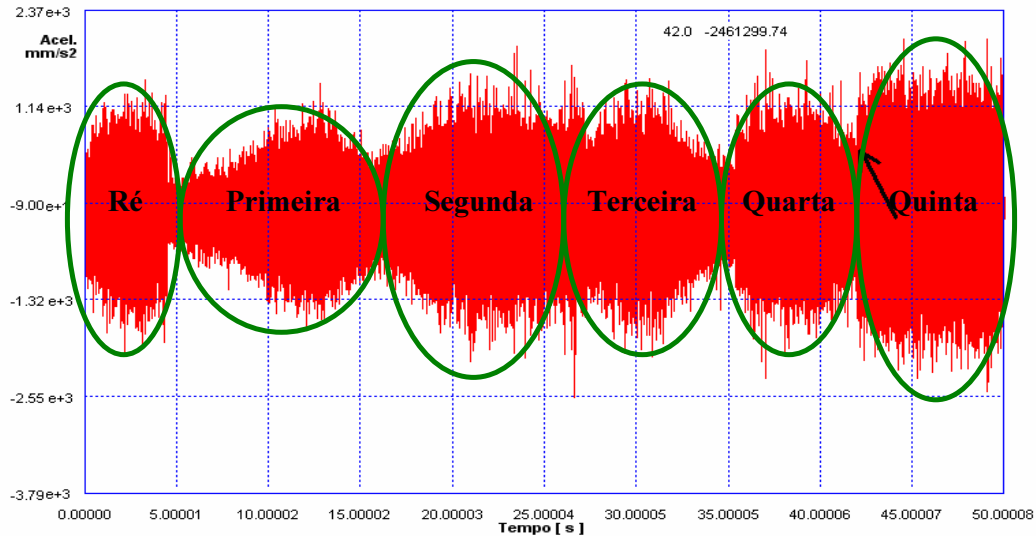


Figura 6.10 a) - Gráfico Aceleração x Tempo para um sinal de engrenamento.

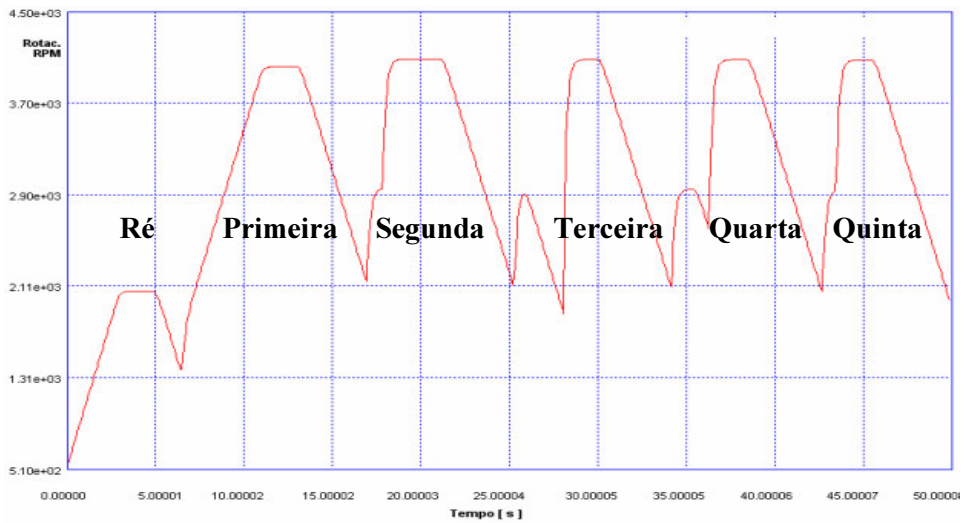


Figura 6.10 b) - Gráfico Rotação x Tempo para um sinal de engrenamento.

6.3.3 Filtragem dos Sinais de Engrenamento

Nesta etapa do trabalho foi realizado todo o processo de filtragem adaptativa dos sinais e análise dos resultados.

Os sinais utilizados para a filtragem foram previamente preparados e separados em três grupos distintos:

- Oito sinais de engrenamento de câmbios bons (B): definido pelos peritos responsáveis pelo banco prova câmbio como câmbios isentos de rumorosidade;

- Sete sinais de engrenamento de câmbios com não conformidades inseridas na quinta marcha em níveis aceitáveis (A): definido pelos peritos como câmbios com rumorosidade em níveis aceitáveis;

- Oito sinais de engrenamento de câmbios com não conformidades inseridas na quinta marcha em níveis não aceitáveis (R): definido pelos peritos como câmbios com rumorosidade em níveis não aceitáveis.

Conhecendo as características dos sinais em estudo, aplica-se a técnica da filtragem adaptativa utilizando um filtro adaptativo com algoritmo LMS normalizado. Na Fig. 6.11 está ilustrado o diagrama de filtragem adaptativa utilizado.

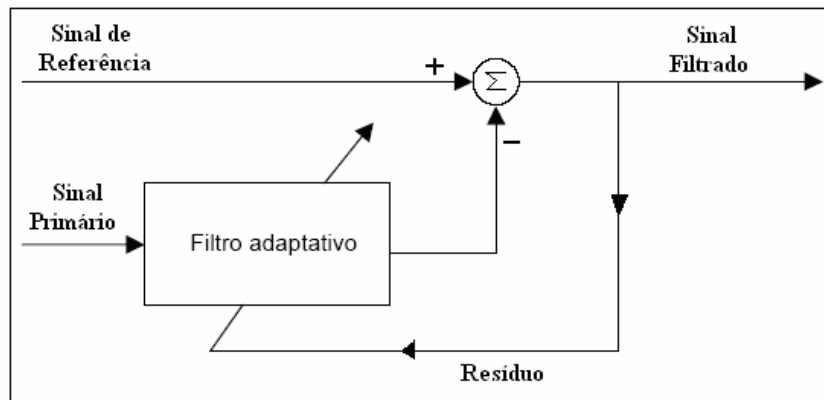


Figura 6.11 - Diagrama da técnica da filtragem adaptativa.

O resíduo de filtragem é estimado pela Eq. (6.1).

$$\text{Resíduo}(k) = \text{Sinal Filtrado}(k) - \text{Sinal de Referência}(k) \quad (6.1)$$

A partir dos sinais filtrados e dos resíduos resultantes, foram calculados os seguintes parâmetros estatísticos (a descrição de cada um dos parâmetros estatísticos abaixo listados se encontra no Anexo II):

- Valor médio [mm/s²];
- Valor de pico [mm/s²];
- Valor pico a pico [mm/s²];

- Kurtosis;
- Skewness;
- Valor médio RMS [dB].

As tabelas 6.1 e 6.2 mostram os parâmetros calculados para os sinais filtrados e resíduos de filtragem respectivamente.

Tabela 6.1 – Parâmetros calculados para os sinais de engrenamento filtrados:

Sinais Filtrados Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média x 10e2	RMS
B1	3,0994	-0,0422	5,3448	15,5260	-1,6481	86,78
B2	3,3418	-0,1635	8,4183	18,2220	-1,6340	87,20
B3	3,6104	-0,0882	8,2026	19,7770	-1,6238	87,08
B4	2,8395	-0,0437	5,2507	13,4730	-1,8010	87,22
B5	2,9188	-0,0844	4,8994	14,0110	-1,6414	86,61
B6	2,8199	-0,0790	4,4469	11,9420	-1,6242	86,32
B7	2,9379	-0,0387	5,5147	15,2790	-1,7369	87,05
B8	3,2616	-0,1053	8,6077	18,9980	-1,7503	87,35
Sinais Filtrados Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média x 10e2	RMS
A1	3,0187	-0,0501	6,0230	15,0700	-1,7244	86,98
A2	3,1416	-0,0682	6,5466	16,5810	-1,7478	87,43
A3	3,0274	-0,0627	6,0143	16,5800	-1,8093	87,55
A4	3,4229	-0,1209	8,9044	22,3530	-1,7493	87,81
A5	3,0087	-0,1052	5,2214	14,7950	-1,7229	87,09
A6	3,1070	-0,0711	6,5276	15,7440	-1,7813	87,55
A7	3,3788	-0,0402	9,7941	20,8820	-1,7273	87,46
Sinais Filtrados Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média x 10e2	RMS
R1	2,9709	-0,0560	5,7680	14,6290	-1,7207	86,98
R2	3,0671	-0,0879	6,1350	15,6190	-1,7477	87,22
R3	3,7641	-0,0404	11,0440	23,7250	-1,5215	86,73
R4	3,2499	-0,0680	7,4550	18,3350	-1,7692	87,51
R5	3,0389	-0,0957	6,5530	16,1460	-1,6914	86,88
R6	3,5966	-0,0709	8,1460	20,1970	-1,6909	87,70
R7	3,1039	-0,0788	6,3147	18,3260	-1,8284	87,78
R8	3,2790	-0,0574	7,4529	20,3260	-1,8287	87,92

Tabela 6.2 – Parâmetros calculados para os resíduos da filtragem:

Resíduo de Filtragem Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média x 10e2	RMS
B1	3,4400	0,0023	20,9200	45,0460	-0,5959	92,71
B2	3,5083	-0,0058	20,9080	47,4170	-0,6092	92,79
B3	3,5298	0,0192	25,5620	51,7490	-0,6189	92,78
B4	3,3425	0,0051	20,1390	42,5880	-0,4423	92,58
B5	3,3226	0,0055	19,5920	41,5290	-0,6012	92,69
B6	3,3412	-0,0036	19,3110	42,4940	-0,6199	92,59
B7	3,3740	0,0037	21,1390	44,5560	-0,5064	92,64
B8	3,4253	0,0100	21,7940	46,2430	-0,4929	92,68
Resíduo de Filtragem Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média x 10e2	RMS
A1	3,4021	0,0038	21,2650	47,5460	-0,5191	92,66
A2	3,4442	0,0103	20,4910	43,8160	-0,4954	92,76
A3	3,4087	0,0078	20,7100	48,6840	-0,4347	92,69
A4	3,5371	0,0182	29,3560	54,3010	-0,4941	92,86
A5	3,3928	0,0022	20,0040	45,2070	-0,5207	92,66
A6	3,4200	0,0060	22,2890	46,0710	-0,4621	92,68
A7	3,5002	0,0139	22,2120	47,2480	-0,5169	92,76
Resíduo de Filtragem Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média x 10e2	RMS
R1	3,3734	0,0053	20,8170	43,0100	-0,5226	92,59
R2	3,3942	0,0075	21,3320	43,7060	-0,4954	92,59
R3	3,5220	0,0065	23,8860	47,4610	-0,7213	92,92
R4	3,4102	-0,0001	22,1060	45,7820	-0,4741	92,75
R5	3,3862	0,0051	22,9150	45,1370	-0,5520	92,70
R6	3,5979	0,0039	24,8310	50,4360	-0,5522	92,85
R7	3,4459	0,0102	21,6040	47,0840	-0,4150	92,65
R8	3,4969	0,0118	22,9810	46,6690	-0,4151	92,74

Através da análise das Tab. 6.1 e 6.2, constata-se que comparando os valores obtidos para os parâmetros estatísticos, tanto dos sinais filtrados como dos resíduos, não existem diferenças significativas que poderiam ser indicativos de defeitos que acarretariam na recusa do câmbio no teste de qualidade. Por este motivo, os sinais filtrados e os sinais de resíduos serão analisados em bandas de frequências, através da utilização de filtros Butterworth de quarta ordem com as seguintes configurações:

- Passa baixa em 500 Hz: visando analisar os harmônicos de rotação dos eixos, para avaliar desbalanceamento e desalinhamento;
- Passa baixa em 1000 Hz: visando identificar problemas em rolamentos;
- Passa banda entre 1000 e 3000 Hz: para avaliar a frequência da malha;
- Passa banda entre 1000 e 5000 Hz: para avaliar o primeiro e segundo harmônicos da malha;

- Passa alta em 4000 Hz: para avaliar possíveis modulações em rolamentos.

Os resultados obtidos estão mostrados nas tabelas de 6.3a a 6.4e.

Tabela 6.3 a) Parâmetros calculados para os sinais filtrados e passados no filtro passa baixa 500 Hz.

Filtro Passa Baixa 500 Hz						
Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média x 10e2	RMS
B1	2,0970	-0,0851	1,3196	6,1905	-1,6479	85,70
B2	2,2434	-0,3130	1,2603	6,7239	-1,6338	85,84
B3	2,2599	-0,1498	1,4466	7,7389	-1,6237	85,60
B4	2,0754	-0,0692	1,5508	6,6513	-1,8007	86,46
B5	2,0736	-0,1220	1,2658	6,3775	-1,6413	85,73
B6	2,0869	-0,1202	1,0829	6,1213	-1,6240	85,59
B7	2,0688	-0,0554	1,5508	6,7862	-1,7366	86,13
B8	2,2252	-0,1682	1,2656	7,0507	-1,7502	86,26
Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média x 10e2	RMS
A1	2,1476	-0,0537	1,3621	6,7894	-1,7243	86,06
A2	2,1059	-0,1344	1,1522	6,3826	-1,7475	86,25
A3	2,0854	-0,1043	1,5475	7,6950	-1,8093	86,53
A4	2,1167	-0,2188	1,5275	7,0432	-1,7491	86,41
A5	2,0557	-0,1037	1,5836	6,9080	-1,7227	86,12
A6	2,0104	-0,0959	1,0812	6,3599	-1,7812	86,40
A7	2,1345	-0,1134	1,3848	6,4525	-1,7271	86,12
Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média x 10e2	RMS
R1	2,0908	-0,0916	1,1503	6,3542	-1,7205	86,08
R2	2,0954	-0,1119	1,1893	6,5305	-1,7476	86,22
R3	2,1371	-0,1154	1,1889	5,9068	-1,5214	85,03
R4	2,1804	-0,1198	1,7161	7,5784	-1,7692	86,32
R5	2,1414	-0,1455	1,1428	6,4852	-1,6913	85,96
R6	2,0964	-0,1453	1,1836	6,5839	-1,6906	85,99
R7	2,0705	-0,1115	1,5883	7,2698	-1,8281	86,64
R8	2,0787	-0,0669	1,7018	7,0719	-1,8285	86,59

Tabela 6.3 b) Parâmetros calculados para os sinais filtrados e passados no filtro passa baixa 1000 Hz.

Filtro Passa Baixa 1000 Hz						
Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média x 10e2	RMS
B1	2,3188	-0,0816	1,9758	7,6890	-1,6480	85,86
B2	2,4772	-0,3243	2,3593	8,4128	-1,6339	86,00
B3	2,5219	-0,1510	2,2610	9,4592	-1,6237	85,77
B4	2,3078	-0,0719	2,3168	8,3120	-1,8008	86,61
B5	2,2902	-0,1211	1,9339	7,8112	-1,6414	85,88
B6	2,3002	-0,1192	1,4810	6,8860	-1,6241	85,74
B7	2,2996	-0,0540	2,2838	8,4964	-1,7368	86,29
B8	2,4529	-0,1665	1,8309	8,1170	-1,7502	86,43
Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média x 10e2	RMS
A1	2,3784	-0,0508	1,9963	8,0371	-1,7244	86,21
A2	2,3340	-0,1418	1,7863	7,8922	-1,7477	86,41
A3	2,3153	-0,1107	2,2305	9,4369	-1,8093	86,68
A4	2,3468	-0,2237	2,2619	9,0230	-1,7492	86,57
A5	2,2899	-0,1095	2,4002	8,3995	-1,7228	86,28
A6	2,2393	-0,1066	1,9943	7,9489	-1,7812	86,56
A7	2,3884	-0,1109	2,1066	8,3913	-1,7272	86,29
Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média x 10e2	RMS
R1	2,3205	-0,0929	1,6779	7,6219	-1,7206	86,24
R2	2,3412	-0,1170	1,6784	7,6999	-1,7477	86,38
R3	2,3743	-0,1117	1,9589	7,4759	-1,5214	85,20
R4	2,4215	-0,1181	2,4977	8,6688	-1,7692	86,48
R5	2,3751	-0,1435	1,8862	8,1828	-1,6914	86,11
R6	2,3366	-0,1516	1,8061	8,0504	-1,6908	86,15
R7	2,3002	-0,1195	2,3832	8,7119	-1,8282	86,80
R8	2,3332	-0,0690	2,5074	8,5439	-1,8286	86,76

Tabela 6.3 c) Parâmetros calculados para os sinais filtrados e passados no filtro passa banda 1000 Hz a 3000 Hz.

Filtro Passa Banda 1000 a 3000 Hz						
Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média	RMS
B1	4,5025	-0,0008	5,7207	11,5870	-14,082	78,56
B2	4,9439	-0,0089	9,0328	17,732	-8,8546	80,11
B3	5,3643	-0,0020	8,7820	17,7090	4,7307	80,39
B4	3,9886	0,0127	4,3869	9,5330	11,1665	77,21
B5	4,0713	0,0090	4,7245	9,7540	-1,3376	77,42
B6	3,9210	0,0133	3,6858	8,5390	4,8957	76,07
B7	4,2801	-0,0005	5,8068	11,6750	-9,8938	78,02
B8	5,0231	-0,0075	9,5576	18,2190	1,8297	79,33
Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média	RMS
A1	4,2883	-0,0025	5,875	12,055	-4,7201	78,06
A2	4,6810	0,0025	6,5600	13,7400	-4,1088	79,85
A3	4,3587	0,0001	5,5480	11,8800	7,6851	79,17
A4	5,1048	-0,0204	7,9970	18,3130	-25,912	81,00
A5	4,2867	0,0008	5,4910	10,8030	-6,6823	78,38
A6	4,6412	-0,0137	7,4510	14,7620	4,0981	79,71
A7	5,1467	-0,0127	10,3390	18,8010	12,4370	80,42
Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média	RMS
R1	4,2231	-0,0029	4,946	10,528	-4,3067	77,93
R2	4,4289	0,0096	5,831	11,708	28,6672	78,70
R3	5,7756	0,0013	13,80	21,952	-1,9347	80,68
R4	4,9524	0,0074	7,222	14,608	0,2466	79,87
R5	4,7508	0,0024	6,931	13,568	1,5832	78,01
R6	5,1800	0,0010	9,146	17,868	6,0555	81,61
R7	4,5758	-0,0025	8,5940	15,8810	-9,9102	79,94
R8	4,7217	0,0031	5,210	17,2250	-4,4371	80,79

Tabela 6.3 d) Parâmetros calculados para os sinais filtrados e passados no filtro passa banda 1000 a 5000 Hz.

Filtro Passa Banda 1000 a 5000 Hz						
Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média	RMS
B1	4,3989	0,0018	5,7930	11,7470	2,1378	79,35
B2	4,7872	-0,0110	8,7110	17,0450	-7,9376	80,86
B3	5,2012	-0,0006	9,5890	19,9070	8,2750	81,10
B4	3,9298	0,0082	5,7020	11,0650	6,9965	78,05
B5	4,0400	0,0117	5,6120	10,0810	-14,302	78,25
B6	3,8898	0,0173	4,5330	9,8190	4,5747	76,93
B7	4,1888	0,0120	5,9680	12,0250	-7,9400	78,85
B8	4,7546	-0,0053	10,0080	18,4590	-3,2940	79,98
Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média	RMS
A1	4,2390	-0,0016	6,3770	12,8640	8,7851	78,87
A2	4,5382	0,0006	7,4270	14,5250	-3,7516	80,48
A3	4,3049	0,0021	6,2340	13,0850	1,8679	79,92
A4	4,9474	-0,0077	10,4170	19,4610	-37,746	81,62
A5	4,2816	0,0062	6,4430	12,2430	-11,856	79,21
A6	4,5790	-0,0080	7,2160	14,7700	14,1427	80,49
A7	4,9830	-0,0008	10,9260	20,7110	-3,6708	81,05
Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média	RMS
R1	4,1779	-0,0068	5,5700	10,7440	-7,925	78,71
R2	4,3220	0,0258	6,5440	12,8360	-1,951	79,48
R3	5,5497	0,0039	11,1080	21,8130	-3,433	81,33
R4	4,7077	0,0005	8,0340	15,6720	3,1257	80,59
R5	4,5664	-0,0035	6,7410	14,1320	-5,519	78,77
R6	5,0864	-0,0095	9,3950	18,3140	3,1288	82,36
R7	4,4860	-0,0109	8,3040	16,8280	-9,2959	80,68
R8	4,6589	0,0019	10,9880	20,6170	-4,0717	81,48

Tabela 6.3 e) Parâmetros calculados para os sinais filtrados e passados no filtro passa alta 4000 Hz.

Filtro Passa Alta 4000 Hz						
Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média	RMS
B1	3,8129	-0,0140	1,8643	3,9179	-1,1549	70,03
B2	4,2600	-0,0103	2,3476	4,6995	-0,0032	70,30
B3	4,0411	-0,0086	2,4730	4,8177	0,6290	70,37
B4	3,7019	-0,0107	1,8488	3,8284	-2,5364	69,86
B5	3,8659	-0,0105	1,9332	3,8175	-0,6870	69,51
B6	3,6444	-0,0160	1,9763	3,8012	2,3221	69,25
B7	3,7622	-0,0098	1,8736	3,7360	-0,3276	70,00
B8	3,8706	-0,0076	2,2868	4,3790	-0,9215	70,34
Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média	RMS
A1	3,7457	-0,0071	1,9031	3,8073	1,5087	69,71
A2	3,9365	-0,0182	1,9104	4,2257	-0,571	70,23
A3	3,9825	-0,0131	2,4002	4,6334	0,9494	70,13
A4	4,1799	-0,0108	2,4322	4,9786	-1,623	70,66
A5	3,9810	-0,0086	2,3460	4,7187	0,7908	69,74
A6	3,9354	-0,0113	2,0665	4,2974	-0,186	70,57
A7	4,0615	-0,0097	2,0235	4,0069	1,3174	70,32
Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média	RMS
R1	3,8405	-0,0192	2,1120	4,0087	-0,633	69,59
R2	3,7300	-0,0176	1,7060	3,7483	1,9461	70,28
R3	4,0622	-0,0089	2,9104	4,9760	-0,535	69,92
R4	3,8938	-0,0085	2,2057	4,7748	-2,208	70,45
R5	3,8590	-0,0211	1,8106	3,9238	1,3247	69,35
R6	4,3026	-0,0142	2,5013	4,8217	0,0801	70,94
R7	3,9011	-0,0206	1,9709	4,0965	0,5089	70,64
R8	4,0224	-0,0166	2,2080	4,5758	-0,300	70,76

Tabela 6.4 a) Parâmetros calculados para os resíduos passados no filtro passa baixa 500 Hz.

Filtro Passa Baixa 500 Hz						
Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média x 10	RMS
B1	3,6278	-0,5576	1,0118	5,6149	-5,9581	77,93
B2	3,7733	-0,6669	1,6933	5,9506	-6,0931	78,79
B3	3,3260	-0,5638	1,2555	5,3447	-6,1886	78,52
B4	3,5193	-0,5457	1,0688	4,8811	-4,4217	76,29
B5	3,3630	-0,4882	0,9137	5,3765	-6,0115	77,93
B6	3,3066	-0,5128	1,0618	5,3676	-6,1976	78,20
B7	3,6510	-0,5457	1,1300	5,6681	-5,0637	76,93
B8	3,8560	-0,6234	1,2962	5,6446	-4,9280	76,98
Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média x 10	RMS
A1	3,6225	-0,5784	0,9322	5,7547	-5,1904	77,25
A2	3,5411	-0,5507	1,2804	5,5533	-4,9530	76,97
A3	3,9905	-0,5682	1,2020	5,9940	-4,3464	76,22
A4	4,0550	-0,6846	1,3685	6,2922	-4,9409	77,27
A5	4,0429	-0,5582	1,1223	5,9955	-5,2062	77,04
A6	3,7583	-0,5272	1,1137	5,0438	-4,6213	76,30
A7	3,7906	-0,6119	1,3169	5,8792	-5,1687	77,30
Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média x 10	RMS
R1	3,4419	-0,5683	0,9848	5,2433	-5,2256	77,21
R2	3,6992	-0,6236	1,0711	5,7270	-4,9546	77,08
R3	3,1931	-0,4795	1,2746	6,1170	-7,2133	79,32
R4	4,1385	-0,6671	1,4375	6,5015	-4,7411	77,06
R5	3,8523	-0,6053	1,2909	6,2277	-5,5197	77,55
R6	3,9110	-0,5938	1,1006	5,8747	-5,5210	77,45
R7	4,1202	-0,5652	1,1461	5,5960	-4,1489	75,66
R8	5,2573	-0,8543	1,2831	6,5783	-4,1504	76,32

Tabela 6.4 b) Parâmetros calculados para os resíduos passados no filtro passa baixa 1000 Hz.

Filtro Passa Baixa 1000 Hz						
Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média x 10	RMS
B1	3,4241	-0,1983	3,0270	8,3245	-5,9584	79,82
B2	3,4947	-0,2455	3,3842	9,3496	-6,0932	80,41
B3	3,3572	-0,2143	2,9564	9,0071	-6,1888	80,22
B4	3,2806	-0,1637	3,1567	8,4229	-4,4221	78,83
B5	3,3504	-0,1925	2,8810	8,9259	-6,0116	79,83
B6	3,3098	-0,1882	2,6337	8,4596	-6,1981	79,96
B7	3,4569	-0,1891	3,2021	8,7117	-5,0639	79,19
B8	3,6010	-0,2154	3,5216	9,4909	-4,9286	79,24
Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média x 10	RMS
A1	3,4015	-0,2188	2,8697	8,3719	-5,1909	79,41
A2	3,4062	-0,1455	3,6350	8,7850	-4,9532	79,31
A3	3,4528	-0,1580	3,4058	8,8280	-4,3461	78,83
A4	3,5632	-0,2731	3,3103	8,6340	-4,9414	79,50
A5	3,4675	-0,1853	3,1808	8,8610	-5,2065	79,28
A6	3,4637	-0,1432	3,2428	9,0280	-4,6215	78,86
A7	3,5955	-0,2026	3,5990	10,2250	-5,1686	79,48
Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média x 10	RMS
R1	3,3118	-0,1858	3,0980	8,2025	-5,2259	79,35
R2	3,3775	-0,1937	3,1432	8,7437	-4,9547	79,29
R3	3,3117	-0,1733	3,6592	9,0152	-7,2134	80,80
R4	3,5200	-0,2354	4,0991	9,9029	-4,7413	79,36
R5	3,3892	-0,1974	2,7978	8,2238	-5,5196	79,58
R6	3,5423	-0,1791	3,5395	8,9173	-5,5213	79,57
R7	3,5135	-0,1761	2,8780	7,7920	-4,1492	78,45
R8	3,8311	-0,2811	3,3282	9,6950	-4,1507	78,91

Tabela 6.4 c) Parâmetros calculados para os resíduos passados no filtro passa banda 1000 a 3000 Hz.

Filtro Passa Banda 1000 a 3000 Hz						
Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e3	Pico a Pico x 10e3	Média	RMS
B1	3,4947	-0,0045	1,9334	4,0645	92,3266	91,43
B2	3,5812	-0,0021	2,0797	4,1256	71,8433	91,52
B3	3,6379	-0,0035	2,2492	4,7322	40,3258	91,50
B4	3,3794	-0,0042	1,9935	4,2485	1,7266	91,40
B5	3,3542	-0,0041	1,9335	3,8288	-69,6485	91,45
B6	3,3733	-0,0047	2,0219	4,1204	-11,7675	91,31
B7	3,4177	-0,0031	2,0147	3,9774	6,9219	91,43
B8	3,4900	-0,0034	1,9595	3,9799	-9,6116	91,47
Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e3	Pico a Pico x 10e3	Média	RMS
A1	3,4668	-0,0039	2,1275	4,4818	48,6821	91,43
A2	3,5064	-0,0026	2,1201	4,5759	13,2095	91,56
A3	3,4563	-0,0032	1,9729	3,9493	0,2177	91,51
A4	3,6438	-0,0026	2,2824	4,6035	94,8894	91,67
A5	3,4274	-0,0040	1,8627	3,8252	-1,4625	91,45
A6	3,4735	-0,0041	1,9626	4,0653	-2,0717	91,49
A7	3,6085	-0,0073	2,1794	4,5836	9,7230	91,54
Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e3	Pico a Pico x 10e3	Média	RMS
R1	3,4159	-0,0029	1,9136	3,7910	-12,0039	91,36
R2	3,4299	-0,0058	1,8449	3,7581	-89,1936	91,37
R3	3,6125	-0,0030	2,1372	4,1105	15,7431	91,63
R4	3,4831	-0,0048	2,0594	4,0572	50,6169	91,57
R5	3,4611	-0,0032	2,1044	4,4113	-52,6298	91,46
R6	3,7044	-0,0044	2,2017	4,7531	-31,2429	91,65
R7	3,5168	-0,0011	1,9527	3,9703	-4,0886	91,47
R8	3,5770	-0,0016	1,8957	4,1553	0,6976	91,56

Tabela 6.4 d) Parâmetros calculados para os resíduos passados no filtro passa banda 1000 a 5000 Hz.

Filtro Passa Banda 1000 a 5000 Hz						
Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e3	Pico a Pico x 10e3	Média	RMS
B1	3,4642	-0,0165	2,1422	4,3502	29,2036	92,30
B2	3,5452	-0,0162	2,2196	4,3251	94,6641	92,37
B3	3,5804	-0,0225	2,3326	4,8688	-6,6239	92,37
B4	3,3678	-0,0188	2,0846	4,3282	-21,7587	92,24
B5	3,3473	-0,0197	2,0703	4,0531	23,2365	92,29
B6	3,3569	-0,0191	2,0343	4,1054	-56,7474	92,18
B7	3,3998	-0,0180	2,0479	4,1077	-20,3996	92,27
B8	3,4503	-0,0172	2,1160	4,3188	-13,6471	92,31
Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e3	Pico a Pico x 10e3	Média	RMS
A1	3,4340	-0,0198	2,2707	4,5595	-30,5831	92,28
A2	3,4705	-0,0156	2,2019	4,5555	16,2468	92,39
A3	3,4253	-0,0201	2,3245	4,4234	-4,4943	92,34
A4	3,5822	-0,0186	2,3087	5,1249	86,0291	92,49
A5	3,4105	-0,0148	2,0445	4,0058	7,2420	92,29
A6	3,4531	-0,0198	2,2536	4,3236	25,5756	92,33
A7	3,5343	-0,0213	2,2287	4,5623	26,5404	92,39
Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e3	Pico a Pico x 10e3	Média	RMS
R1	3,3997	-0,0175	2,0567	3,9801	-23,2374	92,21
R2	3,4174	-0,0186	2,0186	4,1395	22,6830	92,22
R3	3,5726	-0,0133	2,1962	4,4222	9,4372	92,49
R4	3,4457	-0,0171	2,0233	4,1944	44,9317	92,39
R5	3,4221	-0,0203	2,1402	4,5371	-10,5687	92,31
R6	3,6539	-0,0188	2,3393	4,9086	-76,5337	92,49
R7	3,4790	-0,0209	2,0896	4,2008	27,4021	92,32
R8	3,5386	-0,0192	2,1272	4,4098	-8,0334	92,39

Tabela 6.4 e) Parâmetros calculados para os resíduos passados no filtro passa alta 4000 Hz.

Filtro Passa Alta 4000 Hz						
Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e3	Média	RMS
B1	3,5724	-0,0200	7,4449	1,6112	11,9131	82,38
B2	3,6346	-0,0240	7,9760	1,5853	5,7177	82,25
B3	3,5680	-0,0222	7,5143	1,5602	4,3234	82,32
B4	3,4948	-0,0233	7,0275	1,4462	-8,6862	82,11
B5	3,5126	-0,0205	7,3913	1,5328	-13,5564	82,24
B6	3,5101	-0,0216	7,0881	1,5043	13,9151	82,23
B7	3,5158	-0,0200	7,3038	1,4732	1,2565	82,19
B8	3,5282	-0,0205	7,0211	1,4438	-4,1562	82,25
Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e3	Média	RMS
A1	3,5004	-0,0226	7,1404	1,4545	3,6979	82,25
A2	3,5392	-0,0205	7,1542	1,4704	-10,2770	82,28
A3	3,4960	-0,0214	6,6668	1,4562	-2,4857	82,20
A4	3,5195	-0,0205	6,6629	1,4054	-7,0885	82,30
A5	3,5057	-0,0238	6,9488	1,4388	7,2317	82,24
A6	3,5317	-0,0209	6,9598	1,4669	-3,0474	82,21
A7	3,5334	-0,0236	7,1825	1,4926	-0,0628	82,31
Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e3	Média	RMS
R1	3,4728	-0,0200	7,0414	1,4937	-5,6851	82,19
R2	3,5430	-0,0224	6,9103	1,4438	-1,1347	82,17
R3	3,5338	-0,0241	6,9283	1,4821	0,2678	82,40
R4	3,5171	-0,0241	7,2944	1,5545	-4,3386	82,11
R5	3,5210	-0,0194	7,3523	1,5345	-2,7362	82,33
R6	3,5407	-0,0229	8,0056	1,5173	4,0442	82,28
R7	3,5314	-0,0215	7,5039	1,5465	-5,2214	82,19
R8	3,5327	-0,0196	7,7290	1,5262	-3,8424	82,25

Pela análise das tabelas 6.3a a 6.4e, não se consegue estipular um critério para reprovação dos câmbios testados, pois não há um padrão significativo de variação dos parâmetros calculados.

Como tentativa de encontrar uma metodologia válida, optou-se por realizar o mesmo procedimento aos sinais de pressão sonora.

6.4 Análise dos Sinais de Pressão Sonora

Os procedimentos adotados para a análise dos sinais de pressão sonora foram os mesmos efetuados para os sinais de vibração.

O sinal de referência, escolhido dentre os onze sinais de câmbios bons coletados, foi aquele cuja curva RMS mais se aproximou da curva de valor médio (Fig. 6.11), sendo este, novamente, o câmbio B9.

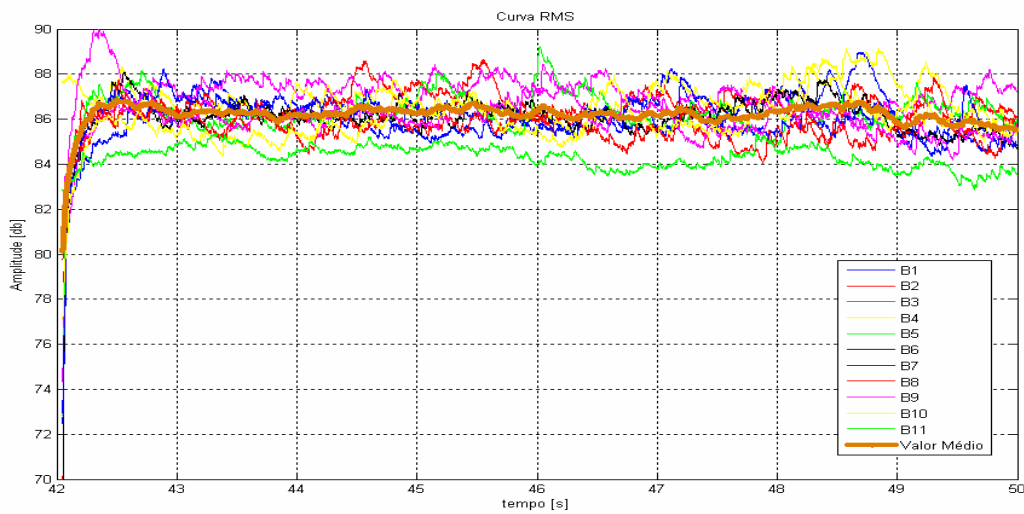


Figura 6.11 – Curvas RMS e de Valor Médio dos sinais de engrenamento taxados como bons.

Os parâmetros do filtro foram estimados adicionando-se um ruído branco ao sinal de referência com amplitude de mesma proporção. As Fig. 6.12 e 6.13 ilustram as comparações das DEP e a curvas RMS dos sinais de referência, primário e filtrado, respectivamente, para os parâmetros otimizados $L = 8$, $\mu = 0,01$ e $\alpha = 0,001$.

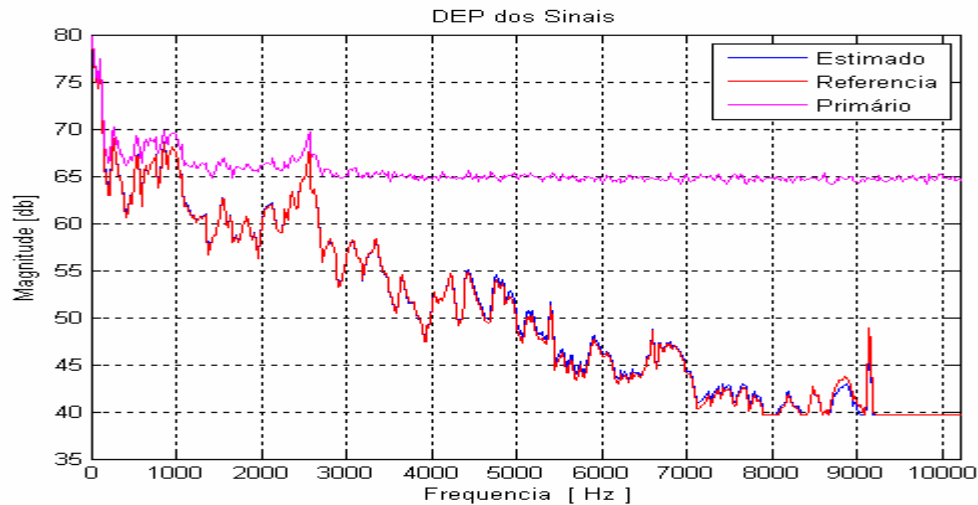


Figura 6.12 – Comparação entre as densidades espectrais de potência dos sinais.

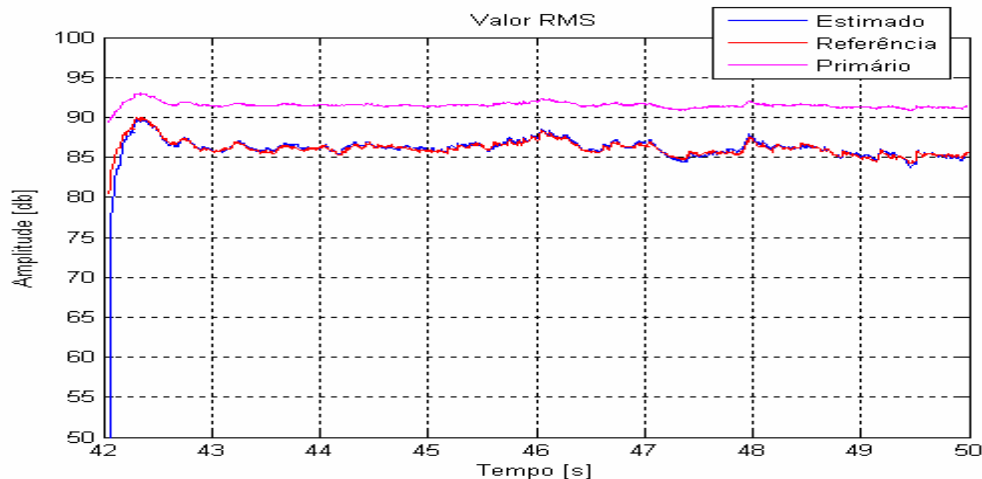


Figura 6.13 - Comparação entre as curvas de valor absoluto (RMS) dos sinais.

Através das análises dos gráficos das Fig. 6.12, 6.13, constata-se que o filtro age de maneira eficaz, aproximando o sinal primário do sinal de referência com um erro médio de aproximadamente 0,035 dB.

Da mesma forma que para os sinais de vibração, foram realizados processos de otimização em todos os sinais dentro do intervalo de tempo de 42 a 50 segundos, visando encontrar o ponto onde a rotação em cada sinal fosse a mesma do instante de início do sinal de referência, sendo este o ponto de partida para a aquisição dos sinais a serem analisados.

Os sinais foram filtrados e então calculados os parâmetros estatísticos:

- Valor médio [MPa];

- Valor de pico [MPa];
- Valor pico a pico [MPa];
- Kurtosis;
- Skewness;
- Valor médio RMS [dB].

As Tab. 6.5 e 6.6 mostram os parâmetros calculados para os sinais filtrados e resíduos de filtragem respectivamente.

Tabela 6.5 – Parâmetros calculados para os sinais de engrenamento filtrados:

Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10e3	RMS
B1	7,4350	0,2965	1,8268	3,4937	1,0178	87,50
B2	7,2014	0,3160	1,9596	3,9473	2,1652	88,19
B3	7,9731	0,0615	1,9676	4,4242	1,5372	88,64
B4	8,5749	0,1233	2,3200	4,4541	1,3246	88,61
B5	8,9618	0,0368	3,1633	5,4071	1,5211	88,33
B6	7,8515	0,4010	1,8579	4,2196	2,0599	87,87
B7	8,3687	0,1449	2,0887	4,1660	0,3864	87,98
B8	8,0004	0,4461	1,9762	3,7294	1,6352	88,14
Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10e3	RMS
A1	8,6450	0,3278	2,1863	3,9304	0,8954	87,38
A2	9,7203	0,8367	2,1536	3,8128	2,7366	86,92
A3	6,6881	0,7523	1,2702	2,3213	3,1079	83,86
A4	7,6991	0,8149	1,2950	2,3720	2,8903	84,15
A5	6,5810	0,8612	0,9815	1,8456	3,1081	82,20
A6	8,6852	0,8862	2,8860	4,5591	3,5984	87,92
A7	8,0635	0,4535	2,0449	4,0695	2,5783	87,51
Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10e3	RMS
R1	7,8290	0,1510	2,0605	4,2479	1,0984	88,36
R2	7,7714	0,2046	2,4748	4,4607	1,2136	88,90
R3	12,0035	0,7121	3,4002	5,4277	0,4896	88,91
R4	7,5288	0,2311	1,6533	3,3722	1,1706	87,62
R5	7,8741	0,2293	2,4198	4,4474	0,9795	88,35
R6	8,7301	0,8846	3,0541	4,8008	3,9060	89,14
R7	6,7007	0,8271	1,2863	2,3301	3,1875	82,92
R8	8,9799	0,9400	2,3574	4,0711	3,3461	87,89

Tabela 6.6 – Parâmetros calculados para os resíduos da filtragem:

Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e6	Média x 10e3	RMS
B1	3,9486	0,0180	3,9663	0,7739	2,1202	96,922
B2	3,9300	-0,0218	4,1079	0,8168	0,9154	97,196
B3	4,0518	-0,0072	4,6176	0,8412	1,5510	97,266
B4	4,2587	0,0463	4,1659	0,8707	1,8404	96,809
B5	3,8972	0,0292	4,1182	0,7797	1,5657	96,589
B6	4,3393	-0,0680	4,1233	0,9450	1,0275	96,612
B7	4,3345	0,0414	5,1054	1,0523	2,7324	97,028
B8	4,0585	0,0046	4,4741	0,8310	1,4942	96,227
Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e6	Média x 10e3	RMS
A1	3,9094	0,0520	4,3387	0,7889	2,238	96,53
A2	3,8304	-0,0721	3,6588	0,8075	3,723	96,77
A3	3,4820	-0,0882	3,7128	0,6984	0,172	96,44
A4	3,5307	-0,0849	3,6612	0,7592	2,394	96,52
A5	3,3791	-0,1179	2,9163	0,6778	0,167	96,36
A6	3,8922	-0,1333	3,2568	0,7911	-5,304	96,62
A7	3,7988	-0,0570	3,6083	0,7461	5,074	96,67
Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e6	Média x 10e3	RMS
R1	3,9657	0,0107	3,9883	0,7644	2,039	96,90
R2	4,1061	0,0189	4,0846	0,8314	1,872	96,93
R3	3,8823	0,0497	4,0071	0,7494	2,648	96,90
R4	3,8016	0,0439	3,4146	0,6867	1,918	96,44
R5	3,9220	-0,0006	3,5716	0,7487	2,106	97,08
R6	3,9327	-0,0963	4,4035	0,8325	-0,769	97,00
R7	3,4322	-0,0829	3,4233	0,6941	-1,195	96,25
R8	3,8195	-0,1387	3,7138	0,7651	-2,723	96,85

Através da análise das Tab. 6.5 e 6.6, comparando os valores obtidos para os parâmetros estatísticos, tanto dos sinais filtrados como dos resíduos, não existem diferenças significativas que poderiam ser indicativas de defeitos que acarretariam na recusa do câmbio no teste de qualidade. Por este motivo, os sinais filtrados e os sinais de resíduos também serão analisados em bandas de frequências, através da utilização de filtros Butterworth de quarta ordem com as seguintes configurações:

- Passa baixa em 500 Hz: visando analisar os harmônicos de rotação dos eixos, para avaliar desbalanceamento e desalinhamento;
- Passa baixa em 1000 Hz: visando identificar problemas em rolamento;
- Passa banda entre 1000 e 3000 Hz: para avaliar a frequência de malha;
- Passa banda entre 1000 e 5000 Hz: para avaliar o primeiro e segundo harmônicos de malha;

- Passa alta em 4000 Hz: para avaliar possíveis modulações em rolamentos.

Os resultados obtidos estão mostrados nas Tab. 6.7a a 6.8e.

Tabela 6.7 a) Parâmetros calculados para os sinais filtrados e passados no filtro passa baixa 500 Hz.

Filtro Passa Baixa 500 Hz						
Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10e3	RMS
B1	7,2555	0,3154	1,5254	2,6876	1,0179	86,3854
B2	7,2733	0,3421	1,6188	3,1165	2,1667	87,0241
B3	8,2299	0,1208	1,4623	3,3111	1,5385	87,4217
B4	8,8995	0,1240	1,7593	3,6911	1,3266	87,4910
B5	8,6539	-0,0454	1,9300	3,6456	1,5213	87,2170
B6	8,1201	0,4488	1,3956	3,1854	2,0596	86,7139
B7	8,3188	0,1729	1,7052	3,3271	0,3904	86,9152
B8	7,7577	0,4463	1,7149	3,1515	1,6347	87,1983
Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10e3	RMS
A1	8,3785	0,3167	1,7037	2,8958	0,8934	86,3555
A2	9,5531	0,9442	1,6063	2,6954	2,7339	85,3682
A3	6,7408	0,9417	0,8943	1,5311	3,1078	82,3412
A4	7,6258	0,8548	0,9777	1,8221	2,8910	82,9834
A5	6,8008	1,0864	0,6786	1,2638	3,1082	80,7274
A6	8,0881	0,9179	1,8423	2,9267	3,5969	86,8767
A7	7,8110	0,4377	1,4908	3,1873	2,5794	86,4581
Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10e3	RMS
R1	7,9231	0,1895	1,3543	3,0350	1,0964	87,2776
R2	7,7311	0,2124	1,7005	3,2630	1,2141	87,6520
R3	13,0096	0,8394	2,7204	4,4733	0,4891	87,9305
R4	7,3634	0,2338	1,4222	2,7337	1,1707	86,5935
R5	7,8242	0,2165	2,0581	3,5064	0,9790	87,2914
R6	8,7330	0,9644	2,0976	3,4420	3,9068	87,9022
R7	6,7394	1,0389	0,8888	1,5862	3,1872	81,3204
R8	9,2289	1,0701	1,8530	3,0446	3,3510	86,7648

Tabela 6.7 b) Parâmetros calculados para os sinais filtrados e passados no filtro passa baixa 1000 Hz.

Filtro Passa Baixa 1000 Hz						
Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10e3	RMS
B1	7,5511	0,3171	1,6098	3,2187	1,0179	87,0402
B2	7,4914	0,3346	1,7971	3,6251	2,1659	87,7126
B3	8,2347	0,0846	1,6869	3,8303	1,5380	88,1319
B4	8,9166	0,1347	2,0169	3,9073	1,3260	88,1595
B5	9,0688	0,0241	2,5646	4,5480	1,5216	87,8897
B6	8,1646	0,4289	1,6931	3,7943	2,0594	87,4075
B7	8,6234	0,1665	1,9762	3,8635	0,3883	87,5673
B8	8,0676	0,4626	1,9099	3,6471	1,6349	88,8074
Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10e3	RMS
A1	8,6492	0,3340	2,0212	3,5104	0,8942	87,0112
A2	10,4072	0,9327	2,0086	3,3360	2,7371	86,2947
A3	7,0975	0,8789	1,0794	1,8815	3,1079	83,1616
A4	7,7655	0,8543	1,2319	2,1479	2,8908	83,6909
A5	6,9480	0,9870	0,8427	1,6012	3,1081	81,5367
A6	8,5354	0,9013	2,5091	3,9148	3,5975	87,5483
A7	8,1215	0,4780	1,8472	3,7634	2,5791	87,1003
Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10e3	RMS
R1	7,9632	0,1678	1,7176	3,7784	1,0967	87,9396
R2	7,9487	0,2284	2,2836	3,9750	1,2141	88,4195
R3	12,6765	0,7704	3,2228	5,1225	0,4889	88,5348
R4	7,6097	0,2403	1,7468	3,2971	1,1706	87,2306
R5	7,9416	0,2250	2,0116	3,8827	0,9790	87,9382
R6	9,0601	0,9558	2,6890	4,2386	3,9062	88,6199
R7	7,0800	0,9443	1,1060	2,1409	3,1873	82,1585
R8	9,4418	1,0040	2,1732	3,7894	3,3490	87,4547

Tabela 6.7 c) Parâmetros calculados para os sinais filtrados e passados no filtro passa banda 1000 Hz a 3000 Hz.

Filtro Passa Banda 1000 a 3000 Hz						
Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média x 10	RMS
B1	5,8000	0,0072	0,4841	1,0481	0,5666	76,9504
B2	5,2775	0,0047	0,5734	1,1435	-0,5968	77,7414
B3	5,2687	0,0185	0,7034	1,3295	-0,4476	78,5167
B4	5,1945	0,0150	0,5564	1,1550	1,2349	77,9950
B5	5,9759	0,0033	0,6262	1,2779	0,2536	77,5818
B6	5,1950	-0,0036	0,5585	1,1038	-0,1526	77,3666
B7	5,2774	-0,0122	0,5717	1,0042	-1,2320	76,9988
B8	6,1264	0,0147	0,5441	1,2000	0,0910	76,2184
Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média x 10	RMS
A1	6,7368	-0,0019	0,5338	1,1662	-0,0267	75,8433
A2	6,1688	0,0050	0,6787	1,2923	4,2831	77,6805
A3	4,7866	0,0071	0,3701	0,8252	-0,0420	75,1009
A4	6,3907	0,0122	0,5027	1,0342	0,1910	73,6028
A5	4,9410	0,0185	0,3046	0,6240	-0,0708	73,1917
A6	6,9342	0,0127	0,7540	1,3737	-1,8955	76,4871
A7	6,1742	0,0215	0,5714	1,1433	-0,0358	76,4542
Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e2	Pico a Pico x 10e2	Média x 10	RMS
R1	5,2883	0,0135	0,5229	1,0754	-3,0412	77,4715
R2	5,8160	0,0284	0,6537	1,3531	-0,0562	78,5642
R3	6,4599	-0,0150	0,6031	1,2872	-3,0243	77,4492
R4	5,5755	0,0423	0,5508	1,0108	0,2615	76,4081
R5	5,8424	-0,0094	0,5925	1,1644	-0,9987	77,3233
R6	5,4104	0,0041	0,7510	1,5202	-0,0920	79,1312
R7	5,0967	0,0287	0,4848	0,8684	-0,0856	74,5100
R8	5,2123	0,0175	0,5599	1,0340	-0,2936	77,1488

Tabela 6.7 d) Parâmetros calculados para os sinais filtrados e passados no filtro passa banda 1000 a 5000 Hz.

Filtro Passa Banda 1000 a 5000 Hz						
Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10e3	RMS
B1	5,6092	0,0019	0,4940	1,0571	0,2982	77,3575
B2	5,1861	-0,0026	0,6355	1,2026	0,1736	78,2240
B3	5,1617	0,0102	0,7321	1,3804	-1,4179	78,9317
B4	5,1726	-0,0073	0,6011	1,1627	0,9298	78,4290
B5	5,8531	0,0117	0,6823	1,2952	0,7205	78,0207
B6	5,0798	-0,0129	0,5186	1,2003	-0,9416	77,7903
B7	5,2709	-0,0125	0,5100	1,0337	0,0630	77,4285
B8	6,0832	0,0183	0,6163	1,2317	-0,3924	76,6173
Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10e3	RMS
A1	6,7710	0,0013	0,7165	1,3297	-0,7552	76,2406
A2	5,9926	0,0108	0,6586	1,2914	4,6684	78,0432
A3	4,7959	0,0026	0,4800	0,9240	0,0486	75,5183
A4	6,2929	0,0145	0,6484	1,1818	0,5155	73,9896
A5	4,8894	0,0038	0,3064	0,6545	0,1356	73,6273
A6	6,9651	-0,0198	0,7779	1,5471	-2,3156	76,9150
A7	6,0530	-0,0001	0,5773	1,1080	-0,3685	76,8559
Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10e3	RMS
R1	5,1970	-0,0007	0,6124	1,1593	-3,1591	77,8434
R2	5,7269	0,0177	0,7448	1,4497	1,2562	78,9124
R3	6,3982	-0,0068	0,6128	1,3317	-2,4031	77,8786
R4	5,5501	0,0078	0,5612	1,1111	0,2397	76,8210
R5	5,7884	-0,0355	0,5988	1,2167	-0,5272	77,7608
R6	5,3759	-0,0014	0,8180	1,5635	-1,2912	79,5018
R7	4,9637	0,0154	0,4322	0,8567	-0,1550	74,9158
R8	5,1511	0,0190	0,5900	1,1158	-0,3624	77,5617

Tabela 6.7 e) Parâmetros calculados para os sinais filtrados e passados no filtro passa alta 4000 Hz.

Filtro Passa Alta 4000 Hz						
Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e4	Pico a Pico x 10e5	Média	RMS
B1	5,0185	-0,0122	0,8977	1,9518	19,0709	61,7535
B2	5,8443	0,0139	1,3534	2,5419	-107,0576	63,9438
B3	5,0755	0,0104	1,0782	2,4995	144,6528	64,2925
B4	5,2050	-0,0055	1,0306	2,2801	30,8450	63,6450
B5	5,1076	-0,0047	1,0331	2,2787	-90,5533	62,9107
B6	5,0345	0,0063	1,0927	2,2151	111,5264	63,0759
B7	5,4875	0,0003	1,0950	2,0537	-156,4542	61,7524
B8	5,0217	0,0112	0,8977	1,8760	46,1855	61,2094
Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e4	Pico a Pico x 10e5	Média	RMS
A1	4,9422	-0,0086	0,8368	1,7469	109,2667	60,8601
A2	5,4166	0,0145	1,0304	2,2260	-32,7041	62,2030
A3	5,1976	0,0004	1,0294	1,9858	4,1892	60,3973
A4	4,8440	-0,0093	0,7978	1,3751	-43,0372	58,1581
A5	5,0747	0,0002	0,6897	1,2763	35,7767	58,8123
A6	5,6992	0,0062	1,1582	2,1778	-15,3584	61,1348
A7	5,4245	0,0057	0,8199	1,5540	63,4183	60,5783
Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e4	Pico a Pico x 10e5	Média	RMS
R1	4,9046	0,0067	0,9432	2,0786	-89,3969	62,2926
R2	5,1104	0,0111	1,2282	2,3925	-4,9921	62,6636
R3	5,2275	-0,0009	0,9801	1,9103	-31,1469	62,0600
R4	5,3292	0,0136	1,1459	2,3164	-12,6914	61,3359
R5	4,6804	-0,0017	0,8567	1,7322	-3,8948	62,5804
R6	5,0825	-0,0080	1,1872	2,5787	-8,0573	63,9442
R7	5,0092	-0,0138	0,8480	1,5063	12,4989	59,7074
R8	4,6836	-0,0060	1,0631	2,2644	-60,4896	62,6884

Tabela 6.8 a) Parâmetros calculados para os resíduos passados no filtro passa baixa 500 Hz.

Filtro Passa Baixa 500 Hz						
Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10e3	RMS
B1	4,6145	0,0302	2,7277	5,3572	2,1238	94,8978
B2	4,5404	-0,0397	3,2492	6,1050	0,9156	95,2640
B3	4,5799	-0,0259	3,0467	5,8036	1,5464	95,2593
B4	5,1652	0,0847	3,2804	6,2972	1,8306	94,7546
B5	4,5755	0,0894	3,0354	5,7099	1,5635	94,4147
B6	5,2045	-0,1211	2,7608	6,3786	1,0212	94,4261
B7	5,1062	0,0593	3,2845	7,0336	2,7216	95,0014
B8	4,9890	0,0026	2,8389	5,9187	1,4906	93,9254
Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10e3	RMS
A1	4,4217	0,0882	3,1470	5,7084	2,2348	94,3695
A2	4,2578	-0,1027	2,7677	5,7548	0,3595	94,6976
A3	3,7766	-0,1604	2,5101	4,7193	0,0166	94,2003
A4	3,9407	-0,1320	2,8372	5,5394	0,2325	94,3642
A5	3,6711	-0,2211	2,3104	4,7928	0,0162	94,1459
A6	4,4511	-0,2206	2,2878	5,2204	-0,5310	94,4666
A7	4,3171	-0,1003	2,4024	5,0212	0,5004	94,5264
Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10e3	RMS
R1	4,5267	-0,0078	2,7551	5,3242	2,0466	94,8418
R2	4,7883	0,0365	2,9240	5,7309	1,8710	94,8894
R3	4,3771	0,0516	2,9757	5,4451	2,6534	94,8608
R4	4,5241	0,0641	2,6356	4,8911	1,9176	94,2445
R5	4,5590	0,0063	2,9912	5,7604	2,1073	95,1197
R6	4,5377	-0,1581	2,9863	5,7808	-0,7660	94,9826
R7	3,7612	-0,1587	2,5873	4,8279	-0,1220	93,9577
R8	4,4830	-0,2468	2,7883	5,5413	-0,2674	94,7683

Tabela 6.8 b) Parâmetros calculados para os resíduos passados no filtro passa baixa 1000 Hz.

Filtro Passa Baixa 1000 Hz						
Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10e3	RMS
B1	4,4807	0,0336	3,8645	6,8669	2,1199	95,7567
B2	4,4226	-0,0295	3,8220	7,5883	0,9145	96,0843
B3	4,4850	-0,0118	3,5974	7,1012	1,5473	96,1165
B4	4,9755	0,0774	3,8289	7,6624	1,8352	95,6269
B5	4,4075	0,0563	3,6386	6,7373	1,5622	95,3446
B6	5,1505	-0,0953	3,5491	8,0761	1,0250	95,3742
B7	5,0737	0,0589	4,3863	9,1758	2,7278	95,8699
B8	4,7707	0,0145	3,7863	7,5482	1,4922	94,9139
Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10e3	RMS
A1	4,4371	0,0807	3,6929	6,7891	2,2353	95,2966
A2	4,2696	-0,1009	3,1327	6,8924	0,3648	95,5777
A3	3,7934	-0,1256	3,2674	6,1418	0,0163	95,1417
A4	3,8732	-0,1153	3,0092	6,3645	0,2362	95,2654
A5	3,6322	-0,1740	2,6153	5,7970	0,0169	95,0663
A6	4,3539	-0,1813	2,7456	6,7903	-0,5310	95,3936
A7	4,2350	-0,0894	2,8415	6,1647	0,5026	95,4376
Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10e3	RMS
R1	4,4015	0,0158	3,6026	6,6842	2,0442	95,7304
R2	4,6538	0,0329	3,4789	6,8496	1,8703	95,7759
R3	4,3180	0,0732	3,4417	6,409	2,6506	95,7332
R4	4,3247	0,0613	3,0074	5,8577	1,9174	95,1701
R5	4,3757	0,0026	3,1551	6,4501	2,1091	95,9576
R6	4,4327	-0,1325	4,2588	7,7703	-0,7693	95,8489
R7	3,7410	-0,1256	3,2166	6,0848	-0,1213	94,9232
R8	4,2542	-0,1998	3,4554	6,4718	-0,2698	95,6420

Tabela 6.8 c) Parâmetros calculados para os resíduos passados no filtro passa banda 1000 a 3000 Hz.

Filtro Passa Banda 1000 a 3000 Hz						
Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10	RMS
B1	3,2361	-0,0037	1,4674	3,1082	-5,6331	89,7311
B2	3,2445	-0,0026	1,4449	3,2025	-1,3064	89,8134
B3	3,3068	0,0034	1,6549	3,2803	0,0082	90,0311
B4	3,2484	-0,0046	1,6011	3,1628	1,9390	89,6801
B5	3,2393	0,0030	1,4455	3,0160	-5,9905	89,6518
B6	3,2456	-0,0036	1,5095	3,2178	-0,5525	89,6534
B7	3,2354	-0,0083	1,4499	3,0316	3,2486	89,8194
B8	3,1564	0,0020	1,3981	2,9615	-2,8347	89,4951
Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10	RMS
A1	3,1727	-0,0004	1,6412	3,2338	-4,1504	89,5694
A2	3,2282	0,0022	1,4199	2,9061	-2,0843	89,6635
A3	3,2002	-0,0031	1,5903	3,1860	-2,0671	89,6370
A4	3,1230	-0,0020	1,4708	2,9743	0,7536	89,6002
A5	3,1504	-0,0008	1,4839	2,9481	-4,8862	89,5583
A6	3,2070	-0,0049	1,4654	2,9983	-4,4945	89,6263
A7	3,1690	0,0001	1,4605	2,9421	0,5257	89,6723
Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10	RMS
R1	3,2443	0,0033	1,4999	3,0310	2,5423	89,6997
R2	3,2749	0,0000	1,6265	3,4308	-1,1876	89,7275
R3	3,2036	0,0061	1,4097	2,9979	-4,0780	89,6745
R4	3,1861	-0,0048	1,5581	2,9966	-2,8537	89,5576
R5	3,2142	0,0083	1,4631	3,0963	6,3137	89,7318
R6	3,3144	0,0029	1,5023	3,0027	-5,6646	89,7464
R7	3,1869	-0,0027	1,3532	2,7806	-0,7435	89,5524
R8	3,2354	0,0024	1,4448	3,1084	-0,2433	89,7957

Tabela 6.8 d) Parâmetros calculados para os resíduos passados no filtro passa banda 1000 a 5000 Hz.

Filtro Passa Banda 1000 a 5000 Hz						
Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10	RMS
B1	3,2415	0,0096	1,7734	3,6471	-6,5031	80,4248
B2	3,2471	0,0118	1,6254	3,3955	-3,1957	80,5087
B3	3,3208	0,0224	1,7884	3,5932	0,3108	80,7086
B4	3,2527	0,0183	1,7574	3,4105	0,2637	80,3692
B5	3,2479	0,0113	1,5879	3,2557	-9,8198	80,3395
B6	3,2413	0,0195	1,6268	3,4093	6,4766	80,3416
B7	3,2447	0,0118	1,7603	3,4700	-0,6843	80,5063
B8	3,1690	0,0134	1,6206	3,2207	-4,5109	80,1804
Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10	RMS
A1	3,1744	0,0109	1,6041	3,3441	-6,4536	80,2652
A2	3,2350	0,0117	1,5418	3,2242	-1,1116	80,3602
A3	3,2021	0,0167	1,5570	3,3948	-1,9436	80,3419
A4	3,1311	0,0140	1,5749	3,2550	4,8548	80,2998
A5	3,1581	0,0182	1,5861	3,0831	-4,7606	80,2583
A6	3,2297	0,0159	1,5802	3,2086	-1,9557	80,3188
A7	3,1950	0,0120	1,5550	3,2804	2,7380	80,3686
Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e5	Pico a Pico x 10e5	Média x 10	RMS
R1	3,251	0,0218	1,6376	3,4185	0,6874	80,3984
R2	3,2815	0,0164	1,6496	3,3547	-1,6603	80,4074
R3	3,218	0,0204	1,6698	3,2755	-0,5265	80,3792
R4	3,2054	0,0152	1,6624	3,3281	-3,0043	80,2574
R5	3,2319	0,0221	1,7005	3,396	9,4964	80,4277
R6	3,2858	0,017	1,6543	3,3868	-9,3356	80,4521
R7	3,1947	0,0183	1,7121	3,2771	-0,1391	80,2469
R8	3,2581	0,0180	1,8272	3,4985	2,7541	80,4919

Tabela 6.8 e) Parâmetros calculados para os resíduos passados no filtro passa alta 4000 Hz.

Filtro Passa Alta 4000 Hz						
Câmbios Bons						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e4	Pico a Pico x 10e5	Média	RMS
B1	3,2931	0,0091	5,3782	1,0384	6,2464	80,1645
B2	3,3236	0,0072	5,6277	1,1417	-14,2544	80,3557
B3	3,4157	0,0066	6,5107	1,2569	39,7657	80,4685
B4	3,3046	0,0100	5,2640	1,0306	15,1063	80,0283
B5	3,2854	0,0086	4,9034	0,9928	65,8121	80,0419
B6	3,3428	0,0097	5,4042	1,0437	-91,0103	80,0601
B7	3,2816	0,0083	5,1085	1,0243	82,2709	80,2069
B8	3,2709	0,0078	5,3928	1,0330	-22,4684	79,8599
Câmbios Aceitáveis						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e4	Pico a Pico x 10e5	Média	RMS
A1	3,2507	0,0114	5,0866	0,9965	-16,7867	80,0058
A2	3,3011	0,0070	5,1442	1,0070	6,5971	80,1440
A3	3,2778	0,0090	5,3998	1,0636	-6,190	80,2266
A4	3,2476	0,0094	4,9495	1,0002	30,6898	80,1374
A5	3,2613	0,0092	5,2159	1,0542	35,2573	80,0804
A6	3,2636	0,0085	5,5668	1,0719	-1,6855	80,0333
A7	3,2695	0,0085	5,2529	1,0572	-40,8731	80,1625
Câmbios Recusados						
Câmbio	Kurtosis	Skewness	Pico x 10e4	Pico a Pico x 10e5	Média	RMS
R1	3,3259	0,0084	5,6558	1,1083	3,7240	80,2741
R2	3,2970	0,0089	5,2330	1,0316	-41,6661	79,9977
R3	3,3129	0,0090	5,1205	1,0532	-27,8196	80,2143
R4	3,2871	0,0077	5,1154	1,0038	26,3085	80,0111
R5	3,2944	0,0090	4,8708	0,9963	42,2740	80,2595
R6	3,2837	0,0086	5,0651	1,0279	-5,0459	80,2796
R7	3,2715	0,0095	5,3171	1,0669	8,1541	80,0575
R8	3,3464	0,0101	5,7786	1,1241	49,1433	80,3635

Pela análise das Tab. 6.7a a 6.8e, não se consegue estipular um critério para reprovação dos câmbios testados, pois, novamente, não há um padrão de variação dos parâmetros calculados.

Uma vez que os peritos responsáveis pelo banco prova câmbio conseguem avaliar níveis de rumorosidade de um câmbio em um ciclo de prova, procurou-se desenvolver um procedimento passa não passa que simulasse o ouvido humano, o qual avalia a amplitude do som pelo nível médio quadrático e pelo espectro (Gerges, 1992).

Em função disto, o procedimento desenvolvido consiste de 4 etapas:

1. Filtrar o sinal utilizando um sinal de câmbio bom como sinal de referência (memória associativa);
2. Filtrar o sinal em bandas específicas de frequência (análise espectral);

3. Quadrar o sinal e aplicar uma média exponencial com tempo de resposta de 0,125 segundos (circuito RMS de resposta rápida);
4. Comparar com curvas limites de aceitação

Os valores RMS máximo e mínimo encontrados dentre todas as curvas de câmbios bons foram estipulados como limites de tolerância para a aceitação dos câmbios. Contudo, foram eliminados os valores (de mínimo e de máximo) mais distantes das curvas RMS, pois poderiam provocar um alargamento da faixa de aceitação. Os valores máximo e mínimo dos câmbios testados foram comparados com estes valores limites e então o câmbio foi caracterizado como aceito ou reprovado.

As Tab. 6.9 e 6.10 mostram os resultados destas comparações efetuadas para os sinais de vibração, onde A se refere à aceitação nos testes e R se refere à recusa nos testes.

Tabela 6.9 - Critério de aprovação para os sinais filtrados.

Câmbios Aceitáveis								
Tipo de Filtragem \ Câmbio	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	
LMS	A	A	A	R	A	A	A	
LMS + Filtro passa baixa 500	A	A	A	R	A	R	A	
LMS + Filtro passa baixa 1000	A	A	A	R	A	R	A	
LMS + Filtro passa banda 1000 3000	A	R	A	R	A	A	R	
LMS + Filtro passa banda 1000 5000	A	A	A	R	A	A	R	
LMS + Filtro passa alta 4000	A	A	R	R	A	A	A	
Câmbios Recusados								
Tipo de Filtragem \ Câmbio	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
LMS	A	A	R	R	A	R	A	A
LMS + Filtro passa baixa 500	A	A	R	R	A	A	A	R
LMS + Filtro passa baixa 1000	A	A	R	R	A	A	A	R
LMS + Filtro passa banda 1000 3000	A	A	R	R	A	R	A	R
LMS + Filtro passa banda 1000 5000	A	A	R	A	A	R	A	R
LMS + Filtro passa alta 4000	A	A	A	A	R	R	R	R

Analisando os resultados da Tab. 6.9, não é possível tomar decisão alguma, contudo analisando os resultados da Tab. 6.10, é possível verificar que, para os resíduos da filtragem adaptativa na faixa de frequências de 1000 a 5000 Hz, obteve-se um resultado satisfatório, pois sete dentre os oito câmbios recusados foram reprovados, e somente dois dentre os sete câmbios aceitáveis foram reprovados.

Tabela 6.10 - Critério de aprovação para os resíduos.

Câmbios Aceitáveis								
Tipo de Filtragem \ Câmbio	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	
LMS	A	R	A	R	R	R	A	
LMS + Filtro passa baixa 500 Hz	A	R	R	R	A	R	R	
LMS + Filtro passa baixa 1000Hz	A	A	R	R	A	R	A	
LMS + Filtro passa banda 1000 a 3000 Hz	A	R	A	R	A	R	A	
LMS + Filtro passa banda 1000 a 5000 Hz	A	R	A	R	A	A	A	
LMS + Filtro passa alta 4000 Hz	R	R	A	A	A	A	A	
Câmbios Recusados								
Tipo de Filtragem \ Câmbio	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
LMS	A	R	R	R	R	R	R	R
LMS + Filtro passa baixa 500 Hz	R	R	A	R	A	A	R	R
LMS + Filtro passa baixa 1000Hz	A	A	A	A	A	A	R	R
LMS + Filtro passa banda 1000 a 3000 Hz	A	A	R	R	R	R	R	R
LMS + Filtro passa banda 1000 a 5000 Hz	A	R	R	R	R	R	R	R
LMS + Filtro passa alta 4000 Hz	A	A	R	A	A	A	A	A

As tabelas 6.11 e 6.12 mostram os resultados da metodologia aplicada aos sinais de pressão sonora.

Tabela 6.11 - Critério de aprovação dos para os sinais filtrados.

Câmbios Aceitáveis								
Tipo de Filtragem \ Câmbio	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	
LMS	R	R	R	R	R	A	R	
LMS + Filtro passa baixa 500	R	R	R	R	R	A	R	
LMS + Filtro passa baixa 1000	R	R	R	R	R	A	R	
LMS + Filtro passa banda 1000 3000	R	A	R	R	R	A	R	
LMS + Filtro passa banda 1000 5000	R	A	R	R	R	A	R	
LMS + Filtro passa alta 4000	R	A	R	R	R	R	R	
Câmbios Recusados								
Tipo de Filtragem \ Câmbio	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
LMS	A	A	R	A	A	A	R	A
LMS + Filtro passa baixa 500	A	A	R	A	A	A	R	A
LMS + Filtro passa baixa 1000	A	A	R	A	A	A	R	A
LMS + Filtro passa banda 1000 3000	A	A	R	A	A	R	R	A
LMS + Filtro passa banda 1000 5000	A	A	R	A	A	R	R	A
LMS + Filtro passa alta 4000	A	A	R	A	A	A	R	A

Tabela 6.12 - Critério de aprovação dos para os resíduos.

Câmbios Aceitáveis								
Tipo de Filtragem \ Câmbio	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	
LMS	A	A	A	A	A	A	R	
LMS + Filtro passa baixa 500	A	A	A	A	A	A	A	
LMS + Filtro passa baixa 1000	A	A	A	A	A	A	A	
LMS + Filtro passa banda 1000 3000	A	R	A	A	A	R	R	
LMS + Filtro passa banda 1000 5000	A	R	A	A	A	A	R	
LMS + Filtro passa alta 4000	A	A	A	A	A	A	A	
Câmbios Recusados								
Tipo de Filtragem \ Câmbio	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
LMS	R	A	R	A	R	A	A	R
LMS + Filtro passa baixa 500	R	A	A	A	R	A	A	R
LMS + Filtro passa baixa 1000	R	A	A	A	A	A	A	R
LMS + Filtro passa banda 1000 3000	R	A	R	A	A	R	A	R
LMS + Filtro passa banda 1000 5000	R	A	R	A	A	R	A	R
LMS + Filtro passa alta 4000	R	A	A	A	R	A	R	R

Analisando os resultados da Tab. 6.11, novamente não é possível tomar decisão alguma, pois não há um tipo de filtragem que resulte em um critério adequado. Analisando os resultados da Tab. 6.12, é constatado que a análise dos resíduos da filtragem adaptativa na faixa de frequências acima de 4000 Hz é a que melhor se aproxima do resultado esperado pela metodologia proposta, pois quatro dentre os oito câmbios recusados foram reprovados, e nenhum dos sete câmbios aceitáveis foi reprovado.

6.5 Análise dos Resultados

Para a elaboração do procedimento de controle de qualidade em linha de produção e montagem de câmbios automotivos, foi necessário sintetizar os resultados obtidos na análise dos sinais de vibração e dos sinais de pressão sonora, criando assim, um critério de aceitação global (Tab. 6.13).

Tabela 6.13 - Critério de aceitação global para os sinais filtrados.

Câmbios Aceitáveis								
Tipo de Filtragem \ Câmbio	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	
LMS	R	R	R	R	R	A	R	
LMS + Filtro passa baixa 500	R	R	R	R	R	R	R	
LMS + Filtro passa baixa 1000	R	R	R	R	R	R	R	
LMS + Filtro passa banda 1000 3000	R	R	R	R	R	A	R	
LMS + Filtro passa banda 1000 5000	R	A	R	R	R	A	R	
LMS + Filtro passa alta 4000	R	A	R	R	R	R	R	
Câmbios Recusados								
Tipo de Filtragem \ Câmbio	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
LMS	A	A	R	R	A	R	R	A
LMS + Filtro passa baixa 500	A	A	R	R	A	A	R	R
LMS + Filtro passa baixa 1000	A	A	R	R	A	A	R	R
LMS + Filtro passa banda 1000 3000	A	A	R	R	A	R	R	R
LMS + Filtro passa banda 1000 5000	A	A	R	A	A	R	R	R
LMS + Filtro passa alta 4000	A	A	R	A	R	R	R	R

Tabela 6.14 - Critério de aprovação Geral para os resíduos da filtragem.

Câmbios Aceitáveis								
Tipo de Filtragem \ Câmbio	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	
LMS	A	R	A	R	R	R	R	
LMS + Filtro passa baixa 500	A	R	R	R	A	R	R	
LMS + Filtro passa baixa 1000	A	A	R	R	A	R	A	
LMS + Filtro passa banda 1000 3000	A	R	A	R	A	R	R	
LMS + Filtro passa banda 1000 5000	A	R	A	R	A	A	R	
LMS + Filtro passa alta 4000	R	R	A	A	A	A	A	
Câmbios Recusados								
Tipo de Filtragem \ Câmbio	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
LMS	R	R	R	R	R	R	R	R
LMS + Filtro passa baixa 500	R	R	A	R	R	A	R	R
LMS + Filtro passa baixa 1000	R	A	A	A	A	A	R	R
LMS + Filtro passa banda 1000 3000	R	A	R	R	R	R	R	R
LMS + Filtro passa banda 1000 5000	R	R	R	R	R	R	R	R
LMS + Filtro passa alta 4000	R	A	R	A	R	A	R	R

Em posse de todos estes resultados, conclui-se que é possível estipular um critério de aceitação de câmbios em linha de montagem através da filtragem adaptativa dos sinais de vibração e de pressão sonora e analisar o resíduo da filtragem na banda de frequências de 1000 a 5000 Hz, pois todos os oito câmbios recusados foram reprovados.

Contudo, três dentre os sete aceitáveis foram reprovados (A2, A4 e A7), sendo necessário averiguar as possíveis causas.

Para realização das análises a seguir, alguns dados foram necessários:

- Engrenamento da 5ª marcha, 34/39: relação de transmissão 0,8718;

- Frequência de rotação: 60,5417 Hz;
- Frequência de malha: 2361 Hz;
- Cepstrum da frequência do secundário (quefrência): 0,0144s;

Para o câmbio A2, através da análise do sinal de pressão sonora no tempo (Fig. 6.14), é verificada uma modulação no início do engrenamento. No espectro de frequências (Fig. 6.15) tal modulação é confirmada pelas bandas laterais à frequência de malha (2361 Hz).

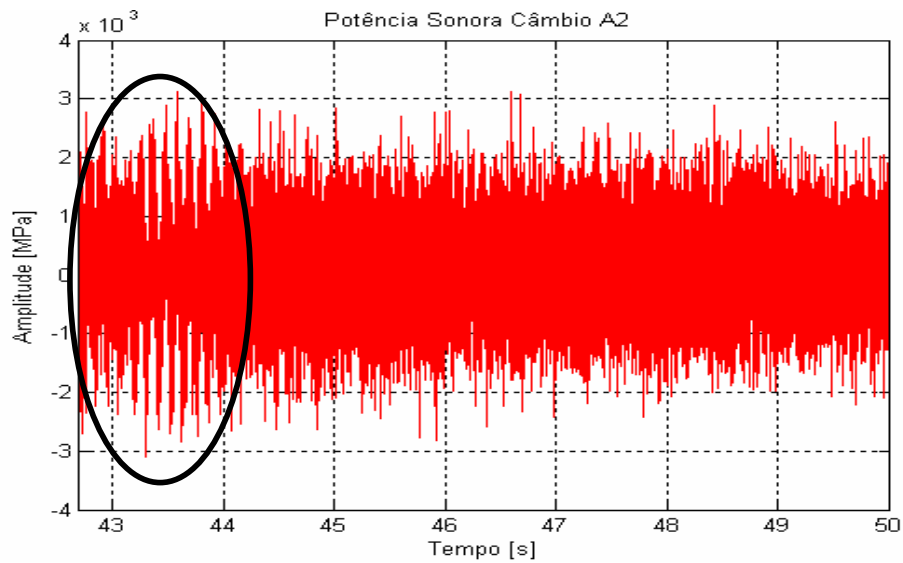


Figura 6.13 – Sinal de pressão sonora do câmbio A2.

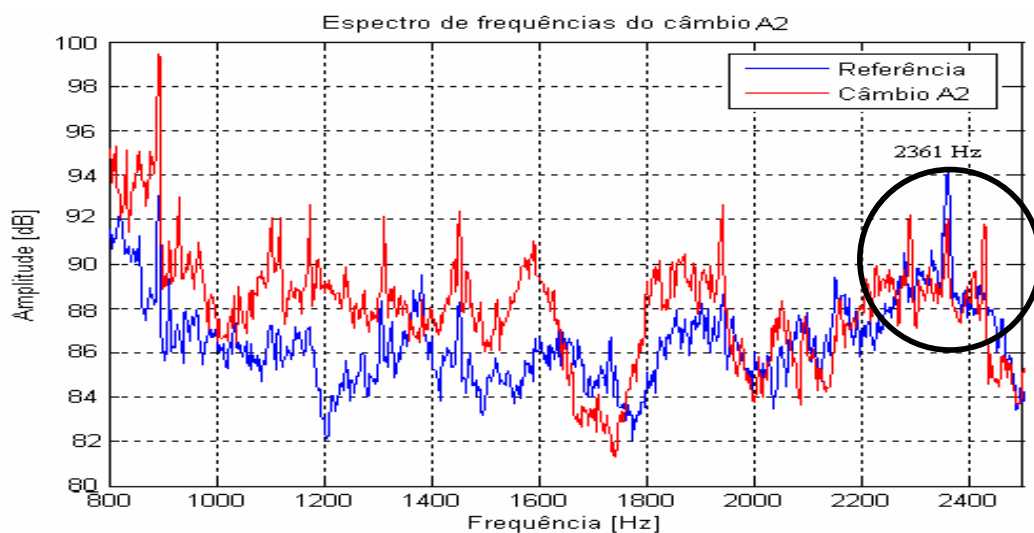


Figura 6.14 – Espectro de frequências do sinal de pressão sonora do câmbio A2.

Para o câmbio A4, foi necessária uma análise harmônica do sinal de aceleração para verificar que também há modulação, pois as bandas laterais da frequência da malha apresentam amplitudes maiores que a frequência desta (Fig. 6.15), sendo que um par engrenado é considerado com problemas de engrenamento quando a amplitude das bandas laterais são maiores que 60% da amplitude da frequência principal (Barreto, 2003).

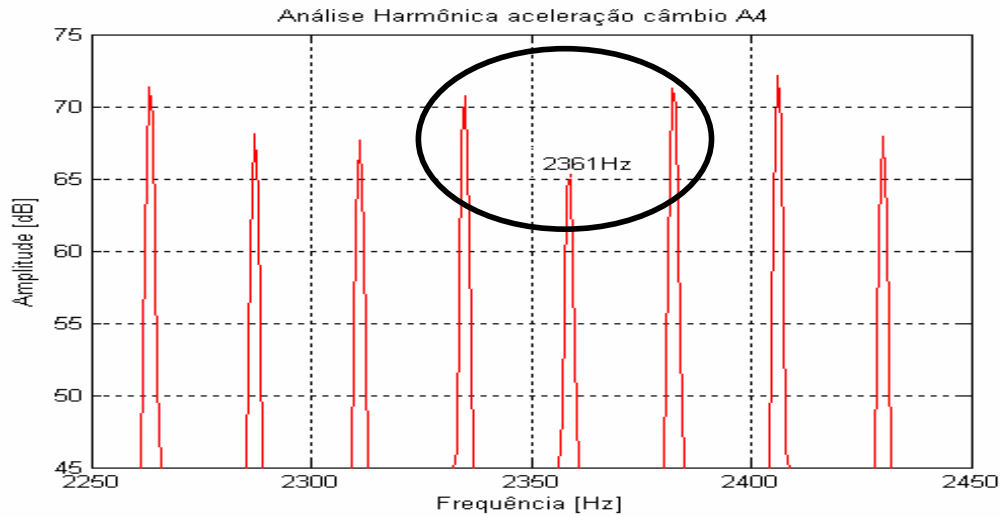


Figura 6.15 – Análise harmônica do sinal de vibração do câmbio A4.

Para o câmbio A7, através da análise do espectro de frequências do sinal de vibração (Fig. 6.16) é verificada uma diferença de 5 dB na amplitude da frequência da malha (2361 Hz). Pela Fig. 6.17, que ilustra o Cepstrum do sinal de vibração do câmbio A7, verifica-se a diferença de 0,0139 dB para a quefrência de 0,0144 s, que é a quefrência do secundário.

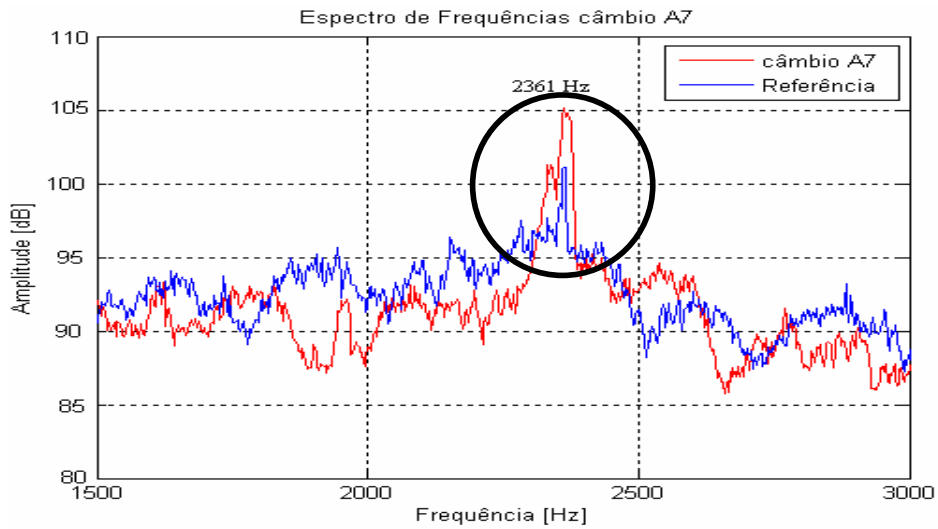


Figura 6.16 – Espectro de frequências do sinal de vibração do câmbio A7.

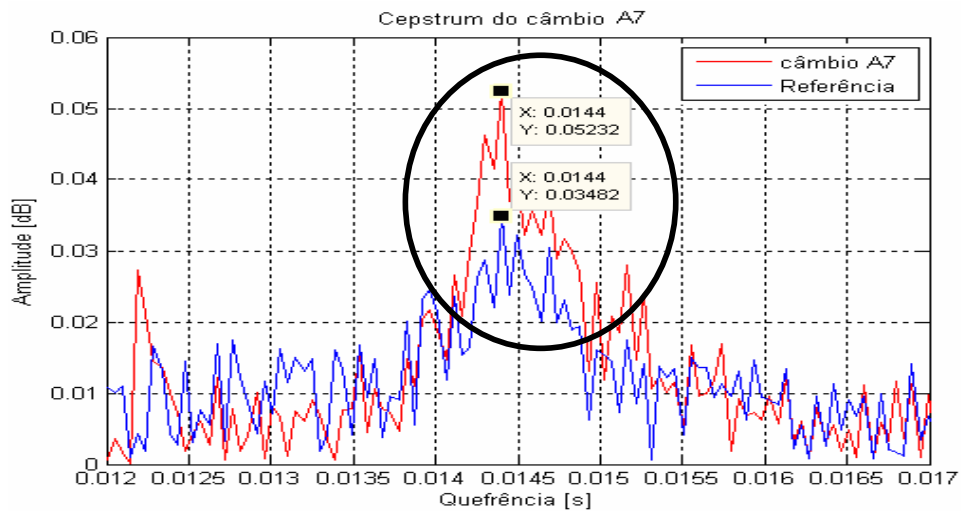


Figura 6.17 – Cepstrum do sinal de vibração do câmbio A7.

Através das análises feitas nos sinais de câmbios A2, A4 e A7 (com não conformidades introduzidos em níveis aceitáveis), pode-se concluir que a metodologia proposta agiu de maneira eficaz, uma vez que os motivos das não aceitações foram constatados e comprovados.

CAPÍTULO VII

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

7.1 Conclusões

As principais conclusões deste trabalho foram:

- 1) Para a utilização do filtro adaptativo, é necessária uma otimização de seus parâmetros (número de pesos do filtro, razão de convergência e fator de esquecimento) através de uma função objetivo que vise minimizar o erro entre o sinal estimado com o filtro e o sinal de referência, para que se obtenha uma boa convergência e uma boa capacidade de filtragem do sistema.
- 2) Pela análise de sensibilidade, utilizando-se o filtro adaptativo para várias configurações dos níveis de energia dos sinais primários e de referência, concluiu-se que à medida que diminui a energia do sinal de referência em relação à do defeito introduzido no sinal primário, a capacidade de filtragem é reduzida, sendo seus resultados comprometidos. Já a variação da amplitude do defeito presente no sinal de referência não forneceu variação significativa nos resultados da filtragem.
- 3) A característica do filtro adaptativo descrita no tópico 2, acima, foi observada em todas as simulações numéricas, pois nas análises das densidades espectrais de potência, as contribuições das frequências dos harmônicos adicionados como ruídos externos sempre apareciam, mesmo que em pequenas amplitudes.
- 4) O comportamento observado para o tópico 2, acima, não teve efeito significativo quando foram utilizadas as curvas RMS dos sinais como parâmetro de

comparação nas simulações numéricas, sendo esta uma metodologia satisfatória para os testes em câmbios reais.

5) A comparação dos parâmetros estatísticos impostos (valores médio, pico, pico a pico, kurtosis, skewness, média RMS), mesmo em bandas de frequências (0 a 500 Hz, 0 a 1000 Hz, 1000 a 3000 Hz, 1000 a 5000 Hz, acima de 4000 Hz), não foram suficientes para a elaboração de um procedimento de controle de qualidade satisfatório, uma vez que não apresentaram nenhum padrão de variação significativo.

6) O critério de avaliação que utilizou como limites para aceitação dos câmbios testados os valores RMS mínimo e máximo obtidos dentre todos os câmbios bons foi satisfatório quando aplicado aos resíduos da filtragem na banda de frequências de 1000 a 5000 Hz.

7) O sinal estimado pelo filtro (sinal filtrado) não apresentou importância significativa para a elaboração do critério de avaliação. Já o resíduo da filtragem foi o responsável pela aprovação ou reprovação do câmbio nos testes executados, uma vez que tal resíduo é proveniente dos defeitos incipientes introduzidos no câmbio.

8) A metodologia recusou três câmbios que inicialmente deveriam ser aceitos (A2, A4 e A7), contudo, através de um estudo mais aprofundado dos sinais de vibração e de ruído, utilizando técnicas de análise espectral, harmônica e tempo frequência, foi constatado o motivo da recusa.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

- 1) Verificar a eficácia da metodologia proposta utilizando o filtro de Kalman e outros filtros adaptativos, tais como o RLS (Algoritmo de Mínimos Quadrados Recursivo). Desta forma poderão ser feitas comparações entre os três filtros adaptativos, LMS, RLS e Kalman, e avaliadas as capacidade de filtragem e o desempenho destes diante da aplicação da metodologia imposta.
- 2) Estudo mais aprofundado dos resíduos de filtragem, com intuito de apontar as possíveis fontes geradoras da vibração e do ruído nos câmbios.
- 3) Desenvolvimento de softwares que facilitem o acesso e a utilização da filtragem adaptativa, uma vez que a quantidade de dados envolvidos no processo é considerável.

CAPÍTULO VIII

Referências Bibliográficas

AMABILI M.; FREGOLENT A., 1998, A Method to Identify Model Parameters and Gear Errors by Vibrations of a Spur Gear Pair, **Journal of Sound and Vibration**, Vol. 214, No. 2, pp. 339-357.

ANGELO, M., 1987, Vibration Monitoring of Machines, **Brüer & Kjaer technical review**, Naerum Offset, n. 1, Denmark.

ARAKERE, N. K.; NATARAJ, C., 1998, Vibration of High-Speed Spur Gear Websn, **Journal of Vibration and Acoustics**, vol. 120, July, pp. 791-800.

ARATO Jr., A; SILVA, D. G., 2001, **Análise Estatística de Sinais Vibratórios na Detecção de Falhas em Sistemas de Engrenamento Sujeitos a Variação de Potência**, XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Brasil, CDROM.

BARBER, A., 1993, **Handbook of Noise and Vibration Control**, 6.ed. Elsevier Science, Oxford, United Kingdom, 600p.

BARRETO, R. A., 2003, **Definição de Parâmetros de Vibração e Ruído Para Aceitação de Câmbios Automotivos em Linha de Montagem**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

BARTELMUS, W., 2001, Mathematical Modeling and Computer Simulations as an Aid to Gearbox Diagnosis, **Mechanical Systems and Signal Processing**. Vol. 14, No. 5, pp. 855-872.

BENDAT, J. S.; PIERSOL, A. G., 1980, **Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis**, 1.ed. John Wiley & Sons, United States of America, 302p.

BENDAT, J. S.; PIERSOL, A. G., 1986, **Random Data - Analysis and Measurement Procedures**, 2.ed. John Wiley & Sons, United States of America, 566p.

BEZERRA, R. A., 2004, **Detecção de Falhas em Rolamentos por Análise de Vibração**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

BOZIC, S. M., 1979, **Digital and Kalman Filtering – An Introduction to Discrete-Time Filtering and Optimum Linear Estimation**, 1.ed. Edward Arnold, Great Britain, 157p.

BRAUN, S., 1986, **Mechanical Signature Analysis: Theory and Applications**, 1.ed. Academic Press, London, 385p.

BRAUN, S.; DATNER, B., 1979, Analysis of Roller/Ball Bearing Vibrations, **Transactions of the ASME**, Vol. 101, January, pp. 118-125.

BRIE, D., TOMCZAK, M. and RICHARD, A., 1997, Gear Crack Detection by Adaptive Amplitude and Phase Demodulation, **Mechanical Systems and Signal Processing**, Vol. 11, No. 1, pp. 149-167.

BRITO, J. N., 1994, **Estudo dos Efeitos dos Erros Geométricos e dos Defeitos de Engrenamento no Comportamento Dinâmico de Redutores de Eixo Flexível**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

BRITO, J. N.; LÉPORE NETO, F. P., 1996, **Modelo para Rigidez de Engrenamento**. Anais do IV Congresso de Engenharia Mecânica – Norte/Nordeste, pp. 935-939.

BROWN, R.G.; HWANG, P.Y.C. **Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1992.

CHEN, J. C.; YAO, K.; HUDSON, R. E., 2002, Source Localization and Beamforming. **IEEE Signal Processing Magazine**, pp. 30-39.

CHOY, F. K.; POLYSHCHUK, J. J. Z.; HANDSCUH, R. F.; TOWNSEND, D. P., 1996, Analysis of the Effects of Surface Pitting and Wear on the Vibration of a Gear Transmission System, **Tribology International**, Vol. 29, n. 1, pp. 77-83.

COHEN, L., 1989, Time-Frequency Distributions: a Review. **Proceedings of IEEE**. v. 77, pp. 941-981.

COHEN, L., 1995, **Time-Frequency Analysis**. Prentice Hall Inc., New Jersey, USA.

DALPIAZ, G., RIVOLA, A., 1997, Condition Monitoring and Diagnostics in Automatic Machines: Comparison of Vibration Analysis Techniques, **Mechanical System and Signal Processing**, Vol. 11, No. 1, pp. 53-73.

DALPIAZ, G., RIVOLA, A. and RUBINE, R., 2000, Effectiveness and Sensitivity of Vibration Processing Techniques for Local Fault Detection in Gears, 14(3), pp. 387-412.

DECKER, H. J., 2002, **Gear Crack Detection Using Tooth Analysis**. U.S. Army Research Laboratory, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, 15p.

FICTH, J. C., 2005, **Manutenção Proativa Pode Economizar 10 Vezes Mais do que Práticas de Manutenção Preditiva/Preventiva Convencionais**. Artigo Técnico, disponível em: <http://www.revistaelo.com.br/downloads/proativa.pdf>.

FRANCO, P. R. G.; DE CASTRO, M. C. F.; DE CASTRO, F. C. C., 2002, Processamento Digital de Sinais – Introdução ao Processamento Adaptativo de Sinas Digitais. Universidade Católica do Rio Grande do Sul. **Apostila do curso de Processamento Digital de Sinais - Mestrado em Engenharia Elétrica**.

GERGES, S. N. Y., 1992, **Ruído: Fundamentos e Controle**, Florianópolis, SC, Brasil.

GUIMARÃES, T. A., 2000, **Análise Tempo-Frequência de Sinais de Vibração Aplicada à Detecção de Falhas em Caixas de Câmbio**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

HAYKIN, S., 1991, **Adaptive Filter Theory**, 2.ed. Prentice Hall, 936p.

HAYKIN, S., 2001, **Kalman Filter and Neural Networks**. John Wiley & Sons, Inc., Communications Research Laboratory, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada, 283p.

HOUSER, D. R., Dudley's Gear Handbook, chapter Gear noise, pages 14.1-14.32. McGrall-Hill, 1991.

HOWARD, I.; JIA, S.; WANG, J., 2001, The Dinamic Modeling of Spur Gear in Mesh Including Friction and a Crack, **Mechanical System and Signal Processing**, Vol. 5, pp. 438-449.

HUERTAS, J. I.; ANTELIS, J. M., 2005, Characterization of Adaptive Filters Used in the Identification Process of Annoying Noises in Vehicles. In: INTERNOISE 2005 - CONGRESS AND EXPOSITION ON NOISE CONTROL ENGINEERING, 07-10 august, Rio de Janeiro, Brasil.

KALMAN, R., 1960, On the General Theory of Control. In: PROC. 1st IFAC CONGRESS, London: Butterworth.

MA; Li, 1996, Gear Defect Detection Through Model-Based Wideband Demodulation of Vibrations, **Mechanical Systems an Signal Processing**, Vol. 10, No. 5, pp. 145-162.

MACÁRIO, C. C. L., 2006, **Utilização de Filtros Adaptativos para Detecção de Falhas em Mancais de Rolamentos**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

MAMEDE, W. F., 1997, **Análise De Falhas Em Redutores Utilizando Transformada de Wavelet**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

MARQUES, P. A. C., 2003, Introdução à Filtragem Adaptativa. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, **Apostila do curso de Processamento Digital de Sinal II** - Engenharia Informática e de Computadores.

MAYBECK, P. S., **Stochastic models, estimation and control**. Vol. 1. New York: Academic Press Inc., 1979.

MCFADDEN, P. D., 1986, Detecting Fatigue Cracks in Gears by Amplitude and Phase Demodulation of the Meshing Vibration, **Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design**, Vol. 108, pp. 165-170.

MCFADDEN, P. D., 1987, A Revised Model for the Extraction of Periodic Waveforms by Time Domain Averaging. **Mechanical Systems and Signal Processing**. Vol. 1, No. 2, pp. 173-183.

MCFADDEN, P. D., 1994, Window Functions for the Calculation of the Time Domain Averages of the Vibration of the Individual Planet Gears and Sun Gear in an Epicyclic Gearbox, **Journal of Vibration and Acoustics**, Vol. 116, pp. 179-187.

MENEGATTI, W. B.; DUARTE, M. A V.; RIBEIRO, C. R, 1998, **Estudo e Identificação de Rumoridade em Câmbios de Veículos Automotivos**, Congresso SAE Brasil'98, São Paulo, Brasil.

MENEGATTI, W. B., 1999, **Identificação de Falhas em Caixas de Câmbios, Via Sinais de Vibração**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

MEOLA, T., 2005, **Monitoramento em Tempo Real da Qualidade de Sinais de Vibrações, Utilizando Inteligência Artificial**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

MULLER, S.; MASSARANI, P. 2001, Transfer-function Measurement with Sweeps, **Journal of Audio Engineering Society**, v. 49(6), pp. 443-471.

MCFADDEN, P. D., 1986, Detecting Fatigue Cracks in Gears by Amplitude and Phase, Demodulation of the Meshing Vibration, **Journal of Vibrations, Acoustics, Stress, and Reliability in Design**, Vol. 108, pp. 165-170.

NEPOMUCENO, L. X., 1989, **Técnicas de Manutenção Preditiva**, Ed. Edgard Blücher, Vol. 1, São Paulo, Brasil.

NUNES, M. A. A., 2006, **Uma metodologia para quantificação da contribuição sonora de fontes de ruído industrial no meio ambiente**, Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

PENA, J. L. O., 2003, **Um Estudo Sobre o Uso de Técnicas Não Tradicionais Aplicadas à Detecção de Defeitos de Fabricação em Câmbios Automotivos**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

RANDALL, R. B., 1982, A New Method of Modeling Gear Faults, **Journal of Mechanical Design**. Vol. 104, April, pp. 259-267.

RANDALL, R. B.; TECH, B. A., 1980, Cepstrum Analysis and Gearbox Fault Diagnosis, **Brüel & Kjaer Application Notes**, Naerum Offset, Oenmark, pp. 1-20.

RANDALL, R. B.; TECH, B. A., 1987, **Frequency Analysis**. 3.ed. Bruel & Kjaer.

SANTANA, D.; RIBEIRO, C. R.; DUATE, M. A. V.; CABACINHA, A., 1998, **Um Procedimento Estatístico Para Identificação de Rumorositades em Câmbios em Linhas de Montagem**, Congresso SAE Brasil'98, São Paulo, Brasil.

SHENOI, B. A., 2006, **Introduction to Digital Signal Processing and Filter Design**. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 423p.

SILVA, L. E. L., 1997, **Relatório Técnico**, FIAT do Brasil, Betim/MG, Brasil.

SOARES Z.M.D.; MÜLLER, S. Secondary Microphone Calibration with Constant Envelope Sweeps Adapted to Background Noise. In: PROCEEDINGS OF THE 17^o INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS, v. 25(1-3), Roma, p. 357, 2001.

SOARES, Z.M.D; HOFFMANN, W.E., MÜLLER ,S. Secondary Microphone Calibration: Advantageous Use of Sweeps to Obtain Impulse Response. In: PROCEEDINGS OF THE 144^o ASA MEETING, Cancun, abstracts in Journal of Acoustict Society American, v. 112(5), p. 2234, 2002.

STEARNS, S. D.; DAVID, R. A., 1996, **Signal Processing Algorithms in Matlab**. Prentice Hall Signal Processing Series, Upper Saddle River, New Jersey, 400p.

TESTER, B. J.; FISHER, M. J., 1981, Engine Noise Source Breakdown: Theory Simulation and Results. In: 7th AERO – ACOUSTIC CONFERENCE AIAA, Paper No. 81.

VELEX, P.; MAATAR, M., 1996, A Mathematical Model for Analyzing the Influence of Shape Deviations and Mounting Errors on Gear Dymanic Behaviour, **Mechanical Systems and Signal Processing**. Vol. 191, No. 5, pp. 629-660.

WANG, W. J.; MACFADDEN, P. O., 1995, Decomposition of Gear Motion Signals and Its Application to Gearbox Oiagnostics, **ASME Journal of Vibration and Acoustics**, Vol. 117, pp. 363-369.

WANG, W. Q.; ISMAIL, F.; GOLNARAGHI, M. F., 2001, Assessment of Gear Damage Monitoring Techniques Using Vibration Measurements, **Mechanical Systems and Signal Processing**. Vol. 15, No. 5, pp. 905-922.

WANG, W. Q., 2001, Early detection of gear tooth cracking using resonance demodulation technique, **Mechanical Systems and Signal Processing**. Vol. 15, No. 5, pp. 887-904.

WIDROW, B.; HOFF, M. E., Adaptive switching circuits. In IRE WESCON, pages 96-104, New York. Convention Record, 1960.

WIDROW, B.; STEARNS, S. D., 1985, **Adaptive Signal Processing**. 1.ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 528p.

WIENER, N. **Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Times Series, with Engineering Applications**. New York: Wiley, 1949.

WINK, C. H., 2007, **Minimização do erro de transmissão de pares engrenados através da modificação da superfície do dentes**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

ANEXO I

Varredura Senoidal (Sine Sweep)

Segundo Nunes (2006), a varredura senoidal, ou, *sine sweep* é um sinal senoidal cuja frequência varia com o tempo, ou melhor, com uma função qualquer de t , $w(t)$. Se $w(t)$ for uma reta, então terá uma varredura linear.

A construção de uma varredura senoidal no domínio do tempo é facilmente compreendida utilizando as seguintes equações (Nunes, 2006):

$$S(t) = A \sin(\varphi) \quad (\text{A1.1})$$

$$\varphi = \varphi_o + \Delta\varphi \quad (\text{A1.2})$$

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_o + \text{Inc}(\varphi) \quad (\text{A1.3})$$

onde $S(t)$ é a varredura linear, A é a amplitude, φ_o possui valor zero para a primeira amostra (primeiro ponto do sinal $S(t)$) e $\Delta\varphi_o$ para a primeira amostra depende da frequência inicial desejada para a varredura a ser construída, como mostrado na Eq. (A1.4):

$$\Delta\varphi_o = \frac{2\pi f_{\text{inicial}}}{f_s} \quad (\text{A1.4})$$

onde f_{inicial} é a frequência inicial da varredura e f_s é a frequência de amostragem.

O fator $\text{Inc}(\varphi)$ é dado por:

$$Inc(\varphi) = 2\pi \frac{f_{final} - f_{inicial}}{f_s N} \quad (A1.5)$$

onde f_{final} é a frequência final da varredura e N é o numero de pontos do sinal $S(t)$.

O grande interesse no emprego da varredura senoidal está na possibilidade de construir funções senoidais arbitrárias, isto é, com respostas em frequências quaisquer (Nunes, 2006).

Na verdade a varredura senoidal é um caso particular da técnica geral de obter respostas impulsivas que utiliza FFT para passar do domínio do tempo para frequência e a IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) para o caminho inverso. Em tese, qualquer sinal pré-determinado pode ser utilizado como sinal de excitação nas técnicas de FFT.

O emprego da varredura senoidal é mais interessante não só pela possibilidade de criar sinais de excitação com resposta em frequência arbitrária, mas também porque há uma relação matemática bem definida entre a frequência da senóide e o instante de tempo em que ela está sendo “apresentada” ao sistema linear ensaiado, representada pela função no tempo, $w(t)$.

A técnica é melhor discutida na interessante revisão presente no artigo de Müller e Massarani (2001).

Segundo Nunes (2006), quando se aplica uma varredura em um sistema, o que se faz é o excitar com uma determinada frequência em cada instante, sendo que, dependendo de como a frequência varia, pode-se ficar mais ou menos tempo excitando o sistema com a mesma frequência. Utilizando um caso limite como exemplo, um tom puro é uma varredura senoidal em que toda a energia (proporcional à duração do sinal) é empregada em uma única frequência.

A razão entre a energia que sai do sistema e a energia que nele foi injetada é a função de transferência do sistema para aquela frequência em particular. Se em vez de um tom puro for injetado uma varredura senoidal com “lei de formação” conhecida, na prática se excita o sistema com um espectro amplo (limites de frequência da varredura) e com a quantidade de energia que se queira em cada frequência (duração da varredura para cada frequência).

Dividindo o espectro complexo da saída pelo da entrada, obtém-se a resposta em frequência complexa do sistema. A transformada inversa do espectro (IFFT) é a resposta impulsiva do sistema. A partir da resposta impulsiva é possível retirar os efeitos não desejados de eventuais reflexões que tenham contaminado o sinal final com um simples “janelamento”

do sinal. Ou seja, com alguma manipulação algébrica, pode-se transformar a resposta impulsiva em uma resposta contínua, com as conseqüentes e inerentes vantagens desse feito.

Algumas recentes aplicações da varredura senoidal em acústica (*airborne acoustics*) podem ilustrar a diversidade da técnica (Soares and Muller, 2001; Soares; Hoffmann; Muller, 2002).

Mas o interesse do uso da varredura não é apenas esse. Como há uma lei de formação bem definida entre frequência instantânea e a fase do seno, o parâmetro “atraso de grupo” tem um significado claro na varredura. O atraso de grupo (τ) é a derivada da fase (Φ) em relação à frequência (f) multiplicada por uma constante ($-1/2\pi$), conforme a Eq. (A1.6).

$$\tau(f) = \frac{-1}{2\pi} \cdot \frac{d\Phi}{df} \quad (\text{A1.6})$$

Ao se dividir o espectro complexo da saída pelo da entrada (portanto da varredura), se obtém a resposta impulsiva, como para qualquer outro tipo de excitação. Mas como o atraso de grupo $\tau(f)$ está relacionado com o instante em que a frequência f foi apresentada ao sistema, a multiplicação pelo espectro inverso equivale a subtrair $\tau(f)$ para cada f .

Portanto frequências que tenham sido geradas pelo sistema (distorções harmônicas, por exemplo) vão aparecer no sinal de saída em instantes anteriores ao respectivo atraso de grupo. Como os atrasos de grupo são sempre maiores do que os instantes em que as distorções aparecem, as distorções são colocadas em instantes não causais na resposta impulsiva (ou transladadas para o final, no caso de deconvolução circular). Com o “janelamento” do sinal no tempo, as distorções podem ser eliminadas. Isso não é possível com outros tipos de excitação, pois as fases (e, portanto os atrasos de grupo) são geralmente pseudo-aleatórias. O raciocínio apresentado não se aplicaria, nesse caso, e as distorções seriam difundidas ao longo de todo o espectro, diminuindo a relação sinal ruído (Nunes, 2006).

ANEXO II

Parâmetros Estatísticos

Na Fig. A2.1 é mostrada a relação entre os níveis Pico a Pico, Pico, Valor Médio e o Valor RMS de um sinal harmônico.

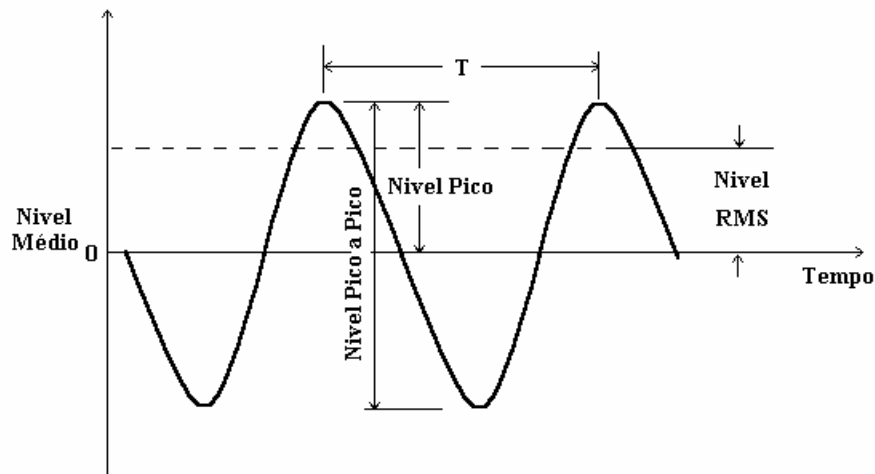


Figura A2.1 - Quantificação de um sinal harmônico.

O valor pico a pico indica a excursão máxima da onda, uma quantidade importante para definir, por exemplo, quando um elemento da máquina atinge valores críticos, considerando-se máximas tensões ou folga mecânica.

O valor pico, por sua vez, indica níveis máximos de sinais transientes (curta duração) em choques, proporcionando apenas o valor máximo sem considerar a cronologia da onda.

O valor médio (Eq. (A2.1)) indica o quanto o sinal está deslocado em relação à referência, tendo pouca, ou nenhuma utilidade no monitoramento de vibrações uma vez que,

por definição, vibrações são o estudo das oscilações em torno da posição de equilíbrio de um sistema mecânico.

$$Valor_Medio = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (A2.1)$$

O valor eficaz (RMS) é uma das medidas mais importantes de amplitude, uma vez que quantifica a energia que está diretamente ligado ao fenômeno estudado, no caso é um indicativo do poder destrutivo da vibração. É muito utilizado como parâmetro global para determinação de níveis de alerta e alarme usados em procedimentos de manutenção preditiva (Ângelo, 1987).

Contudo, devido ao comportamento transiente e não estacionário dos sinais analisados, onde a frequência varia com o tempo, é necessário o uso de metodologias de análise tempo-frequência. Neste trabalho foi utilizada a média exponencial, aqui denominada curva RMS.

A média exponencial $\bar{x}^2$, que é dada pela Eq. (A2.2):

$$\bar{x}_i^2 = x_{i-1}^2 + (x_i^2 - x_{i-1}^2) / k \quad (A2.2)$$

onde $\bar{x}_i^2$ é o i-ésimo termo do vetor $\bar{x}^2$ e k é dado pela Eq. (A2.3):

$$k = f_{aquis} T + 1 \quad (A2.3)$$

onde f_{aquis} é a frequência de aquisição em Hz e T é o tempo de integração, o qual neste trabalho é igual a 125×10^{-3} s, o que corresponde a um tempo de integração rápido (*fast*), permitindo então um esquecimento das ocorrências passadas no sinal analisado.

Desta forma, o valor médio RMS, utilizado como parâmetro estatístico para as análises no Capítulo 6, foi estimado calculando-se o valor médio da curva RMS.

Os momentos estatísticos são úteis para descrever o comportamento de variáveis randômicas, estes momentos também são definidos como momentos de área da função densidade de probabilidade, e quando calculado em torno da média são então definidos como

Momento Central. Portanto, o n -ésimo momento de tendência central é estimado pela Eq. (A2.4).

$$\mu^n = \int_{-\infty}^{\infty} [x - \bar{x}]^n p(x) dx \quad (\text{A2.4})$$

Onde $\bar{x}$ é o valor médio de $x(t)$ e $p(x)$ é a função distribuição de probabilidade.

O coeficiente de Skewness, terceiro momento de tendência central, que mede o grau de deformação de uma distribuição em relação ao eixo de simetria, é designado por γ^3 (Eq. (A2.5)) e obtido dividindo-se μ^3 pelo desvio padrão σ elevado a terceira potência.

$$\gamma^3 = \frac{\mu^3}{\sigma^3} \quad (\text{A2.5})$$

O coeficiente de Kurtosis, quarto momento de tendência central, que mede o grau de achatamento de uma distribuição, é designado por γ^4 (Eq. (A2.6)) e obtido dividindo-se μ^4 pelo desvio padrão σ elevado a quarta potência.

$$\gamma^4 = \frac{\mu^4}{\sigma^4} \quad (\text{A2.6})$$