

CARACTERIZAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DAS VIBRAÇÕES MECÂNICAS GERADAS POR MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA À EXPOSIÇÃO HUMANA UTILIZANDO ACELERÔMETROS MEMS

Gabriel Klein Lunkes, herr.lunkes@gmail.com¹
Carlos Eduardo de Souza, carlos.souza@ufsm.br¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima nº1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria – RS, CEP: 97105-900, Brasil.

Resumo: Um importante parâmetro para a qualidade de condução e conforto veicular é a avaliação da exposição do condutor às vibrações de corpo inteiro. Para evitar que indesejadas frequências sejam atingidas é necessário que se identifique as fontes de vibração e o quanto desta energia não é dissipada pelo automóvel. Excetuando as vibrações inerentes à dinâmica da condução, os motores de combustão interna são a maior fonte de vibração. Neste trabalho exploramos a origem destas vibrações, sua magnitude e o quanto desta energia é transferida para o condutor. Esta relação de transmissibilidade entre motor e o habitáculo foi realizada utilizando o sinal capturado por um acelerômetro capacitivo de baixo custo MEMS. Após aferir sua eficácia em uma plataforma vibratória padrão (shaker), foi realizado um estudo de caso com um veículo sedan quatro cilindros e identificação dos parâmetros pertinentes do sinal adquirido.

Palavras-chave: conforto, motores, vibrações, análise de sinal, MEMS

1. INTRODUÇÃO

A análise das vibrações mecânicas é uma poderosa ferramenta para avaliação da integridade e dos parâmetros de projeto de diversos dispositivos. Podem ser desejáveis, como forma de feedback dos processos em andamento, mas também podem gerar sérios riscos à saúde durante a exposição humana a estes eventos. O risco de lesões irreparáveis é especialmente alto para a vibração do corpo humano em exposições diárias na rotina de trabalho, onde as magnitudes de vibração podem ser substanciais e os tempos de exposição longos.

Infelizmente, a relação entre exposição de vibração e danos à saúde muitas vezes não é tão óbvia. A exposição intensiva é facilmente confundida com a fadiga após um dia de trabalho. Inicialmente são efeitos temporários que com a repetitividade, geram patologias nas articulações, sistema circulatório, nervoso e digestivo, conforme Griffin, 1990.

Para definir os limites de exposição às vibrações, a norma ISO-2631-1 (1997) patroniza a metodologia de avaliação da Vibração de Corpo Inteiro ou (Whole body vibration - WBV) dentro do espectro de frequências pertinentes 0,5 – 80 Hz. A referida norma padroniza os cálculos que mensuram a quantidade de energia acumulada durante as medições e propõe níveis de segurança. A exemplo disto, para a situação típica de exposição em veículos, o valor mais indicado é o “Vibration Dose Value” (VDV) que é uma medida cumulativa desta quantidade de energia. Outra forma complementar de avaliação é a verificação do sinal tratado no domínio da frequência fazendo uso de espectrogramas, Transformada de Fourier e “Power Spectral Density” (PSD).

Os recentes avanços na tecnologia de sistemas de medição embarcados, reduziu custos e tornou acessível diversos tipos de sensores como os acelerômetros MEMS (Micro-Electro Mechanical Systems), como mostra Alhussein (2008). É possível encontra-los em diversos dispositivos móveis inteligentes tais como celulares, relógios e câmeras fotográficas. No setor industrial, os MEMS são uma solução consolidada a mais tempo. Podemos encontrar estes sensores em acionamento de air bags e monitoramento de eixos rotativos, aplicados isoladamente ou em conjunto com acelerômetros convencionais como utilizou Sabin (1995).

O presente trabalho utiliza os acelerômetros MEMS para realizar a caracterização dos motores de combustão interna como fonte de vibração pertinente a avaliação do valor WBV.

2. CARACTERIZAÇÃO DO MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA COMO FONTE DE VIBRAÇÃO

Veículos automotivos devem ser pensados como uma estrutura flexível de massas e molas distribuídas com o objetivo de melhor equilibrar o manuseio, conforto e eficiência de combustível. Sendo assim, ao contrário da subjetividade da maioria das avaliações, é de suma importância que se identifique e mensure as diferentes fontes de WBV.

Excetuando os esforços dinâmicos provenientes da combinação dos fatores envolvidos na condução (perfil da pavimentação, velocidade, etc), a maior fonte de vibrações mecânicas é o sistema de propulsão ou Powertrain. Além da potência necessária para a locomoção, há também um aspecto dinâmico para a potência transferida que pode resultar em ruído e vibração. Na Fig. 1 é esquematizado as principais fontes de vibração para este equipamento.

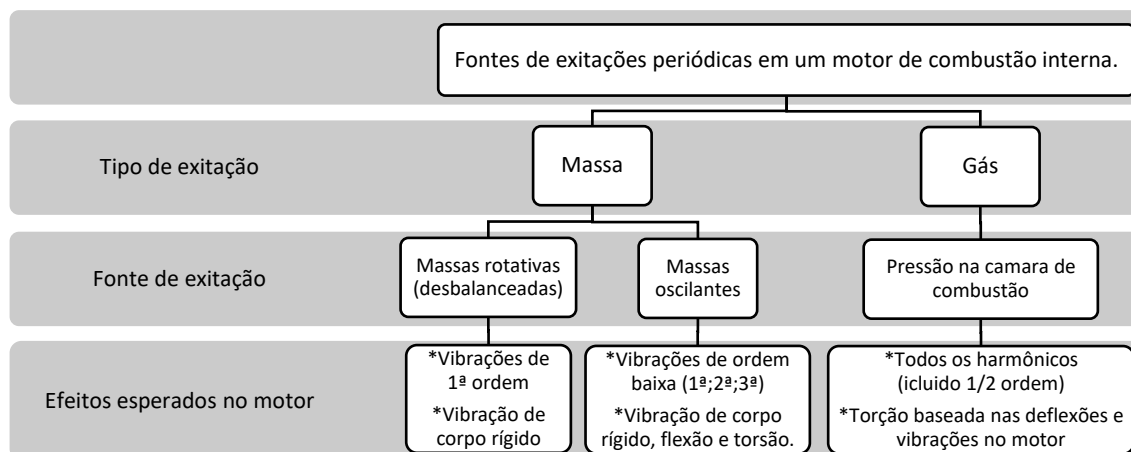
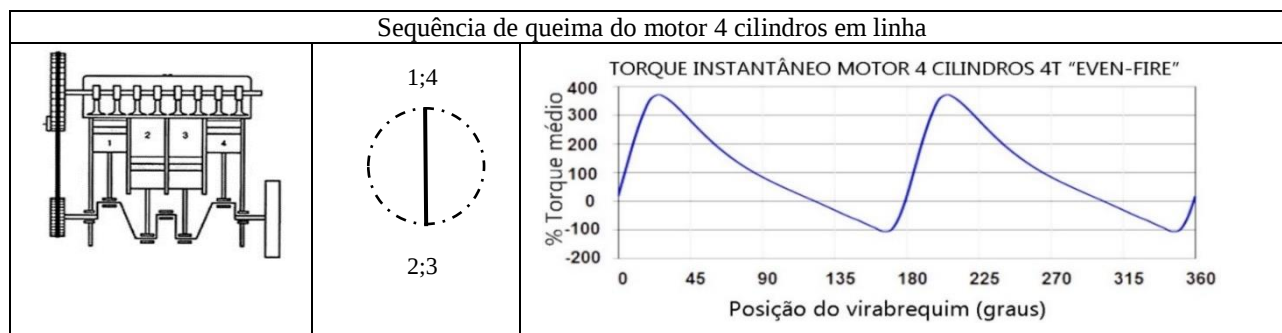


Figura 1. Fontes de vibração em motores de combustão interna –Adaptado de Joshi A. (2012).

Conforme Heywood J. (1988), a excitação gerada no processo de combustão se dá em forma de flutuações de torque e ocorre em dois regimes de frequência: demanda de torque do motorista e pulsos de combustão. Para este trabalho, foi considerado um motor quatro tempos, quatro cilindros em linha onde o tempo entre uma combustão e outra é regido pela mesma distância angular do virabrequim. Ou seja, ocorre um tempo de combustão a cada 180° de deslocamento da árvore de manivelas. Na Tab. 1 é possível observar que a forma da curva de torque contém dois picos de torque que são quase 300% acima do torque médio, e dois vales de torque que são cerca de 200% abaixo do torque médio. Esta curva é um exemplo de excitação de "segunda ordem" porque existem dois pulsos de torque (ciclos) por volta do virabrequim.

Tabela 1. Pulsos de torque em um motor de combustão interna.



3. PARÂMETROS DE CONFORTO VIBRACIONAL

Tendo exemplificado a importância das medições das vibrações mecânicas que atingem o ser humano bem como identificado uma das principais fontes de vibração (motor de combustão interna), é necessário saber quanto desta vibração gerada chega ao condutor e o potencial risco desta parcela de exposição.

Geralmente esta avaliação restringe-se a avaliação da transmissibilidade entre o assoalho do veículo e a superfície onde o condutor se apoia. A avaliação somente da transmissibilidade do assento não é suficiente para um completo panorama e reconhecimento das fontes de vibrações em veículos automotivos. Uma maneira conveniente de incluir mais fatores em um único índice é usar a transmissibilidade da amplitude efetiva do assento ou "valor SEAT". O valor SEAT inclui inerentemente os três fatores importantes para o desempenho dinâmico do assento: espectro de vibração, transmissibilidade e ponderação de frequência de resposta humana. Sendo assim, o valor SEAT pode ser quantificado como a razão entre os valores RMS (Root Mean Square) ou VDV conforme mostram as fórmulas abaixo:

$$SEAT\% = 100 \times \frac{VDV(assento)}{VDV(assolho)}, \quad (1)$$

$$SEAT\% = 100 \times \frac{rms(assento)}{rms(assolho)}. \quad (2)$$

Contudo, com este valor, não é possível caracterizar as fontes de vibração do assoalho. Entendemos que existe outra fonte de vibração dentro do sistema com potencial para interferir no conforto e segurança. Neste trabalho, foi proposta a mesma metodologia de avaliação aplicada a transmissibilidade entre o motor e o chassi. Analogamente ao valor SEAT, foi avaliado a relevância de análise de um valor MOTOR%, como representado na Fig. 2 para o conforto e segurança de acordo com os parâmetros de exposição diária normalizados.

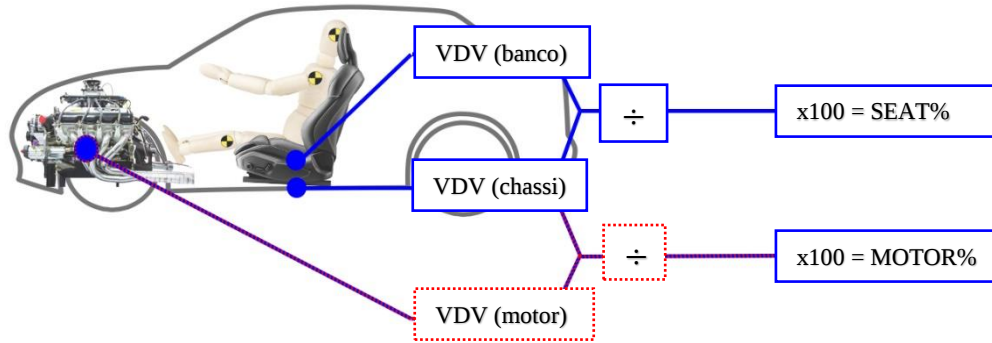


Figura 2. Representação gráfica do cálculo MOTOR%.

Um valor $MOTOR\% = 100\%$, por exemplo, indicará que as propriedades dinâmicas do suporte do motor e os aspectos construtivos do chassi não melhoram ou reduzem o conforto do veículo, para esta fonte de vibração. Um valor superior a 100% indicaria que o conjunto piora a condução comparado a hipótese de o condutor guiar apoiando-se na superfície do motor. Por fim, um valor inferior a 100% representaria a situação ideal de efetividade de isolamento de vibrações mecânicas provenientes do motor.

Para mensurar a quantidade de vibração que um trabalhador é exposto durante sua rotina de trabalho, o valor típico utilizado é o RMS. Esta quantificação é válida, de acordo com Brüel & Kjaer (2009), apenas para situações onde as acelerações lineares são constantes e sem grandes variações. No entanto, é de grande importância que se avalie ambientes onde o ser humano é exposto a vibrações com variações repentinas e eventuais choques. Por exemplo, um motorista realizando uma viagem experimentará situações irregulares na pista, tais como buracos, quebra-molas e paralelepípedos. Nestes casos somente o valor VDV é representativo pois é uma medida cumulativa ao invés de uma média (RMS). Na seção 6.3.2 da norma ISO-2631-1:1997 o cálculo deste parâmetro é descrito como:

$$VDV = \left\{ \int_0^T \{a_w(t)\}^4 dt \right\}^{1/4} \quad (3)$$

com $a_w(t)$ representando a aceleração instantânea ponderada e T correspondendo ao tempo de medição.

Contudo, para atender a recorrente situação de múltiplos períodos de medição com períodos de magnitudes diferentes, a norma estabelece o valor VDV_{total} .

$$VDV_{total} = (\sum_i VDV_i^4)^{1/4}. \quad (4)$$

Onde i identifica o período de medição.

Este cálculo é de fundamental importância para avaliação da exposição às vibrações mecânicas que são expostos motoristas de ônibus, taxistas, operadores de máquinas agrícolas, etc.

4. AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE SINAL (colocar como item 3)

Vários trabalhos (Muszynska, 1995; Jiang, 2012 e Sinha, 2013) apontam que a sensibilidade das máquinas às vibrações mecânicas vem crescendo nas últimas décadas. Para manter a integridade estrutural e condições de segurança, a avaliação do comportamento vibracional, nos domínios do tempo e da frequência, formatam a base para o monitoramento de máquinas rotativas como os motores de combustão interna.

Esta análise depende do sistema de aquisição de sinal aplicado. Vários parâmetros como velocidade, deslocamento e aceleração podem ser medidos por equipamentos que aplicam diferentes princípios de funcionamento como mostrado na Fig 3.

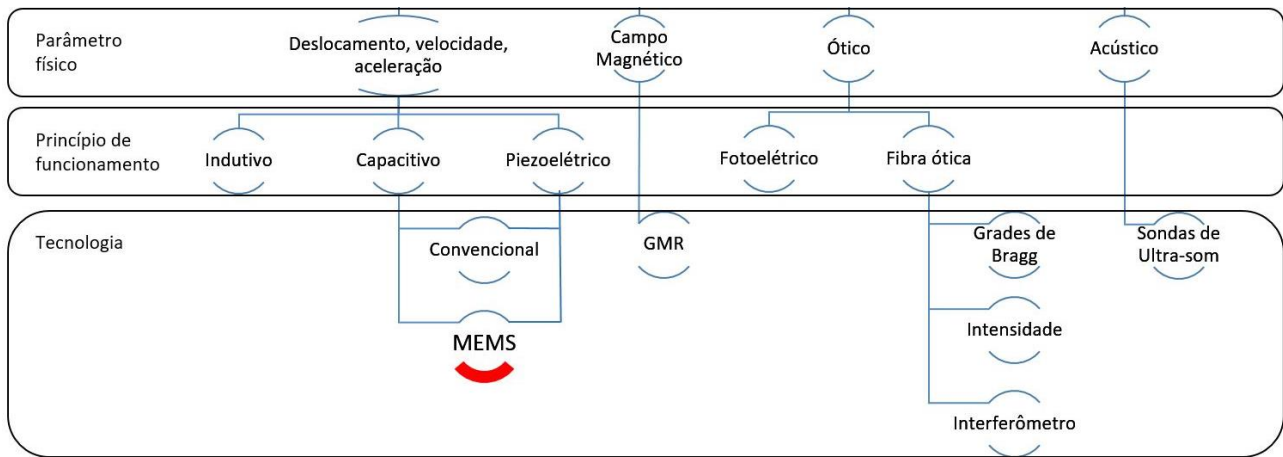


Figura 3. Diferentes sensores de vibração e suas tecnologias – Adaptado de .

4.1. Acelerômetros MEMS

Acelerômetros MEMS podem utilizar dois princípios de funcionamento, como fica evidente na Fig 3. Gao (2004), mostra que os acelerômetros piezoelétricos consistem em um sistema onde uma massa sísmica gera compressão ou cisalhamento sobre um cristal piezoelétrico. A alteração da diferença de potencial induzida no cristal (efeito piezoelétrico) é proporcional à aceleração linear. Katalin A. (2012), mostra que os sensores baseados em cristais piezoelétricos, apesar de bastante difundidos, são grandes e complexos. Neste contexto, os acelerômetros MEMS capacitivos tem larga vantagem e aplicabilidade devido a possibilidade de miniaturização de seus componentes eletromecânicos e baixo consumo de energia. Com a redução do volume ocupado e custo, os MEMS capacitivos se tornam a opção viável para inúmeras aplicações onde os componentes piezoelétricos não são acessíveis. Este trabalho aproveita-se destas características para definição do instrumento de medição. Conforme ratifica Akinnuli et al. (2017), os MEMS capacitivos satisfazem as condições para medições de WBV. O princípio de funcionamento destes sensores baseia-se na variação de capacitância entre um eletrodo de medição (móvel) e um de referência (fixo), conforme Fig 4.

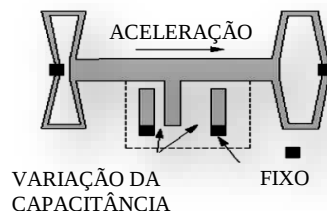


Figura 4 Princípio de funcionamento do acelerômetro MEMS capacitivo.

4.2. Equipamento de Aquisição e Tratamento do Sinal

Considerando os níveis de vibração gerados por motores de combustão interna apresentados por vários trabalhos (Amar S., 2016; Madhava V., 2016 e Ahmad T., 2016), justifica-se a utilização do equipamento apresentado por Lunkes (2017), também neste trabalho. Conectado a uma placa de desenvolvimento Arduino Uno, um MEMS capacitivo triaxial registra as acelerações lineares e as envia para o processamento do sinal em ambiente computacional.



Figura 5 Aquisição e tratamento de sinal.

Com taxas de aquisição superiores a 400 Hz, podemos inferir que o dispositivo atende o teorema de Nyquist. Este estipula que o sistema de medição deve ser capaz de adquirir dados com taxa no mínimo duas vezes superior à maior frequência que se pretende medir. Uma vez que o espectro de frequências alvo para WBV está compreendido entre 0,5 e 80 Hz (ISO-2631-1(1997)), definimos este dispositivo de baixo custo para todas avaliações neste trabalho.

Alguns trabalhos (Yazdi N., 1998 e Mohn-Yasin F., 2003) descrevem uma característica inerente aos acelerômetros MEMS, o Ruído Gaussiano em altas frequências. Este ruído é representado por um sinal aleatório periódico com variações características. No presente trabalho, a atenuação deste ruído é realizada por múltiplas etapas, utilizando filtros de resposta ao impulso finita (FIR).

Neste contexto, após transformar o sinal para o domínio da frequência utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT), foram identificadas as frequências indesejadas e aplicado o método de Janelamento de Kaiser. Este é considerado por Proakis J. (1997), como o filtro mais otimizado por prever um lóbulo principal largo para atenuação da banda de corte com parâmetros variáveis como mostrado nas Eq (10) e Eq (11).

$$w[n] = \begin{cases} \frac{I_0\left[\beta\sqrt{1-\left(1-\frac{2n}{M}\right)^2}\right]}{I_0[\beta]}, & 0 \leq n \leq M \\ 0, & \text{senão} \end{cases} \quad (10)$$

Na equação acima, o parâmetro M representa o comprimento do lóbulo e β , controla o nível dos lóbulos secundários com respeito ao lóbulo central. A função de Bessel é identificada por I_0 :

$$I_0(x) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(x/2)^n}{n!} \right]^2 \quad (11)$$

Uma vez que existem grandes diferenças de amplitude e ruídos atribuídos aos sinais medidos no motor e no interior do carro, para cada medição foi encontrado valores específicos nos parâmetros que definem o filtro de Kaiser

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Várias empresas fornecedoras de instrumentos de medição industriais comerciais possuem soluções para avaliação das vibrações no corpo humano com inegável superioridade técnica, porém com custo elevado. Tanto nestas empresas quanto em trabalhos como Albarbar A. (2009), identifica-se a necessidade de testes para aferição das características de funcionamento dos acelerômetros precedendo as medições apropriadas ao objeto de estudo.

Para tanto o procedimento experimental deste trabalho compreendeu uma primeira etapa onde foi aferido as características do acelerômetro utilizado. Posteriormente, foi executado as medições no veículo para as avaliações de conforto e transmissibilidade pretendidas.

5.1. Caracterização do Acelerômetro MEMS MPU9250.

Para caracterizar o acelerômetro, foi realizado um experimento onde excitamos o sensor com uma frequência padrão conhecida em um shaker. Estas informações recolhidas foram avaliadas com o software Matlab em um computador conectado à porta serial do Arduino. Os dados brutos recebidos foram primeiramente plotados no domínio do tempo e avaliado sua proximidade com os valores da onda-padrão senoidal enviada ao shaker.

Assim, aplicando a FFT, os dados foram transformados para o domínio de frequência onde comprovamos a correlação entre os picos do gráfico e a frequência imposta pela fonte de excitação. Para diferentes frequências foi obtido o erro percentual entre sinal fornecido e medido apresentado na Tab 2.

Tabela 2. Erro percentual entre sinal de referência e medição do acelerômetro MPU9250

Frequência (Hz)	Erro (%)
5	0,80
10	0,74
20	0,73
50	0,68
100	0,72

Dando continuidade a avaliação do acelerômetro, o shaker foi excitado por uma onda senoidal de frequência não constante. Conforme é possível observar na Fig 6., em 120 segundos, este sinal percorreu as frequências até 500 Hz de forma linear e crescente. Para gerar este gráfico, foi utilizado o método de Janelamento de Kaiser com as constantes descritas na Fig. 6.

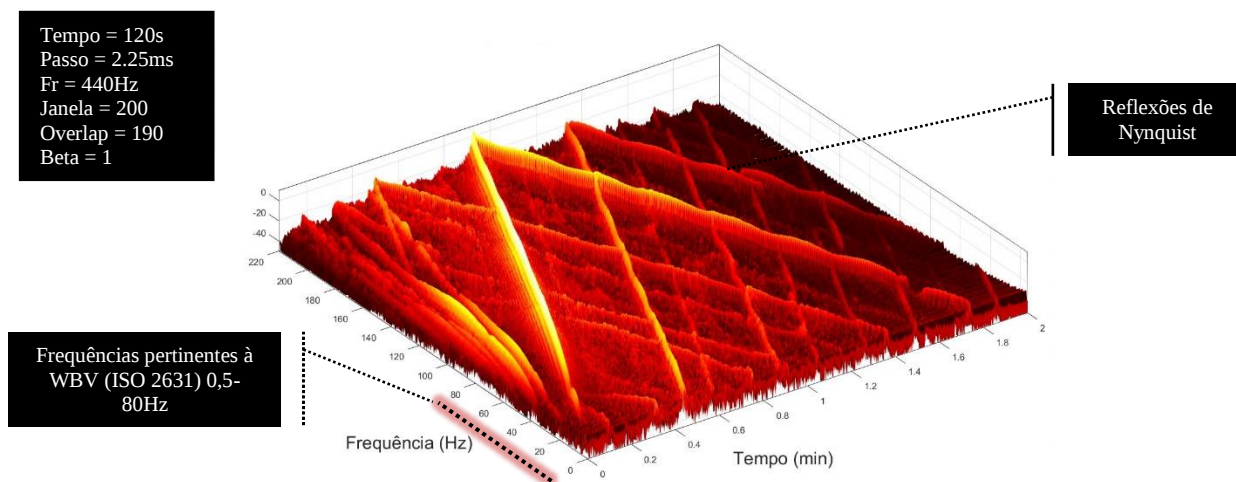


Figura 6 Espectrograma com janelamento de Kaiser.

É possível observar no gráfico que, para o espectro de frequências importantes à avaliação de WBV, a frequência de excitação é a mais proeminente. Alguns aspectos indesejados também foram percebidos. As reflexões, por exemplo, foram observadas a partir de 220 Hz, ratificando o teorema de Nynquist. Devido a fixação do acelerômetro no shaker e frequências naturais do próprio sistema de medição ocorreram leituras de frequências não desejadas, mas com menor energia do que a frequência de excitação. Em suma, o acelerômetro utilizado apresentou um desempenho suficiente para a avaliação pretendida.

5.2. Medições no Veículo

Afim de cumprir com as avaliações propostas, uma matriz de ensaios foi estabelecida para avaliação da dinâmica e estática do veículo na transmissibilidade de vibrações do motor para dentro do habitáculo. Foi estipulado a avaliação do conjunto dinâmico do carro em três faixas de rotação: marcha lenta, 1500 rotações por minuto (rpm) e 3000 rpm. Para cada faixa de rotação foi realizado medições em 3 pontos distintos do veículo: diretamente no motor, no chassi e no assento. Todas estas primeiras análises foram feitas com o veículo em repouso.

Para verificar a participação das vibrações mecânicas geradas pelo sistema de propulsão, o veículo foi levado para testes em uma rodovia com condição de pouco tráfego. Nesta situação, foi imposto ao motor uma rotação constante de 3000 rpm e relação de transmissão condizente com a velocidade da via. O trajeto escolhido foi registrado com o aplicativo de celular gratuito GPS Tracker como demonstrado na Fig. 7.

Observando a Fig. 7, é possível identificar o ponto de início das medições com o marcador triangular, seguindo a rodovia e voltando pelo mesmo trajeto até o ponto final (marcador quadrado). As cores representadas correspondem a velocidade do veículo. Com esta relação, foi identificado os trechos onde as medições foram mais representativas.

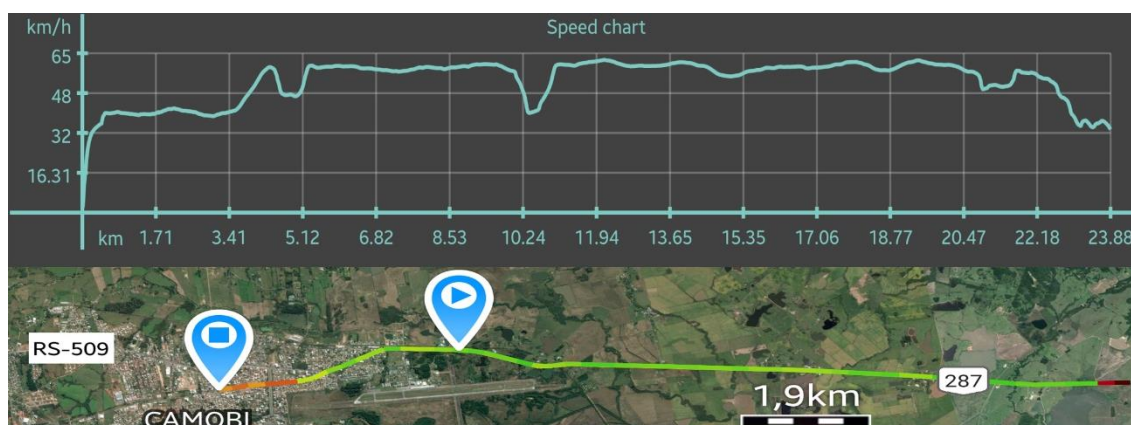


Figura 7 Registro do deslocamento durante as medições.

Para que fosse atendido a norma ISO-2631(1997), a duração das medições para o cálculo do VDV precisou ser representativa para uma jornada de 8 horas de serviço. Para que se evite grandes períodos de medição a norma estipula que sejam feitas medições fracionadas com períodos de 5 minutos até que o tempo total complete 20 minutos de registro.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O veículo escolhido para o teste foi o Chevrolet Prisma, ano e modelo 2011. Este é equipado com um motor 1,4 litros de deslocamento volumétrico, possui 4 cilindros em linha e está posicionado transversalmente ao comprimento do carro. A disposição angular do virabrequim é análoga ao apresentado na Tabela 1.

Após feitas as medições conforme o procedimento estipulado, identificamos que a dinâmica de deslocamento do motor sobre seus apoios não é exclusivamente vertical. Este fato é atribuído ao processo de combustão, efeitos da inércia e desbalanceamentos. As somas vetoriais das acelerações lineares de cada eixo cartesiano para as faixas de rotação estipuladas geraram os gráficos da Fig. 8.

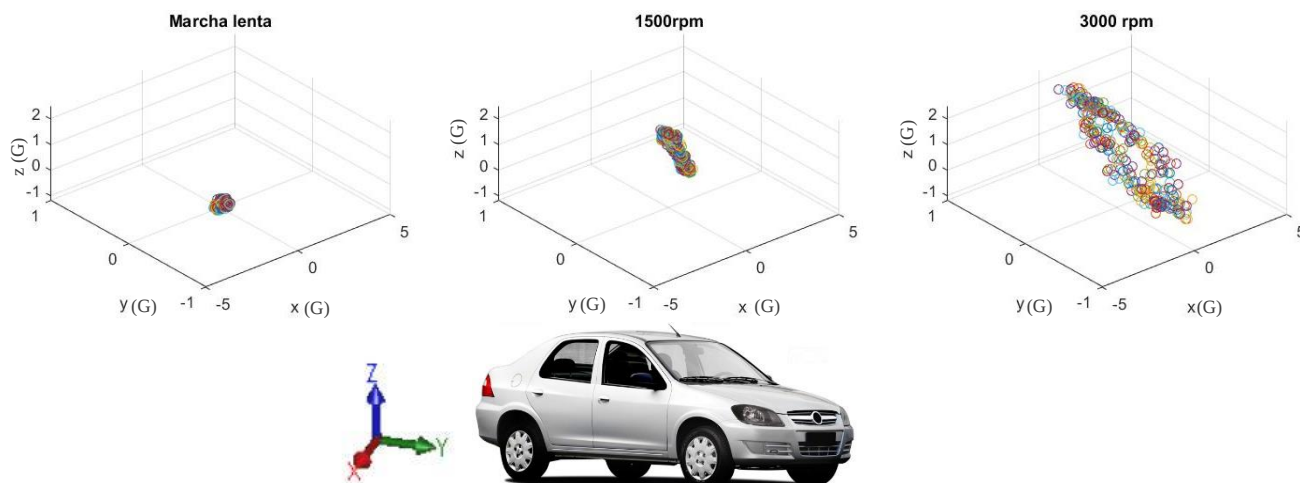


Figura 8 Soma vetorial das acelerações e orientação cartesiana do Chevrolet Prisma 1.4

Posterior a esta verificação, foi utilizado o método de Janelamento de Kaiser para gerar um espectrograma onde fosse possível ratificar a capacidade do acelerômetro de identificar, no domínio da frequência, a maior fonte de vibração do motor. Para o sinal medido diretamente na carcaça superior do motor a 3000 rpm, temos o resultado apresentado na Fig. 9.

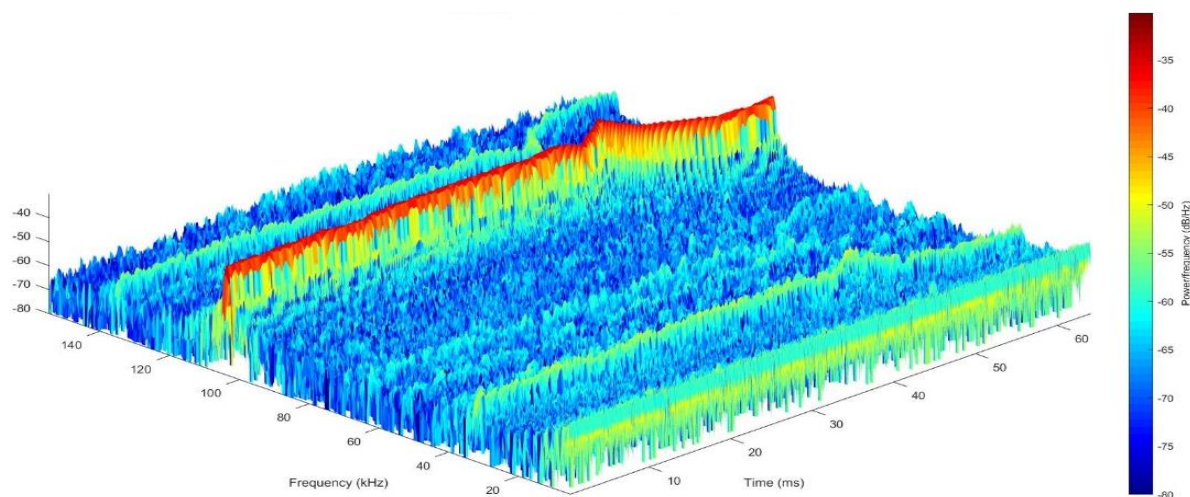


Figura 9 Deslocamento vertical a 3000 rpm

Na Fig. 9 é possível identificar que a frequência de 100 Hz se manteve constante e obteve as maiores amplitudes. Esta frequência caracteriza a maior relevância dos efeitos da combustão na dinâmica vibracional do motor. Isto porque 3000 rpm, correspondem a 50 rps (rotações por segundo). Como a cada volta deste motor ocorrem dois tempos de combustão separados por ângulos equidistantes do virabrequim, são 100 combustões ocorrendo por segundo que correspondem aos 100 Hz.

Conhecendo a dinâmica de funcionamento dos motores de combustão interna podemos prever que outros picos de frequências podem ocorrer. Comando de válvulas, sistemas periféricos governados pela polia, escoamento dos gases e massas rotativas, são alguns exemplos de fontes de vibração com amplitudes menores. Todos estes, oscilam com frequência múltipla da frequência de primeira ordem (frequência de rotação do virabrequim). Os múltiplos são constatados analisando a Transformada Rápida de Fourier do sinal medido no motor.

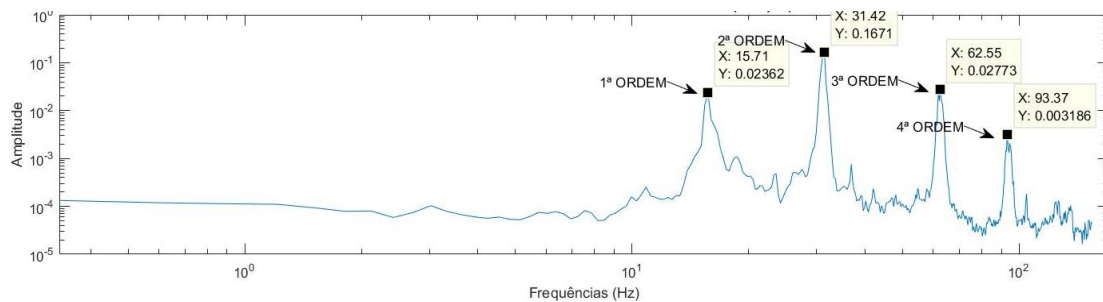


Figura 10 FFT do deslocamento vertical em marcha lenta (900 rpm)

A linha pontilhada apresentada na Fig. 11, compreende o espectro de frequências analisadas pela norma ISO 2631. Com isso foi possível verificar que a faixa de rotações mais importantes para o conforto humano são as inferiores a 2400rpm (80 Hz). Para um trânsito urbano ou movimentação em baixas velocidades, esta faixa de rotação é extremamente usual, ratificando a importância deste estudo. Estes gráficos mostram também as frequências de segunda ordem que caracterizam a combustão contendo maior energia.

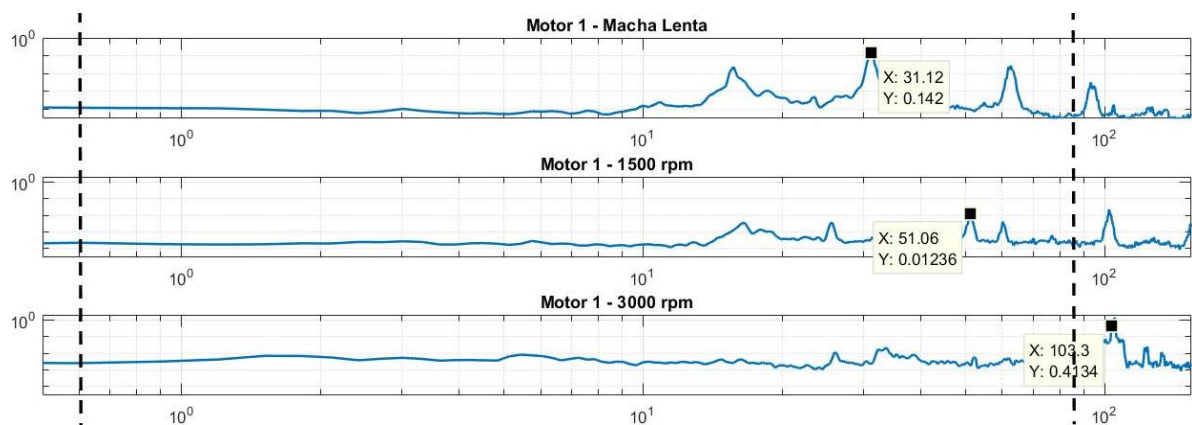


Figura 11 FFT em diferentes rotações

Após a caracterização das fontes de vibração, foi verificado o quanto estas contribuem para o (des)conforto dos passageiros. Para este fim, foi utilizado o cálculo proposto para o valor de exposição diária VDV. Na condição de 3000 rpm foi encontrado as maiores amplitudes de deslocamentos gerado a Fig. 12 a partir das medições dos pontos-chave escolhidos. Ficou evidente a atenuação das vibrações entre o motor e o habitáculo.

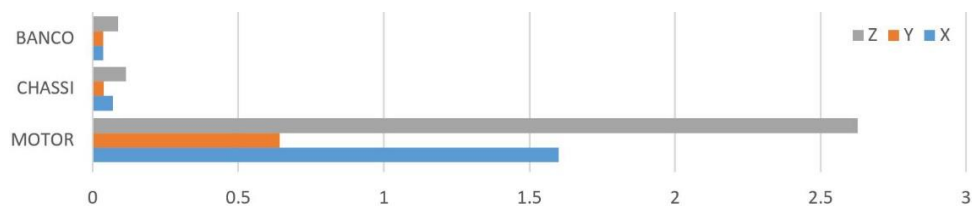


Figura 12 Composição do VDV para diferentes pontos de medição

Para situação real de condução do veículo estes resultados se pronunciaram de forma semelhante. Durante o tráfego com o veículo pela via asfaltada é adicionado uma grande parcela de deslocamentos provenientes da condução. Ainda assim os valores de exposição VDV atribuídos a contribuição exclusiva do motor são visíveis e não podem ser negligenciados durante o projeto de veículos ou avaliação da adequação às normas de segurança.

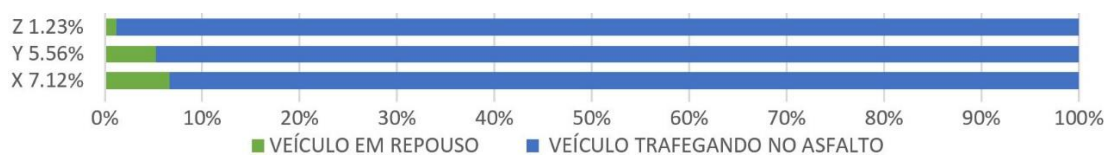


Figura 13 Participação do motor na medição do VDV

Alguns autores (Griffin, 1990 e Mansfield, 2005) propõem uma curva típica de transmissibilidade para o valor SEAT%. Antes da medição do valor proposto para este trabalho “MOTOR%”, foi verificado a correlação dos valores medidos com a curva padrão proposta por Mansfield (2005). Com os resultados da Fig 14, é comprovado a eficácia do sistema de medição com o acelerômetro MEMS.

Na sequência em que aparecem, os gráficos mostram os valores da FFT do assento, do chassi e a sua relação de transmissibilidade. A partir do gráfico conseguimos garantir que para as frequências superiores a 10 Hz, o assento atenua as vibrações. O último gráfico da Fig. 14 é a referência proposta por Mansfield (2005).

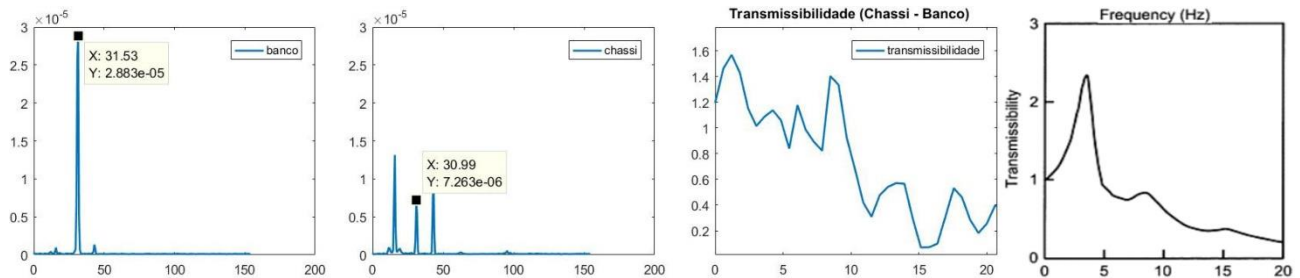


Figura 14 Valores medidos e curva típica de transmissibilidade SEAT

Enfim, foi realizado a verificação da relação de transmissibilidade de vibrações entre o motor e o chassi através da relação MOTOR% proposta por este trabalho. Existem duas regiões onde o sistema do veículo se comporta mal neste quesito. Entre 5 e 10Hz e entre 20 e 25 Hz a Fig. 15 mostra que o sistema não consegue atenuar as vibrações provenientes do motor de forma eficiente. Contudo esta segunda faixa de frequências é bem atenuada pelo banco conforme a Fig 14. O espectro compreendido entre 5 e 10 Hz, corresponde as rotações de 150 e 300 rpm, pouco comuns em um veículo com o estudado neste trabalho e, portanto, tem pouca relevância no dimensionamento.

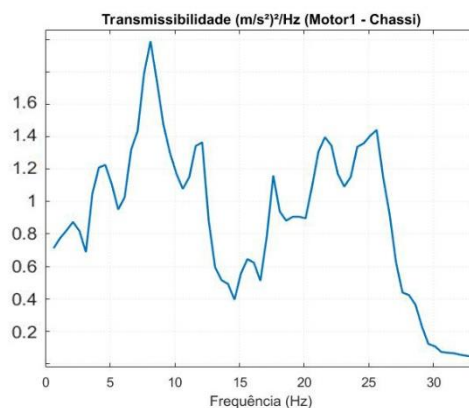


Figura 15 Transmissibilidade Motor-Chassi

7. CONCLUSAO

Os resultados obtidos neste trabalho demonstraram a viabilidade do uso de acelerômetros MEMS capacitivos na caracterização das acelerações lineares geradas por motores de combustão interna. A correlação feita entre o sinal padrão e o sinal medido pelo acelerômetro MEMS bem como a análise dos resultados encontrados foi suficiente para validar o acelerômetro.

Este trabalho também contribui para uma melhor interpretação do valor SEAT%. Um segundo valor percentual, MOTOR% é proposto para distinção da contribuição do motor de combustão interna nos cálculos de exposição diária às vibrações mecânicas (VDV). Foi comprovado existir regimes de funcionamento em baixa frequência em que estas vibrações tomam uma parcela não negligenciável no desenvolvimento de novos veículos.

8. REFERÊNCIAS

- Ahmad T., Barat G., Teymour T., Seyyed S. M., Abbas R., Mohsen A., 2016, “Characterization of engine's combustion-vibration using diesel and biodiesel fuel blends by time-frequency methods: A case study”, Renewable Energy International Journal, Vol 95, pp 422-432.
- Akinnuli, B. O., Dahunsi O. A., Ayodeji S. P. and Bodunde O. P., 2017, “Investigation and validation of consumer device accelerometers for the assessment of whole-body vibration”, Cogent Engineering, Vol. 4.

- Albarbar A., Badri A., Jyoti K., Starr A., 2009, "Performance evaluation of MEMS accelerometers", Measurement, Vol 42, pp 790-795.
- Alhussein A., Samir M., Andrew S. and Robert P., 2008, "Suitability of MEMS Accelerometers for Condition Monitoring: An experimental study", Sensors, Vol. 8, pp 784-799.
- Amar S., Shubham B., Sunny N., 2016, "Analysis of Various NVH Sources of a Combustion Engine", International Journal of Mechanical Engineering and Automation, Vol. 3, pp 249-261.
- Bruel e Kjaer, 2009, "Human Vibration Analyser Type 4447 – User Manual", Denmark, 100 p.
- Gao, R.; Zhang, L., 2004, Micromachined Microsensors for Manufacturing. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine 1094-6969.
- Griffin M. J., 1990, "Handbook of Human Vibration", Academic Press, Southampton, U.K., 988 p.
- Heywood J. B., 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, New York, 930 p.
- Jiang F., Li W., Wang Z., and Zhu Z., 2012 "Fault Severity Estimation of Rotating Machinery Based on Residual Signals," Advances in Mechanical Engineering, pp. 1-8.
- Joshi A. and Sarkar D., 2012, "To Study the Dynamic Behavior of Engine Assembly by Using Altair OptiStruct", HyperWorks Technology Conference, India.
- Katalin Á., 2012, "Accelerometer characteristics, errors, and signal conditioning", Interdisciplinarity in Engineering International Conference "Petru Maior" University of Tîrgu Mureş, Romania.
- Madhava V. B., Ravi K. N and Prasanthi G., 2016, "An experimental investigation of vibration characteristics of compression ignition engine running with neem methyl ester", International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME), Vol. 13, pp. 3434 – 3450.
- Mansfield N. J., 2005, "Human response to vibration" Washington, D.C, Taylor & Francis e-Library.
- Mohn-Yasin C, Korman E. and Nagel D. J., 2003, "Measurement of noise characteristics of MEMS accelerometers," Solid-State Electronics, Vol. 47, pp. 357–360.
- Muszynska A., 1995, "Vibrational Diagnostics of Rotating Machinery Malfunctions", International Journal of Rotating Machinery, vol1 Issue 3-4, pp 237-266.
- Sabin, E. Vibration of dry pumps. Semicond. Int. 1995, 18(8), 249-250.
- Sinha J. K and. Elbhah K, 2013 "A future possibility of vibration based condition monitoring of rotating machines", Mechanical Systems and Signal Processing, vol 34: pp 231–240.
- Yazdi N., Ayazi F., Najafi K., 1998, "Micromachined inertial sensors", Proc. IEEE, Vol.86, pp. 1640-1659.

9. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

CHARACTERIZATION OF THE CONTRIBUTION OF MECHANICAL VIBRATIONS GENERATED BY INTERNAL COMBUSTION ENGINES TO HUMAN EXPOSURE USING MEMS ACCELEROMETERS

Gabriel Klein Lunkes, herr.lunkes@gmail.com¹
Carlos Eduardo de Souza, carlos.souza@ufsm.br¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Av Roraima nº 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria – RS, CEP: 97105-900

Abstract. An important parameter for driving quality and vehicle comfort is the evaluation of the driver's exposure to whole body vibrations. To avoid undesired frequencies being reached, it is necessary to identify the sources of vibration and how much of this energy is not dissipated by the car. Except for the inherent vibrations of driving dynamics, internal combustion engines are the major source of vibration. This work explores the source of these vibrations, their magnitude and how much of this energy is transferred to the driver. This transmissibility relationship between engine and cockpit was performed using the signal captured by a low-cost MEMS accelerometer. After confirming its effectiveness on a standard shaker platform, a case study was carried out with a four-cylinder sedan vehicle and the relevant parameters of the acquired signal were identified.

Keywords: comfort, engines, vibration, signal analysis, MEMS