

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO PROFISSIONALIZANTE EM ENGENHARIA**

**IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS EM ENGRENAGENS NA TRANSMISSÃO DE
TRATOR AGRÍCOLA POR MEIO DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES**

Hudson Lobo do Prado Jr

Porto Alegre, 2003

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO PROFISSIONALIZANTE EM ENGENHARIA**

**IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS EM ENGRENAGENS NA TRANSMISSÃO DE
TRATOR AGRÍCOLA POR MEIO DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES**

Hudson Lobo do Prado Jr

Orientador: Professor Dr. Alberto Tamagna

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Vilson João Batista

Prof. Dr. Rosa Leamar Dias Blanco

Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

**Trabalho de Conclusão do Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia como
requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia – modalidade
Profissionalizante – Engenharia Automotiva**

Porto Alegre, 2003

Este Trabalho de Conclusão foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de mestre em ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo orientador e pelo coordenador do Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr Alberto Tamagna
Orientador
Escola de Engenharia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Helena Beatriz Bettella Cybis
Coordenadora
Mestrado Profissionalizante em Engenharia
Escola de Engenharia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr Vilson João Batista
PROMEC/UFRGS

Prof. Dr Rosa Leamar Dias Blanco
ULBRA

Prof. Dr Ignacio Iturrioz
PROMEC/UFRGS

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE QUADROS.....	X
RESUMO	XI
ABSTRACT.....	XII
1 INTRODUÇÃO	1
2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	4
3. DESCRIÇÃO DA TRANSMISSÃO.....	6
3.1 MARCHAS.....	6
3.2 REDUÇÃO ENTRE O MÓDULO DE MARCHAS E DE GRUPOS	6
3.3 GRUPOS	7
3.4 DIFERENCIAL.....	7
3.5 TOMADA DE FORÇA.....	8
4. EMBASAMENTO TEÓRICO	10
4.1 FREQUÊNCIAS GERADAS POR UM PAR DE RODAS DENTADAS EM CONTATO.....	10
4.1.1 FREQUÊNCIA ROTACIONAL DA COROA (FC)	10
4.1.2 FREQUÊNCIA ROTACIONAL DO PINHÃO (FP).....	10
4.1.3 FREQUÊNCIA DO ENGRENAMENTO (FE)	10
4.1.4 FREQUÊNCIA DA PASSAGEM DA FASE DE MONTAGEM (FM)	10
4.1.5 FREQUÊNCIA DE DENTE REPETIDO (FR).....	12
4.1.6 RELAÇÃO ENTRE AS FREQUÊNCIAS DE UM ENGRENAMENTO	12
4.2 AQUISIÇÃO DE DADOS	12
4.2.1 SOBREPOSIÇÃO DE ESPECTRO.....	13
4.2.2 FILTROS	14
4.2.3 ONDE MEDIR	16
4.3 MÉTODO DAS ASSINATURAS	17
4.3.1 CLASSIFICAÇÕES QUANTO AO TIPO DE EXCITAÇÃO PARA OBTENÇÃO DOS SINAIS E QUANTO AO TIPO DE SINAL MEDIDO.....	18
4.3.1.1 CASO PASSIVO E CASO ATIVO	18
4.3.1.2 SINAIS PRIMÁRIOS E SECUNDÁRIOS	19
4.3.2 FASES DO MÉTODO DAS ASSINATURAS	19
4.3.3 TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO.....	20
4.4 ANÁLISE ESPECTRAL	20
4.4.1 “FAST FOURIER TRANSFORM”	21
4.4.2 JANELAMENTO	22
4.5 “ROOT MEAN SQUARE” (RMS) E VALOR PICO A PICO	24
4.6 SINAIS CARACTERÍSTICAS DE FALHAS EM ENGRENAGENS.....	25
4.6.1 ENGRENAGENS COM DEFEITO EM APENAS UM DENTE.....	26

5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	27
5.1 MEDIÇÃO SEM CARGA	27
5.2 FORMA DE FIXAÇÃO DO ACELERÔMETRO.....	28
5.3 POSIÇÃO DE FIXAÇÃO DO ACELERÔMETRO.....	29
5.4 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	31
5.4.1 ANALISADOR DE VIBRAÇÕES E BALANCEADOR DINÂMICO NK 100.....	32
5.4.2 CONVERSOR ANALÓGICO DIGITAL ADC 100	32
5.4.3 ACELERÔMETRO NK 20.....	32
5.4.4 COMPUTADOR PORTÁTIL.....	33
5.4.5 “SOFTWARE” PARA AQUISIÇÃO DE DADOS	33
5.4.6 BANCADA DE TESTE DE TRANSMISSÕES.....	33
5.5 PRIMEIRA FASE	34
5.5.1 DEFINIÇÃO DAS FREQUÊNCIAS ENVOLVIDAS	34
5.5.2 DEFINIÇÃO DAS FREQUÊNCIAS DE AQUISIÇÃO E DA FREQUÊNCIA DE CORTE DO FILTRO	38
5.5.3 INFLUÊNCIA CONJUNTA DA ATENUAÇÃO DO FILTRO E DA AMPLIFICAÇÃO DO SENSOR NA FAIXA 5 A 13,2 KHZ.	40
5.5.4 TEMPO DE MEDIÇÃO.....	41
5.5.5 NÚMERO DE TRANSMISSÕES ENSAIADAS	42
5.6 SEGUNDA FASE	42
6. TRATAMENTO DE DADOS	43
6.1 RETIRADA DO COMPONENTE DC	43
6.2 FAST FOURIER TRANSFORM.....	43
6.3 “ROOT MEAN SQUARE” (RMS) E VALOR PICO A PICO.....	43
7. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	44
7.1 PRIMEIRA FASE	44
7.1.1 MEDIÇÕES HORIZONTAIS.....	44
7.1.1.1 MEDIÇÃO HORIZONTAL – 1ª MARCHA.....	44
7.1.1.2 MEDIÇÃO HORIZONTAL – 2ª MARCHA.....	46
7.1.1.3 MEDIÇÃO HORIZONTAL – 3ª MARCHA.....	47
7.1.1.4 MEDIÇÃO HORIZONTAL – RÉ.....	48
7.1.2 MEDIÇÕES VERTICAIS	49
7.1.2.1 MEDIÇÃO VERTICAL 1ª MARCHA.....	49
7.1.2.2 MEDIÇÃO VERTICAL 2ª MARCHA.....	51
7.1.2.3 MEDIÇÃO VERTICAL 3ª MARCHA.....	52
7.1.2.4 MEDIÇÃO VERTICAL 1ª RÉ	53
7.2 SEGUNDA FASE	55
7.2.1 ENGRENAGEM DA RÉ COM FALHA NO PERFIL DO DENTADO	55
7.2.2 ENGRENAGEM CONDUZIDA DA PRIMEIRA COM BATIDA EM UM DENTE	59
7.2.3 ENGRENAGEM CONDUZIDA DA SEGUNDA COM BATIDA EM UM DENTE	64
8. MÉTODO PROPOSTO	69
8.1 CLASSIFICAÇÃO DE UMA TRANSMISSÃO COMO CORRETA OU FALHADA.....	69
8.2 IDENTIFICAÇÃO DA ENGRENAGEM FALHADA.....	70
8.3 PASSOS PARA IMPLEMENTAÇÃO	71

9. CONCLUSÕES	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
ANEXO A – CURVAS DO ACELERÔMETRO NK20	76
ANEXO B – ESPECTROS DE FREQUÊNCIA DA QUARTA TRANSMISSÃO PADRÃO	77
ANEXO C - ESPECTROS DE FREQUÊNCIAS MEDIÇÃO HORIZONTAL E VERTICAL DA TRANSMISSÃO COM ENGENHAGEM CONDUZIDA DA PRIMEIRA MARCHA COM BATIDA	79
ANEXO D – SINAIS NO TEMPO DAS MEDIÇÕES VERTICAIS NAS QUATRO MARCHAS DA TRANSMISSÃO COM A ENGENHAGEM CONDUZIDA DA SEGUNDA MARCHA COM BATIDA	82
ANEXO E – BANCADA DE TESTE TRANSMISSÕES.....	84

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Avaliação das técnicas de processamento	20
--	----

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Fluxo de transmissão de potência caixa de marchas	8
FIGURA 2 – Fluxo de transmissão de potência caixa de grupos.....	9
FIGURA 3 – Amostragem resultando numa frequência falsa.....	13
FIGURA 4 – Esquema de um filtro RC de segunda ordem	15
FIGURA 5 – Faixas de frequência em um arranjo típico para aquisição de dados.....	16
FIGURA 6 – Aplicações do método das assinaturas.....	18
FIGURA 7 - Formato do espectro janela Hanning.....	23
FIGURA 8 - Formato do espectro janela Haming.....	23
FIGURA 9 - Formato do espectro janela Triangular.....	24
FIGURA 10 - Formato do espectro janela Retangular.....	24
FIGURA 11 – Diagnóstico de problemas em engrenamentos	25
FIGURA 12– Fixação do acelerômetro na medição vertical	29
FIGURA 13– Fixação do acelerômetro na medição vertical	30
FIGURA 14– Posição do acelerômetro medições vertical e horizontal.....	30
FIGURA 15 – Esquema do equipamento de medição.....	31
FIGURA 16- Diagrama de Bode filtros passivos de primeira, segunda e terceira ordem	41
FIGURA 17 – Transmissão 1 – Primeira Marcha – Medição Horizontal.....	44
FIGURA 18 – Transmissão 2 – Primeira Marcha – Medição Horizontal.....	45
FIGURA 19 – Transmissão 3 – Primeira Marcha – Medição Horizontal.....	45
FIGURA 20 – Transmissão 1 – Primeira Marcha – Medição Horizontal.....	46
FIGURA 21 – Transmissão 2 – Primeira Marcha – Medição Horizontal.....	46
FIGURA 22 – Transmissão 3 – Segunda Marcha – Medição horizontal.....	46
FIGURA 23 – Transmissão 1 – Terceira Marcha – Medição horizontal	47
FIGURA 24 – Transmissão 2 – Terceira Marcha – Medição horizontal	47
FIGURA 25 - Transmissão 3 – Terceira Marcha – Medição Horizontal.....	48
FIGURA 26 – Transmissão 1 – Ré – Medição horizontal	48
FIGURA 27 – Transmissão 2 – Ré – Medição horizontal	49
FIGURA 28 – Transmissão 3 – Ré – Medição horizontal	49
FIGURA 29 – Transmissão 1 – Primeira Marcha – Medição Vertical	50
FIGURA 30 Transmissão 2 – Primeira Marcha – Medição Vertical	50
FIGURA 31– Transmissão 3 – Primeira Marcha – Medição Vertical	50
FIGURA 32 – Transmissão 1 – Segunda Marcha – Medição Vertical	51
FIGURA 33 – Transmissão 2 – Segunda Marcha – Medição Vertical	51
FIGURA 34 – Transmissão 3 – Segunda Marcha – Medição vertical	51
FIGURA 35– Transmissão 1 – Terceira Marcha – Medição vertical	52
FIGURA 36– Transmissão 2 – Terceira Marcha – Medição vertical	52
FIGURA 37– Transmissão 3 – Terceira Marcha – Medição vertical	52
FIGURA 38– Transmissão 1 – Ré – Medição Vertical.....	53
FIGURA 39 - Transmissão 2 – Ré – Medição Vertical	53
FIGURA 40 - Transmissão 3 – Ré – Medição Vertical	53
FIGURA 41 – Foto da engrenagem reversora da ré com falha no perfil do dentado.....	55
FIGURA 42 – Gráfico comparativo entre valores RMS médios das transmissões padrão e da transmissão com problema na engrenagem inversora da ré	56
FIGURA 43 – Gráfico comparativo entre valores pico a pico médios das transmissões padrão e da transmissão com problema na engrenagem inversora da ré.....	56

FIGURA 44 – Transmissão 1 – Ré – Medição Horizontal	57
FIGURA 45 – Transmissão 2 – Ré – Medição Horizontal	57
FIGURA 46 – Transmissão 3 – Ré – Medição horizontal	57
FIGURA 47 – Transmissão 4 – Ré – Medição horizontal	58
FIGURA 48 – Transmissão com defeito na reversora de ré – Ré – Medição horizontal.....	58
FIGURA 49 – Espectro de frequência transmissão com engrenagem reversora da ré com problema no perfil do dentado – Ré - Medição Horizontal	58
FIGURA 50 – Espectro de frequência transmissão com engrenagem reversora da ré com problema no perfil do dentado – Ré - Medição Vertical	59
FIGURA 51 – Engrenagem conduzida da primeira marcha com batida em um dente	60
FIGURA 52 – Gráfico comparativo entre valores RMS médios das transmissões padrão e da transmissão com batida em um dente da engrenagem conduzida da primeira marcha	61
FIGURA 53 – Gráfico comparativo entre valores pico a pico médios das transmissões padrão e da transmissão com batida em um dente da engrenagem conduzida da primeira marcha	61
FIGURA 54 – Transmissão com batida na primeira marcha – Primeira marcha – Medição Horizontal	62
FIGURA 55 – Transmissão padrão – Primeira marcha – Medição Horizontal	62
FIGURA 56 – Transmissão com batida na primeira marcha – Primeira marcha – Medição Vertical.....	63
FIGURA 57 – Transmissão padrão – Primeira marcha – Medição Vertical.....	63
FIGURA 58 – Engrenagem conduzida da segunda marcha com batida em um dente.....	65
FIGURA 59 - Gráfico comparativo entre valores RMS médios das transmissões padrão e da transmissão com batida em um dente da engrenagem conduzida da segunda marcha.....	66
FIGURA 60– Gráfico comparativo entre valores Pico a pico médios das transmissões padrão e da transmissão com batida em um dente da engrenagem conduzida da segunda marcha	66
FIGURA 61 – Transmissão com batida na engrenagem conduzida da segunda marcha – Primeira marcha – Medição Horizontal.....	67
FIGURA 62 – Transmissão com batida na engrenagem conduzida da segunda marcha – Segunda marcha – Medição Horizontal.....	67
FIGURA 63– Transmissão com batida na engrenagem conduzida da segunda marcha – Terceira marcha – Medição Horizontal	67
FIGURA 64 – Transmissão com batida na engrenagem conduzida da segunda marcha – Ré – Medição Horizontal	68

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Correspondência dentes da coroa e pinhão	11
QUADRO 2 – Frequências com a primeira marcha engrenada.....	35
QUADRO 3 – Frequências com a segunda marcha engrenada.....	36
QUADRO 4 – Frequências com a terceira marcha engrenada.....	37
QUADRO 5 – Frequências com a ré engrenada.....	38
QUADRO 6 – Efeito conjunto atenuação do filtro e amplificação do acelerômetro	41
QUADRO 7 – Resumo valores RMS das transmissões padrão ensaiadas.....	54
QUADRO 8 – Resumo valores pico a pico das transmissões padrão ensaiadas.....	54

RESUMO

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um método de análise de falhas, por meio de análise de vibrações, para a bancada de final de linha das transmissões dos tratores linha 5000 da John Deere Brasil, o qual tem como finalidade diferenciar transmissões aprovadas de transmissões com defeito em engrenagens na caixa de marchas, e também auxiliar na identificação da engrenagem com defeito. Para o desenvolvimento deste método foram utilizados equipamentos de medição e aquisição de dados disponíveis na John Deere Brasil. Os testes foram realizados na bancada de final da linha de transmissões, possibilitando a aplicação do método sem a necessidade de alteração na bancada de testes. Os sinais padrões da transmissão em cada uma das quatro marchas foram levantados através da medição de quatro transmissões boas. De posse destes padrões, (assinatura em cada marcha), partiu-se para a identificação de como estes são alterados por diferentes defeitos em diversas engrenagens da caixa de marchas, sendo para isto induzidos defeitos em diferentes engrenagens da caixa de marchas de transmissões boas. Os sinais em todas as marchas nestas transmissões com defeito induzido foram medidos e analisado as alterações em relação aos padrões, resultando a conclusão de que a aplicação do método de análise de vibrações no final de linha de transmissões da John Deere Brasil é possível, tanto para a diferenciação entre transmissões boas e transmissões com defeito em engrenagens da caixa de marchas, quanto como auxiliar na identificação de qual engrenagem da caixa de marchas está com defeito.

ABSTRACT

This paper presents a failure analysis method, through vibration analysis, to be used in the final test bench of the 5000 Series tractor's transmissions of John Deere Brasil, with the aim of differentiating approved transmissions from transmission with gear box gears with failure and also to be an auxiliary in the identification of which gear box gear has the failure. To the development were used measurement and data acquisition equipment available at John Deere Brasil. All the tests were run in the transmission assembly line final test bench, allowing the use of the method without need of changes in the bench. The signal patterns, (signatures), to each gear engaged were raised through measurement of approved transmissions. Having these signals, the changes that different failures in different gear box gears cause in the signal were identified through the measurement of approved transmissions with different failures induced in different gear box gears. The signal in all gears of each transmission with induced problem were raised and the differences regarding the patterns analyzed, resulting the conclusion that the application of vibration analysis method in the John Deere Brasil 5000 Series transmission final line is possible, for the differentiation of approved transmission and transmissions with gear box gear failed and also as auxiliary in the identification of which gear in the gear box has the problem.

1 INTRODUÇÃO

Conforme apresentado por Marra (1998), a vibração pode ser vista como um subproduto da força cíclica transmitida através de uma máquina, sendo que para a maioria das máquinas a vibração tem um padrão característico quando a máquina está em boas condições, denominado assinatura, o qual pode ser obtido analisando-se o sinal de vibração da máquina. Quando falhas começam a se desenvolver, o processo dinâmico da máquina sofre alterações, alterando-se assim o nível de vibração e o espectro de frequências.

Diferentes alterações estão ligadas a diferentes falhas. Ao se conhecer a ligação entre as diferentes alterações e suas causas, assim como se conhecer o padrão, assinatura da máquina em boas condições, pode-se, através da análise das alterações, identificar se uma máquina está em boas condições ou não, assim como, no caso da máquina não estar em boas condições, identificar-se a causa do problema.

A montagem de transmissões dos tratores 5000 na fábrica da John Deere Brasil, (JDB), em Horizontina iniciou em 2001. Até então, estas transmissões eram compradas da Yanmar do Brasil, tendo esta empresa encerrado a montagem destas transmissões no Brasil no ano de 2001, quando então a JDB adquiriu a linha de montagem da Yanmar, assim como o direito de fabricação e montagem destas transmissões no Brasil. A fabricação de todas as engrenagens destas transmissões é terceirizada, sendo a montagem, testes e a usinagem das carcaças executadas na JDB.

O critério atualmente empregado para aprovação no teste de funcionamento ao qual são submetidas todas as transmissões na bancada de final de linha destas transmissões é baseado na medição do ruído global e na audição do operador. Este é o mesmo método que era empregado quando estas transmissões eram fabricadas na Yanmar.

Apesar da empresa trabalhar com fornecedores com qualidade assegurada e controle do processo de montagem, ocorrem casos em que as transmissões testadas no final de linha apresentam comportamento diferente do critério de aprovação. Estes casos, apesar de raros, quando ocorrem, acarretam perda de tempo elevada para a desmontagem de toda a transmissão. Esta desmontagem é necessária para se identificar qual é a engrenagem falhada, uma vez que, somente pela medição do nível global de ruído em cada marcha e pela audição do operador, não há como se realizar esta identificação.

Menegatti e Duarte (1999), apresentam bons resultados obtidos com a aplicação de um método de identificação de falhas em engrenagens de transmissões automotivas através da análise de vibrações. Farrar e Duffey (1999), por sua vez, citam que possivelmente a detecção de falhas e máquinas rotativas seja o campo onde a detecção de falhas por análise de vibração obteve maiores sucessos. Um bom exemplo disso é a aplicação do monitoramento de vibrações no campo de manutenção de helicópteros. Segundo Larder (1999), no tocante a de HUM, (“Helicopter Health and Usage Monitoring”), o maior avanço foi o advento de um método de diagnóstico para o sistema de transmissão de potência através de análise de vibrações.

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um método para classificação de transmissões dos tratores da linha 5000 da John Deere Brasil como aprovadas ou como com defeito em engrenagens da caixa de marchas a partir de medições de vibração realizadas durante os testes de final de linha. Para o desenvolvimento do método foram primeiramente levantadas as assinaturas nas quatro marchas, com a transmissão operando na bancada de teste de final de linha, em quatro transmissões aprovadas pelo critério atual. Após, foram eleitos problemas típicos, em função da experiência do pessoal de linha de montagem e induzidos estes problemas, (diferentes falhas em diferentes engrenagens da caixa de marchas), buscando-se identificar como estas falhas alteravam os sinais de vibração. Além da separação entre transmissões boas e com defeitos em engrenagens da caixa de marcha, este conhecimento das alterações pode ser um auxiliar no diagnóstico da engrenagem causa do problema. Outro objetivo do trabalho foi servir como uma primeira identificação da viabilidade da aplicação da análise de vibrações como método de aprovação de transmissões na bancada de testes das transmissões tratores 5000 na John Deere Brasil.

No próximo capítulo é apresentada uma descrição do problema. Nele são apresentados a forma como o teste é realizado atualmente e os motivos que tornariam atrativa a adoção de um método baseado em análise de vibrações. No capítulo 3 é apresentada uma descrição da transmissão. No capítulo 4 se busca expor o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento deste trabalho, sobretudo no que diz respeito à vibração em engrenamentos em condições normais e na presença de diferentes falhas e a procedimentos para aquisição, tratamento e análise de dados. Ainda no mesmo capítulo são apresentados os fundamentos do método das assinaturas. O capítulo 5 traz toda a descrição do procedimento experimental empregado. São descritos procedimentos de medição e aquisição dados. São também descritas as falhas induzidas para a identificação das alterações nos sinais de vibração. O

tratamento de dados é descrito no capítulo 6. O capítulo 7 apresenta a análise dos resultados. Primeiramente no que diz respeito às medições das quatro transmissões padrão, ou seja ao levantamento das assinaturas nas quatro marchas, e por fim no que diz respeito às alterações provocadas no sinal de vibração pelas diferentes falhas induzidas. O capítulo 8 apresenta os métodos propostos para classificação das transmissões como aprovadas ou como com falhas em engrenagens da caixa de marchas e para diagnóstico da engrenagem falhada na caixa de marchas. Neste capítulo são ainda apresentados os passos aconselhados para implementação na linha de montagem.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A JDB iniciou no ano de 2001 a montagem das transmissões dos tratores da linha 5000 em sua fábrica. Estas transmissões eram compradas da Yanmar Brasil, a qual as produzia como subsidiária no Brasil da Kanzaki Japão, dona do projeto. Estas transmissões, com pequenas variações, são empregadas em tratores John Deere fabricados na Alemanha e nos Estados Unidos. Nestes dois casos as transmissões são fornecidas pela Kanzaki Japão.

Na linha de montagem destas transmissões na JDB trabalham dez pessoas, sendo que a quantidade máxima de transmissões que podem ser montadas em um turno, sem alterações na linha de montagem, é de dez transmissões.

Estas transmissões possuem dois modelos. O Modelo TSS, (“Top Shaft Synchronizer”), montado na maioria dos tratores da linha 5000, (modelos 5605 e 5705), e o modelo “Collar shift”. Montado apenas no modelo 5403. Estes dois modelos de transmissão são bastante semelhantes, tendo como única diferença o eixo superior da caixa de marchas que, no caso das transmissões TSS, é sincronizado, enquanto nas transmissões “Collar shift” é acionado por meio de acoplamento deslizante sem sincronizador. O presente trabalho se aplica às transmissões TSS.

O último posto da linha de montagem de transmissões é o posto onde são realizados os testes de final de linha. Estes testes compreendem verificação de vazamento e funcionamento. O teste de funcionamento se baseia em transmitir potência com um motor elétrico ao eixo de entrada da transmissão. Este teste é feito em velocidade de 2400 rpm e 800 rpm. Coloca-se a caixa em cada uma das marchas e em cada um dos grupos e, por meio de freios acoplados à saída do diferencial para as reduções finais, é colocada carga na transmissão. O operador mede então, numa posição padronizada, o ruído. Este não pode ultrapassar um valor definido. Este critério, juntamente com a audição do operador, é empregado para a identificação da transmissão como aprovada ou não. Para o teste de funcionamento das engrenagens da tomada de força se procede de forma muito similar, contudo neste caso as caixas de grupos e de marchas ficam no neutro, estando a tomada de força acionada. A carga é aplicada através de um terceiro freio acoplado ao eixo da tomada de força.

A JDB não produz nenhuma das engrenagens utilizadas para estas transmissões. As mesmas são fornecidas por fornecedores brasileiros ou importadas diretamente da

Kanzaki Japão. Embora a frequência de transmissões reprovadas pelo critério do ruído global e da audição do operador esteja sendo bastante pequena, uma vez que todos os fornecedores fornecem as engrenagens e os demais componentes da transmissão com garantia assegurada, e também o critério de testes esteja se mostrando suficiente, uma vez que não se tem observado falhas em transmissões aprovadas pelo mesmo, nem nos testes de campo, nem em clientes, fica-se com um problema: Nos casos onde o critério reprova uma transmissão, quer por nível de ruído global muito alto, quer pelo operador ter identificado algum ruído que não lhe parece normal, ainda que o nível global esteja dentro do aceito, é necessário muitas vezes desmontar completamente a transmissão, separando todas as engrenagens, para se identificar qual está falhada. Isto, sem dúvida, acarreta uma perda de tempo elevada.

Dados obtidos junto ao setor de montagem de transmissões indicam que uma transmissão reprovada demanda o trabalho de dois operadores na sua inspeção por pelo menos meia hora, sendo este tempo bem mais alto no caso da identificação do problema não ser imediata. A linha de montagem normalmente não fica parada pois o retrabalho é feito num posto específico para esta tarefa. Contudo, duas pessoas têm que ser deslocadas de seu trabalho rotineiro para executar a identificação e correção do problema. Uma vez que não se tem certeza, pelo critério atual, se o problema está na caixa de grupos ou de marchas, torna-se necessário, no caso do problema não estar na primeira caixa desmontada, desmontar as duas caixas para identificar o problema, ainda que as mesmas sejam desmontáveis separadamente.

Nota-se também o fato de que leves alterações no perfil do dentado de uma engrenagem podem causar problemas de funcionamento. Estas alterações se manifestam através de alterações no nível global de ruído, ultrapassando o limite definido no critério de aprovação, ou observadas pelo operador durante o teste. Contudo, é bastante difícil a identificação de qual das engrenagens está causando o ruído, uma vez que, ainda que se realize inspeção visual em todas as engrenagens, em alguns casos não se consegue perceber o perfil alterado, tornando-se necessárias sucessivas desmontagens, trocas de peças, montagens e testes para a identificação da engrenagem com problema.

Além disso, o método utilizado atualmente, identificação do nível global de ruído e audição do operador, é muito dependente da interpretação do operador. Um mesmo ruído numa transmissão pode ser interpretado como normal por um operador e como defeito por outro.

3. DESCRIÇÃO DA TRANSMISSÃO

A transmissão sobre a qual trata este trabalho é de tratores John Deere Brasil 5605 e 5705, com potência respectivamente de 75 e 85 HP. É uma transmissão mecânica de 12 velocidades, 9 à frente e 3 à ré. O tipo desta transmissão é denominado TSS, (“Top Sincronized Shaft”), porque o eixo superior das marchas é sincronizado.

A transmissão é dividida basicamente em 4 módulos:

3.1 MARCHAS

Neste módulo estão os componentes para engrenamento das marchas. 1^a, 2^a, 3^a e Ré. A potência entra neste módulo pelo eixo superior, o qual gira a mesma rotação do motor do trator.

Para a primeira marcha há uma roda dentada de 28 dentes que, quando acionada, o que ocorre por meio de sincronizador, engrena-se a uma engrenagem de 50 dentes a qual está solidária ao eixo inferior, (conduzido). Tem-se assim uma redução de 28/50. No caso da Segunda marcha o processo é o mesmo, com outras engrenagens. A redução é de 38/47.

Para a terceira novamente se tem o mesmo processo e uma amplificação, neste caso, de 43/39.

O acionamento da ré é diferenciado, uma vez que, embora ele também seja feito por meio de sincronizador, há uma engrenagem intermediária de 26 dentes para alterar o sentido de giro. A redução é de 32/34.

As quatro marchas são acionadas por meio de 2 sincronizadores. Um comum à segunda e ré e outro à primeira e terceira.

Todas as engrenagens deste módulo de marchas são engrenagens do tipo helicoidal.

3.2 REDUÇÃO ENTRE O MÓDULO DE MARCHAS E DE GRUPOS

Assim como as engrenagens conduzidas das marchas, está também solidária ao eixo inferior das marchas uma roda dentada de 27 dentes. Esta roda dentada está constantemente engrenada a uma roda dentada de 50 dentes, a qual, por sua vez, está solidária ao eixo superior da caixa de grupos, (eixo de redução de grupo). A velocidade de giro do eixo

superior da caixa de grupos é então igual à velocidade do eixo inferior das marchas multiplicado por $27/50$. As engrenagens são do tipo helicoidal.

3.3 GRUPOS

A transmissão possui 3 grupos. A, B e C. O engrenamento dos grupos se dá da seguinte forma:

No caso do grupo A e B, a rotação do eixo superior dos grupos é transmitido através de rodas dentadas solidárias ao eixo superior, as quais são engrenadas às rodas dentadas do eixo inferior de grupos. As rodas dentadas do eixo superior e inferior estão permanentemente engrenadas, contudo, as inferiores giram livres até o momento em que são conectadas ao eixo inferior por meio de acoplamentos deslizantes. As reduções para A e B são $12/42$ e $29/43$ respectivamente.

Para o grupo C a transmissão se dá diretamente do eixo inferior das marchas para o eixo inferior dos grupos, conectando-se estes dois eixos através de um sistema de acoplamento deslizante, não havendo assim a redução de $27/50$, ainda que o eixo superior esteja girando.

Também na caixa de grupos está localizada uma roda dentada de 29 dentes, solidária ao eixo inferior. Esta engrenagem tem a função de transmitir potência para a tração dianteira. Esta transmissão de potência para a tração dianteira se dá quando a tração dianteira é acionada, acoplando-se a engrenagem de 29 dentes à transmissão da tração dianteira.

Uma vez que os grupos não possuem sincronizadores para o engrenamento, tem-se que parar o trator para troca-los. Todas as engrenagens da caixa de grupos são do tipo helicoidal, a exceção das engrenagens conduzida e condutora do grupo A, que são engrenagens cilíndricas de dentes retos.

3.4 DIFERENCIAL

O eixo inferior dos grupos tem no seu final o pinhão cônico do conjunto pinhão e coroa do diferencial. A redução do diferencial nestes tratores é de 3,27. Após redução do diferencial se tem dois conjuntos de redução epicicloidais, um para o lado esquerdo, outro para o lado direito. Estes conjuntos fazem respectivamente as reduções para as rodas esquerda e direita. A redução destes conjuntos é de 6,86. Estes conjuntos, denominados

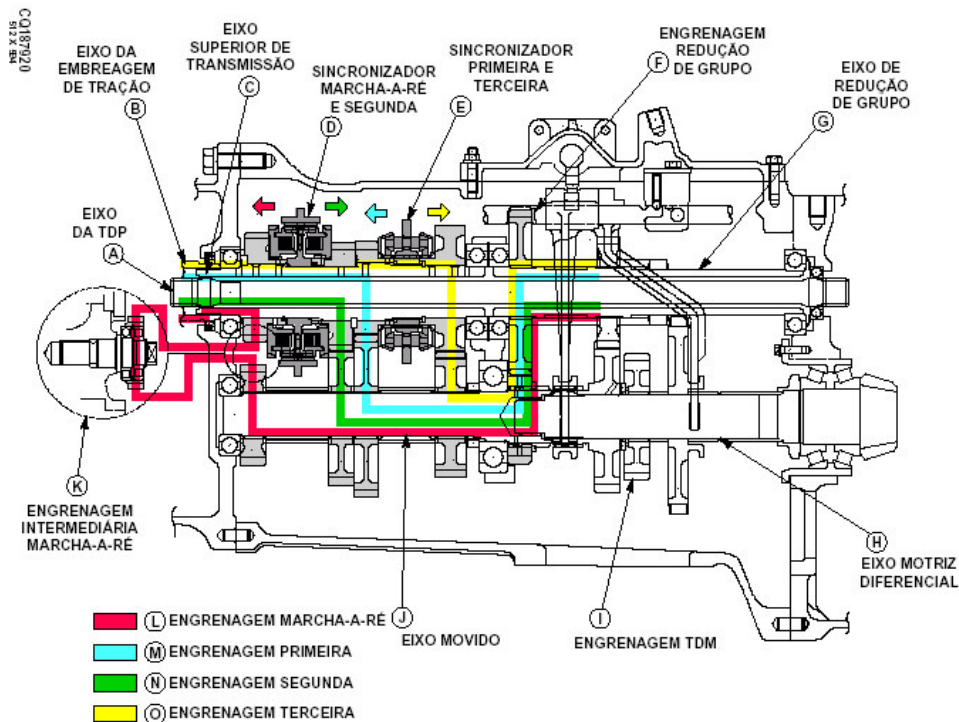
reduções finais, não são testados na bancada de testes da linha de transmissões da JDB. São comprados de fornecedor nacional, já testados.

3.5 TOMADA DE FORÇA

O eixo superior dos grupos aciona também a tomada de força, a qual tem uma redução de 3,76, realizada por duas engrenagens helicoidais. Uma de 17 dentes e outra de 64 dentes.

A seguir podem ser vistas as Fig. 1 e 2, com desenhos esquemáticos da transmissão de potência nas caixas de grupo e marchas.

É importante salientar que, quando em operação, ainda que com a caixa de grupos no neutro, todas as engrenagens da caixa de grupo e de marchas estão engrenadas e girando, ainda que somente as engrenagens da marcha escolhida naquele momento estejam sob carga, (no caso da caixa de grupos no neutro, a carga nas engrenagens é a necessária para vencer os atritos internos da transmissão).



FLUXO DE TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA - MUDANÇA DE MARCHA

FIGURA 1 – Fluxo de transmissão de potência caixa de marchas

Fonte: John Deere Brasil, 2002.

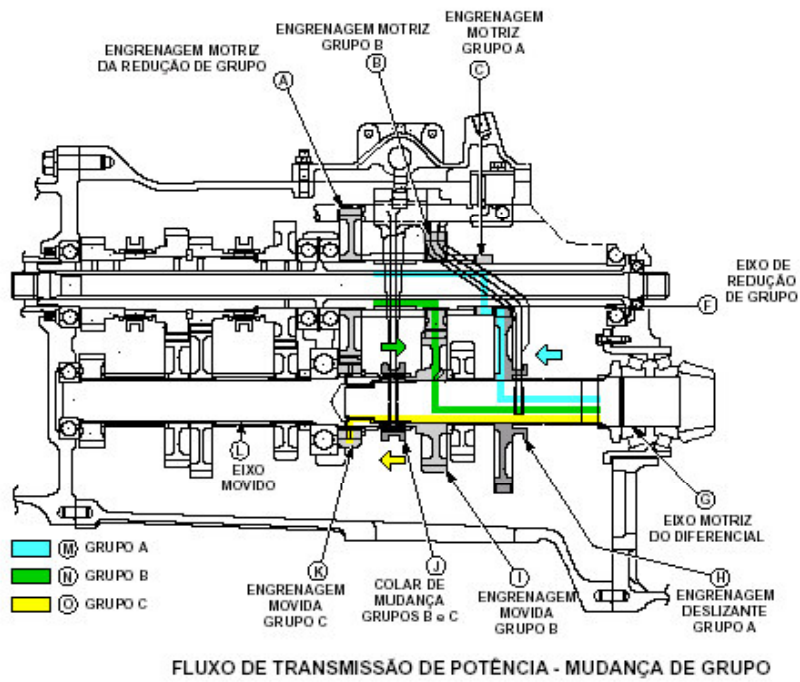


FIGURA 2 – Fluxo de transmissão de potência caixa de grupos

Fonte: John Deere Brasil, 2002.

4. EMBASAMENTO TEÓRICO

4.1 FREQUÊNCIAS GERADAS POR UM PAR DE RODAS DENTADAS EM CONTATO

Um engrenamento composto de duas rodas dentadas possui 5 frequências fundamentais. As definições das 5 frequências, conforme apresentado por Winnerton (2001), são:

4.1.1 Frequência rotacional da coroa (FC)

É simplesmente a velocidade rotacional da coroa, (N_C), expressa em revoluções por segundo (Hz). Deve ser lembrado que esta será a frequência com que um determinado dente da coroa engrenará.

Matematicamente a frequência rotacional da coroa é:

$$FC = N_C / 60 \text{ (Hz)}$$

4.1.2 Frequência rotacional do pinhão (FP)

É a frequência rotacional do pinhão, (N_P), expressa em Hz.

$$FP = N_P / 60 \text{ (Hz)}$$

4.1.3 Frequência do engrenamento (FE)

É a frequência com que pares de dentes engrenam. Pode ser descrita matematicamente como função do número de dentes do pinhão, (Z_P), ou da coroa, (Z_C), e a respectiva velocidade rotacional. Também conhecida como frequência de malha.

$$FE = N_P \cdot Z_P = N_C \cdot Z_C$$

4.1.4 Frequência da passagem da fase de montagem (FM)

No caso do engrenamento de um par de rodas dentadas, que possuem no número de dentes fatores primos comuns, nem todos os dentes do pinhão engrenam durante a operação com todos os dentes da coroa. Por exemplo, ao se montar um pinhão de 9 dentes e uma coroa

de 15 dentes, se na hora da montagem se colocar em contato o dente número um do pinhão com o dente número um da coroa, ocorrerá que durante a operação o dente número um da coroa somente entrará em contato com os dentes 1, 7 e 4 do pinhão. O dente número dois da coroa entrará em contato apenas com os dentes 2, 8 e 5 do pinhão e o dente 3 da coroa entrará em contato apenas com 3, 9 e 6 do pinhão. Começando-se novamente com o dente número 4 da coroa que engrenará assim como o 1 com 1, 7 e 4 do pinhão.

Desta forma surgem em operação três diferentes padrões de desgaste, pois cada 5 dentes da coroa engrenam apenas com 3 dentes do pinhão. Para o caso de um pinhão de 9 dentes e uma coroa de 15 dentes, pode-se ver no Quadro 3 a correspondência dos dentes da coroa e do pinhão:

QUADRO 1 – Correspondência dentes da coroa e pinhão

Coroa	Pinhão
1-10-4-13-7	1-7-4
2-11-5-14-8	2-8-5
3-12-6-15-9	3-9-6

Fonte: Winnerton, 2001.

Devido aos três padrões de desgaste diferentes que surgem, para o caso do pinhão de 9 dentes e a coroa de 15, surgem, no espectro deste par de engrenagens frequências que são três vezes maiores que as respectivas frequências rotacionais.

O número de padrões de desgaste é dado pelo produto dos fatores primos comuns à coroa e ao pinhão, (PFP). Cada Z_C/PFP dentes da coroa contatarão Z_P/PFP dentes do pinhão e darão origem a PFP padrões de desgaste, surgindo uma frequência que é igual a frequência de malha dividida pelo número de padrões de desgaste, quando se desmonta o engrenamento e se monta novamente numa diferente posição relativa entre pinhão e coroa.

Claramente os dentes em contato se alteraram se for modificado o contato inicial, não mais se engrenando o dente número 1 do pinhão e o dente número 1 da coroa. Isto explica porque se recomenda manter a mesma posição relativa entre pinhão e coroa quando estes são desmontados e montados novamente após um certo tempo de trabalho.

Para engrenamentos de maior precisão são selecionados coroas e pinhões que não têm fatores primos comuns. Assim sendo, todos os dentes da coroa contatam todos os dentes do pinhão durante a operação. Isto é o que se chama “Hunting tooth”.

4.1.5 Frequência de dente repetido (FR)

No caso de se ter um problema em ambos os dentes que se engrenam durante a operação, um do pinhão e outro da coroa, certamente se terá um pico na frequência em que se repete o encontro dos dentes falhados.

Matematicamente esta frequência é definida como:

$$FR = (FE \cdot PFP) / (ZC \cdot ZP)$$

Para o caso de engrenamentos do tipo “Hunting tooth”, tem-se que $PFP = 1$. Logo:

$$FR = FC / ZP = FP / ZC$$

4.1.6 Relação entre as frequências de um engrenamento

Conforme as explicações acima, pode ser visto que qualquer par de rodas dentadas engrenadas terão as suas frequências cumprindo a seguinte condição:

$$FR \leq FC \leq FP \leq FM \leq FE$$

4.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

Aquisição de dados pode ser descrita como a digitalização de um sinal analógico e seu armazenamento na forma de números binários. As principais partes de um sistema de aquisição de dados são: filtragem anti-rebatimento, amostragem (discretização no tempo), sustentação, discretização na amplitude e armazenamento.

A filtragem anti-rebatimento é necessária para garantir que sinais de alta frequência, que podem estar presentes, não se sobreponham na faixa de frequências de interesse.

A discretização no tempo é oriunda do fato de que se observa o sinal analógico um número finito de vezes, originando-se assim um sinal discreto no tempo.

A sustentação é necessária para que o conversor analógico digital trabalhe com um sinal estável. O tempo necessário para a sustentação depende do tempo necessário para que o conversor realize a conversão.

A discretização na amplitude é necessária porque os computadores trabalham com sistema de numeração binário. A resolução pode ser expressa em relação ao número de dígitos, (bits) utilizados.

$$\text{Resolução} = 1/2^n$$

Onde n é o número de dígitos utilizados.

O armazenamento tem por finalidade permitir que o sinal, após todo o processo, possa ser guardado para uso posterior.

4.2.1 Sobreposição de espectro

A sobreposição de espectro pode ocorrer quando o intervalo de amostragem do fenômeno não é suficientemente pequeno, ou seja, quando o fenômeno não é amostrado com velocidade suficiente. Isto leva a que sinais de alta frequência apareçam sobrepostos sobre o espectro de baixas frequências.

Usando-se uma taxa de amostragem, (f_a), tem-se que os sinais com frequência superior à metade da taxa de amostragem, ($f_a/2$), denominada frequência de Nyquist, se refletirão sobre esta frequência, aparecendo sobrepostos sobre o espectro de frequências abaixo desta frequência.

A Fig. 3 mostra como um sinal de frequência f_1 , quando amostrado com uma frequência de amostragem não alta o suficiente, aparecerá no espectro como um sinal de frequência $f_a - f_1$.

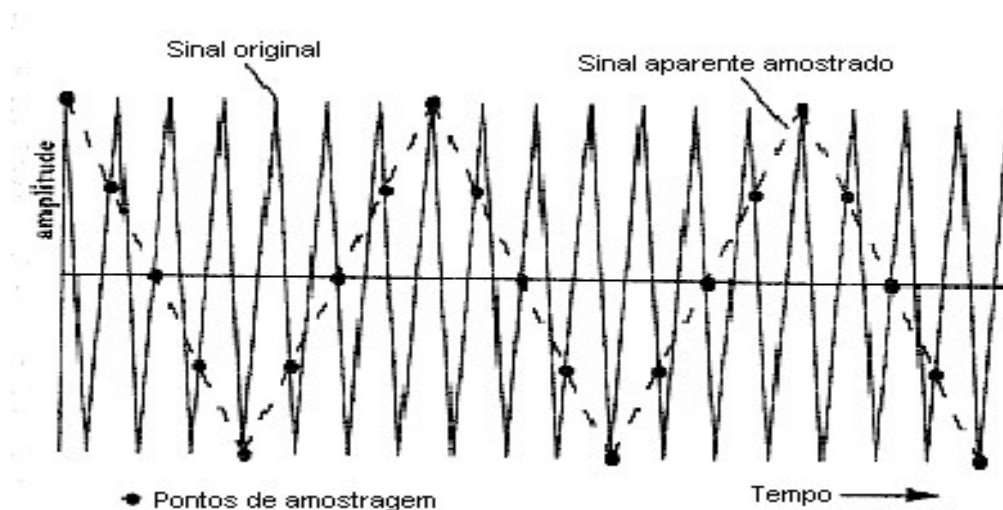


FIGURA 3 – Amostragem resultando numa frequência falsa

Fonte: Smith, 1999.

Para se evitar que isto ocorra, tem-se duas alternativas: A primeira é ter certeza que não se terá sinais não desejados com frequências superiores à frequência de Nyquist. Isto é bastante complicado, sobretudo quando se tem a faixa de interesse de baixas frequências ou se está trabalhando em ambiente ruidoso. A segunda opção consiste na utilização de filtros passa baixa. O filtro atenua os sinais acima da sua frequência de corte, fazendo com que os sinais de frequência superior à frequência Nyquist se tornem insignificantes devido à atenuação. Assim, quando estes se refletirem na faixa de frequências de interesse, estarão bastante atenuados, não causando problemas à medição.

4.2.2 Filtros

Os filtros não são componentes perfeitos. Um filtro passa baixa perfeito seria aquele cujo ganho fosse unitário abaixo da sua frequência de corte e zero acima desta. Um filtro passa baixa RC de primeira ordem atenuará pela metade a amplitude de um sinal cuja frequência é duas vezes maior que sua frequência de corte. Um filtro passa baixa RC de segunda ordem acarretará uma atenuação de quatro vezes em um sinal com frequência duas vezes maior que sua frequência de corte. Este filtro pode ser obtido acoplando-se dois filtros RC de primeira ordem em série. Por exemplo, usando-se uma taxa de aquisição de 10 kS/s, a frequência de Nyquist será de 5 kHz. Caso se tenha um sinal não desejado com frequência de 8 kHz e um filtro de segunda ordem com frequência de corte de 3 kHz, o sinal de 8 kHz aparecerá sobreposto na frequência de 2 kHz. Contudo, devido à atenuação do filtro este sinal terá sua amplitude dividida por 7,1. Sendo assim, o sinal sobreposto em 2 kHz terá apenas 14% da sua amplitude original.

Para se obter resultados melhores se poderia utilizar filtros de mais alta ordem. Contudo, a medida que se aumenta a ordem do filtro, aumenta-se também o seu custo. Além disto, filtros de ordem superior à quarta tendem a produzir ondulações na banda passante, bem como a causarem aumento das perdas de sinal.

Segundo Smith (1999), um bom método para testes em geral consiste em definir a maior frequência de interesse, (f_g). A partir dela, definir a frequência de corte do filtro, aproximadamente 25% acima da máxima frequência de interesse. A frequência de amostragem é definida então como quatro vezes a máxima frequência de interesse.

A Fig. 5 apresenta este arranjo típico. Note-se que os valores aqui descritos são valores típicos utilizando-se filtros de quarta ordem. Para filtros de outras ordens os valores variarão de acordo com o máximo de sinal sobreposto que se aceita ter na faixa de interesse,

assim como de acordo com a disponibilidade de filtros e os limites de taxas de aquisição dos equipamentos disponíveis.

Smith (1999), apresenta ainda a idéia de que, especialmente para casos de engrenagens, pode-se diminuir a frequência de aquisição, uma vez que normalmente não se está interessado em definir a amplitude exata das harmônicas, e sim, na presença ou não de harmônicas de alta frequência. Como por exemplo, no caso de um pinhão de 40 dentes girando a 1500 rpm: Tem-se uma frequência de malha de 1 kHz. Sendo esta a frequência de interesse mais alta da medida em questão, se for definida a taxa de aquisição como de 10 kS/s, isto fará com que se possa ter a sexta harmônica sobreposta à quarta harmônica. Isto contudo é de pouca importância, pois não se está interessado em qual das harmônicas é dominante, mas sim na presença ou não de harmônicas de alta frequência. Isto permitiria utilizar taxas de aquisição mais baixas.

A Fig. 4 apresenta o esquema de um filtro RC de segunda ordem.

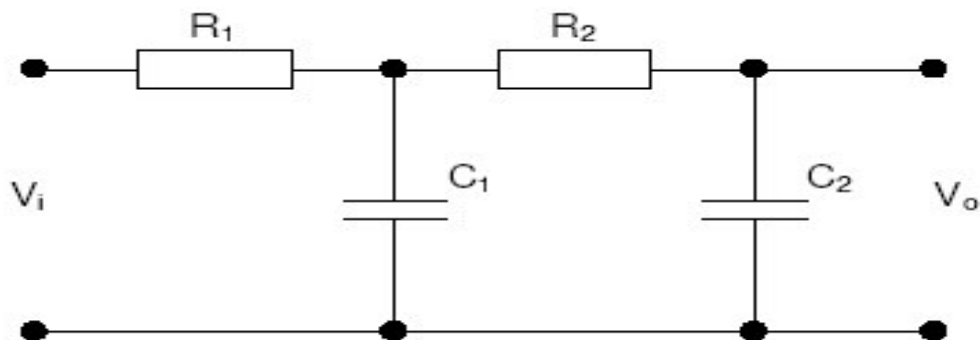


FIGURA 4 – Esquema de um filtro RC de segunda ordem

Fonte: Hallmann, 2002

Alguns termos importantes na nomenclatura dos filtros são: banda de passagem, banda de rejeição, frequência de corte, banda de transição e ordem.

A banda de passagem é a faixa de frequências que o filtro deixa passar, enquanto banda de rejeição ou de corte é a faixa de frequência que o filtro rejeita. A situação ideal seria que a primeira tivesse ganho unitário em toda a faixa e a segunda ganho zero em toda a faixa. Contudo, características construtivas dos filtros impedem que isso seja obtido na prática.

A frequência de corte é o final da banda de passagem. Quando nenhuma menção for feita, será definida como o ponto onde o sinal, em potência, tem uma atenuação de 3 dB.

Banda de transição é a faixa de frequências entre a banda de passagem e a banda de corte.

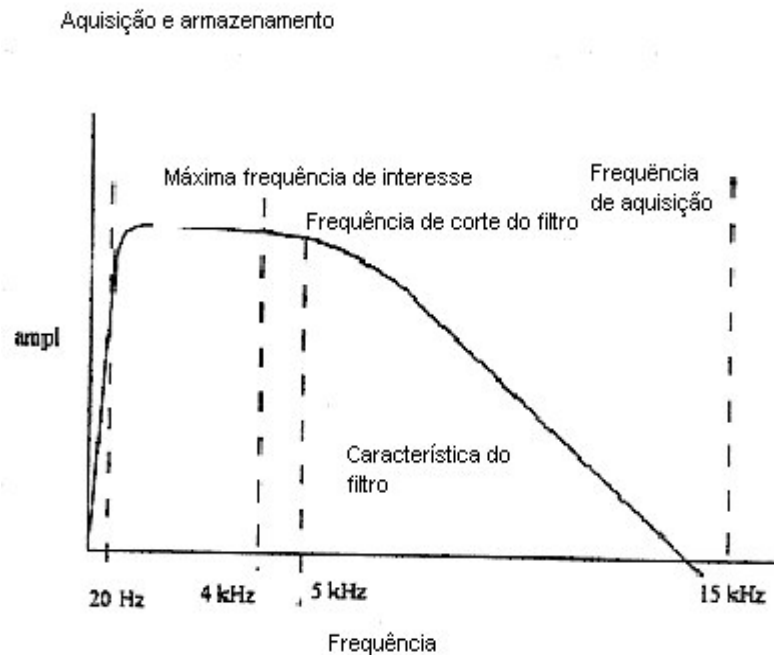


FIGURA 5 – Faixas de frequência em um arranjo típico para aquisição de dados

Fonte: Smith, 1999.

Ordem é o número de pólos do filtro. A ordem está diretamente ligada a taxa de atenuação. Um filtro passa baixa de primeira ordem terá uma taxa de atenuação de 6 dB/oitava, ou seja, ao se dobrar a frequência, (uma oitava), a amplitude estará diminuída pela metade, (6 dB). Um filtro de segunda ordem tem taxa de atenuação de 12 dB/oitava.

4.2.3 Onde medir

Segundo Goldman (1999), no caso de máquinas rotativas, a vibração dos elementos rotativos é transmitida através dos mancais e este fenômeno é mais pronunciado no caso de mancais de rolamentos do que com mancais deslizantes. Segundo Dalpiaz, Rivola e Rubini (1998), a maioria das técnicas atuais para diagnóstico de falhas em engrenagens são baseadas na análise dos sinais de vibração medidos nas carcaças das caixas de marchas.

Também segundo Goldman (1999), as medidas devem ser feitas com o acelerômetro perpendicular à superfície de interesse e, sobretudo sinais de alta frequência, devem ser medidos com o acelerômetro aparafusado ou colado à superfície de interesse, uma vez que manualmente não se consegue fixar o acelerômetro com rigidez suficiente para que este acompanhe corretamente os movimentos de alta frequência. A montagem com base

magnética é preferível à fixação manual, contudo não é tão boa quanto às montagens aparafusada ou colada para respostas em alta frequência.

4.3 MÉTODO DAS ASSINATURAS

O nome assinatura se refere a um padrão de um sinal que caracteriza um estado de um sistema. O termo não se refere apenas à vibração. Qualquer padrão de sinal de um sistema adquirido por sensores de pressão, temperatura, força, etc., pode ser considerado uma assinatura deste sistema. De acordo com Braun (1986), os principais campos de aplicação do método das assinaturas na engenharia mecânica, com as suas respectivas definições são:

Monitoramento das condições de uma máquina: o objetivo é basear a realização da manutenção em indicadores de desgaste ou falhas. Sendo isto possível através da identificação de padrões para os sinais quando a máquina está operando dentro de suas condições ideais, monitorando-se então estes sinais para que, quando os mesmos se distanciarem dos padrões, indicando desgaste ou proximidade de alguma falha, se realize a manutenção.

Controle de qualidade na produção: através do monitoramento de alguns sinais e da comparação destes com padrões, identificar componentes faltando ou falhados.

Teste modal, o qual se dá da seguinte forma: Uma estrutura é impactada por um martelo com sensores de força. A aceleração é então medida em diversos pontos da estrutura. Por meio das funções de transferência obtidas dos sinais adquiridos são ajustados modelos analíticas da estrutura. Estes modelos são utilizados para a checar a validade de modelos de elementos finitos ou para analisar o efeito de alterações estruturais.

Controle de ruído e vibração: são investigadas as fontes de ruído e os meios de propagação. A vibração em diferentes pontos é adquirida e o ruído num ponto determinado, gerando-se, baseado nestes dados, um modelo múltiplas entradas, uma saída. As propriedades de atenuação de ruído de uma material podem ser obtidas através da análise modal. O modelo pode ser utilizado para desenvolvimento de sistemas para atenuação de ruído.

Definição dos parâmetros para testes de durabilidade: uma máquina é posta para trabalhar em condições idênticas às que será submetida durante o seu trabalho. Durante este trabalho são adquiridos dados por meio de instrumentação, sendo os dados adquiridos então utilizados para definição dos parâmetros que devem ser utilizados nos testes de durabilidade.

Controle de processo: um padrão de sinais é obtido para fins de controle de processo, sendo então o processo instrumentado para ser constantemente monitorado. A parte do sinal lido que não se deve ao processo normal, ou seja, foge do padrão do processo, é usada para diagnóstico de problemas.

A Fig. 6 é um resumo das aplicações do método das assinaturas na engenharia mecânica.

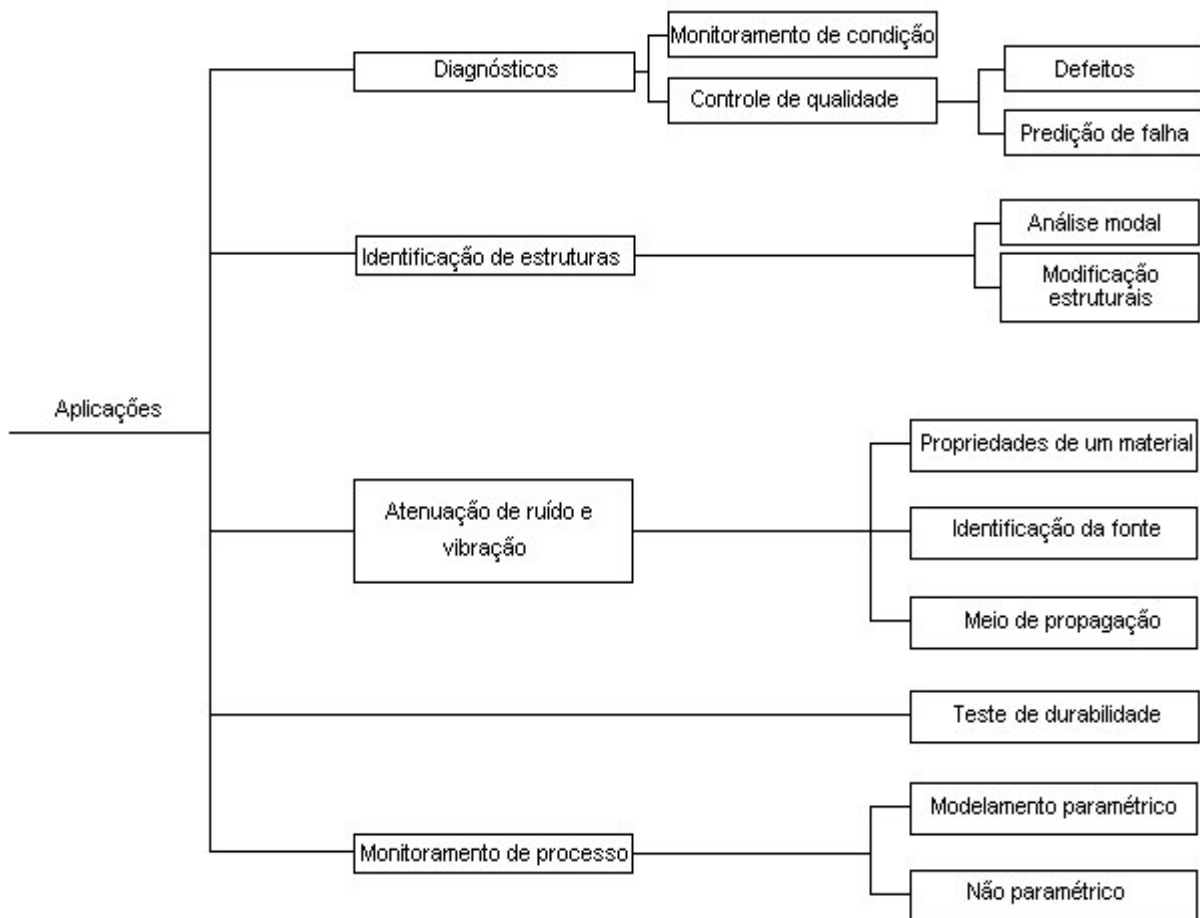


FIGURA 6 – Aplicações do método das assinaturas

FONTE: BRAUN, 1986.

4.3.1 Classificações quanto ao tipo de excitação para obtenção dos sinais e quanto ao tipo de sinal medido.

4.3.1.1 Caso passivo e caso ativo

Segundo Braun (1986), as áreas de aplicação do método das assinaturas se dividem em dois grupos. Caso passivo e caso ativo. Ele as define da seguinte forma: caso ativo

quando são adquiridos sinais enquanto o sistema recebe excitações controladas. Estas excitações controladas são definidas de forma a interrogar o sistema para se obter respostas desejadas. Análise modal é um exemplo de caso ativo. Caso passivo quando se faz uso de sinais adquiridos durante a operação normal do sistema. Neste caso a extração da assinatura é mais difícil do que no caso em que a excitação do sistema é controlada, contudo em condições de operação normal é mais relevante. Medições para diagnóstico de condições de máquinas são exemplos do caso passivo.

4.3.1.2 Sinais primários e secundários

Também segundo Braun (1986), os sinais primários são sinais que representam funções bem definidas do fenômeno monitorado, tais como força, velocidade, torque e temperatura. Podem ser utilizados para se retirar diretamente informação quantitativa. Já os sinais secundários são aqueles que são afetados pelos parâmetros investigados. Sendo então, considerados transportadores de informação, mas sem uma relação quantitativa com o fenômeno completamente conhecida. É por isso que a aplicação de sinais secundários requer o uso de banco de dados ou programas de testes. Ruído e vibração são exemplos de sinais secundários.

4.3.2 Fases do método das assinaturas

De acordo com Braun (1986), a sistemática do método das assinaturas pode ser desdobrada nos seguintes passos:

- a) Checar e avaliar as variáveis que serão monitoradas;
- b) Definir a faixa de frequência do sinal a ser medido;
- c) Usar os sensores, métodos de montagem e localização corretos e condicionadores de sinal. Este passo é obviamente ligado ao passo 2. Usar pré filtro se necessário;
- d) Baseado no conhecimento do sinal e dos meios de propagação, definir o domínio de análise e a técnica de processamento para a primeira fase da redução dos dados;
- e) Baseado no resultado de testes específicos ou banco de dados, escolher as próximas fases da redução, definição de parâmetros e estratégias de classificação. O produto final deve ser sensível a alterações na informação desejada e insensível a variações induzidas por qualquer outro efeito;
- f) Se necessário permitir o uso de múltiplos parâmetros, não relacionados e hierarquias entre eles na árvore de decisões;

- g) Permitir flexibilidade e alterações futuras nos passos e e f durante períodos de aprendizagem.

4.3.3 Técnicas de processamento

A Tabela 1 mostra uma avaliação das técnicas de processamento normalmente utilizadas no método das assinaturas. É importante salientar que a redução de dados pode ser obtida por vários métodos, incluindo transformação para outros domínios, além do tempo. Normalmente a capacidade de reconhecimento dos padrões, necessária para o método das assinaturas, é diminuída com o aumento da redução de dados. É necessária análise para se chegar a uma solução que leve em conta a redução de dados conveniente, mantendo a capacidade de reconhecimento de padrões necessária.

TABELA 1 – Avaliação das técnicas de processamento

Processamento	Redução	Reconhecimento de padrões
Sinal original, domínio do tempo	Nenhuma	Variável
Sinal filtrado, domínio do tempo	Pobre	Variável-boa
Domínio da frequência (Espectro)		
Alta resolução	Média	Boa
Média resolução	Alta	Variável-pobre
Domínio da amplitude		
Funções de probabilidade	Média	Pobre
Pico, RMS	Extrema	Pobre
Fator de crista, Kurtosis	Extrema	Variável
"Time domain averaging"	Média	Boa
Cepstrum	Média	Sem experiência suficiente
Correlação	Média	Sem experiência suficiente
Variância	Média	Sem experiência suficiente
Momentos	Alta	Sem experiência suficiente

Fonte: Braun, 1986.

4.4 ANÁLISE ESPECTRAL

Há várias razões para transformações para diferentes domínios. Esta transformação normalmente resulta em redução dos dados, o que muitas vezes é uma fase necessária no método das assinaturas. Contudo, ao se realizar transformações para diferentes domínios se busca sobretudo ter propriedades estatísticas ou melhorar o reconhecimento de padrões de sinais, ainda que não se tenha redução de dados.

De acordo com Braun (1986), “os principais aspectos buscados numa transformação de domínio são a redução de dados e a acentuação das características do sinal. Estes dois aspectos são evidentes na transformação para o domínio da frequência. Características como

a presença de periodicidade podem ser acentuadas ainda que sem envolver redução de dados. Normalmente as duas vantagens são obtidas simultaneamente”.

Ainda segundo Braun (1986), as razões para a análise espectral ser o método mais usado no método das assinaturas são:

- a) Capacidade de grande redução de dados. Algumas características aparecem melhor no domínio da frequência. A análise visual de espectros de frequência pode resultar em uma boa percepção intuitiva de propriedades dos dados. Alguns fenômenos são mais fáceis de se reconhecer, ainda que o mecanismo do fenômeno não seja perfeitamente entendido. Componentes periódicos em uma mistura de sinais são também mais facilmente percebidos no domínio da frequência.
- b) Algumas características dos dados podem ser extraídas mais facilmente por processamento aplicado ao sinal no domínio da frequência.
- c) Relações entre sinais multi - dimensionais podem ser mais fáceis de estabelecer ou avaliar no domínio da frequência.
- d) Métodos equivalentes de análise não implicam em mesmo esforço computacional. A decisão para analisar em um domínio específico pode ser motivado pela disponibilidade de implementação de software e hardware de maior eficiência. Análise espectral baseada no algoritmo de “Fast Fourier Transform”, (FFT), normalmente representa este caso.

4.4.1 “Fast Fourier Transform”

Segundo a teoria de Fourier, qualquer sinal $X(t)$ pode ser representado por um somatório de senos e cossenos. Para se aplicar a série de Fourier é necessário que o sinal seja contínuo e periódico no tempo, resultando da mesma um espectro discreto e aperiódico. Caso se deseje trabalhar com sinais contínuos no tempo, mas aperiódicos, é necessário que se trabalhe com a transformada de Fourier. Esta, a partir de um sinal contínuo e aperiódico no tempo, fornece um espectro contínuo e aperiódico.

Com o aumento da utilização de sinais amostrados em equipamentos digitais, tem-se a necessidade de se utilizar a teoria de Fourier para sinais discretos no tempo. Desta necessidade se desenvolveu a “Discret Time Fourier Transform”, (DTFT), a qual trabalha com sinais discretos e aperiódicos no tempo, fornecendo um espectro contínuo e periódico. É importante salientar que a DTFT tem pouca aplicação prática, uma vez que necessita de

tempo infinito, sendo apenas uma etapa para a transformada discreta em ambos, tempo e espectro.

A “Discret Fourier Transform”, (DFT) é a amostragem espectral da DTFT. Por meio da DFT pode-se ter um espectro discreto e periódico a partir de um sinal no tempo também discreto e periódico, permitindo a utilização de sinais digitais.

A “Fast Fourier Transform”, (FFT), nada mais é que um algoritmo computacionalmente rápido para se calcular a DFT. Cabe lembrar que estes algoritmos requerem que o número de pontos seja 2^N , por causa do mecanismo usado no cálculo. Quando o número de pontos não coincide com uma potência de 2, geralmente, os algoritmos realizam a complementação com zeros (“zero padding”).

4.4.2 Janelamento

O janelamento é sempre necessário para o algoritmo de FFT. Dependendo do que se deseje, pode-se optar por diferentes janelas, uma vez que as mesmas têm características diferentes. Estas diferentes características de cada janela tornam cada uma delas atraentes para algumas necessidades e não atraentes para outras.

A janela natural é a retangular. Nenhuma operação é necessária para obtê-la.

Basicamente se pode analisar as diferenças entre as janelas considerando-se duas características: largura do lóbulo central e vazamento espectral, esta segunda caracterizada por atenuação do lóbulo secundário.

Pode-se observar que a janela retangular é a que possui o lóbulo central mais estreito. Contudo, é também a que apresenta menor atenuação do lóbulo secundário. Caracterizando-se assim, por uma boa resolução para identificação dos picos de frequência, contudo também por um elevado espalhamento.

Uma janela com lóbulo central mais estreito proporcionará uma melhor resolução nos picos de frequência. Uma janela com maior atenuação do lóbulo secundário terá menor espalhamento e, conseqüentemente, menor vazamento espectral. Menor espalhamento diminui a possibilidade que sinais de baixa amplitude fiquem mascarados.

A seguir são apresentadas as Fig. 7, 8, 9 e 10, nas quais se pode observar a largura do lóbulo central e a atenuação do lóbulo secundário de quatro janelas comuns.

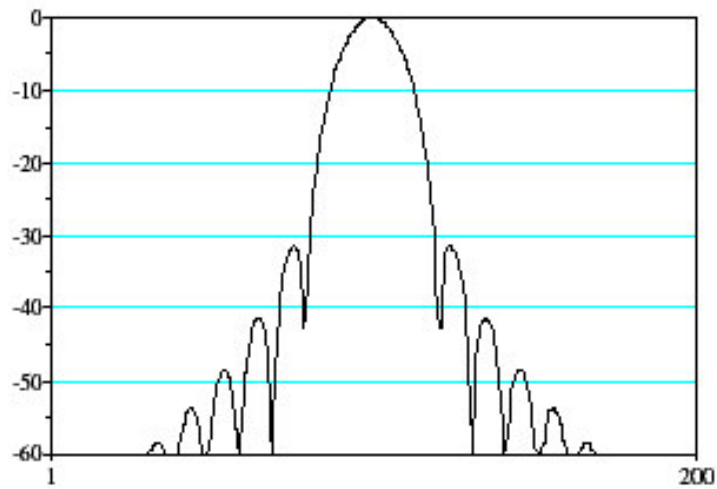


FIGURA 7 - Formato do espectro janela Hanning

Fonte: Hallmann, 2002

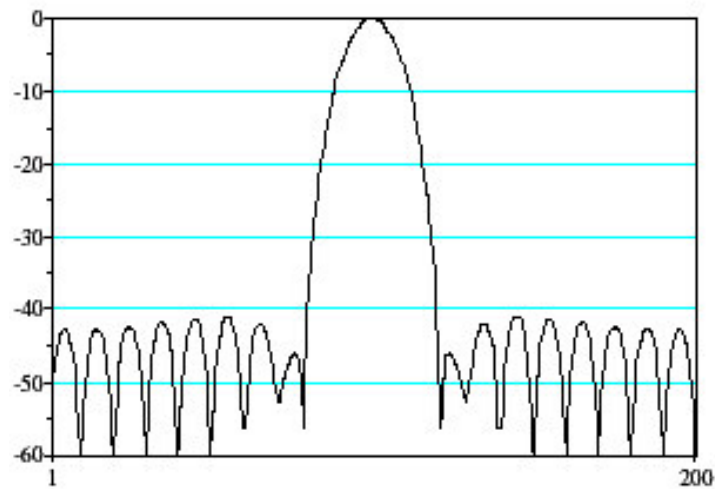


FIGURA 8 - Formato do espectro janela Hamming

Fonte: Hallmann, 2002

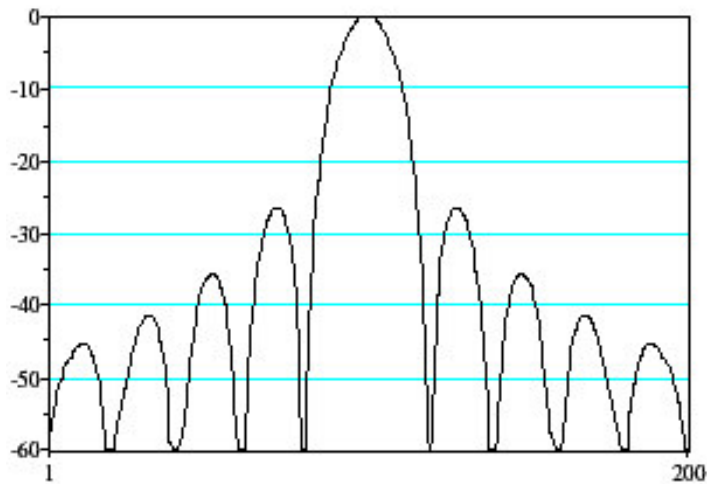


FIGURA 9 - Formato do espectro janela Triangular

Fonte: Hallmann, 2002

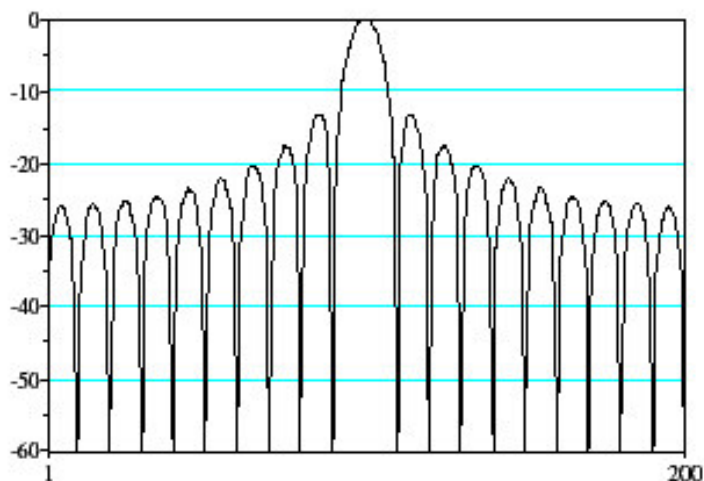


FIGURA 10 - Formato do espectro janela Retangular

Fonte: Hallmann, 2002

4.5 “ROOT MEAN SQUARE” (RMS) E VALOR PICO A PICO

O valor RMS é uma medida da energia contida no sinal. Conforme descrito por Lebold et al (2000), o valor RMS é útil para acompanhar o nível global de energia do sinal, o que pode dar bons indícios da presença de falhas, contudo não permite a identificação de qual o componente falhado.

O valor pico a pico é útil na identificação do nível de sinais de curta duração.

4.6 SINAIS CARACTERÍSTICAS DE FALHAS EM ENGRENAGENS

De acordo com Goldman (1999), no caso de engrenamentos, um nível de vibração alto na frequência de malha é característico de problemas que desviam as superfícies de contato dos dentes do seu padrão ideal, prejudicando o engrenamento, devido a causas como fabricação imprópria, desgaste ou folga incorreta. Alta energia em bandas laterais de frequência se deve a modulações causadas por as superfícies de contato dos dentes não estarem contatando no momento correto. Um exemplo de causa é o espaçamento dos dentes não estar correto. Eixos não perfeitamente paralelos ou engrenagens excêntricas, podem também causar modulação. Segundo Smith (1999), a deformação do eixo pode variar durante a rotação no caso de engrenagens sobrecarregadas, podendo ocasionar modulação devido à variação do alinhamento das hélices das engrenagens. Ainda segundo Smith (1999), a modulação pode ser devida também a deformações elásticas dos dentes durante a transmissão de potência.

Segundo Randall e Tech, citados por Menegatti e Duarte (1999), espectros de redutores em boas condições apresentam bandas laterais, porém em níveis que permanecem constantes ao longo do tempo. Sendo que mudanças no número e no comprimento das bandas laterais indicam deterioração no sistema.

Segundo Goldman (1999), outras duas frequências podem aparecer devido a falhas em engrenagens: A frequência denominada neste trabalho de dente repetido, quando o par de engrenagens possui em cada uma das engrenagens um dente falhado, causando um pico de amplitude toda vez que estes dentes se encontrarem e as “ghost frequencies”, originadas de problemas no processo de fabricação.

A Fig. 11 apresenta a correlação entre diferentes sintomas e diferentes falhas.

Sintoma	Problema
Alta amplitude na frequência de malha	Erro no dentado Desgaste Folga incorreta Engrenagens sobrecarregadas
Alta energia nas bandas laterais	Engrenagens excêntricas Eixos não paralelos Dente com trinca Carcaça com trinca Outras modulações (tais como acoplamentos desgastados)

FIGURA 11 – Diagnóstico de problemas em engrenamentos

Fonte: Goldman, 1999.

4.6.1 Engrenagens com defeito em apenas um dente

No caso de engrenagens com falha localizada em apenas um dente, o defeito é detectado com razoável facilidade no tempo, contudo não se observa variação significativa na frequência de malha desta engrenagem ou na frequência rotacional do eixo da mesma no espectro de frequências. Conforme Smith (1999), “Fica-se com o problema de que, embora se observe claramente o problema no tempo, uma simples análise no espectro de frequências esconde completamente a falha”. Isto, ainda segundo Smith (1999), ocorre também com métodos estatístico, porque o problema ocorre em apenas uma pequena parcela do tempo total de uma revolução. O nível de potência relacionado com o problema é pequeno quando considerado em toda a rotação, podendo facilmente desaparecer no ruído de fundo.

Para estes casos a análise do sinal no tempo pode trazer bons resultados. Duarte e Menegatti (1999), descrevem bons resultados na detecção de falhas em engrenagens de transmissões automotivas através da análise do sinal no tempo. Segundo Dunton (1998), a análise do sinal no tempo pode ser aplicada a qualquer problema de vibração.

Uma forma de se diminuir o ruído para análise no tempo é através de “time averaging”. O sinal no tempo é adquirido de forma sincronizada com a rotação do eixo no qual se quer analisar uma possível falha. Após é feita uma média de vários sinais medidos, os problemas que não estiverem ligados a este eixo serão consideravelmente diminuídos, uma vez que não se repetirão, acontecendo o mesmo com o ruído. Problemas ligados à rotação deste eixo ocorrerão sempre no mesmo ponto da rotação do eixo, sobressaindo-se quando calculada a média. Para isto contudo, é necessário que se tenha acesso ao eixo da engrenagem para monitorar sua rotação com um segundo canal de medição, sincronizando a este o canal no qual se realizará a medição de vibração.

5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental foi dividido em duas fases. Na primeira, o objetivo foi realizar medições para a identificação das assinaturas em cada uma das quatro marchas, com a caixa de grupos no neutro, para as transmissões sem defeitos operando na bancada de testes a 2400 RPM. Isto foi necessário devido ao fato de que para o caso destas transmissões não há parâmetros definidos. Sendo assim, optou-se por escolher quatro transmissões tidas como normais pelo critério de aprovação hoje utilizado na linha de montagem e, através de medições, levantar as assinaturas deste modelo de transmissão em cada uma das marchas. Buscou-se identificar parâmetros que identificassem as transmissões normais, para que estes parâmetros pudessem ser utilizados para distinção entre transmissões corretas e transmissões com problemas na caixa de marchas. Na segunda fase se buscou, através da indução de diferentes defeitos em diferentes engrenagens da caixa de marchas, identificar que alterações o sinal de vibrações sofreria quando da presença de diferentes defeitos em diferentes engrenagens da caixa de marchas, buscando identificar alterações típicas de cada defeito.

5.1 MEDIÇÃO SEM CARGA

Para evitar um número ainda mais elevado de frequências presentes e, tendo este trabalho se dedicado exclusivamente a defeitos em engrenagens da caixa de marchas, optou-se por realizar as medições com a caixa de grupos no neutro. Desta forma as engrenagens do diferencial, as quais não fazem parte do escopo deste trabalho, permanecem paradas. É bom salientar que todas as engrenagens das caixas de grupos e de marchas se mantêm girando sempre que a caixa de marchas está acionada. Como pode ser visto no tópico descrição da transmissão. Optou-se também por manter a engrenagem conduzida da tração dianteira no neutro, uma vez que a tração dianteira também não faz parte deste trabalho.

Logo, fica claro que a decisão de realizar as medições sem carga , (ou melhor, somente com a carga necessária para vencer os atritos internos da transmissão), vem do objetivo de se diminuir o número de engrenagens girando, diminuindo assim o número de frequências presentes. Deve-se observar aqui que, por características construtivas da bancada de testes, o eixo da tomada de força esta sempre girando durante os testes. Isto faz com que sempre o par de engrenagens da tomada de força esteja acionado durante o teste.

Existe uma segunda forma de se carregar esta transmissão que não via engrenagens do diferencial. Esta forma de carregamento se dá via eixo da tomada de força. As engrenagens da tomada de força, contudo, também não estão no escopo deste trabalho. Além disso, ao se carregar a transmissão via o eixo da tomada de força, carrega-se apenas o eixo superior da transmissão, não se carregando as engrenagens da caixa de grupos e de marchas.

A medição sem carga pode acarretar que pequenos defeitos superficiais não sejam percebidos devido ao fato de que pequenas imperfeições sejam corrigidas pelo filme de óleo em situações de baixa carga. Isto, segundo Goldman (1999), explica porque em alguns casos, em medições sem carga, algumas frequências de malha de engrenagens sem falhas não aparecem. No caso deste trabalho, isto foi considerado aceitável, uma vez que não se está interessado na visualização das frequências originadas de pequenas imperfeições superficiais, as quais são naturais em qualquer par de engrenagens, e sim em falhas que distanciem as engrenagens das condições normais, as quais as tornem inaceitáveis na linha de montagem. Diferentemente do caso em que se estivesse interessado em monitoramento de desgaste.

Bons resultados obtidos na identificação de falhas em final de linha de transmissões de automóveis com medições sem carga são apresentadas por Duarte e Menegatti (1999).

5.2 FORMA DE FIXAÇÃO DO ACELERÔMETRO

Para identificação da faixa de linearidade do acelerômetro, foram solicitados ao fabricante dados dos ensaios realizados pelo mesmo com amostras deste modelo de acelerômetro. Os dados recebidos foram de ensaios realizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo, IPT. Os gráficos com os resultados dos ensaios podem ser vistos em anexo. Os dados são de ensaios realizados em duas situações, com o acelerômetro preso por base roscada com prisioneiro e preso com base magnética.

Como pode ser observado nos gráficos anexos, quando utilizado com base magnética, o acelerômetro não apresenta resposta linear acima de 1 kHz, quando com base roscada com prisioneiro, a resposta é linear até 5 kHz.

Quanto às baixas frequências, pode-se ver que a amostra ensaiada, quando com base roscada com prisioneiro, apresenta resposta linear inclusive para valores abaixo de 5 Hz.

Não se pode furar todas as transmissões para realizar o ensaio. Assim sendo optou-se por realizar as medidas com um suporte colado à transmissão por meio de adesivo Loctite

496. O prisioneiro do sensor é roscado à base colada à transmissão, aproximando-se assim do comportamento obtido com o acelerômetro roscado.

Conforme recomendado por Tamagna (2001), o cabo do acelerômetro foi fixado para evitar ruídos de causa mecânica.

5.3 POSIÇÃO DE FIXAÇÃO DO ACELERÔMETRO

Conforme apresentado no tópico embasamento teórico, é bastante interessante a medição com acelerômetros na carcaça da transmissão. Neste caso isto se torna ainda mais interessante uma vez que permite preparar rapidamente o acelerômetro para a medida sem necessidade de desmontar partes da transmissão ou montagem de dispositivos especiais.

Os pontos de fixação podem ser vistos nas Fig. 12 e 13 a seguir. Procurou-se inicialmente realizar a medição nos três eixos. Vertical, horizontal, (perpendicular ao eixo longitudinal da transmissão) e horizontal, (paralelo ao eixo longitudinal da transmissão). Contudo, em virtude de não haverem superfícies usinadas nas quais se poderia realizar a colagem do acelerômetro, perpendiculares ao eixo longitudinal, optou-se por realizar as medições somente nos eixos vertical e horizontal, (perpendicular ao eixo longitudinal). Os pontos de fixação do acelerômetro foram escolhidos em função da posição de superfícies usinadas na carcaça da caixa de marchas que possibilitassem a colagem e a fixação do acelerômetro de forma perpendicular à superfície e também em função da proximidade destes pontos dos mancais dos eixos da caixa de marchas.

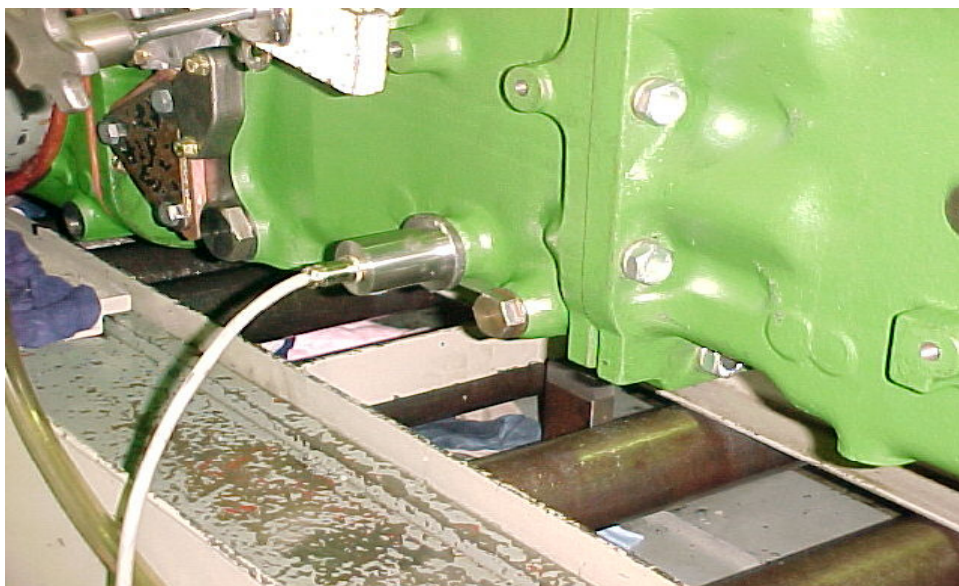


FIGURA 12– Fixação do acelerômetro na medição vertical

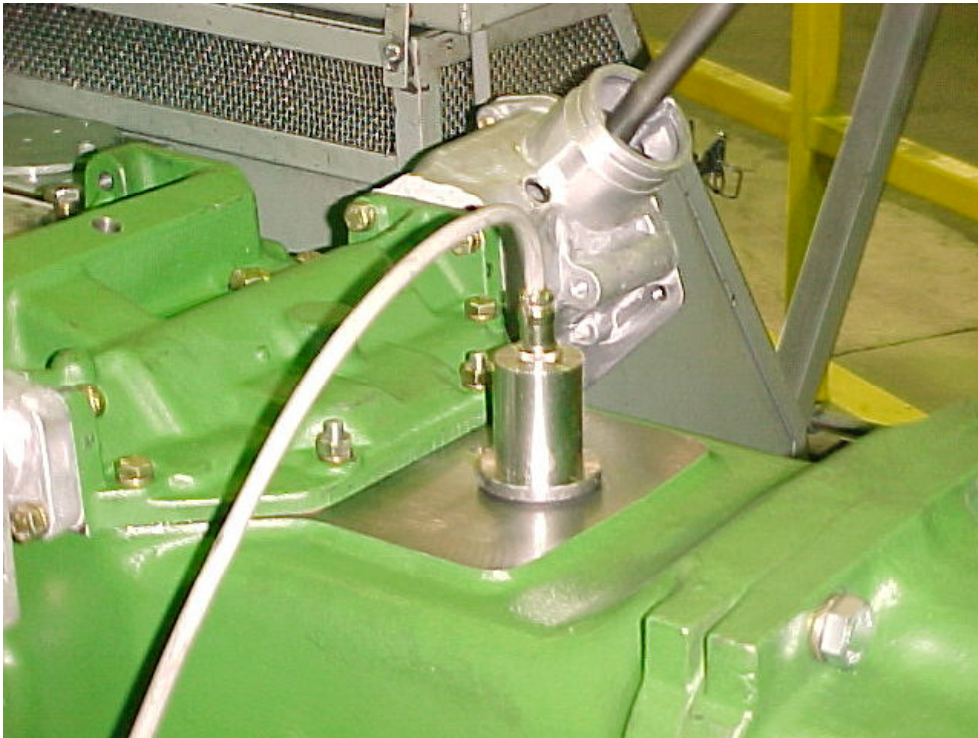


FIGURA 13– Fixação do acelerômetro na medição vertical

A Fig. 14 a seguir mostra um croqui das posições de fixação do acelerômetro nas medições vertical e horizontal.

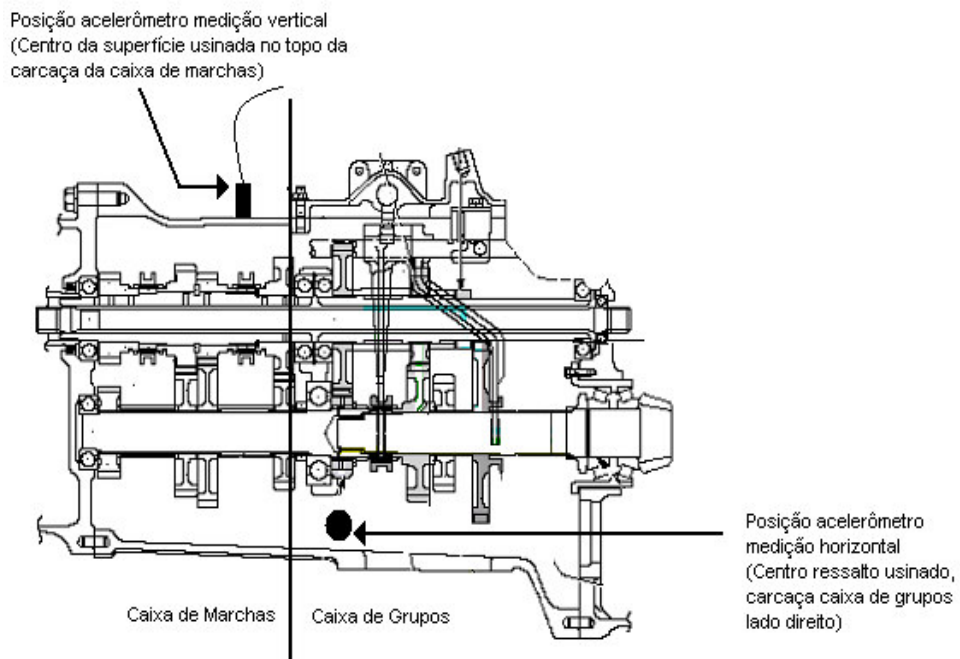


FIGURA 14– Posição do acelerômetro medições vertical e horizontal

5.4 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

Objetivando-se utilizar um equipamento disponível na empresa, sem necessidade de investimentos, optou-se por utilizar o analisador de vibrações NK 100 da Teknikao. Este equipamento é normalmente utilizado pelo setor de manutenção da JDB. Este aparelho foi adquirido junto à Teknikao em conjunto com o acelerômetro NK20 e um conversor analógico digital ADC 100 da Pico Technology, (fabricante do conversor analógico digital, ADC100 o qual é vendido em conjunto com o NK100 pela Teknikao). Da mesma forma, evitando-se gastos adicionais, e buscando tornar prática a utilização do método de diagnóstico, desenvolvido neste trabalho, aos casos reais de problemas de transmissões na linha de montagem, optou-se por realizar todas as medições na própria bancada de testes de final de linha da JDB.

A aquisição de dados foi feita utilizando-se o acelerômetro NK20, o analisador de vibrações NK100, o conversor analógico digital ADC100, um filtro passivo, passa baixa de segunda ordem com frequência de corte 13,2 kHz, para evitar sobreposição de espectro, e um computador portátil.

Os sinais adquiridos pelo NK20, alimentado pelo NK100, são filtrado em 13,2 kHz e transmitidos ao ADC100, onde se dá a conversão analógica digital. Os dados são então gravados no computador, numa planilha Excel, por meio de um programa para aquisição de dados utilizando planilhas Excel, denominado ADC10032, disponível na página da Pico Technology na internet, desenvolvido em Visual Basic.

A Fig. 15 abaixo é o esquema do equipamento de medição

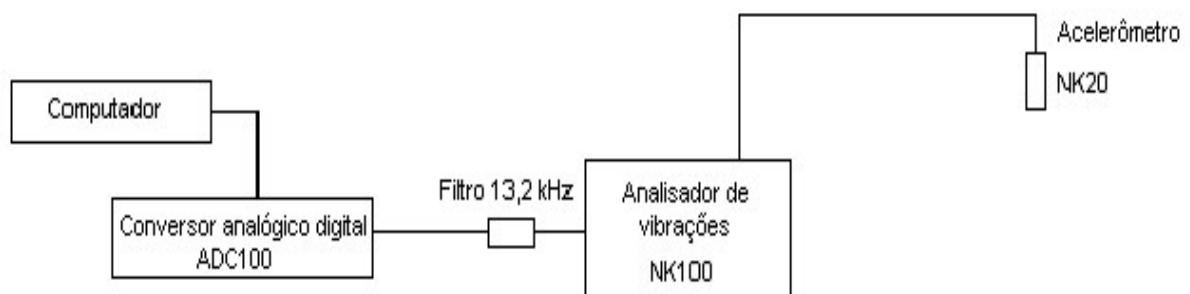


FIGURA 15 – Esquema do equipamento de medição

5.4.1 Analisador de vibrações e balanceador dinâmico NK 100

O NK 100 é um analisador de vibrações e balanceador dinâmico para equipamentos rotativos. É um equipamento analógico, tendo suas leituras analógicas convertidas pelo ADC 100 em sinais digitais os quais são transmitidos para o computador.

A leitura no computador pode ser feita via o Picoscope, forma como o NK100 é normalmente utilizado na John Deere Brasil. O Picoscope é um software desenvolvido pela PICO Technology para aquisição de dados. A limitação da utilização do PicoScope está no fato de a quantidade de dados que podem ser gravados é bastante pequena, impossibilitando aquisição de dados em frequências elevadas por tempos maiores que décimos de segundos.

Devido à esta limitação não foi utilizado o Picoscope, e sim o programa ADC10032, disponível na página da Pico Technology na Internet.

O NK 100 tem possibilidade de se acionar filtros de varredura. Estes filtros dão possibilidade de se realizar as medidas em três faixas de frequência, 100 a 2000 RPM, 1000 a 20000 RPM e 10000 a 200000 RPM. Dentro destas faixas o filtro pode ser posicionado em qualquer frequência para se ler o sinal apenas naquela frequência. O filtro é de 23 dB/oitava, ou seja, ao se dobrar a frequência, a amplitude do sinal é atenuada de forma a ficar com apenas 7% do valor original.

Quando utilizado com os filtros de varredura desligados, forma como foi empregado neste trabalho, a taxa de aquisição passa a ser definida pelo conversor A/D ADC 100 e, obviamente pelo software empregado. O equipamento tem resposta linear até 20 kHz. Isto é devido ao fato de que o amplificador operacional empregado no analisador tem resposta bastante atenuada a partir desta frequência.

5.4.2 Conversor analógico digital ADC 100

Conforme Pico Technology (2001), o ADC100 é um conversor analógico digital com 12 bits. Faixa de aquisição de 100 Ks/s. Erro máximo 3 % e erro típico 1%.

5.4.3 Acelerômetro NK 20

O acelerômetro NK20 é um acelerômetro piezoelétrico com amplificação interna e possibilidade de montagem com base magnética ou base roscada.

Como pode ser visto nas curvas de resposta de uma amostra deste acelerômetro ensaiadas no IPT no Anexo A, quando utilizado com prisioneiro montado à base roscada o acelerômetro NK20 tem uma faixa perfeitamente linear de 0 a 5 kHz. Havendo uma amplificação máxima de 1,5 dB na faixa de 5 a 13 kHz.

Pode também ser visto nos gráficos que a resposta tem uma faixa linear muito maior quando o acelerômetro é utilizado com base roscada. Quando utilizado com base magnética a faixa de linearidade se limita a valores inferiores a 1 kHz.

5.4.4 Computador portátil

Foi utilizado um computador portátil Toshiba Satellite 225 CDT, com processador Pentium 600 e 128 MB de memória RAM. O sistema operacional empregado foi Windows 98.

5.4.5 “Software” para aquisição de dados

Tendo-se em vista a necessidade de se adquirir dados em alta frequência, (60 kS/s), para posterior tratamento e análise, optou-se pelo emprego do ADC10032. Este programa está disponível na página da Pico Technology na internet. Permite leitura em um ou dois canais. A taxa máxima de aquisição para 1 canal é de 66,7 kS/s, quando empregado com Windows 98.

Os dados são gravados em planilha Excel. A taxa de aquisição, o número de canais e o tempo de aquisição podem ser definidos no ADC10032.

5.4.6 Bancada de teste de transmissões

Os ensaios foram realizados na mesma bancada empregada para os testes de final de linha das transmissões 5000 na JDB.

A transmissão quando em testes na bancada é movida por um motor elétrico. Este motor elétrico é conectado ao eixo de entrada da transmissão e, através deste a potência é transmitida à transmissão.

Também estão presentes três freios, os quais podem ser acionados pelo operador. Tem-se dois freios, um para cada lado do diferencial, (para roda traseira esquerda e para roda

traseira direita), e outro para a tomada de força. Os valores de torque e rotação podem ser lidos nos visores digitais.

As marchas e grupos são engrenadas pelo operador por meio de alavancas da própria bancada. Os testes são realizados com a transmissão montada sem a embreagem.

5.5 PRIMEIRA FASE

5.5.1 Definição das frequências envolvidas

Após a definição de que as medições se realizariam sem carga, com a caixa de grupos no neutro, partiu-se para a definição das frequências envolvidas.

Os testes foram todos realizados com a rotação de entrada de 2400 RPM, Para que as frequências envolvidas estivessem dentro da faixa ideal do sistema de medição.

Os Quadros 2, 3, 4 e 5 a seguir apresentam as frequências presentes com cada uma das marchas engrenadas com a caixa de grupos no neutro.

QUADRO 2 – Freqüências com a primeira marcha engrenada

Marcha 1^a

RPM do eixo de entrada = 2400

1 Marcha	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	28	2400	40	1120
Movida	50	1344	22	1120

2 Marcha	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	38	1662	28	1053
Movida	47	1344	22	1053

3 Marcha	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	43	1219	20	874
Movida	39	1344	22	874

Ré	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	32	1428	24	762
Louca	26	1758	29	762
Movida	34	1344	22	762

Engrenagens de redução Marcha - Grupo

	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	27	1344	22	605
Movida	50	726	12	605

Grupo A	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	12	726	12	145
Movida	42	207	3	145

Grupo B	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	29	726	12	351
Movida	43	489	8	351

QUADRO 3 – Freqüências com a segunda marcha engrenada

Marcha: 2ª

RPM do eixo de entrada = 2400

1 Marcha	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	28	3465	58	1617
Movida	50	1940	32	1617

2 Marcha	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	38	2400	40	1520
Movida	47	1940	32	1520

3 Marcha	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	43	1760	29	1261
Movida	39	1940	32	1261

Ré	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	32	2062	34	1100
Louca	26	2537	42	1100
Movida	34	1940	32	1100

Engrenagens de redução Marcha - Grupo

	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	27	1940	32	873
Movida	50	1048	17	873

Grupo A	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	12	1048	17	210
Movida	42	299	5	210

Grupo B	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	29	1048	17	506
Movida	43	707	12	506

QUADRO 4 – Freqüências com a terceira marcha engrenada

Marcha: 3^a

RPM do eixo de entrada = 2400

1 Marcha	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	28	4725	79	2205
Movida	50	2646	44	2205

2 Marcha	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	38	3273	55	2073
Movida	47	2646	44	2073

3 Marcha	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	43	2400	40	1720
Movida	39	2646	44	1720

Ré	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	32	2812	47	1499
Louca	26	3460	58	1499
Movida	34	2646	44	1499

Engrenagens de redução Marcha - Grupo

	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	27	2646	44	1191
Movida	50	1429	24	1191

Grupo A	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	12	1429	24	286
Movida	42	408	7	286

Grupo B	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	29	1429	24	691
Movida	43	964	16	691

QUADRO 5 – Freqüências com a ré engrenada

Marcha: Ré

RPM do eixo de entrada = 2400

1 Marcha	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	28	4034	67	1882
Movida	50	2259	38	1882

2 Marcha	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	38	2794	47	1769
Movida	47	2259	38	1769

3 Marcha	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	43	2049	34	1468
Movida	39	2259	38	1468

Ré	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	32	2400	40	1280
Louca	26	2954	49	1280
Movida	34	2259	38	1280

Engrenagens de redução Marcha - Grupo

	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	27	800	13	360
Movida	50	432	7	360

Grupo A	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	12	432	7	86
Movida	42	123	2	86

Grupo B	T	RPM	Freqüência (Hz)	Freqüência de malha (Hz)
Motora	29	432	7	209
Movida	43	291	5	209

5.5.2 Definição das freqüências de aquisição e da freqüência de corte do filtro

Com base nas freqüências presentes nas tabelas foi definida a faixa de freqüências de interesse. Esta faixa foi definida com valor máximo de 13,2 kHz, (6ª harmônica da maior freqüência de malha presente). A freqüência de corte do filtro foi definida como 13,2 kHz. A escolha de um filtro de segunda ordem tem por finalidade diminuir a amplitude de sinais de alta freqüência que poderiam ser rebatidos dentro da faixa de interesse, em função da maior atenuação deste tipo de filtro em relação ao de primeira ordem.

A taxa de aquisição de 60 kS/s foi definida em função da maior taxa de aquisição possível com o ADC100 trabalhando com o programa para aquisição de dados ADC10032 e também para minimizar a possibilidade e o efeito da sobreposição de espectro dentro da faixa de frequências de interesse, sobretudo na faixa das frequências fundamentais, abaixo 2,2 kHz.

Utilizando-se taxa de aquisição de 60 kS/s e um filtro de segunda ordem com frequência de corte 13,2 kHz, tem-se que somente sinais superiores à 46,8 kHz poderão aparecer sobrepostos dentro da faixa de interesse, e destes, somente os sinais de frequência superior a 57,8 kHz poderão se sobrepor na faixa de frequências fundamentais.

Deve-se salientar que a possibilidade de se ter sinais com frequência superior a 57,8 kHz com energia suficiente para trazer problema à medição é bastante pequena. Além disso, utilizando-se o filtro de segunda ordem com frequência de corte 13,2 kHz, tem-se que, caso se tenha um sinal com frequência de 57,8 kHz, pior situação em termos de atenuação da amplitude original do sinal espúrio, este aparecerá rebatido na frequência de 2,2 kHz com apenas 5,2 % de sua amplitude original, o que é bastante aceitável.

Para a identificação das harmônicas deve-se ter em mente que, como descrito no capítulo de embasamento teórico, está-se normalmente preocupado com a presença ou não de harmônicas de alta frequência e suas variações qualitativas, não com os valores exatos destas harmônicas. Sendo assim, pode-se dizer que se tem a possibilidade de identificar até a sexta harmônica, no pior caso que é o da frequência de malha das engrenagens da primeira marcha quando com a 3ª marcha engrenada. Obviamente estas harmônicas, sobretudo as de ordem mais altas podem estar atenuadas devido ao comportamento do filtro nas proximidades da frequência de corte, assim como, devido ao fato de que o NK20 não tem comportamento linear acima de 5 kHz. O efeito da atenuação do filtro abaixo da frequência de corte, em conjunto com a amplificação do sensor acima de 5 kHz é abordado no próximo tópico. Na faixa de 2,2 kHz a 13,2 kHz, faixa das harmônicas, a pior situação seria um sinal de 46,8 kHz rebatido sobre a frequência de Nyquist, (30 kHz), na frequência de 13,2 kHz, (frequência de malha das engrenagens da 1ª marcha com a 3ª engrenada). Neste caso se tem possibilidade de ter 8 % da amplitude original do sinal rebatida na frequência de 13,2 kHz, o que é bastante aceitável, especialmente porque aqui se deve novamente salientar que a possibilidade de se ter sinais com grande energia numa frequência de 46,8 kHz é bastante pequena. Além disso, está-se analisando uma situação extrema: A 6ª harmônica, (13,2 kHz), da mais alta frequência de malha possível. Caso se passe para a 5ª harmônica, (11 kHz) tem-se a possibilidade de apenas 7,2% da amplitude de um sinal a 49 kHz rebatido. No caso da segunda frequência de

malha mais alta (2 kHz), que é a das engrenagens da 2ª também com a terceira marcha engrenada, tem-se, na frequência de 12 kHz, (6ª harmônica), caso se tenha um sinal com frequência 48 kHz, apenas 7,6% de amplitude original.

No caso das baixas frequências, pode ser observado nas tabelas que há três casos onde as frequências estão abaixo da faixa na qual o fornecedor, conforme Tekinikao (2000), recomenda o sistema de medição, (acelerômetro NK20 e analisador de vibrações NK100) como linear. Segundo o fornecedor, o sinal é bastante atenuado abaixo de 5 Hz, especialmente devido a características do analisador de vibrações NK100, uma vez que, como pode ser visto pelas curvas da amostra ensaiada no IPT em anexo, o acelerômetro possui resposta linear inclusive abaixo de 5 Hz. Tendo-se em vista as recomendações do fornecedor, optou-se por considerar o sinal linear apenas acima de 5 Hz. Isto não traz problemas para medição, uma vez que este trabalho se dedica exclusivamente a falhas nas engrenagens da caixa de marchas. Os sinais das frequências de malha das engrenagens do grupo A, quando com a primeira marcha engrenada e dos grupos A e B quando com a ré engrenada, (os três casos com frequências inferiores a 5 Hz), estarão atenuadas.

5.5.3 Influência conjunta da atenuação do filtro e da amplificação do sensor na faixa 5 a 13,2 kHz

Foi realizada uma análise na faixa de 5 a 13,2 kHz para identificação de o quanto o sinal estaria afetado pelos dois fatores, amplificação devido ao acelerômetro e atenuação devido ao comportamento do filtro abaixo de sua frequência de corte. O Quadro 6 apresenta os valores de atenuação do sinal quando considerado o efeito conjunto. Esta tabela foi feita com base na observação visual dos valores da curva do acelerômetro e também de um diagrama de Bode típico para filtros de segunda ordem. Como pode ser visto no diagrama de Bode, Fig. 16, a atenuação de um filtro de segunda ordem abaixo de sua frequência de corte varia de -3 dB na frequência de corte, a um valor próximo de zero duas oitavas abaixo, (neste caso 3,3 kHz). Logo, se considerando que o acelerômetro é linear abaixo de 5 kHz e não há efeito de atenuação do filtro abaixo de 3,3 kHz, fica claro o comportamento linear do sistema de medição na faixa das frequências fundamentais (de 5 Hz a 2,2 kHz). Na faixa das harmônicas se pode considerar duas faixas: Uma vez que acelerômetro é linear até 5 kHz e nesta faixa se pode ainda considerar o efeito de atenuação do filtro como nulo, o comportamento ainda é linear. Entre 5 kHz e 13,2 kHz a atenuação do filtro acaba por diminuir o efeito da amplificação do acelerômetro, como numa espécie de linearização.

Embora o resultado não seja propriamente linear, observa-se pelo Quadro 6, que no mínimo se terá 79 % da amplitude original. O que é bastante aceitável para as harmônicas.

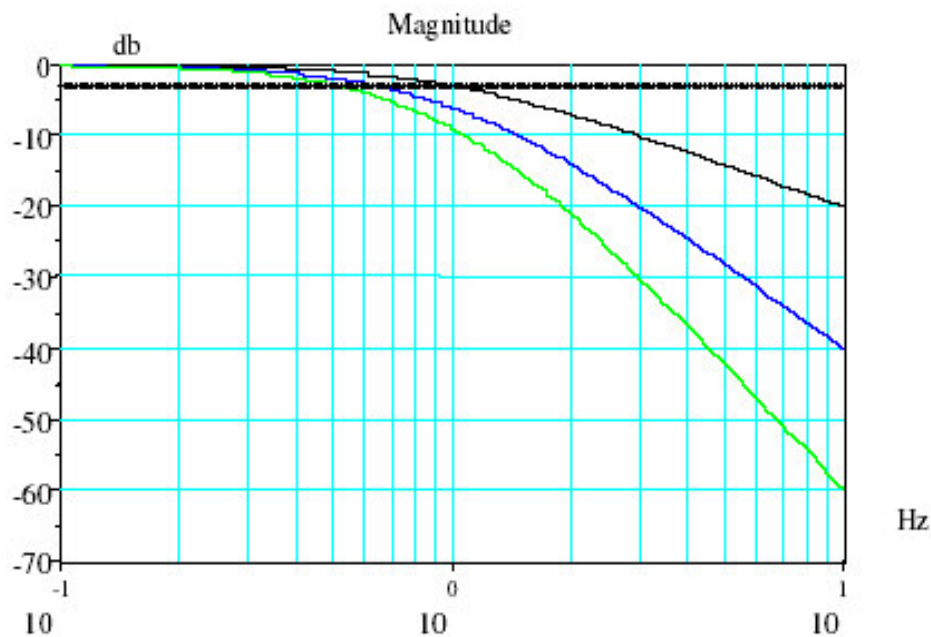


FIGURA 16- Diagrama de Bode filtros passivos de primeira, segunda e terceira ordem

Fonte: Hallmann, 2002

QUADRO 6 – Efeito conjunto atenuação do filtro e amplificação do acelerômetro

Freqüência (Hz)	Atenuação do filtro (dB)	Amplificação do acelerômetro (dB)	Amplitude presente	Efeito conjunto em dB
5000	0	0	100%	0
6000	-1.5	1.25	97%	-0.25
7000	-2	0	79%	-2
8000	-2	1	89%	-1
9000	-2	1.5	94%	-0.5
10000	-2	1.8	98%	-0.2
11000	-2	2	100%	0
12000	-3	2.25	92%	-0.75
13200	-3	2.5	94%	-0.5

5.5.4 Tempo de medição

Com base na mais baixa freqüência presente foi definido o tempo de aquisição. Tomando-se 5 Hz como a mais baixa freqüência possível de ser identificada, tem-se que com um tempo de aquisição de 1 s, ter-se-á 5 valores nesta freqüência lidos, o que foi considerado aceitável para este trabalho. Como a taxa de aquisição é bastante alta, 60 kS/s, ao se aumentar o tempo de aquisição se teria um número muito elevado de dados e se tornaria necessário trabalhar com arquivos muito grandes, passando inclusive do limite de linhas das planilhas do Excel, software utilizado para o armazenamento dos dados.

5.5.5 Número de transmissões ensaiadas

O objetivo desta primeira fase de medições foi levantar a assinatura deste modelo de transmissão. Para isso, mediram-se quatro transmissões tidas como normais pelos critérios atualmente utilizados. Em cada uma das transmissões foram realizadas oito tomadas de dados com duração de um segundo. Uma horizontal e outra vertical em cada marcha, com a caixa de grupos no neutro.

Para a identificação do nível de ruído causado por fontes externas à bancada de testes e à transmissão, para cada transmissão ensaiada foi feito um ensaio com a bancada desligada.

Os ensaios foram realizados fora do expediente normal de trabalho da fábrica para que se tivesse menos ruído presente no ambiente de medição.

5.6 SEGUNDA FASE

Foram elegidos problemas típicos que podem ocorrer em engrenagens. A identificação se baseou num levantamento junto ao pessoal da linha de montagem dos problemas que já foram observados e também de problemas possíveis.

Os problemas eleitos foram engrenagens com batida em um dente e engrenagens com problemas no perfil do dentado. Sendo assim, foi decidido se realizar três medições. A primeira para levantar a alteração causada no espectro pela indução de uma engrenagem da ré com problema no perfil do dentado em uma transmissão boa. A segunda para levantar as alterações causadas por uma engrenagem conduzida da primeira marcha com batida em um dos dentes e a terceira medição para levantar as alterações causadas por uma engrenagem conduzida da segunda marcha com batida em um dos dentes.

Os parâmetros e procedimentos para aquisição de dados foram mantidos os mesmos utilizados no levantamento da assinatura nas quatro marchas.

6. TRATAMENTO DE DADOS

O tratamento de dados foi realizado com o software SAD, desenvolvido pelo Laboratório de Medições Mecânicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Para cada amostra foi calculado o valor RMS e o valor pico-a-pico do sinal no tempo. Foi também realizada a FFT de cada sinal no tempo para se obter o espectro de frequências.

6.1 RETIRADA DO COMPONENTE DC

Os sinais obtidos apresentavam presença de um componente de corrente contínua, o qual deslocava a média do sinal levemente do zero. Este componente não tem ligação com o fenômeno, devendo-se possivelmente a limitações no amplificador do NK100. Estes sinais foram retirados no software Excel por meio de subtração da média dos valores instantâneos.

6.2 FAST FOURIER TRANSFORM

A FFT foi realizada utilizando-se o software para aquisição e tratamento de dados SAD. Desenvolvido pelo Laboratório de Medições Mecânicas da Universidade Federal do Rio Grande do SUL

Para se obter a melhor resolução possível para a frequência central, foi utilizada a janela retangular. Não se optou por outra janela que pudesse diminuir o espalhamento porque, em virtude da grande quantidade de frequências de baixa amplitude presentes, frequências estas devidas ao grande número de componentes da transmissão, sobretudo rolamentos e engrenagens da caixa de grupos que permanecem girando quando com uma marcha engrenada, ainda que com a caixa de grupos no neutro, não se obteria melhoria significativa em termos de possibilidade de identificação de sinais de baixa amplitude. Optou-se assim por usar a janela retangular devido a ser a janela cujo lóbulo central é mais estreito, o que proporciona a melhor definição para os picos de amplitude.

6.3 “Root mean square” (RMS) e valor pico a pico

Ambos foram calculados através do software SAD

7. ANÁLISE DOS RESULTADOS

7.1 PRIMEIRA FASE

As figuras a seguir apresentam os espectros de frequência dos sinais no tempo de cada uma das três primeiras das quatro transmissões padrão ensaiadas com as 4 marchas engatadas. No Anexo B são apresentados também os espectros da quarta transmissão ensaiada para definição do padrão. Primeiro são apresentados os espectros obtidos com o acelerômetro no sentido horizontal e depois no sentido vertical. Nota-se, em quase todas as medições, a presença de um pico de pequena amplitude na frequência de malha do engrenamento da tomada de força. É interessante notar que esta frequência não se altera nas diferentes marchas. Uma vez que a redução para a tomada de força é uma redução direta do eixo de entrada da transmissão, a frequência de malha neste caso independe da marcha

Deve ser observado que tanto nos sinais no tempo como no espectro de frequências foram omitidos os fatores de ganho e por conseqüência as unidades dos eixos das ordenadas devido ao fato de que estas informações são propriedade da John Deere Brasil.

7.1.1 Medições horizontais

7.1.1.1 Medição Horizontal – 1ª Marcha

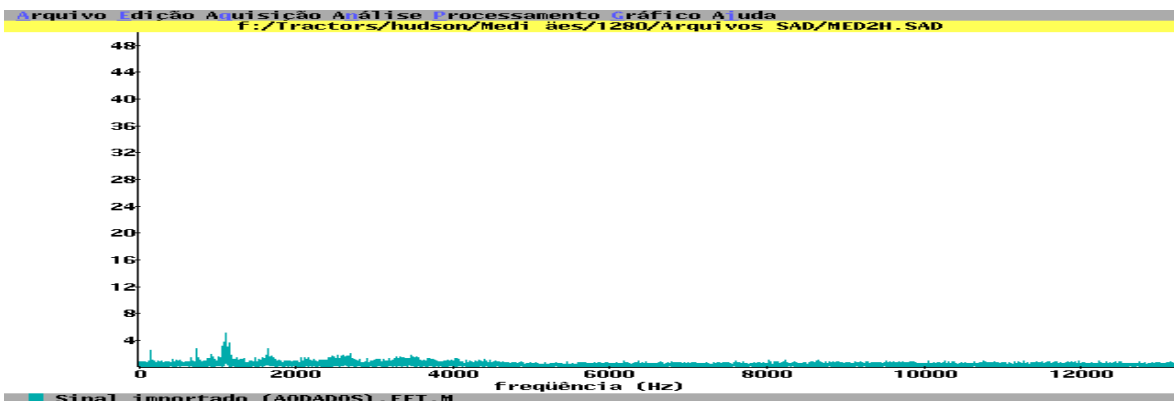


FIGURA 17 – Transmissão 1 – Primeira Marcha – Medição Horizontal

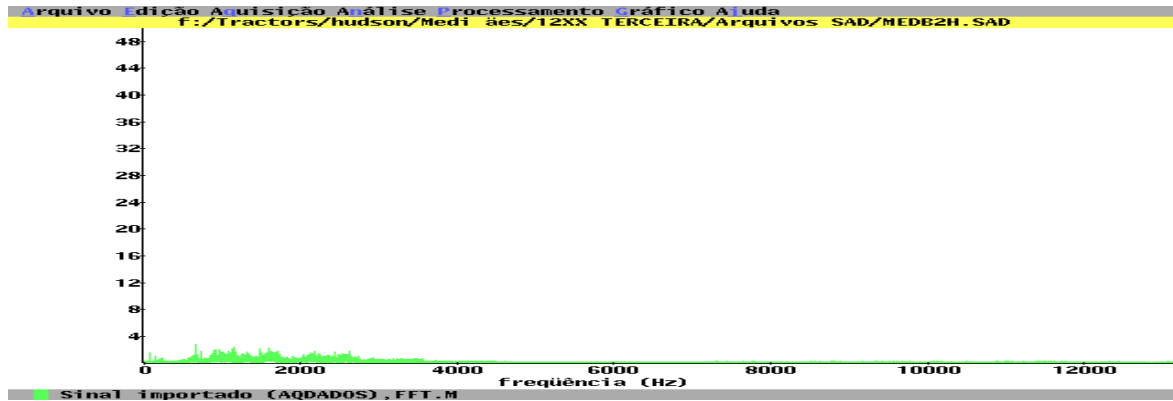


FIGURA 18 – Transmissão 2 – Primeira Marcha – Medição Horizontal

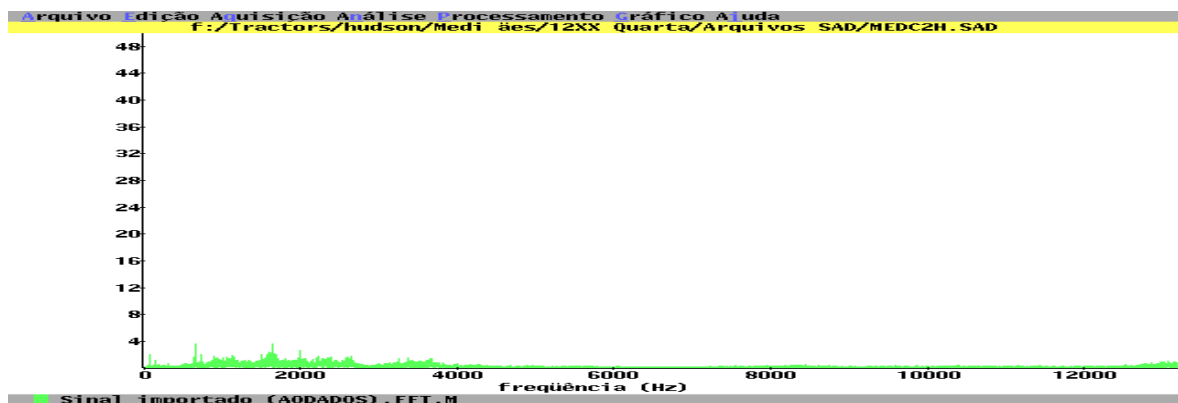


FIGURA 19 – Transmissão 3 – Primeira Marcha – Medição Horizontal

Nestas três transmissões as amplitudes em todas as frequências são bastante baixas, sempre abaixo de 5. Na primeira medição se observa um pequeno pico na frequência de malha da 1ª marcha, (1120 Hz), mas mesmo este pico tem amplitude bastante baixa, abaixo de 5.

7.1.1.2 Medição Horizontal – 2ª Marcha

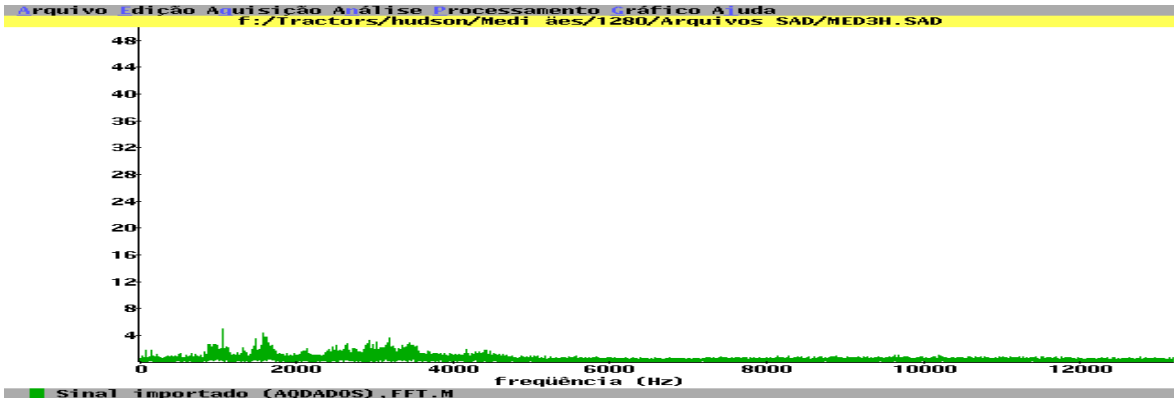


FIGURA 20 – Transmissão 1 – Segunda Marcha – Medição Horizontal

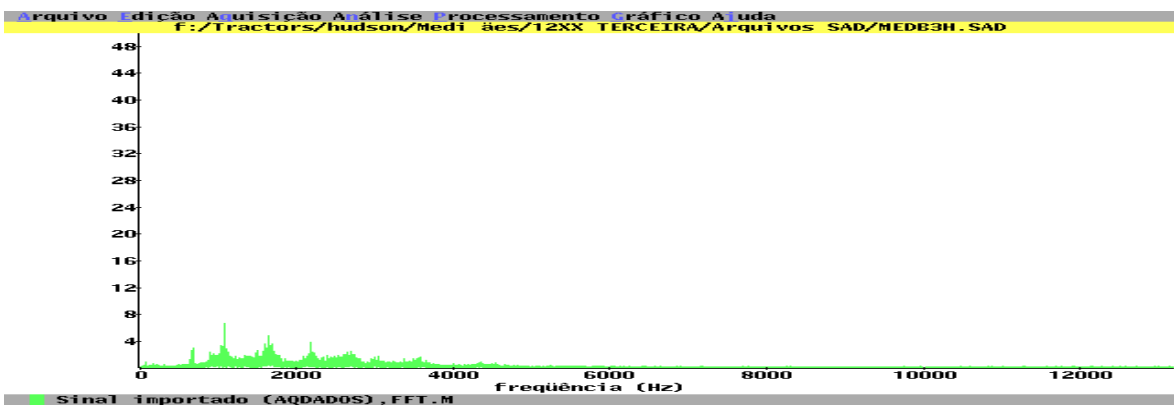


FIGURA 21 – Transmissão 2 – Segunda Marcha – Medição Horizontal

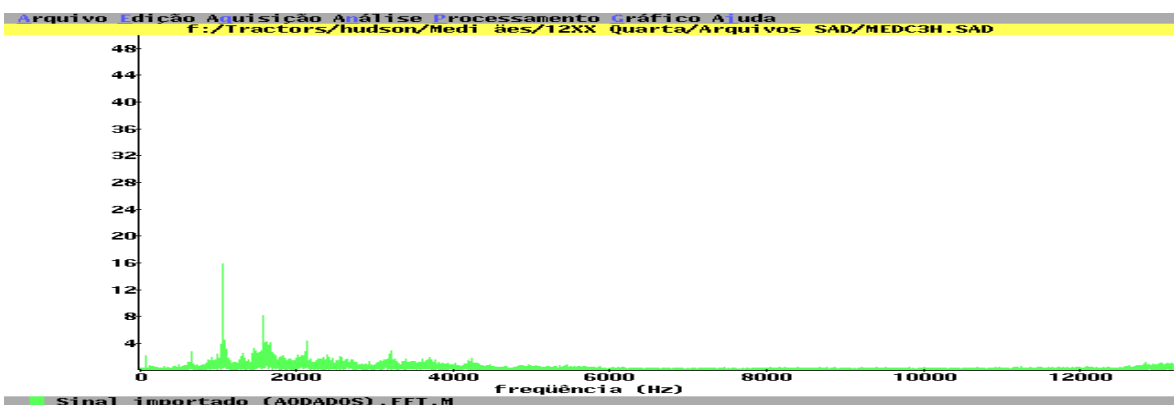


FIGURA 22 – Transmissão 3 – Segunda Marcha – Medição horizontal

No caso da segunda marcha se observa sempre a presença de picos nas frequências de malha da ré, (1100 Hz), da primeira, (1617 Hz) e da segunda, (1520 Hz), destacando-se o pico na frequência de malha da ré. Nota-se também a presença de harmônicos com frequência duas e três vezes a frequência de malha da ré. Os valores dos picos são sempre inferiores a 16.

7.1.1.3 Medição Horizontal – 3ª Marcha

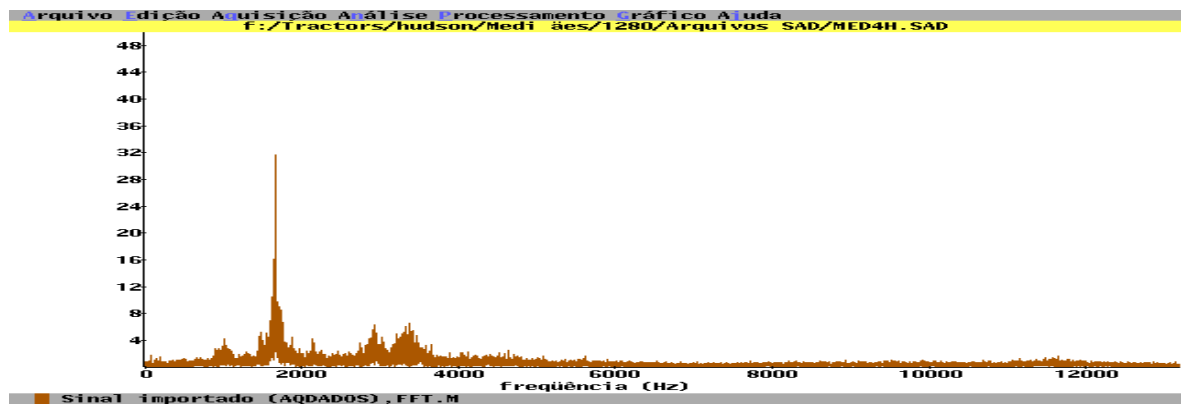


FIGURA 23 – Transmissão 1 – Terceira Marcha – Medição horizontal

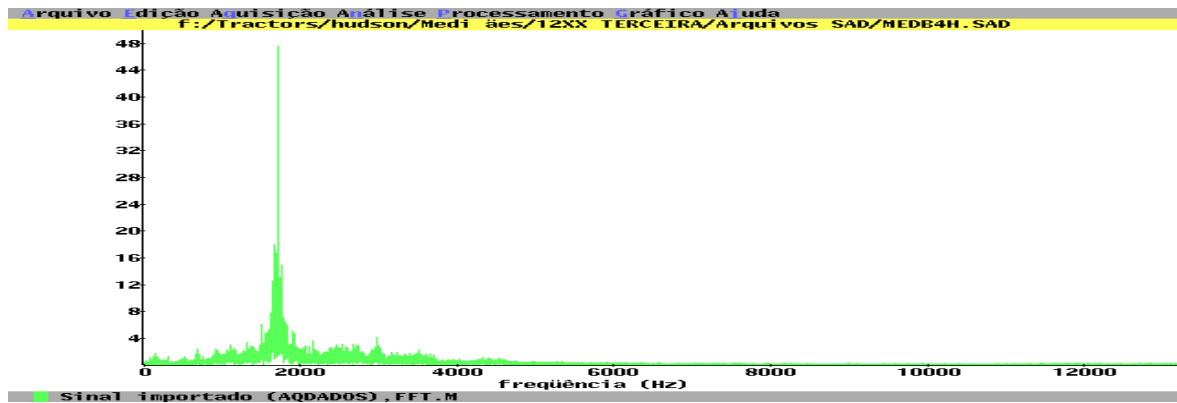


FIGURA 24 – Transmissão 2 – Terceira Marcha – Medição horizontal

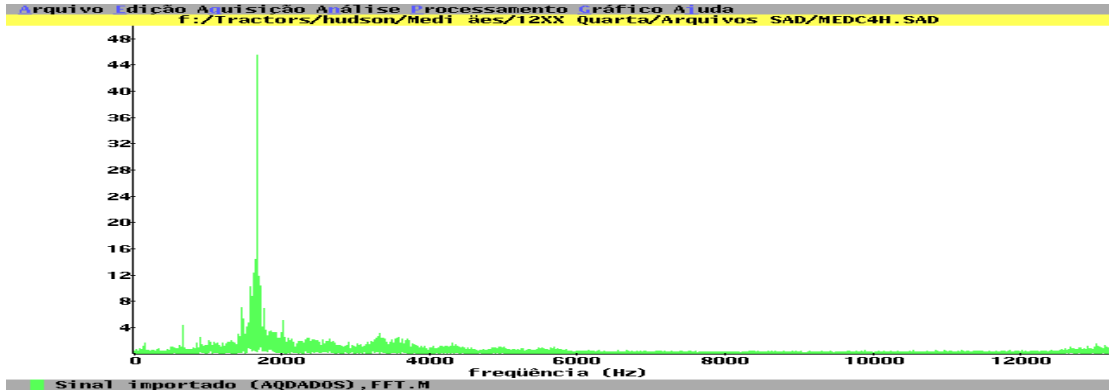


FIGURA 25 - Transmissão 3 – Terceira Marcha – Medição Horizontal

No caso das medições com a terceira marcha engrenada se observa sempre um pico bastante acentuado na frequência de malha da terceira marcha, (1720 Hz) . O valor do pico na frequência de malha da terceira marcha é sempre inferior a 50. Os valores máximos dos demais picos são sempre inferiores a 8.

7.1.1.4 Medição Horizontal – Ré

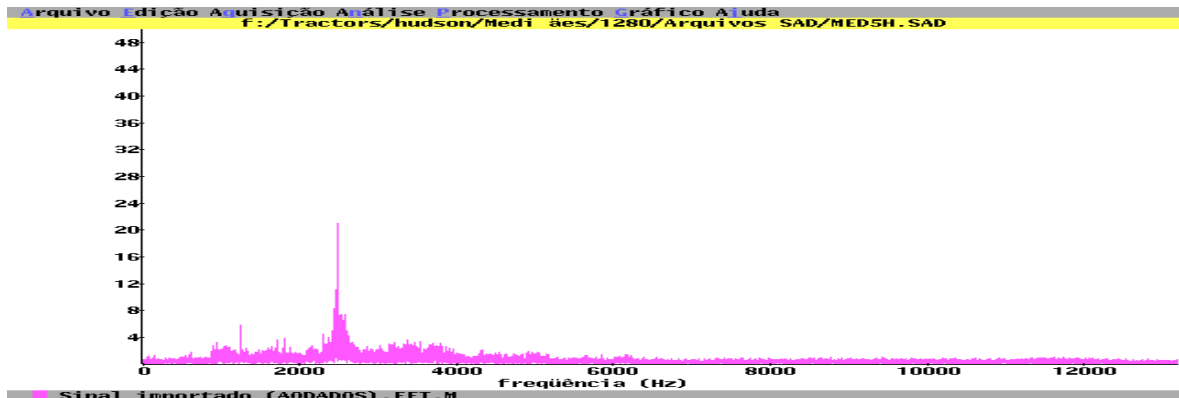


FIGURA 26 – Transmissão 1 – Ré – Medição horizontal

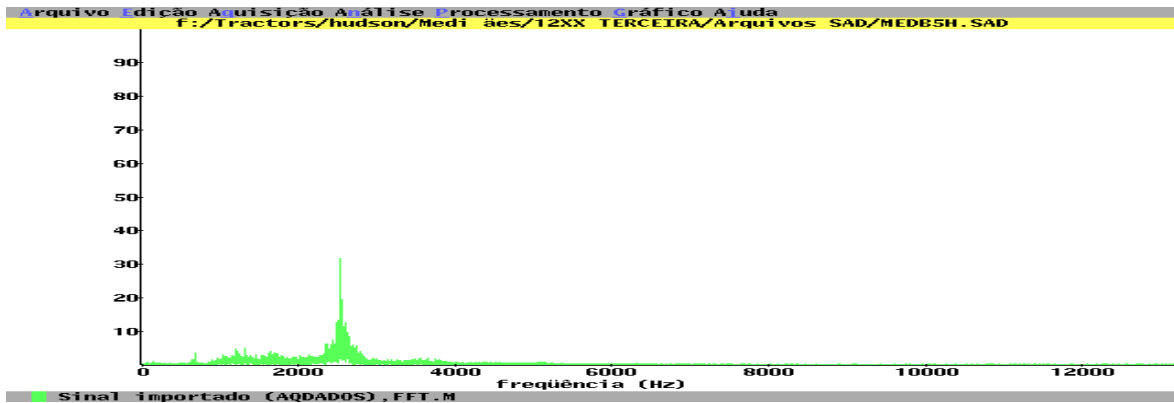


FIGURA 27 – Transmissão 2 – Ré – Medição horizontal

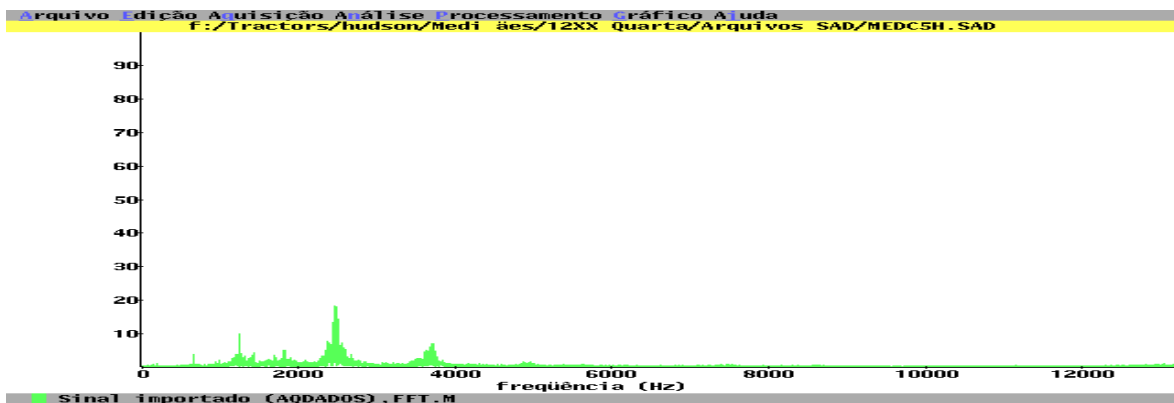


FIGURA 28 – Transmissão 3 – Ré – Medição horizontal

No caso das medições com a ré engrenada observou-se sempre a presença picos nas frequências de malha da ré, (1280 Hz), e sua 2ª harmônica. A frequência mais acentuada é sempre a de duas vezes a frequência de malha da ré. Isto se deve ao fato de que no caso da ré se tem na verdade três engrenagens em contato. O valor do pico nesta frequência é sempre inferior a 40. Os picos nas demais frequências são sempre inferiores a 10.

7.1.2 Medições verticais

7.1.2.1 Medição vertical 1ª marcha

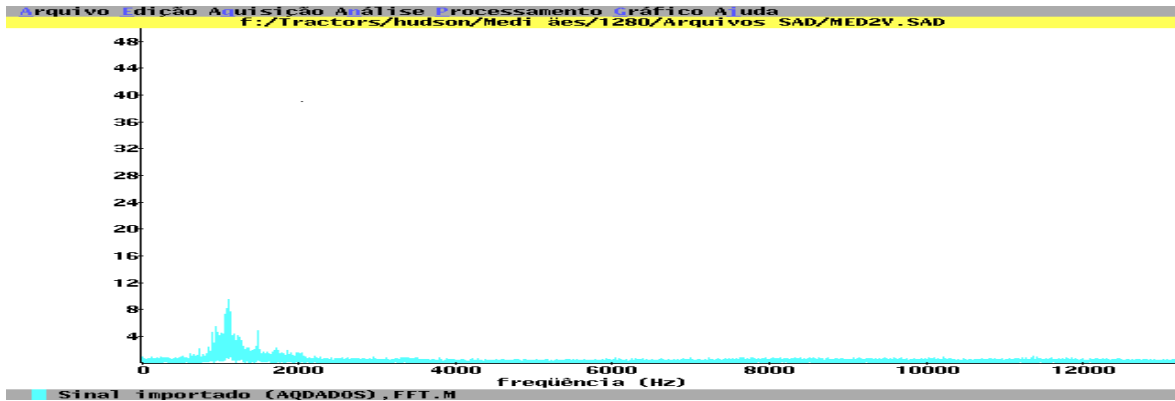


FIGURA 29 – Transmissão 1 – Primeira Marcha – Medição Vertical

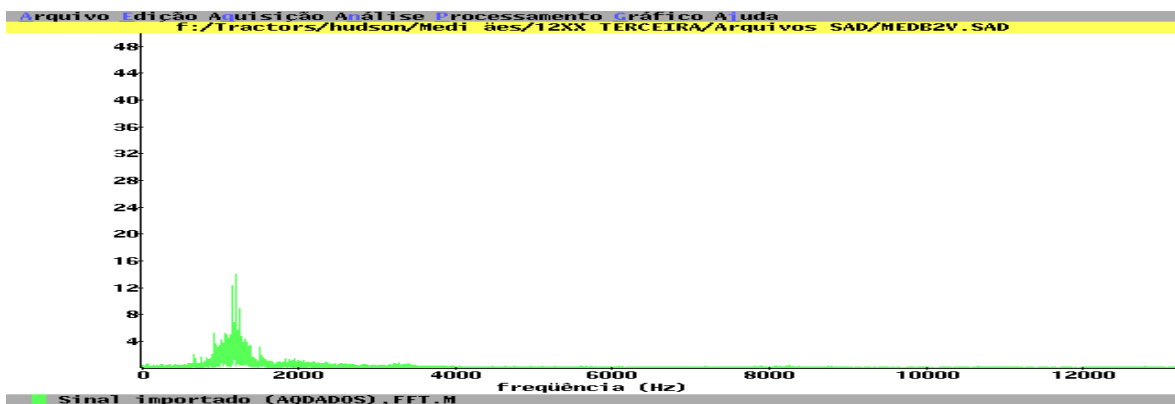


FIGURA 30 Transmissão 2 – Primeira Marcha – Medição Vertical

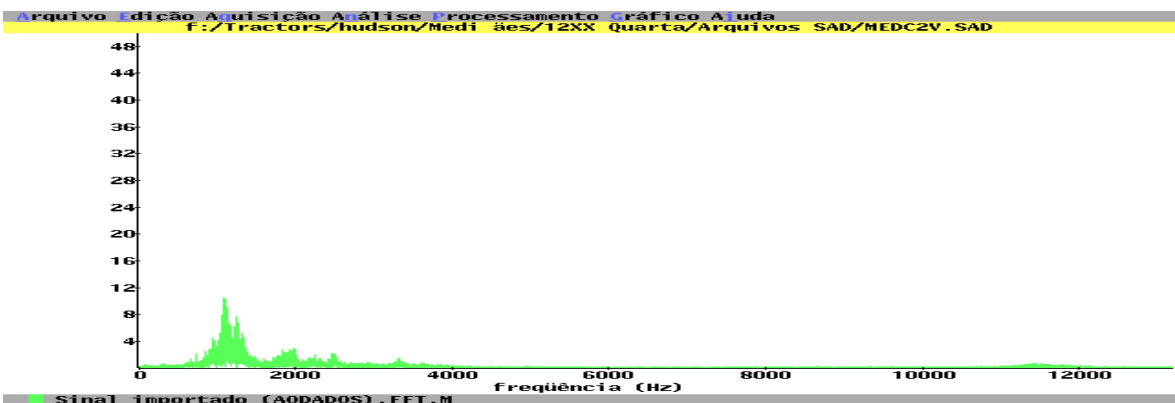


FIGURA 31– Transmissão 3 – Primeira Marcha – Medição Vertical

Nestas medições se observa destaque para um pico na frequência de malha da primeira marcha, (1120 Hz). São observados também sinais, ainda que bem menos acentuados na frequência de malha ré, (762 Hz) e da segunda marcha, (1053 Hz). O valor máximo do pico na frequência de malha da primeira marcha é sempre inferior a 16. Os demais picos têm valores sempre inferiores a 8.

7.1.2.2 Medição Vertical 2ª Marcha

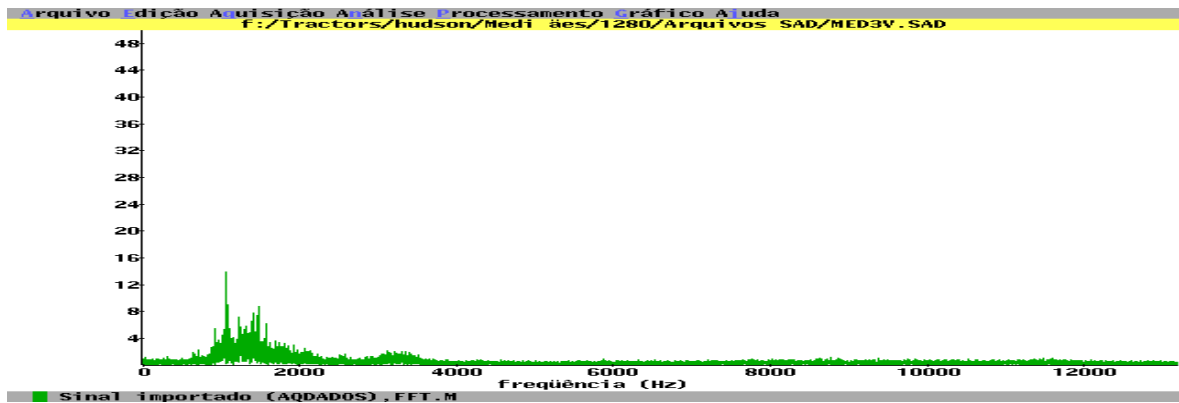


FIGURA 32 – Transmissão 1 – Segunda Marcha – Medição Vertical

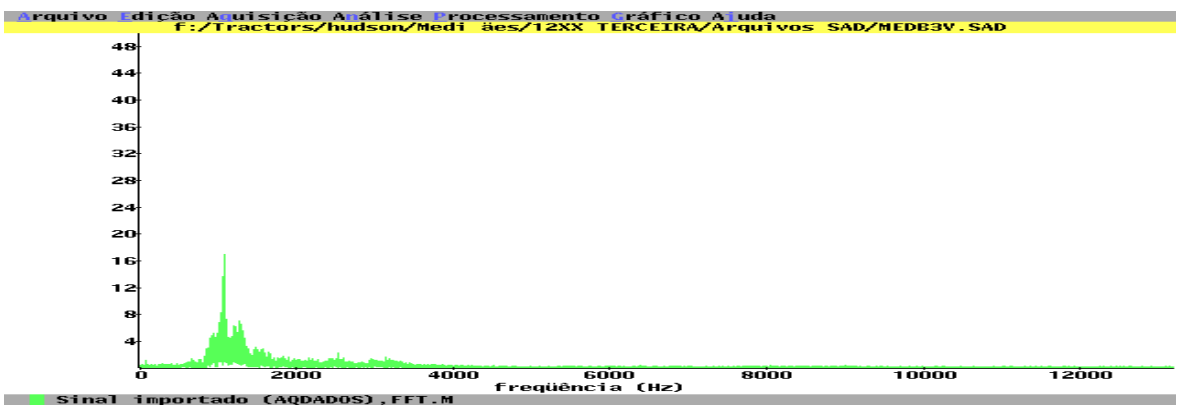


FIGURA 33 – Transmissão 2 – Segunda Marcha – Medição Vertical

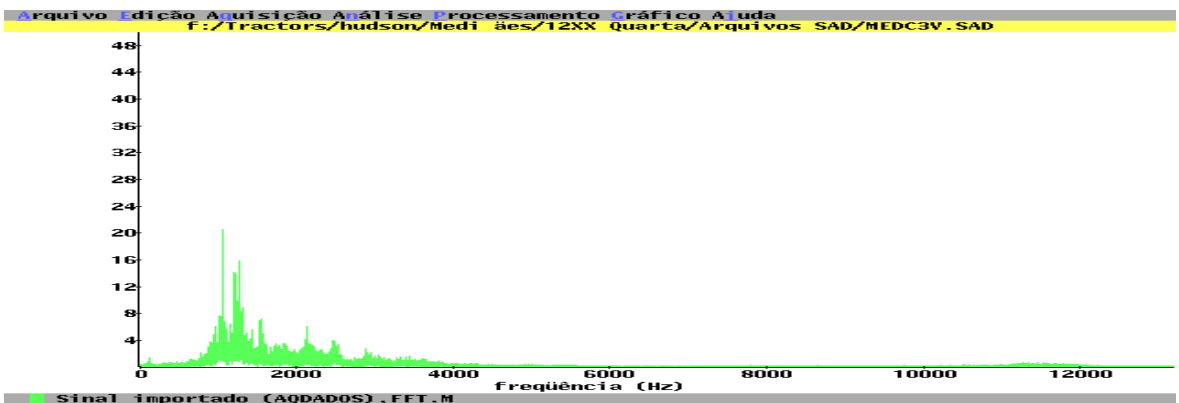


FIGURA 34 – Transmissão 3 – Segunda Marcha – Medição vertical

Nota-se nestas medidas sempre picos nas frequências de malha das quatro marchas, 1ª marcha, (1617 Hz), 2ª, (1520 Hz), 3ª, (1261 Hz) e ré, (1100 Hz), com destaque para a ré. Em todas as medidas os valores máximos dos picos são sempre inferiores a 22.

7.1.2.3 Medição Vertical 3ª Marcha

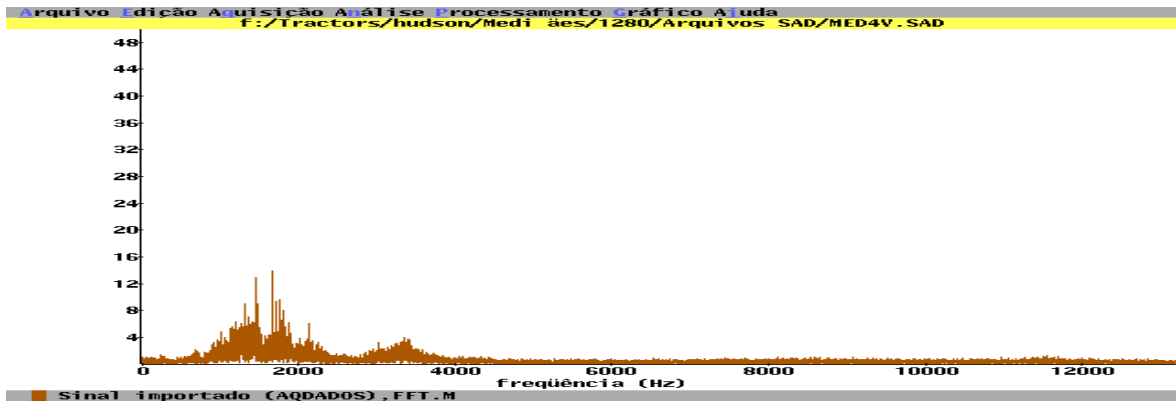


FIGURA 35– Transmissão 1 – Terceira Marcha – Medição vertical

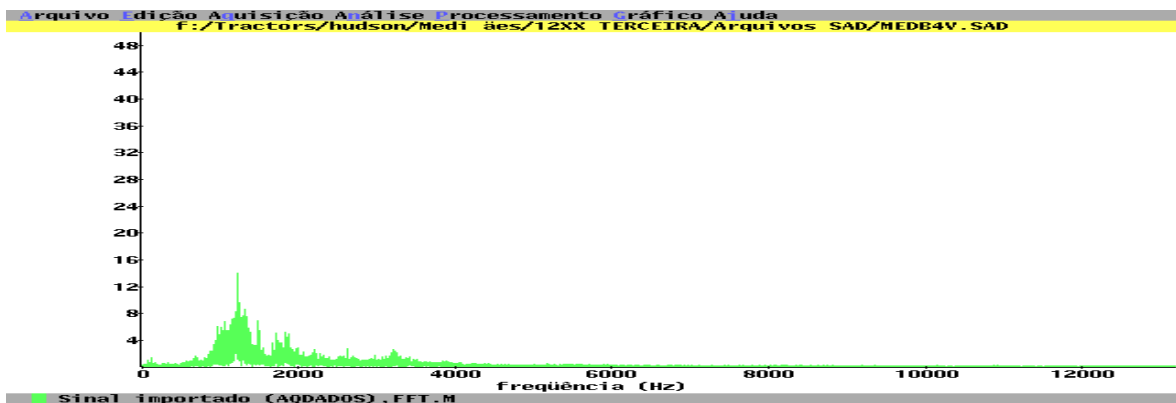


FIGURA 36– Transmissão 2 – Terceira Marcha – Medição vertical

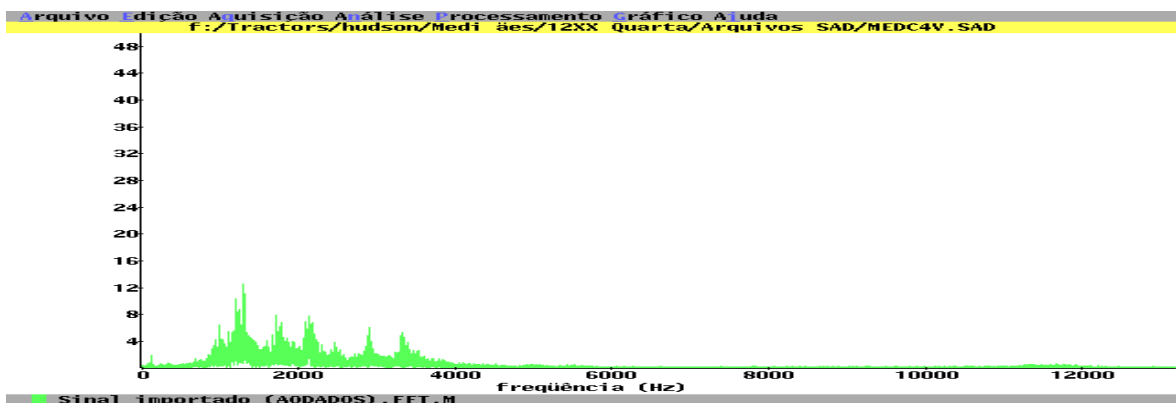


FIGURA 37– Transmissão 3 – Terceira Marcha – Medição vertical

No caso das medidas com a transmissão na 3ª marcha, com o acelerômetro na vertical, nota-se em todos os espectros um pico de frequência na frequência de malha da redução entre as caixas de marchas e grupos, (1191 Hz).

Deve-se salientar que neste caso há uma grande variedade de picos presentes. Isto dificulta a definição exata de qual o componente é o originador de cada um dos picos.

7.1.2.4 Medição vertical 1ª Ré

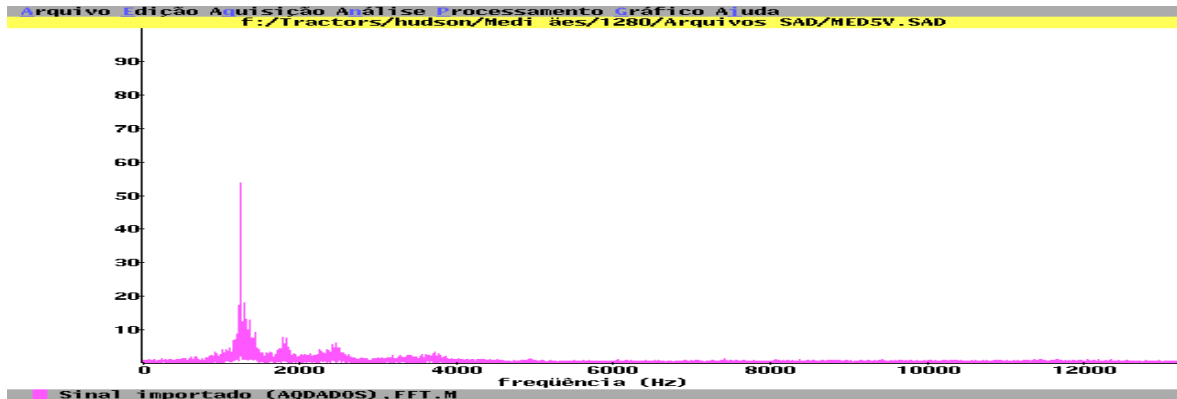


FIGURA 38– Transmissão 1 – Ré – Medição Vertical

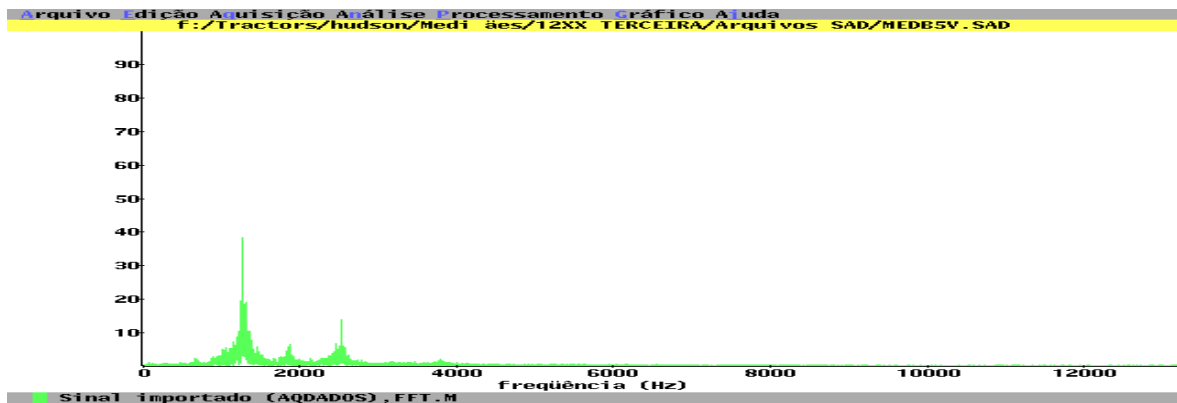


FIGURA 39 - Transmissão 2 – Ré – Medição Vertical

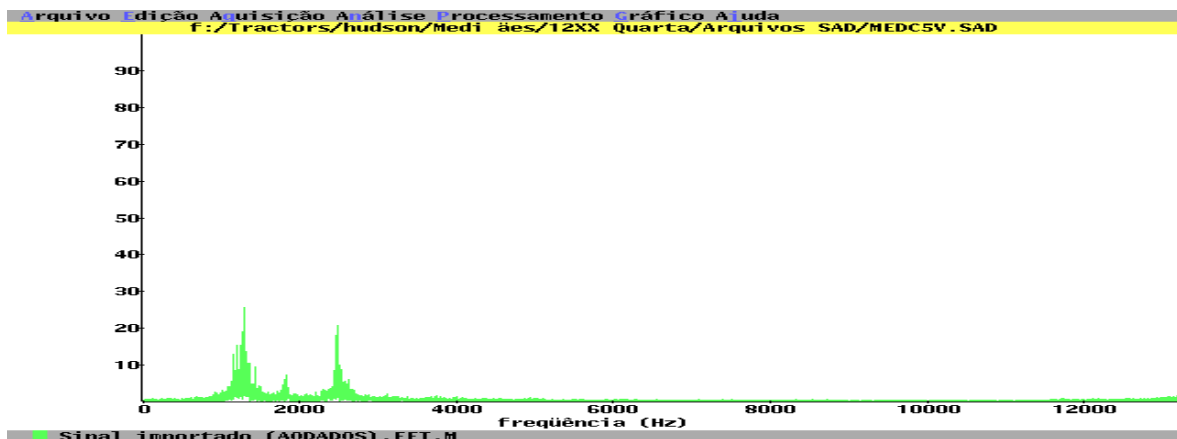


FIGURA 40 - Transmissão 3 – Ré – Medição Vertical

No caso destas medições podem ser sempre observados picos na frequência de malha da ré, (1280 Hz) e também na frequência de malha da primeira, (1882 Hz), destacando-se o na frequência da ré. Pode-se observar também um pico na harmônica de duas vezes a frequência de malha da ré. Isto novamente se explica devido ao engrenamento neste caso é de três engrenagens.

No Quadro 7 são apresentados os valores RMS das medições horizontais e verticais em cada uma das marchas para as quatro transmissões ensaiadas. Neste mesmo quadro são também apresentados a média e o desvio padrão dos valores RMS para as medições horizontal e vertical em cada uma das marchas.

No Quadro 8 são apresentados os valores pico a pico das medições horizontais e verticais em cada uma das marchas para as quatro transmissões ensaiadas. Neste mesmo quadro são também apresentados a média e o desvio padrão dos valores pico a pico para as medições horizontal e vertical em cada uma das marchas.

QUADRO 7 – Resumo valores RMS das transmissões padrão ensaiadas

	RMS					
	Transmissão 1	Transmissão 2	Transmissão 3	Transmissão 4	Média	Desvio Padrão
1ª Marcha Horizontal	92	51	59	69	67.8	15.4
1ª Marcha Vertical	111	96	101	124	108.0	10.7
2ª Marcha Horizontal	108	75	92	98	93.3	12.0
2ª Marcha Vertical	138	121	156	154	142.3	14.1
3ª Marcha Horizontal	198	212	150	195	188.8	23.3
3ª Marcha Vertical	166	136	155	168	156.3	12.7
Ré Horizontal	156	180	145	147	157.0	13.9
Ré Vertical	218	232	211	214	218.8	8.0

QUADRO 8 – Resumo valores pico a pico das transmissões padrão ensaiadas

	Pico a Pico					
	Transmissão 1	Transmissão 2	Transmissão 3	Transmissão 4	Média	Desvio Padrão
1ª Marcha Horizontal	1124	481	574	722	725,3	245,7
1ª Marcha Vertical	1136	769	884	1009	949,5	137,1
2ª Marcha Horizontal	1177	691	786	911	891,3	182,5
2ª Marcha Vertical	1435	1045	1203	1437	1280,0	165,7
3ª Marcha Horizontal	1899	1355	1225	1641	1530,0	260,8
3ª Marcha Vertical	1687	1304	1448	1526	1491,3	138,3
Ré Horizontal	1406	1228	1126	1350	1277,5	108,6
Ré Vertical	2056	1789	1613	1565	1755,8	192,4

7.2 SEGUNDA FASE

Na segunda fase se buscou, a partir da indução de falhas na transmissão identificar como diferentes falhas em diferentes engrenagens faziam com que o sinal de vibração medido se distanciasse do padrão estabelecido.

7.2.1 Engrenagem da ré com falha no perfil do dentado

Foi montada em uma transmissão boa uma engrenagem reversora da ré com problema no perfil do dentado. Este problema faz com que o padrão de contato dos dentes se desvie do ideal. Uma foto desta engrenagem, após ter sido submetida à carga, onde se pode observar o perfil de engrenamento fora da região considerada adequada, pode ser vista na Fig. 41. O problema provavelmente se deva a falha no tratamento térmico.



FIGURA 41 – Foto da engrenagem reversora da ré com falha no perfil do dentado

Foram medidos os sinais de vibração da transmissão com esta engrenagem com problema, nas 4 marchas, tanto com o acelerômetro na posição horizontal quanto na vertical. As alterações observadas em relação aos padrões foram as seguintes:

Valores pico a pico e RMS elevados, quando comparados com os padrões, nas medições horizontais com a terceira e a ré engrenadas. Estas elevações são bem mais significativas no caso da marcha ré, chegando o valor RMS a estar 20 desvios padrão acima do valor médio e o valor pico a pico 14 desvios padrão. No caso da terceira marcha o valor pico a pico fica 3,3 desvios padrão acima da média e o RMS 4,2. Nas Fig. 42 e 43 a seguir, são apresentados os gráficos comparativos entre valores RMS e pico a pico desta transmissão

com problema na ré e os valores RMS e pico a pico médios para as quatro transmissões padrão em cada uma das marchas.

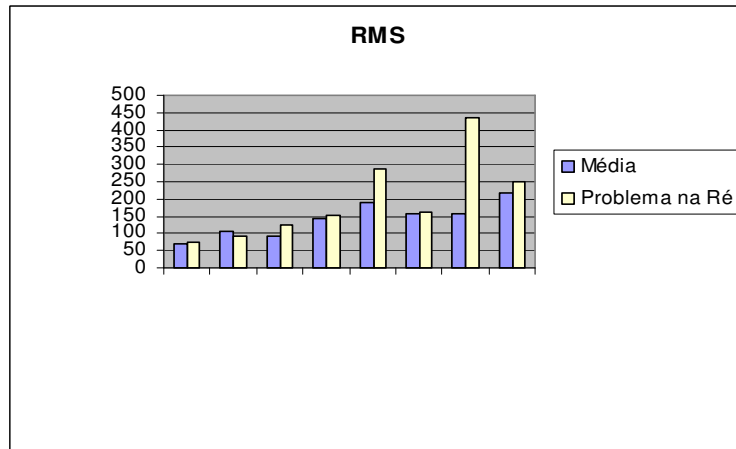


FIGURA 42 – Gráfico comparativo entre valores RMS médios das transmissões padrão e da transmissão com problema na engrenagem inversora da ré

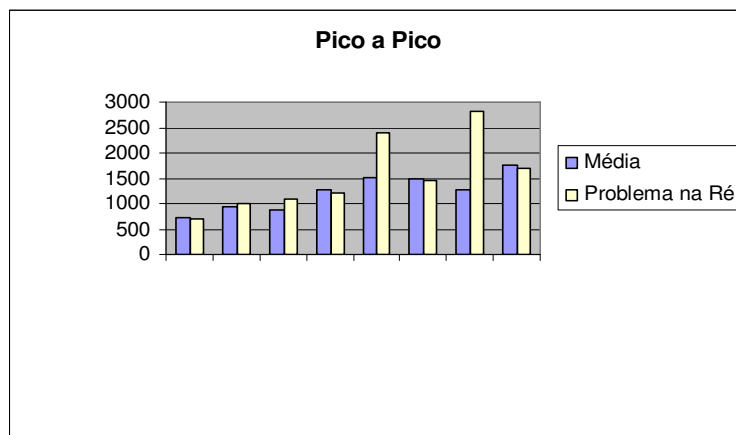


FIGURA 43 – Gráfico comparativo entre valores pico a pico médios das transmissões padrão e da transmissão com problema na engrenagem inversora da ré

Foi também observado aumento da presença de picos periódicos no sinal no tempo nas medições horizontais da terceira e da ré.

Os picos, que aparecem nestas duas situações no sinal no tempo, têm período igual ao período da engrenagem motora da ré para o caso da ré engrenada e igual ao período da motora da terceira quando com a terceira engrenada.

A seguir são apresentados os quatro sinais no tempo das transmissões padrão com a ré engrenada, medidas no eixo horizontal. Depois é apresentado o sinal no tempo também na horizontal da transmissão com defeito na engrenagem reversora da ré.

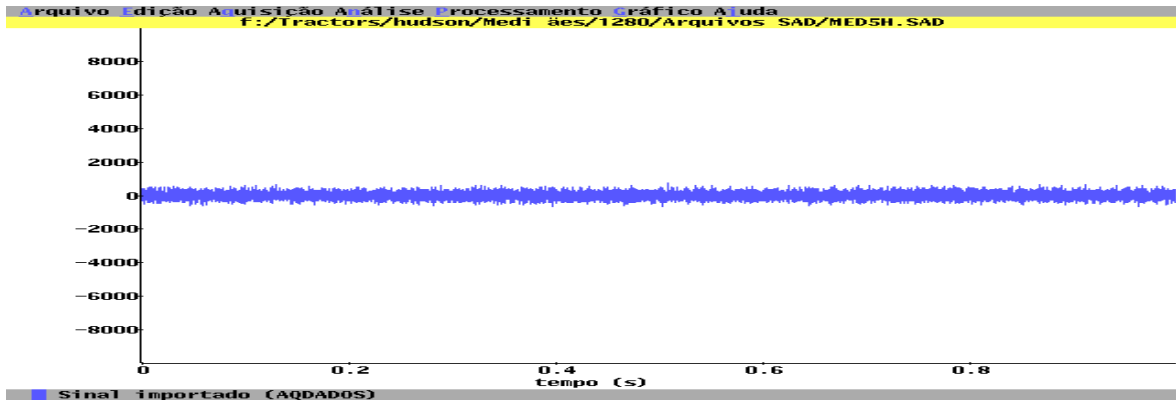


FIGURA 44 – Transmissão 1 – Ré – Medição Horizontal

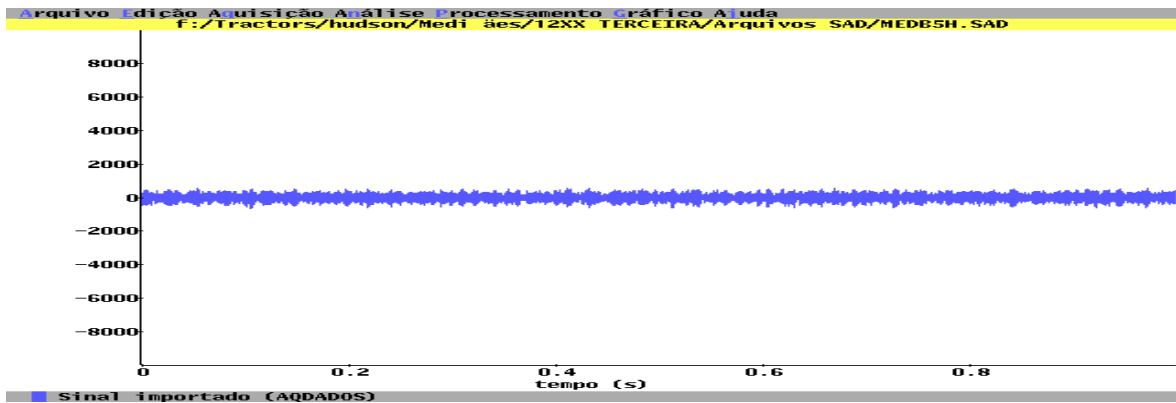


FIGURA 45 – Transmissão 2 – Ré – Medição Horizontal

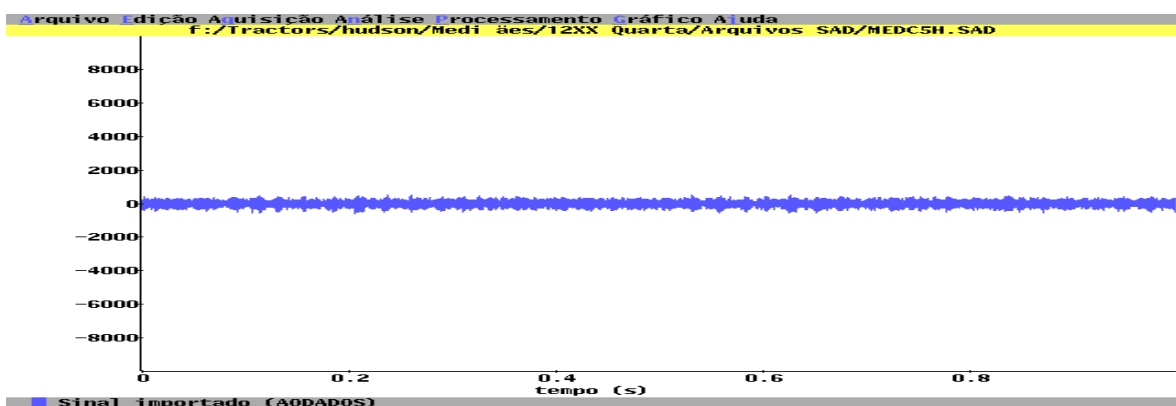


FIGURA 46 – Transmissão 3 – Ré – Medição horizontal

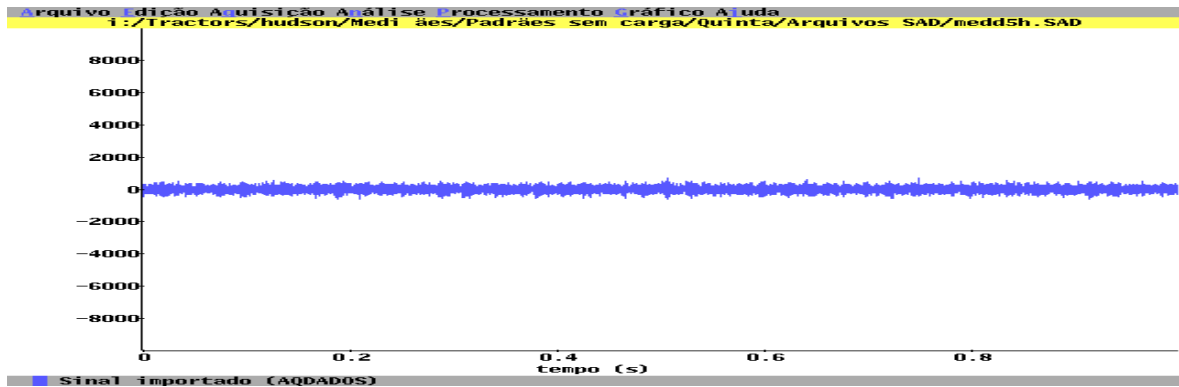


FIGURA 47 – Transmissão 4 – Ré – Medição horizontal

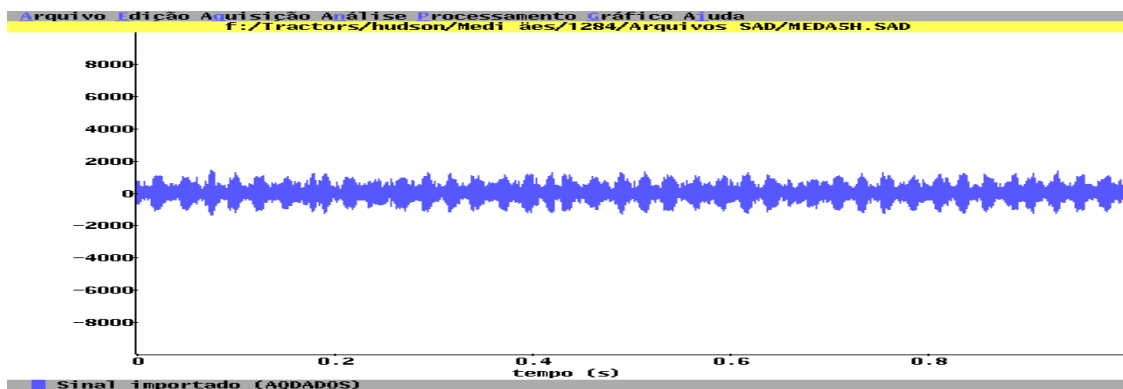


FIGURA 48 – Transmissão com defeito na reversora de ré – Ré – Medição horizontal

Uma análise destes sinais no tempo, assim como da variações dos valores RMS e pico a pico, bastante significativas, dá grande indicativos da presença de defeito nas engrenagens da ré.

A seguir, Fig. 49 e 50, são apresentados os espectro da transmissão com a engrenagem reversora da ré defeituosa medidos na horizontal e na vertical. Estas figuras podem ser comparadas com os padrões das medição horizontal e vertical com ré engrenada.

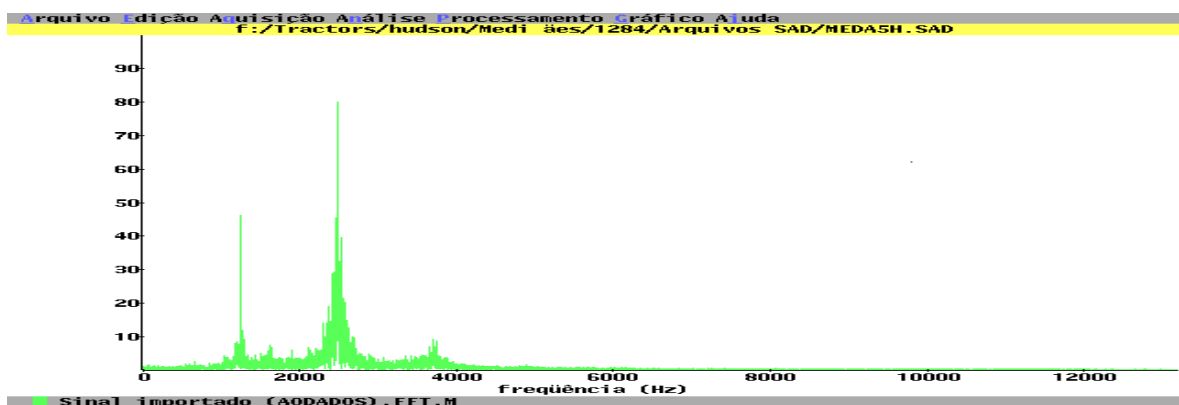


FIGURA 49 – Espectro de frequência transmissão com engrenagem reversora da ré com problema no perfil do dentado – Ré - Medição Horizontal

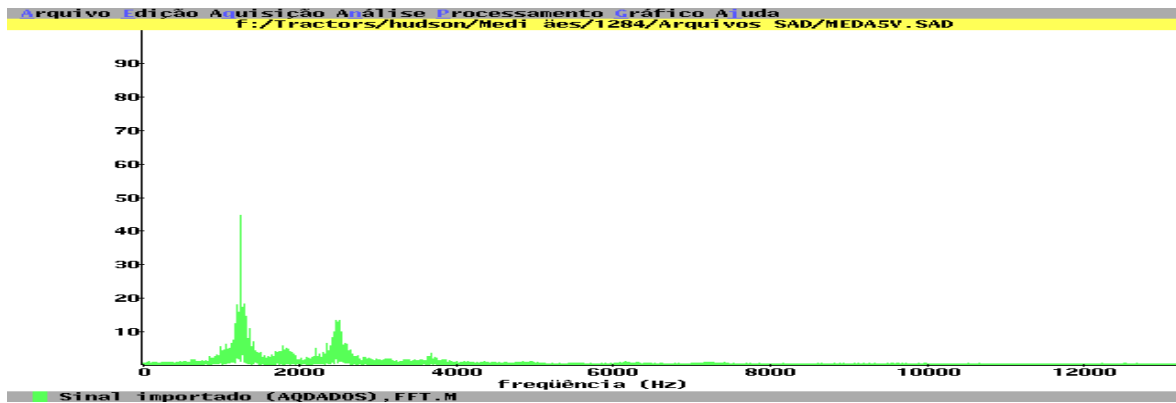


FIGURA 50 – Espectro de frequência transmissão com engrenagem reversora da ré com problema no perfil do dentado – Ré - Medição Vertical

A análise dos espectros comprova o que se havia levantado através da análise do sinal no tempo e da variação dos valores RMS e pico a pico. O problema no engrenamento nas engrenagens da ré.

Deve-se observar que no espectro horizontal das transmissões padrão com a ré engrenada, a frequência de malha da ré tem amplitude sempre inferior a 8. No caso da transmissão com problema na reversora da ré esta amplitude sobe para valores acima de 40. Nota-se também um aumento significativo na amplitude do pico na segunda harmônica da frequência de malha da ré. Estes valores nas medições de transmissões boas estão sempre abaixo de 40. No caso desta transmissão está em aproximadamente 80. O aumento do pico na frequência de malha e suas harmônicas devido à problemas de engrenamento em todos os dentes de uma engrenagem condiz com o apresentado na bibliografia.

Note-se que a elevação da segunda harmônica deve-se ao fato de que a engrenagem reversora esta engrenada a duas engrenagens, a motora e a conduzida da ré, fazendo com que cada dente desta engrenagem engrene duas vezes por rotação.

Observou-se também, quando da medição horizontal da terceira marcha, um aumento na amplitude do pico da segunda harmônica da frequência de malha da terceira marcha. Em todos os demais espectros não houve alteração significativa.

7.2.2 Engrenagem conduzida da primeira com batida em um dente

Foi montada em uma transmissão aprovada uma engrenagem conduzida da primeira marcha com uma batida em um dos dentes. A foto desta engrenagem, onde se pode observar o defeito induzido, pode ser vista na Fig. 51.



FIGURA 51 – Engrenagem conduzida da primeira marcha com batida em um dente

Neste caso também foram medidos os sinais de vibração da transmissão com esta engrenagem com problema nas 4 marchas. Tanto com o acelerômetro na posição horizontal quanto na vertical. As alterações observadas em relação ao padrão foram as seguintes:

Aumento no valor RMS do sinal na medição horizontal quando com a ré engrenada. O valor está mais de sete desvios padrão acima da média.

Aumento dos valores de pico a pico na medição horizontal quando com a ré engrenada e nas medições horizontal e vertical quando com a primeira marcha engrenada. No caso da medição horizontal na marcha ré o valor de pico a pico está 4,7 desvios padrão acima da média. No caso da medição horizontal da primeira marcha o valor está 3,1 desvios padrão acima da média. No caso da medição vertical da primeira marcha, 4,4. A seguir podem ser observadas as Fig. 52 e 53, que mostram as comparações entre os valores RMS e pico a pico das medições horizontal e vertical nas quatro marchas com a transmissão com a engrenagem conduzida da primeira marcha com defeito e as transmissões padrão.

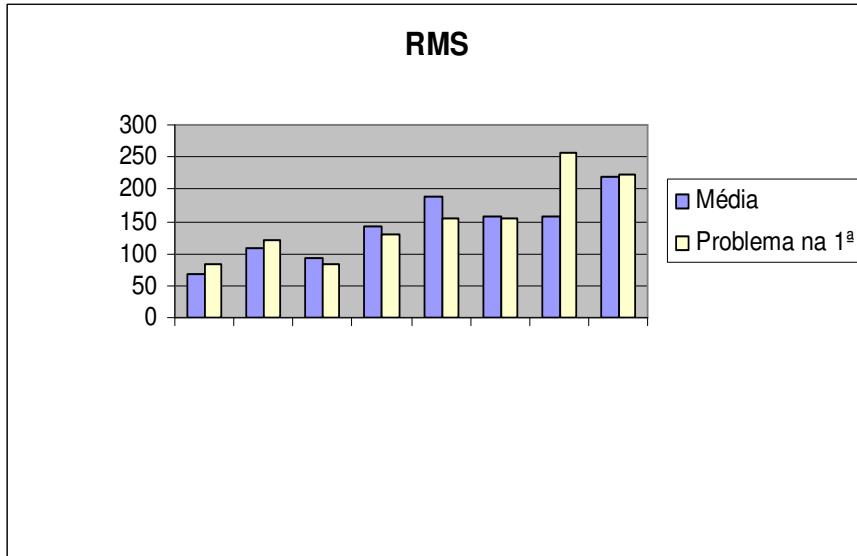


FIGURA 52 – Gráfico comparativo entre valores RMS médios das transmissões padrão e da transmissão com batida em um dente da engrenagem conduzida da primeira marcha

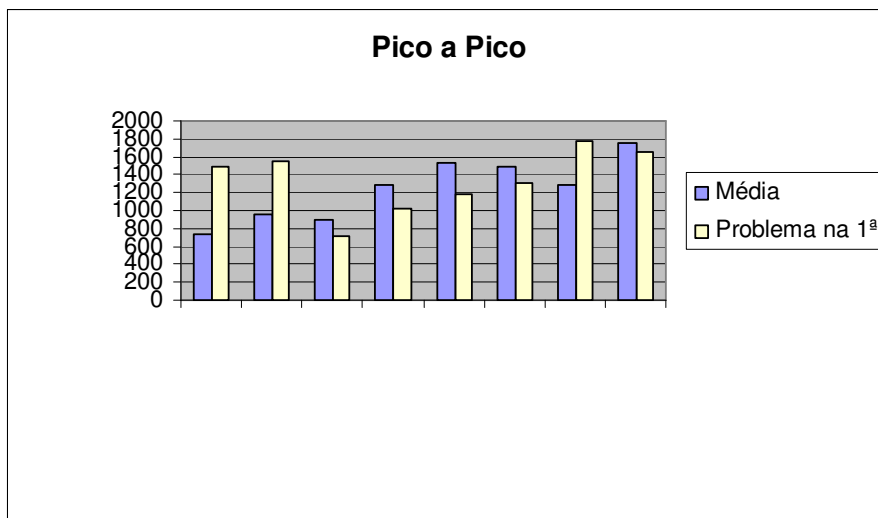


FIGURA 53 – Gráfico comparativo entre valores pico a pico médios das transmissões padrão e da transmissão com batida em um dente da engrenagem conduzida da primeira marcha

Observou-se ainda o surgimento de picos periódicos nos sinais no tempo medidos na horizontal e vertical com a primeira marcha engrenada. Na Fig. 54 pode ser visto o sinal da medição horizontal desta transmissão com batida na engrenagem conduzida da ré, com a primeira marcha engrenada. A Fig. 55 mostra o sinal medido na mesma situação para uma das transmissões padrão. A Fig. 56 mostra o sinal da medição vertical desta transmissão com

batida na engrenagem conduzida da primeira marcha. A Fig. 57 mostra o sinal medido na mesma situação que na Fig. 56, contudo para uma transmissão padrão.

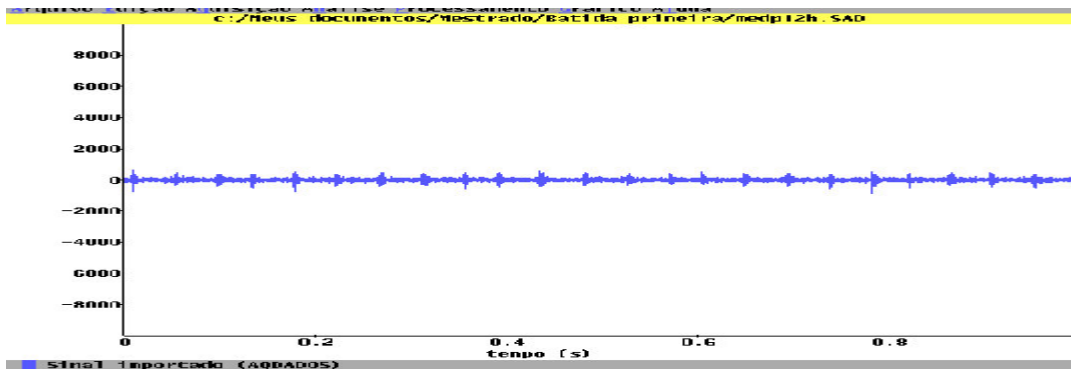


FIGURA 54 – Transmissão com batida na primeira marcha – Primeira marcha – Medição Horizontal

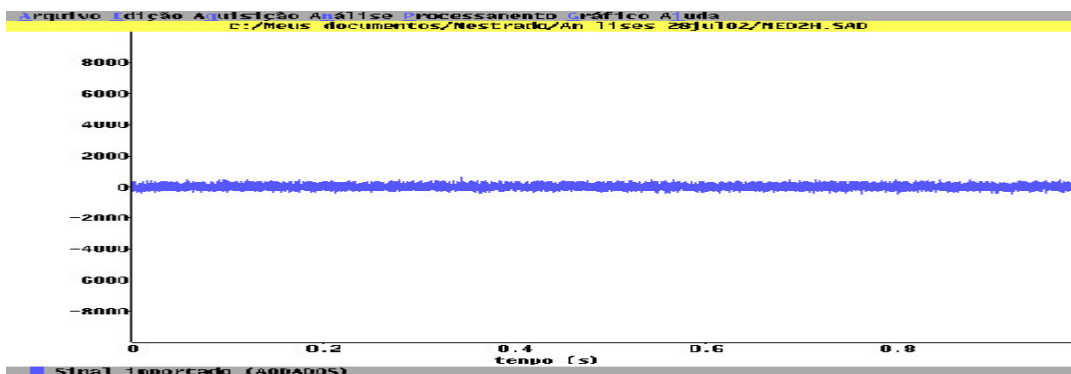


FIGURA 55 – Transmissão padrão – Primeira marcha – Medição Horizontal

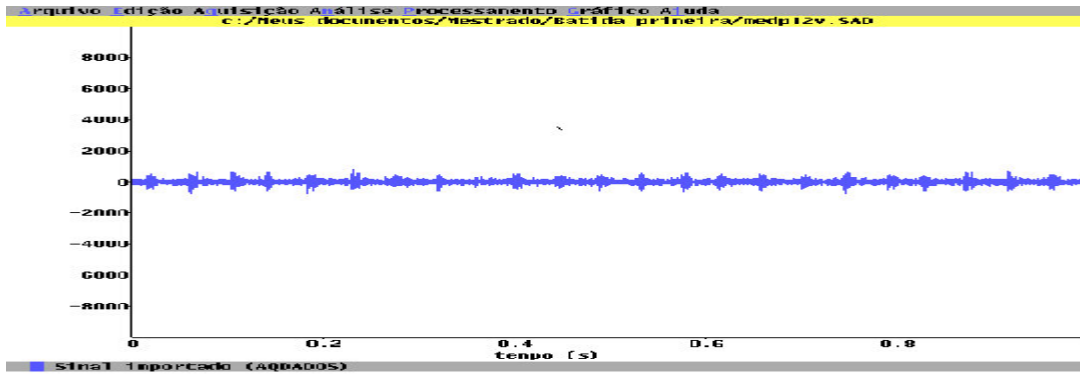


FIGURA 56 – Transmissão com batida na primeira marcha – Primeira marcha – Medição Vertical

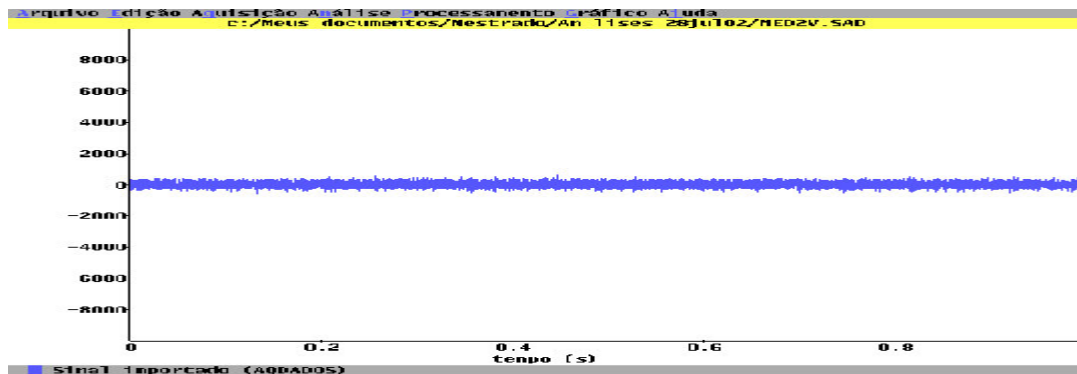


FIGURA 57 – Transmissão padrão – Primeira marcha – Medição Vertical

Pode-se observar que os picos periódicos que surgem no sinal no tempo têm período igual ao período de rotação do eixo das engrenagens conduzidas quando com a primeira marcha engrenada.

Os espectros de frequência dos sinais horizontal e vertical nas quatro marchas apresentam alterações significativas apenas na medição horizontal com a ré engrenada e na medição vertical com a Segunda marcha engrenada. Observa-se no caso da ré um aumento da amplitude do pico da frequência de malha da ré. No caso da medição vertical com a Segunda marcha engrenada, ao contrário do que ocorria nas transmissões padrão, a frequência com maior amplitude não é mais a frequência de malha da ré, e sim a frequência de malha da Segunda marcha. Os espectros de frequência na horizontal e vertical desta transmissão com batida na engrenagem conduzida da primeira, nas quatro marchas, podem ser vistos no Anexo C.

Pode se dizer que, apesar de algumas alterações no espectro, não se pode observar um padrão de alteração. Não ocorreu aumento significativo do pico da frequência de malha da primeira marcha em nenhuma das medições.

O motivo disto é o fato de que a falha em apenas um dente não têm energia suficiente para trazer alteração significativa no espectro. Os choques causados pelo dente com batida durante a rotação aparecem claramente no sinal no tempo quando na primeira marcha, contudo no espectro não se tornam claros. Isto condiz com o observado na bibliografia para falhas em um único dente.

Em casos de transmissões mais simples se poderia observar um aumento da energia nas bandas laterais de frequência, que é o modo clássico de se identificar a presença de falha em um único dente. Contudo, no caso desta transmissão, onde se tem dezesseis engrenagens girando simultaneamente, sendo que as quatro engrenagens conduzidas da caixa de marchas giram na mesma frequência, pode se dizer que um problema em um dos dentes de qualquer uma das engrenagens conduzidas se apresentaria na mesma frequência. Assim, qualquer uma das quatro engrenagens com problema acarretaria o surgimento de bandas laterais de mesmo espaçamento. Somando-se ainda a isto o grande número de engrenagens presentes, as quais têm frequência de malhas razoavelmente próximas, acarretando a possibilidade de sobreposição de bandas laterais, pode-se concluir que quando da falha em um único dente de uma engrenagem conduzida o método não permite identificar qual das engrenagens do eixo das conduzidas é a falhada. É possível, contudo, por meio de análise no tempo, identificar qual é a rotação do eixo da engrenagem falhada, podendo-se assim, identificar se a falha é no eixo conduzido, conforme mostrado neste caso. Isto é bastante interessante para as transmissões em estudo neste trabalho, porque, identificando-se qual dos eixos da caixa de marchas, motriz ou conduzido, é o que apresenta a engrenagem falhada, pode-se desmontar apenas este eixo para inspeção, evitando-se assim o risco de se desmontar primeiramente o eixo sem problema.

Deve-se observar também que a identificação visual de batidas nos dentes de engrenagens é normalmente mais simples que a identificação de problemas no perfil.

7.2.3 Engrenagem conduzida da segunda com batida em um dente

Foi montada em uma transmissão aprovada uma engrenagem conduzida da segunda marcha com batida em um dente. A foto desta engrenagem pode ser vista na Fig. 58.

Os sinais no tempo e os espectros de frequências desta transmissão com a engrenagem conduzida da Segunda falhada tanto na horizontal quanto na vertical, em cada uma das marchas, foram analisados. As alterações em relação aos padrões foram as seguintes:

Aumento significativo dos valores RMS do sinal no tempo em todas as medições, excetuando-se primeira horizontal, terceira horizontal e ré vertical. Os aumentos mais significativos ocorreram nas medições com a Segunda marcha engrenada, tanto na medição horizontal, quanto na vertical os valores estão mais de onze desvios padrão acima da média.

No caso dos valores de pico a pico o aumento foi significativo em todas as medições. Em todos os caso os valores pico a pico estão mais de cinco desvios padrão acima da média,



FIGURA 58 – Engrenagem conduzida da segunda marcha com batida em um dente

na maioria dos casos estão mais de 15 desvios padrão acima da média. A seguir podem ser observadas as figuras 59 e 60, que mostram respectivamente as comparações entre os valores RMS e pico a pico das medições horizontal e vertical nas quatro marchas com a transmissão com a engrenagem conduzida da segunda marcha com defeito e as transmissões padrão.

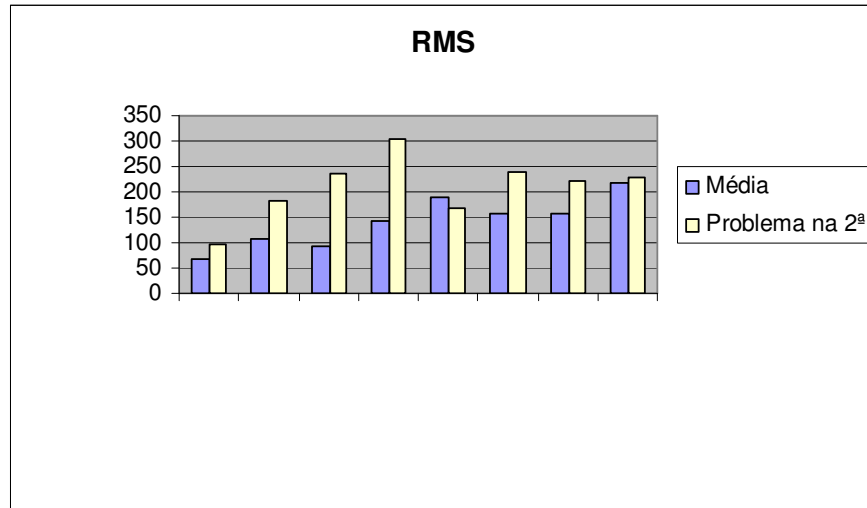


FIGURA 59 - Gráfico comparativo entre valores RMS médios das transmissões padrão e da transmissão com batida em um dente da engrenagem conduzida da segunda marcha

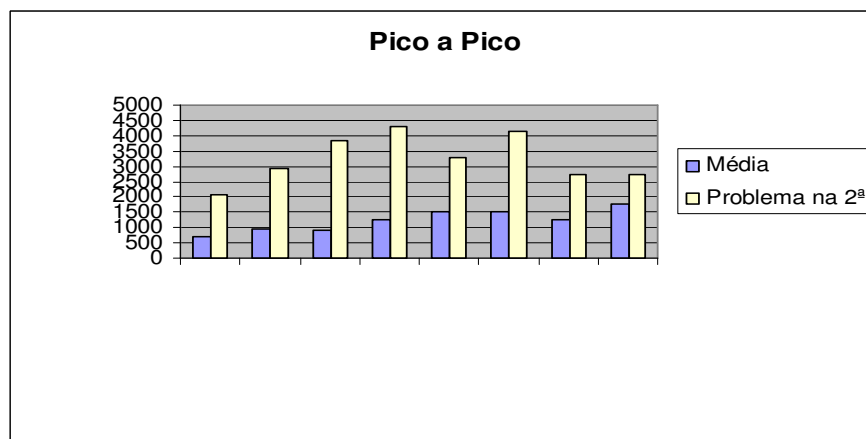


FIGURA 60– Gráfico comparativo entre valores Pico a pico médios das transmissões padrão e da transmissão com batida em um dente da engrenagem conduzida da segunda marcha

Em todas as medições se observa o surgimento de picos periódicos no sinal no tempo. Pode-se observar que o período dos picos é sempre o período do eixo conduzido. O valor é diferente para cada uma das quatro marchas, contudo, em todos os casos, igual ao período do eixo conduzido naquela marcha. Esta observação torna claro que o defeito está no eixo conduzido.

A seguir, nas Fig. 61, 62, 63 e 64, podem ser observados os sinais no tempo na horizontal das quatro marchas. Os sinais no tempo das quatro marchas na vertical podem ser observados no anexo D.

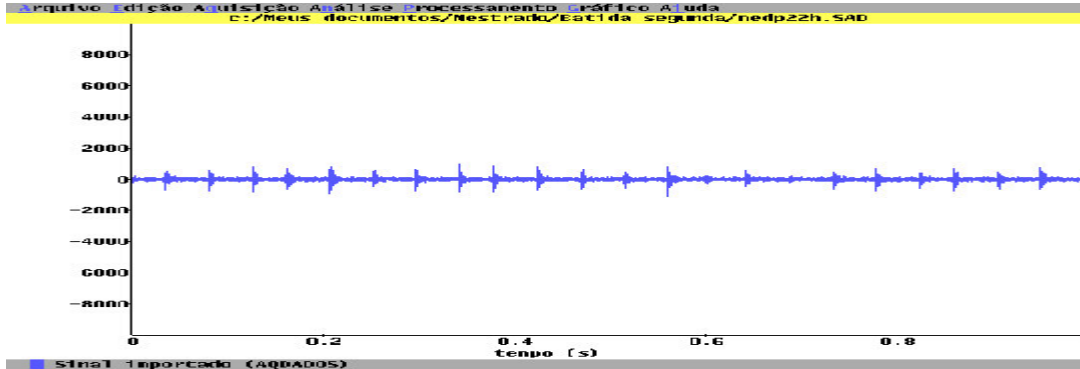


FIGURA 61 – Transmissão com batida na engrenagem conduzida da segunda marcha – Primeira marcha – Medição Horizontal

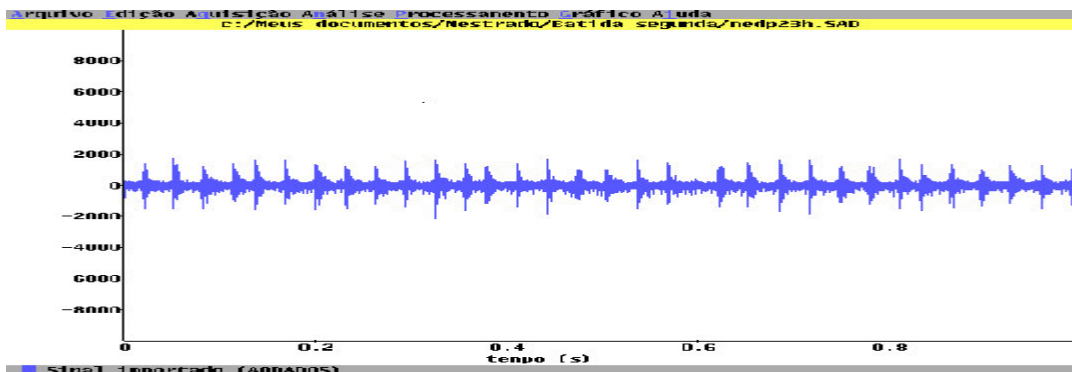


FIGURA 62 – Transmissão com batida na engrenagem conduzida da segunda marcha – Segunda marcha – Medição Horizontal

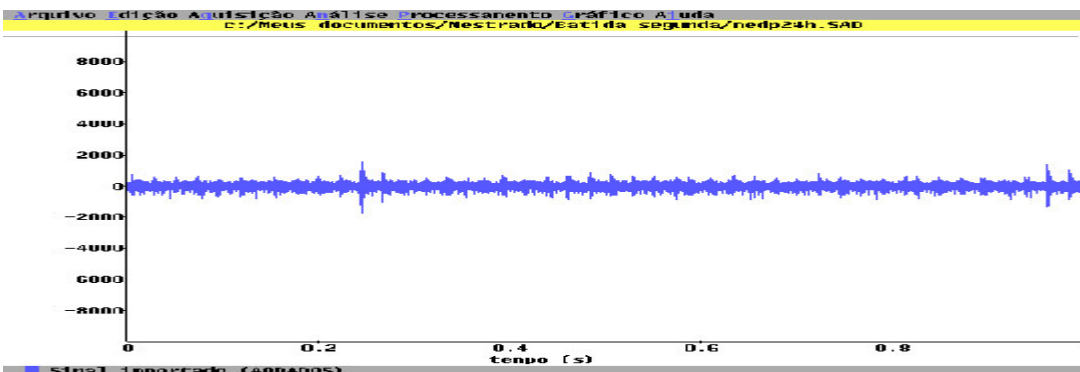


FIGURA 63 – Transmissão com batida na engrenagem conduzida da segunda marcha – Terceira marcha – Medição Horizontal

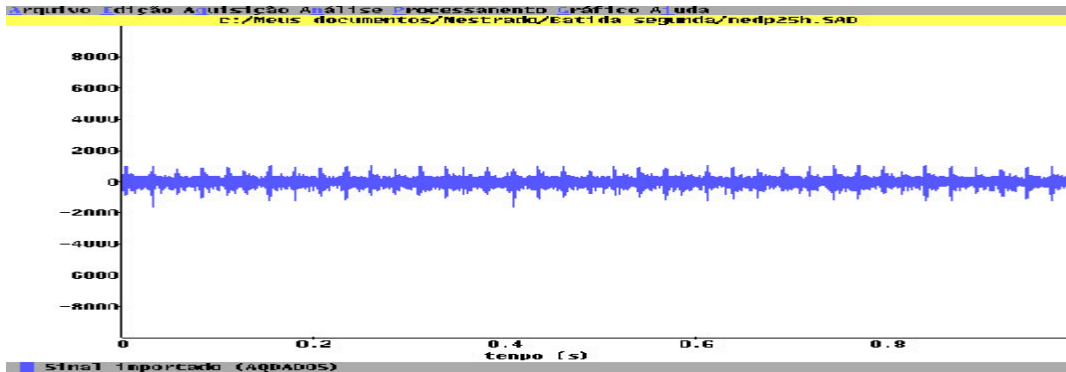


FIGURA 64 – Transmissão com batida na engrenagem conduzida da segunda marcha – Ré – Medição Horizontal

Com nenhuma das marchas engrenadas há variação significativa nos espectros. Na medição vertical da segunda marcha, pode se observar uma maior amplitude no pico da frequência de malha da segunda marcha.

Pode-se dizer assim que, como no caso da primeira marcha com batida, é bastante fácil a identificação da presença de problema no eixo conduzido. O grande número de engrenagens presentes, assim como o fato do problema ser em apenas em um dos dentes da engrenagem da segunda, pelos mesmos motivos descritos no caso da conduzida da primeira marcha com batida, dificulta a identificação de qual das quatro engrenagens conduzidas está com problema, podendo-se apenas identificar a existência de falha numa das engrenagens conduzidas. Isto, contudo, como já foi comentado, tem bastante utilidade no auxílio ao diagnóstico de falhas em engrenagens das transmissão em estudo.

8. MÉTODO PROPOSTO

Tendo-se em vista os resultados obtidos, optou-se por dividir o método em duas etapas. A primeira para identificação de uma transmissão em teste como correta ou defeituosa. A segunda para um método auxiliar de identificação da engrenagem falhada.

8.1 CLASSIFICAÇÃO DE UMA TRANSMISSÃO COMO CORRETA OU FALHADA

Deve-se realizar a aquisição de dados nas quatro marchas, tanto com o acelerômetro na posição horizontal quanto na posição vertical. A aquisição deve ser feita com os mesmos equipamentos e parâmetros descritos no tópico aquisição de dados.

De posse dos arquivos de dados adquiridos, deve-se calcular os valores RMS e pico a pico em todas as condições, (medições horizontal e vertical nas quatro marchas). De posse destes valores, deve-se comparar os mesmos com os valores médios apresentados nos Quadros 6 e 7, que são os valores médios para as transmissões padrão. Caso, em qualquer uma das marchas, na medição horizontal ou vertical, obtenha-se o valor RMS ou pico a pico acima de 4 desvios padrão da média, esta transmissão deve ser classificada como falhada.

Deve-se salientar aqui que este trabalho se dedicou exclusivamente a falhas nas engrenagens da caixa de marchas da transmissão. Talvez falhas em outros componentes, tais como mancais de rolamento, possam ocorrer sem que se tenha uma alteração significativa nos valores RMS e pico a pico. Da mesma forma o trabalho não incluiu falhas em engrenagens da caixa de grupos, da caixa da tração dianteira ou da tomada de força. Falhas nestas engrenagens, possivelmente ao ocorrerem acarretam aumento significativo nos valores RMS e de pico a pico. Isto, contudo, antes de se julgar o método válido também para identificação de problemas nestes subconjuntos, deve ser comprovado experimentalmente.

A medição pode ser tornada mais rápida e prática para implementação em linha caso se utilizem dois acelerômetros. Isto permitira a medição simultânea das acelerações vertical e horizontal. No trabalho aqui relatado foram feitas todas as medições apenas com um acelerômetro, uma vez que se possuía apenas um na fábrica. O NK100 tem duas entradas, permitindo a medição simultânea em dois canais. Caso se opte por esta forma de medição é necessário que seja verificada na prática a máxima taxa de aquisição que se pode obter utilizando o programa ADC10032 operando com dois canais. Conversores analógicos

digitais, (no caso deste trabalho o ADC100), conforme Aguiar (2002), apresentam a taxa de aquisição de cada canal inversamente proporcional ao número de canais amostrados. Taxas de aquisição mais baixas que a empregada neste trabalho podem ser utilizadas, uma vez que os sinais obtidos nas medições aqui descritas não apresentam sinais em frequências elevadas. Deve-se lembrar contudo, que as medições foram realizadas fora do expediente normal da fábrica. Caso se deseje baixar a taxa de aquisição, deve-se também rever a frequência de corte do filtro.

8.2 IDENTIFICAÇÃO DA ENGRENAGEM FALHADA

Uma vez tendo a transmissão sido classificada como falhada, para identificação da engrenagem falhada na caixa de marchas, deve-se sempre analisar o sinal no tempo e também o espectro de frequências. Primeiramente deve-se analisar o espectro de frequências em todas as marchas tanto na medição horizontal quanto na vertical. Caso seja encontrada um pico em alguma frequência que não ocorria nas medições padrão, (Fig. 17 à Fig. 40), deve-se identificar a frequência do mesmo. Após observada, a mesma deve ser identificada nos Quadros 2, 3, 4 ou 5, (dependendo da marcha da medição na qual foi encontrada o pico acentuado). Caso a frequência do pico coincida com a frequência de malha de um dos engrenamentos, no Quadro da marcha da medição em que o pico apareceu, deve-se, como primeira tentativa, inspecionar as engrenagens deste engrenamento.

Caso não se identifique nenhum pico que se destaque, deve-se partir para a análise dos sinais no tempo. Deve-se analisar os sinais no tempo de todas as medições, (quatro marchas na horizontal e na vertical). Caso em algum destes se possa identificar o surgimento de picos periódicos, deve-se identificar o período dos mesmos. O período dos mesmos será igual ao período de rotação da engrenagem defeituosa quando girando com a mesma marcha do sinal no qual se observam os picos periódicos. As frequências das engrenagens em cada uma das quatro marchas engrenadas podem ser observadas nos Quadros de 2 a 5. No caso das engrenagens conduzidas, pelo período dos picos no sinal no tempo, não se pode identificar qual das quatro engrenagens é a que possui o defeito porque todas elas giram sempre na mesma frequência. Sendo possível neste caso apenas se identificar que o problema é numa engrenagem conduzida e não numa condutora.

8.3 PASSOS PARA IMPLEMENTAÇÃO

Para implementação como teste de final de linha deve-se inicialmente aumentar a quantidade de transmissões ensaiadas para padrão. Para isto pode-se estatisticamente identificar qual seria a amostra necessária em virtude da população de transmissões fabricadas e também da confiabilidade desejada. As medições devem ser realizadas em transmissões no final de linha. A partir do aumento do número de transmissão ensaiadas se poderá estabelecer os critérios de aprovação, (números máximo de desvios padrão longe da média para que a transmissão seja aceita), com maior refinamento.

Um segundo passo é o acompanhamento das transmissões ensaiadas para padrão no campo. Como já foi dito neste trabalho as transmissões foram classificadas como boas pelo critério hoje empregado. Para que se esteja livre de que uma transmissão defeituosa tenha sido classificada como boa, o que poderia distorcer os padrões, todas as transmissões ensaiadas para padrão devem ter seu número de série rastreado. Caso uma delas falhe dentro da garantia, ainda que não se consiga esclarecer se a causa foi defeito de um componente desde a montagem, desgaste ou mesmo sobrecarga ou outros problemas durante a aplicação, a mesma deve ser descartada.

Finalmente deve-se lembrar que o trabalho aqui apresentado diz respeito apenas a falhas em engrenagens na caixa de marchas. Para que se possa aplicar o método para aprovação ou reprovação das transmissões completas no final de linha, deve-se estender o estudo aos outros conjuntos. Caixa de grupos, caixa da redução final e tomada de força. O conceito do método contudo será bastante similar.

9. CONCLUSÕES

Através deste trabalho se pôde identificar padrões bastante consistentes para os sinais de vibração das transmissões sincronizadas de tratores JDB da linha 5000 na bancada de testes do final da linha de montagem com cada uma das quatro marchas engrenadas. Pôde ser observado que nas quatro transmissões medidas para padrão, os valores RMS e de pico a pico se mostraram bastante constantes. Sendo que, em todas as marchas ensaiadas o desvio padrão dos valores RMS das transmissões ensaiadas para padrão foi sempre inferior a 13 % da média, excetuando-se a medição horizontal da primeira marcha. No caso dos valores pico a pico os desvios padrão em todas as marchas são sempre inferiores a 20,5 % da média, excetuando-se novamente a medição horizontal da primeira marcha.

Pôde-se observar também que as falhas induzidas nestas transmissões produzem alterações nestes padrões, sobretudo alterações no sinal no tempo, permitindo-se distinguir entre uma transmissão boa e uma que possui algum dos defeitos induzidos através da comparação dos sinais medidos com os sinais padrão. Sendo assim possível a distinção entre transmissões boas e com defeito em engrenagens da caixa de marchas. As alterações causadas pelos defeitos induzidos nos valores RMS e pico a pico são bastante significativas, tendo sido escolhidas como método de comparação entre transmissão em teste e valores médios das transmissões padrão para a classificação de transmissões como aprovadas ou com defeito na caixa de marchas.

Para o caso de identificação de qual das engrenagens da caixa de marchas possui o defeito, torna-se necessário fazer distinção entre defeitos nos quais todos os dentes de uma engrenagem apresentam problema, por exemplo problemas na geometria no dentado, e problemas que se apresentam em apenas um dente, por exemplo dente com batida.

Para o caso de problemas em todo o dentado, a análise do espectro de frequência se mostrou uma ferramenta bastante útil, possibilitando, através de uma simples comparação das amplitudes das frequências de malhas presentes nos sinais padrão, com as amplitudes das frequências de malhas presentes no sinal sendo analisado, identificar-se no engrenamento de qual das marchas está o problema.

No caso de engrenagens com problema em apenas um dos dentes, a análise no tempo se mostrou a mais indicada. No caso de engrenagens do eixo conduzido, através da análise

no tempo pode-se somente identificar que a engrenagem defeituosa pertence a este eixo, evitando-se assim a necessidade de se desmontar também o eixo motor. Não se consegue identificar qual das engrenagens do eixo conduzido é a com problema, porque, por características construtivas desta transmissão, todas as engrenagens do eixo conduzido giram à mesma rotação. A rotação muda de acordo com a marcha engrenada, mas é a mesma para as quatro engrenagens conduzidas.

Desta forma, pôde-se observar por este trabalho a viabilidade da utilização da análise de vibrações como ferramenta de identificação de transmissões boas e transmissões com engrenagens da caixa de marchas defeituosas no teste de final de linha das transmissões sincronizadas dos tratores 5000 da JDB. Além disso, a ferramenta se mostrou bastante útil como método auxiliar na identificação da engrenagem falhada.

Cabe lembrar que embora o presente trabalho se dedique exclusivamente a falhas em engrenagens da caixa de marchas, o método pode ser utilizado de forma similar para a análise completa da transmissão. Devendo-se, para isso, levantar as alterações nos padrões acarretadas por falhas em outros subconjuntos. Caixa de grupos, caixa da tração dianteira e tomada de força.

Como sugestão para futuros trabalhos em termos de identificação de falhas nesta caixa de câmbio, pode ser usada a técnica do envelope, também chamada de técnica de alta frequência, a qual consiste em processar o sinal em torno da frequência de ressonância da estrutura. Este método talvez permita uma maior capacidade de identificação de falhas em um único dente de uma engrenagem, (por exemplo batidas), uma vez que o impacto causado pelo dente com batida, conforme Lebold et al. (2000), excita frequências da estrutura muito mais altas que as dos outros componentes. Courrech (2000), cita também esta vantagem de se selecionar a ressonância de alta frequência como forma de se evitar a interferência de outras fontes de vibração. Possivelmente o método também traria alguma vantagem na identificação de falhas pouco pronunciadas, como batidas bastante leves em um dente.

Finalmente se deve salientar ainda que todas as medições foram realizadas com equipamentos disponíveis na JDB. Isto objetivou evitar gastos com equipamentos, uma vez que este é o primeiro estudo neste sentido em relação a estas transmissões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AGUIAR, P. R., **Introdução a sistemas de aquisição de dados**. Bauru: Faculdade de Engenharia elétrica, UNESP, 2002.
- 2 BRAUN, S. **Mechanical signature analysis**. Londres: Academic Press, 1986.
- 3 COURRECH JOELLE. **Análise de envelope para detecção efetiva de defeito em rolamentos – verdade ou ficção**. Uptime Magazine, número 1 - 2000.
- 4 DALPIAZ, G; RIVOLA, A and RUBINI, R. **Gear fault monitoring: Comparison of vibration analysis techniques**. Bologna: Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni Meccaniche, Nucleari, Aeronautiche e di Metallurgia – University of Bologna, 1998.
- 5 FARRAR, CHARLES e DUFFEY, THOMAS. **Vibration – based damage detection in rotating machinery**. Los Alamos: Los Alamos National laboratory, 1999.
- 6 GOLDMAN, STEVE. **Vibration spectrum analysis**. Nova Iorque: Industrial Press Inc, 1999.
- 7 HALMANN, CARLOS D. **Apostila de treinamento em aquisição de dados**. HORIZONTINA: JOHN DEERE Brasil, 2001.
- 8 LARDER, BRIAN D. **An analysis of HUMS vibration diagnostic capabilities**, Virginia Beach: American Helicopter Society 53 rd annual forum, 1997.
- 9 LEBOLD, MITCHEL et al. **Review of analysis methods for gearbox diagnostics and prognostics**. Viginia Beach: 54 th Meeting of the society for machinery failure prevention technology, 2000.
- 10 MARRA, JOSÉ. **Medição de vibração, uma ferramenta para manutenção**. São Paulo: Tekinikao, 1987.
- 11 MENEGATTI, WILVER E DUARTE, MARCOS. **Identificação de falhas em engrenagens de câmbios**. Águas de Lindóia: XV Congresso Brasileiro de engenharia mecânica, 1999
- 12 PICO TECHNOLOGY. **Manual ADC100**. 2001.
- 13 SMITH, DEREK. **Gear and noise vibration**. Nova Iorque: Marcel Dekker, 1999

- 14 TAMAGNA, ALBERTO. **Vibrações**. Horizontina: UFRGS, Mestrado Profissional em engenharia automotiva, 2001.
- 15 DUNTON, TIMOTHY. **Time waveform analysis**. Cincinnati: Enteract '98, 1998.
- 16 TEKINIKAO. **Manual de operação NK100**. São Paulo, 2000.
- 17 WINNERTON, JOHN G. Component identification of gear component spectra.
<http://www.bently.com/articles/69/winter.asp>. 22/08/01

ANEXO A – CURVAS DO ACELERÔMETRO NK20

Os resultados apresentados no presente Documento têm significação restrita e se aplicam somente à amostra analisada. A utilização dos mesmos para fins promocionais depende de prévia autorização do IPR. A reprodução do documento para outros fins só poderá ser feita ilegalmente, sem nenhuma alteração.

Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo S.A. - IPR - Caixa Universitária Avenida da Silveira Oliveira - Guarulhos - CEP 05508-901 - São Paulo - SP
Cidade Postal 7141 - CEP 05648-970 - Endereço Telefônico: TCHNMTF - Numa (011) 8314-8034 INPR 881 - Numa (011) 849-3533 - Numacon (011) 248-2211

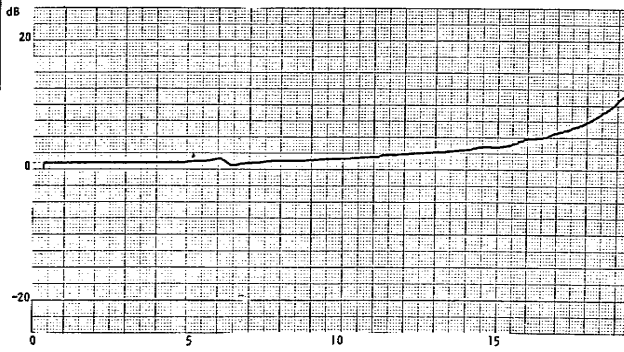


FIGURA 1 : Curva de resposta em frequência até 25 kHz do acelerômetro NK20, preso através de prisioneiro.

Os resultados apresentados no presente Documento têm significação restrita e se aplicam somente à amostra analisada. A utilização dos mesmos para fins promocionais depende de prévia autorização do IPR. A reprodução do documento para outros fins só poderá ser feita ilegalmente, sem nenhuma alteração.

Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo S.A. - IPR - Caixa Universitária Avenida da Silveira Oliveira - Guarulhos - CEP 05508-901 - São Paulo - SP
Cidade Postal 7141 - CEP 05648-970 - Endereço Telefônico: TCHNMTF - Numa (011) 8314-8034 INPR 881 - Numa (011) 849-3533 - Numacon (011) 248-2211

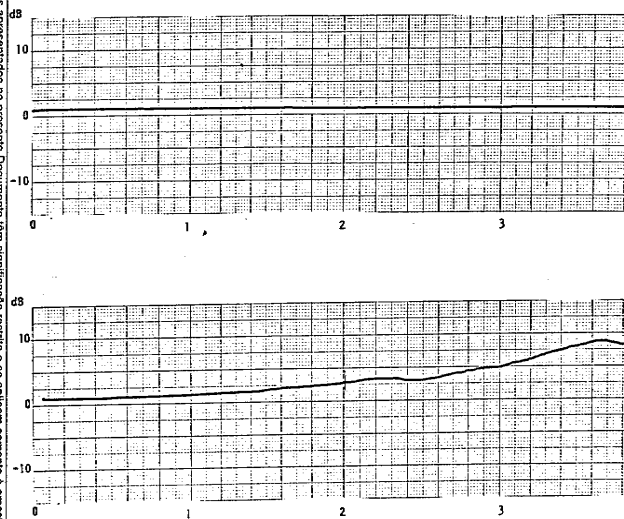
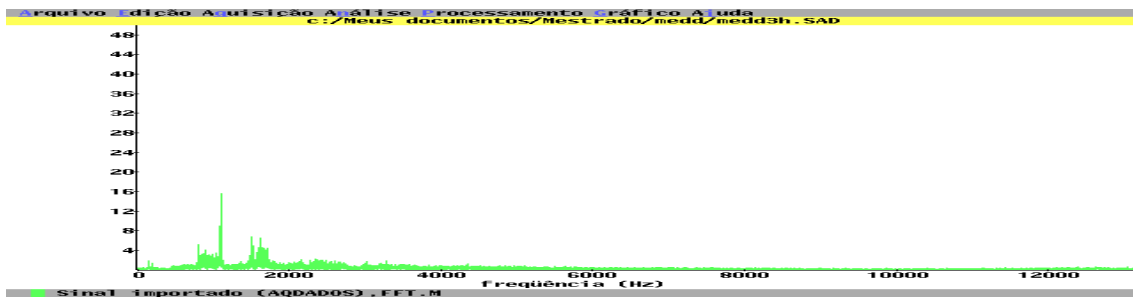
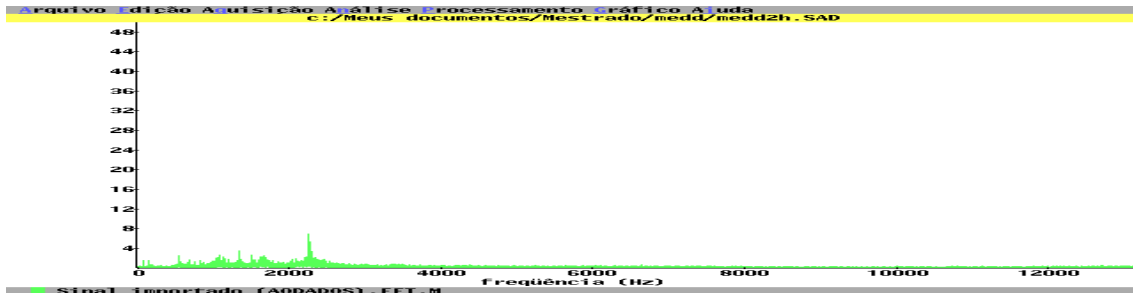


FIGURA 2 : Curva de resposta em frequência até 5 kHz do acelerômetro NK20, preso através de prisioneiro e de base magnética.

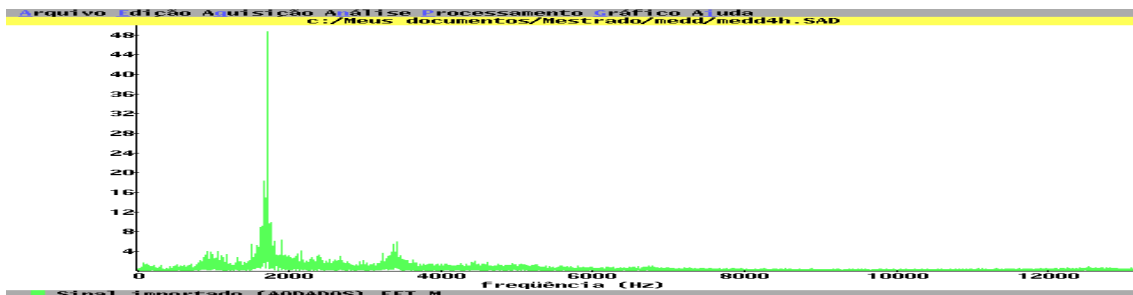
ANEXO B – ESPECTROS DE FREQUÊNCIA DA QUARTA TRANSMISSÃO PADRÃO

Primeira marcha medição horizontal



Segunda marcha medição horizontal

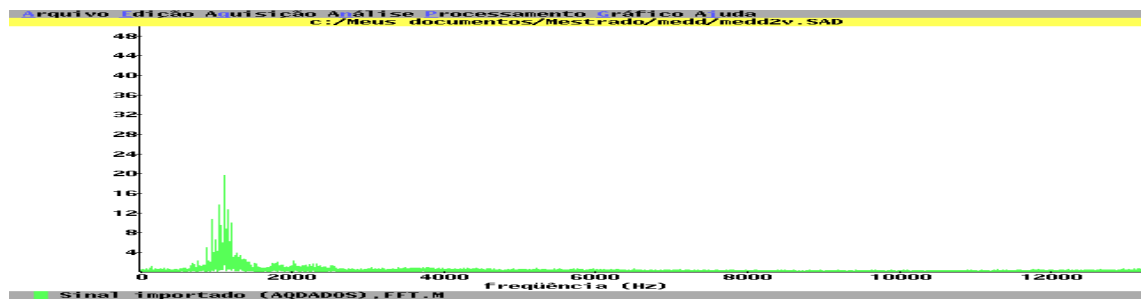
Terceira marcha medição horizontal



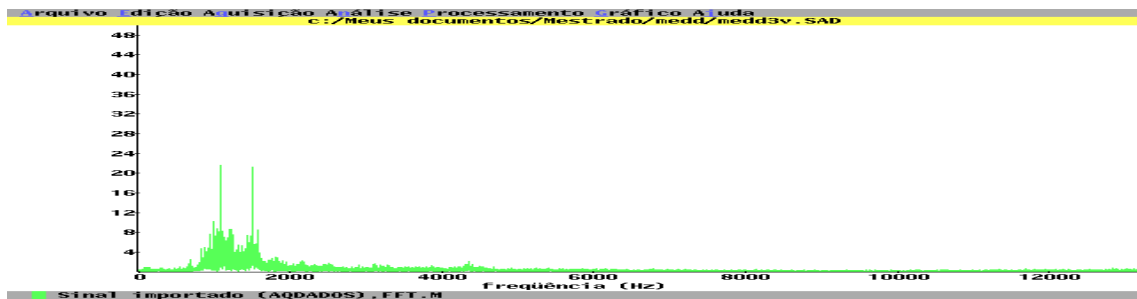
Ré medição horizontal



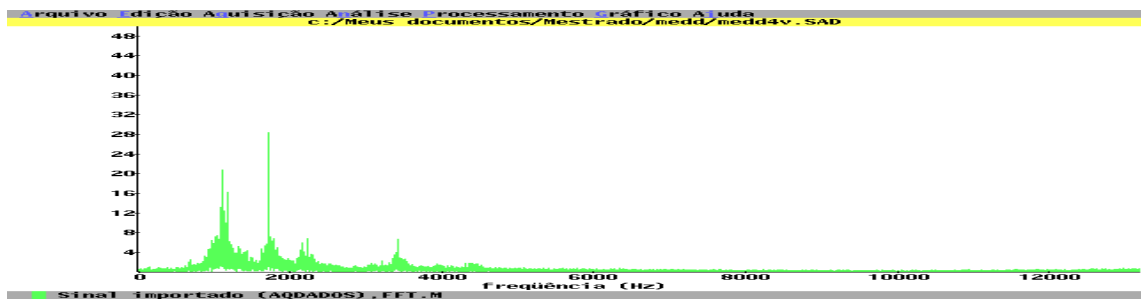
Primeira marcha medição vertical



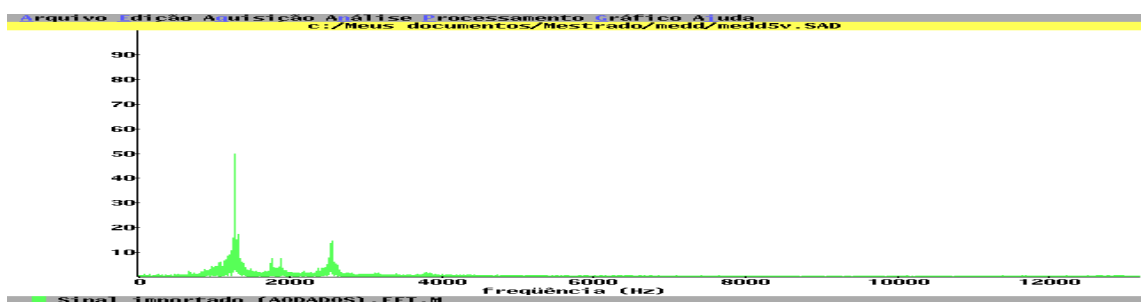
Segunda marcha medição vertical



Terceira marcha medição vertical

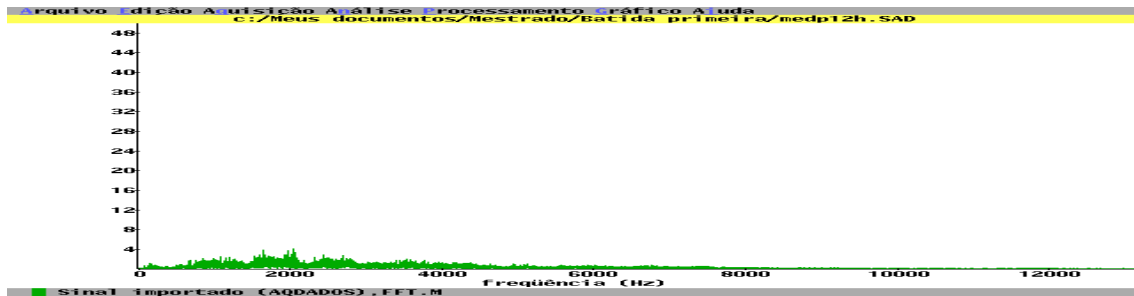


Ré medição vertical

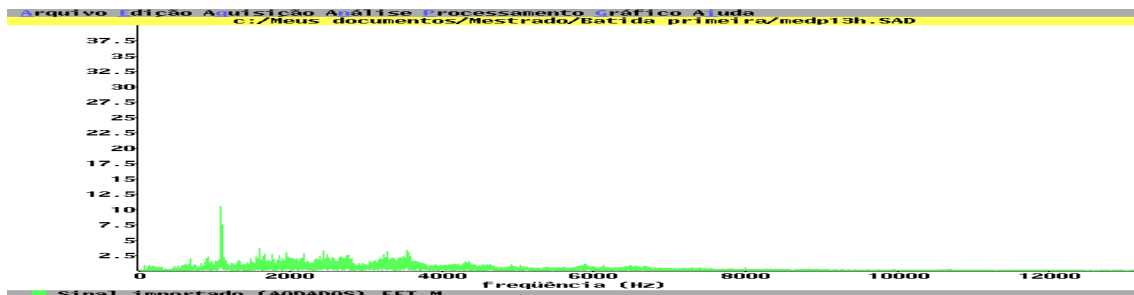


ANEXO C - ESPECTROS DE FREQUÊNCIAS MEDIÇÃO HORIZONTAL E VERTICAL DA TRANSMISSÃO COM ENGRENAGEM CONDUZIDA DA PRIMEIRA MARCHA COM BATIDA

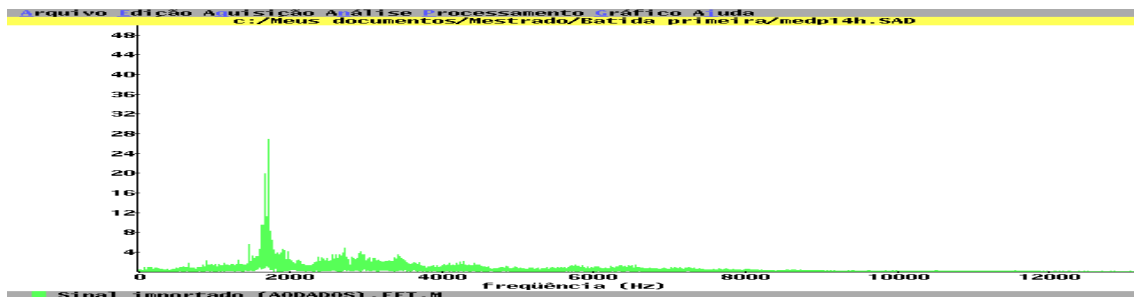
Primeira marcha medição horizontal



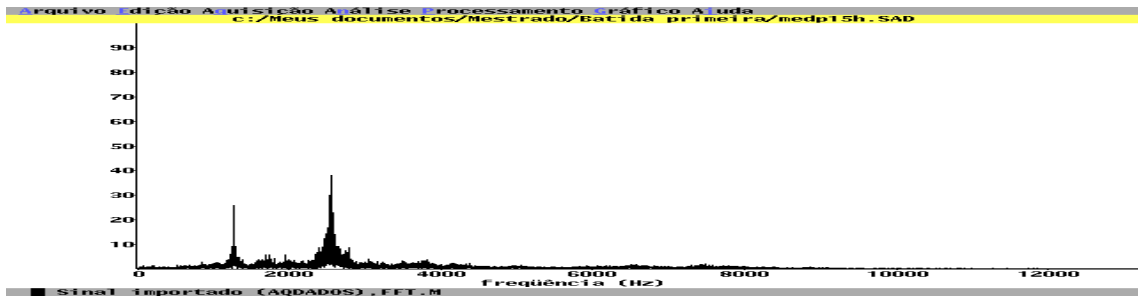
Segunda marcha medição horizontal



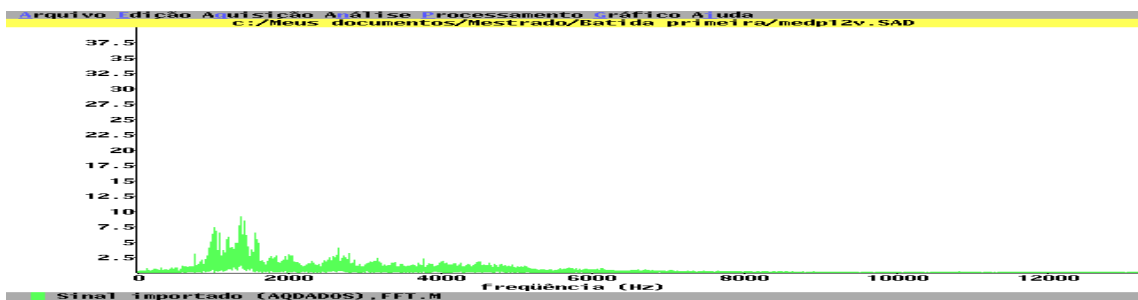
Terceira marcha medição horizontal



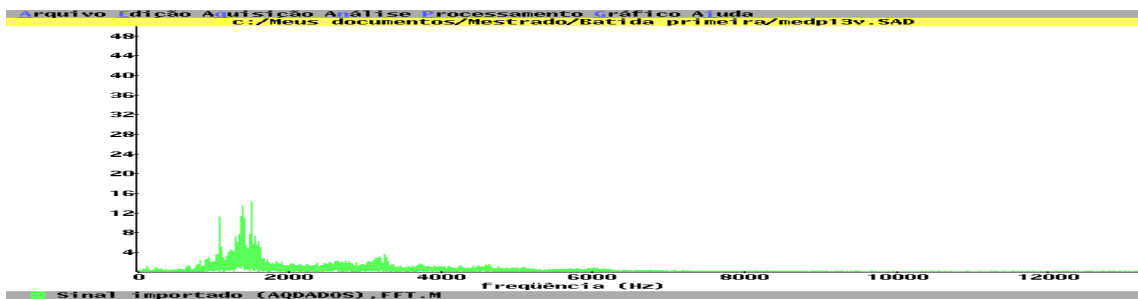
Ré Medição horizontal



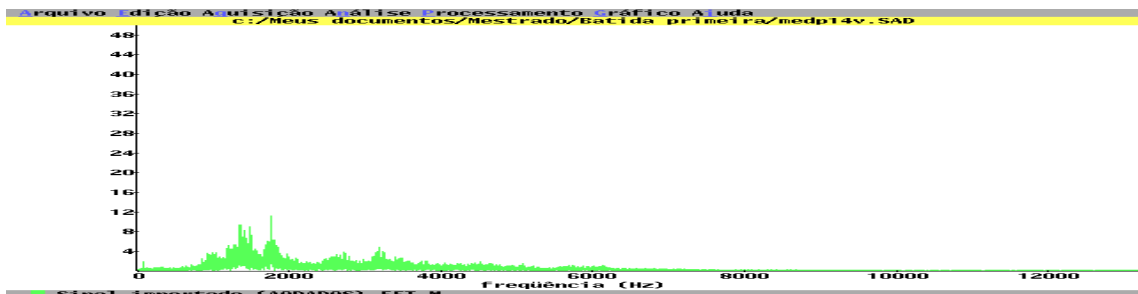
Primeira marcha medição vertical



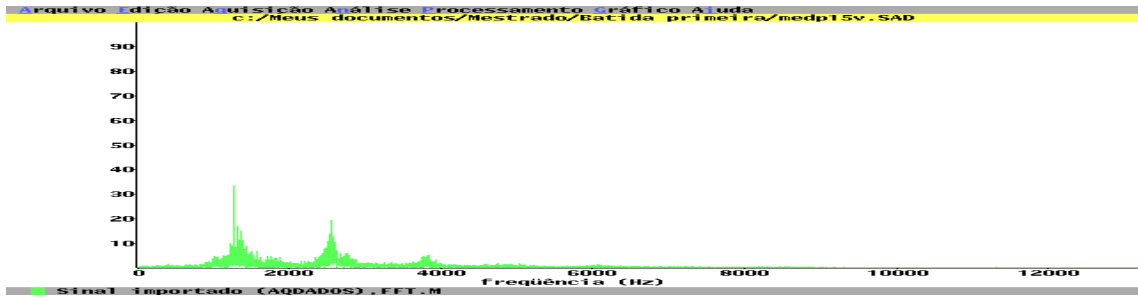
Segunda marcha medição vertical



Terceira marcha medição vertical

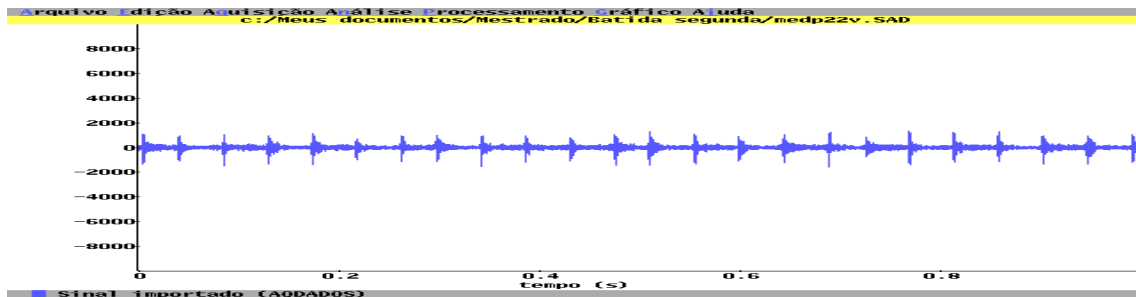


Ré medição vertical

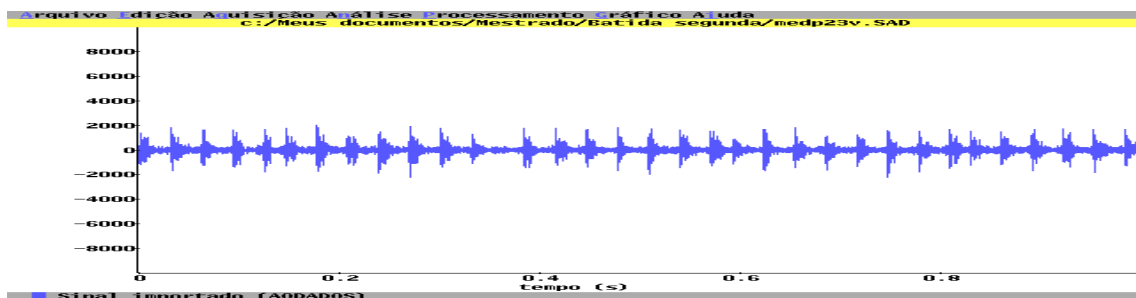


ANEXO D – SINAIS NO TEMPO DAS MEDIÇÕES VERTICAIS NAS QUATRO MARCHAS DA TRANSMISSÃO COM A ENGRENAGEM CONDUZIDA DA SEGUNDA MARCHA COM BATIDA

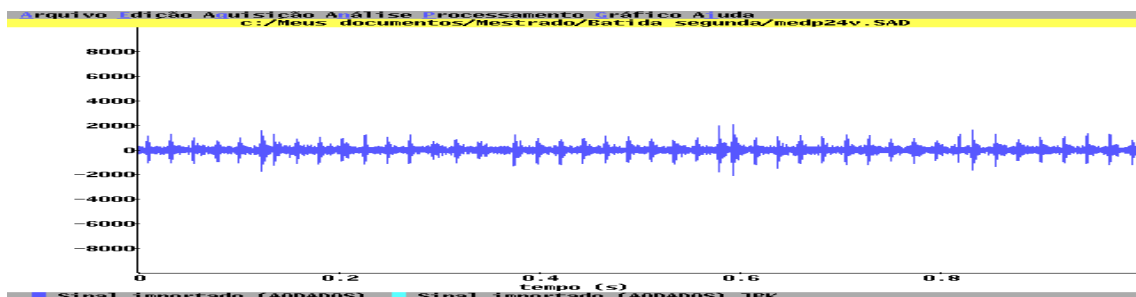
Primeira marcha medição vertical



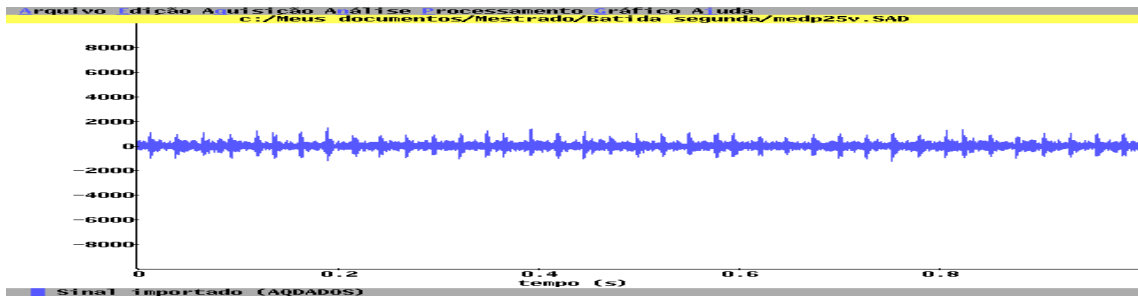
Segunda marcha medição vertical



Terceira marcha medição vertical



Ré medição vertical



ANEXO E – BANCADA DE TESTE TRANSMISSÕES