



Renan Vieira Fernandes Troina - 1711459

Análise da influência de acessórios de fixação em testes de vibração e impacto em componentes durante o processo de qualificação conforme API 17Q

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Allan Nogueira de Albuquerque

Rio de Janeiro Julho de 2024

AGRADECIMENTOS

Como não pode deixar de ser, meu primeiro agradecimento é à minha família, à minha mãe que sempre me encorajou a continuar mesmo durante as maiores adversidades, à minha irmã, por sempre ter sido minha melhor amiga, e a minha avó que sempre comemorou minhas conquistas como se fossem dela.

À PUC-Rio, agradeço a todos os professores e funcionários que acompanharam minha jornada, em especial aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica por terem me provado que escolhi sim, a carreira correta e que não poderia ter optado por instituição melhor para graduar.

Ao meu professor orientador, Allan Albuquerque, que sempre esteve disponível quando precisei, e que em muito contribuiu para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho de pesquisa.

Agradeço aos amigos que fiz ao longo dos anos passados na faculdade, amigos que sem dúvidas ficarão para sempre ao meu lado. O apoio, e momentos de descontração me ajudaram a superar todos os desafios.

À equipe de robótica RioBotz, que fez com que eu definitivamente me apaixonasse pela Engenharia Mecânica, onde eu tive a oportunidade desde cedo em aplicar conceitos aprendidos em sala de aula, possibilitando um crescimento profissional além de pessoal pelos momentos compartilhados todos os dias dentro do laboratório.

Ao Cepel, principalmente à equipe de mecatrônica, que me auxiliou profissionalmente ao longo de dois anos de estágio e além, compartilhando uma experiência inimaginável.

Por fim, agradeço a Deus por sempre ter estado ao meu lado, auxiliando nas escolhas, me dando forças e motivação para que fosse possível chegar até aqui.

RESUMO

Análise da influência de acessórios de fixação em testes de vibração e impacto em componentes durante o processo de qualificação conforme API 17Q.

A vibração é um fenômeno que geralmente afeta diversos equipamentos presentes em nossa sociedade, como veículos, maquinários industriais, estruturas, entre outros. Devido a isso, para verificar a adequação de diversos equipamentos, é comum realizar ensaios normalizados em ambientes controlados, de forma a simular o ambiente em que o sistema será inserido. Este trabalho tem como objetivo verificar numericamente e experimentalmente, como diferentes acessórios de fixação de um mesmo objeto de testes, quando submetidos as mesmas condições de ensaios, afetam os resultados obtidos, o que pode por muitas vezes causar uma conclusão errônea acerca da qualificação do ensaio.

Palavras-Chave

Vibração, Ensaios Normalizados, Acessórios de Fixação, Qualificação

ABSTRACT

Analysis of the influence of mounting accessories in vibration and impact tests on components during the qualification process according to API 17Q.

Vibration is a phenomenon that generally affects various equipment present in our society, such as vehicles, industrial machinery, structures, among others. Due to this, to verify the adequacy of various equipment, it is common to perform standardized tests in controlled environments to simulate the environment in which the system will be placed. This work aims to verify numerically and experimentally how different mounting accessories of the same test object, when subjected to the same test conditions, affect the obtained results, which can often lead to an erroneous conclusion regarding the qualification of the test.

Keywords

Vibration, Standardized Tests, Mounting Accessories, Qualification

SUMÁRIO

1.	INT	RODUÇÃO	9
2.	RE	/ISÃO BIBLIOGRÁFICA	.10
2	2.1.	Aplicação	.10
2	2.2.	Programa de qualificação	.11
2	.3.	Avaliando maturidade tecnológica	.13
2	.4.	Normas aplicáveis	.13
	2.4.1	. MIL-STD-810	.14
	2.4.2	MIL-STD-883H	.17
3.	МО	DELO ANALÍTICO	.19
3	5.1.	Modelagem via grafos de ligação	.19
3	.2.	Simulação e resultados	.23
4.	MO	DELAGEM COMPUTACIONAL	.25
4	.1	Modelagem em CAD	.24
4	.2.	Simulação e resultados	.25
5.	TES	STES DE VERIFICAÇÃO	.27
5	5.1.	Materiais Utilizados	.27
5	5.2.	Procedimento Experimental	.28
5	5.3.	Resultados Experimentais	.34
6.	CO	NCLUSÕES	.38
8.	APÍ	ÈNDICES	.40
A	PÊNC	ICE A: Código Matlab para obtenção dos resultados da	
análise	e da va	ariação de massa e rigidez	.40
9.	AN	EXOS	.42
A	NEXC	A: Datasheet Shaker K2007E01	.42
A	NEXC	B: Datasheet Shaker 2060E	.43
A	NEXC	C: Datasheet amplificador de potência 2050E09	.44
A	NEXC	D: Desenho técnico da placa PCB e ambas as bases	.45

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Exemplo de ligação entre desenvolvimento de tecnologia e
desenvolvimento de aplicação/projeto pelo usuário final10
Figura 2.2 - Processo Geral para Programas de Qualificação11
Figura 2.3 - Níveis recomendados para testes estruturais14
Figura 2.4 - Níveis recomendados para testes operacionais14
Figura 2.5 - Curvas para ensaio de vibração mecânica17
Figura 3.1 - Diagrama sistema Massa-Mola-Amortecedor com 1 GL19
Figura 3.2 - Diagrama sistema Massa-Mola-Amortecedor com 2 GL20
Figura 3.3 - Grafos de ligação do sistema em questão20
Figura 3.4 - Equacionamento e matrizes de estados em variáveis de
potência21
Figura 3.5 – Comparação do lugar das raízes para o deslocamento da
massa 2 entre o sistema com valores iguais e diferentes para massa e
rigidez23
Figura 3.6 – Comparação da resposta ao degrau para a velocidade da
massa 2 entre o sistema com valores iguais e diferentes para massa e
rigidez23
Figura 3.7 – Comparação do diagrama de Bode para o deslocamento da
massa 1 entre o sistema com valores iguais e diferentes para massa e
rigidez24
Figura 4.1 – Suportes projetados em CAD25
Figura 4.2 – Modo de vibração com flexão em torno do eixo Y para ambos
os suportes25
Figura 5.1 – Equipamentos utilizados: (a) Shaker eletrodinâmico 1; (b)
Shaker eletrodinâmico 2; (c) Amplificador de potência; (d) Gerador de
Sinais27
Figura 5.2 – Acelerômetro utilizado28
Figura 5.3 – Curvas para teste de vibração segundo norma MILSTD-810.29
Figura 5.4 – Placa PCB e bases de fixação utilizadas30
Figura 5.5 – Orientações Eixo X, Eixo Y, Eixo Z31
Figura 5.6 – Demonstração dos arranjos experimentais para as diferentes
orientações da placa PCB com shaker 2060E32

Figura 5.7 – Demonstração dos arranjos experimentais para as diferentes
orientações da placa PCB com shaker K2007E0133
Figura 5.8 – Aceleração para ambas as bases com shaker 2060E no Eixo
X34
Figura 5.9 – Aceleração para ambas as bases com shaker 2060E no Eixo
Y35
Figura 5.10 – Aceleração para ambas as bases com shaker 2060E no Eixo
Z35
Figura 5.11 – Aceleração para ambas as bases com shaker K2007E01 no
Eixo
X
Figura 5.12 – Aceleração para ambas as bases com shaker K2007E01 no
Eixo
Y
Figura 5.13 – Aceleração para ambas as bases com shaker K2007E01 no
Eixo
Z37
Figura A.1 – Diagrama de blocos para simulação no Simulink41

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Classificação do equipamento a ser ensaiado	.15
Tabela 2.2 - Tempo recomendado de ensaio a ser executado	16
Tabela 2.3 - Níveis adequados de teste para ensaio de aceleração	.18
Tabela 2.4 - Níveis adequados de teste para ensaio de vibração	.18
Tabela 3.1 – Nomenclatura utilizada para montagem das matrizes	de
estados em variáveis de potência	.22

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo a análise teórica, numérica e por fim experimental da influência que diferentes tipos de fixação de peças em ensaios de impacto ou vibração podem ocasionar em seus resultados.

O capítulo 1: Introdução, inicia o tema central de estudo assim como os objetivos que se espera alcançar ao fim do trabalho. Já o capítulo 2: Revisão Bibliográfica apresenta uma breve revisão de trabalhos anteriores e de normas para qualificação que são interessantes para o estudo. Por sua vez no capítulo 3: Modelo é apresentado uma modelagem inicial do sistema para análise e equacionamentos. No capítulo 4: Simulação e Resultados, uma investigação dos resultados gerados em simulações no Matlab e Simulink é apresentada. No capítulo 5: Testes de Verificação, são apresentados os equipamentos e procedimentos utilizados para realização dos ensaios de vibração variando-se os acessórios de fixação utilizados. Por fim no capítulo 6: Conclusões os resultados do estudo são publicados.

E extremamente incomum encontrar estruturas ou equipamentos na área da engenharia que não estejam sob ações de forçamentos sejam eles de caráter periódico ou transiente, como por exemplo prédios, pontes ou torres de telecomunicações. Tais forças geram vibrações mecânicas que podem ser catastróficas caso a frequência de excitação esteja dentro da faixa de uma das frequências naturais da estrutura, o que ocasiona um aumento considerável da amplitude, fenômeno este conhecido como ressonância.

Visando o conhecimento das propriedades mecânicas das mais diversas peças e estruturas usualmente são realizados testes de vibração ou impacto. Porém tais ensaios também estão sujeitos a erros devido a problemas na adequação dos mesmos, como por exemplo o tipo de fixação para a realização do ensaio pode interferir nos resultados do mesmo, onde cabe ao operador e ao supervisor do teste a escolha da forma mais adequada para sua realização.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Aplicação

Um programa de qualificação é um processo multidimensional que consiste em um número de etapas inter-relacionadas, partindo desde requerimentos do projeto, atividades planejadas, testes e análises, comparação dos resultados com as expectativas até a preparação da documentação final. Embora não seja obrigatório o uso da API 17Q para a qualificação, é altamente recomendado utilizá-la o máximo possível para que haja um aumento da eficiência dentro da indústria.

Esta prática se baseia nos níveis de prontidão tecnológica (TRL) e de risco técnico (TRC) para que sejam feitos o planejamento e as recomendações adequadas ao longo de toda a etapa de qualificação. É imprescindível a reavaliação constante dos níveis de TRL e TRC ao longo do processo para que sejam feitas as devidas atividades. O desenvolvimento tecnológico e o desenvolvimento de projeto usualmente são independentes, porém, complementares. Cada um segue um papel ao longo do processo de qualificação e progressão de TRL.

A figura 2.1 mostra as diferentes etapas que o fornecedor e o usuário final tipicamente têm no processo.



Figura 2.1 - Exemplo de ligação entre desenvolvimento de tecnologia e desenvolvimento de aplicação/projeto pelo usuário final.

2.2. Programa de qualificação

O objetivo final de qualquer processo de qualificação é fornecer evidências que determinada tecnologia ou equipamento irá cumprir os requisitos de funcionalidade e performance, dentro de um limite operacional especificado e com um certo nível de confiança.

Os passos gerais em um processo de qualificação podem ser visualizados no diagrama abaixo.



Figura 2.2 - Processo Geral para Programas de Qualificação.

O processo de planejamento de requisitos inclui atividades como identificação de metas e requisitos, validação desses elementos, elaboração de um rascunho da especificação da aplicação para revisão das partes interessadas, emissão de uma versão final da especificação aprovada e critérios para adaptação das definições gerais de prontidão tecnológica (TRL) à tecnologia específica. É crucial que a aplicação da tecnologia seja descrita de forma clara e completa, abordando requisitos funcionais, de desempenho e limitações, com atualizações contínuas à medida que a tecnologia amadurece. As metas e requisitos devem abranger áreas como requisitos regulatórios, de função e desempenho, estágios do ciclo de vida, padrões de design, condições operacionais e ambientais, vida útil do equipamento, desempenho de confiabilidade e integridade, estados limites e nível de prontidão tecnológica.

Usualmente se utiliza de ferramentas como TRC e TRL para avaliar a maturidade tecnológica, tais ferramentas são essenciais para comparar tecnologias, desenvolver planos de qualificação e comunicar o status durante programas de desenvolvimento. Avaliações de TRC e TRL ajudam na seleção do caminho de qualificação adequado. O monitoramento contínuo de TRL é vital, especialmente para múltiplas tecnologias em um programa, já a TRC é essencial desde o início para avaliar riscos.

Para tecnologias com TRL < 1, propõe-se um enfoque flexível de pesquisa e desenvolvimento, com etapas como Plano de Pesquisa e Execução para atingir TRL 1. Após conclusão bem-sucedida, as especificações são atualizadas, a prontidão é reavaliada e novas atividades de qualificação são determinadas. A partir dos resultados obtidos até então, é possível escolher o programa de qualificação mais adequado ao equipamento.

Após a análise de qualificação e testes físicos serem realizados, os resultados são analisados novamente para verificar se atenderam as metas e requisitos previamente estabelecidos. Além dos resultados, também é feita uma avaliação do risco técnico residual e sua incerteza para cada TRL alcançado. Espera-se que ao longo da avaliação, os riscos técnicos e incertezas diminuam. Caso seja necessário, melhorias e modificações

devem ser feitas em qualquer momento do processo de avaliação, porém novos testes devem ser realizados sempre que algo assim ocorrer.

Após o processo ser concluído, é feito um relatório a fim de resumir as evidências obtidas ao longo do processo indicado que os objetivos especificados no início foram alcançados satisfatoriamente.

2.3. Avaliando maturidade tecnológica

A avaliação de TRL é aplicada a um conjunto específico de requisitos, sendo válida apenas para uma aplicação específica. A análise envolve considerar desempenho passado e requisitos atuais em termos de forma, adequação e função. Ao longo do processo, a documentação de design, relatórios de teste e registros de serviço servem como evidências de suporte para cada TRL alcançado. A avaliação de TRL é válida apenas para uma aplicação específica, definida por um conjunto de requisitos de confiabilidade, integridade e operacionais. Se os requisitos mudarem, o TRL deve ser reavaliado.

2.4. Normas aplicáveis

Normas são conjuntos de diretrizes e procedimentos padronizados para avaliar produtos e materiais nos mais diversos quesitos mecânicos, elas definem as condições de teste, equipamentos e métodos, fazendo com que se obtenha reprodutibilidade, consistência e confiabilidade, para que se torne possível a comparação e validação em diferentes ambientes e laboratórios.

Diversas organizações são responsáveis pela criação e gerência dessas normas técnicas, como por exemplo ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), ISO (International Organization for Standardization), ASTM (American Society for Testing and Materials), entre outras. Usualmente órgãos militares também são responsáveis pela criação de diversas normas, isso ocorre devido ao fato dos equipamentos utilizados por eles serem em sua maioria exigidos mecanicamente em um grau de severidade acima dos produtos para a sociedade em geral.

Para este trabalho cabe destacar a norma MIL-STD-810 desenvolvida pela força aérea americana para utilização quanto a ensaios mecânicos

para equipamentos de solo e aeroespaciais, além da norma MIL-STD-883H desenvolvida pelo departamento de defesa americano para teste com microcircuitos embarcados em sistemas militares e aeroespaciais. Ambas possuem critérios rigorosos e satisfatórios para ensaios de aceleração e vibração assim como os que serão utilizados neste projeto.

2.4.1. MIL-STD-810

O ensaio de aceleração é dividido em duas etapas, teste estrutural e teste operacional, para o teste estrutural é recomendado que o equipamento a ser ensaiado seja montado no aparato de ensaio normalmente e que não esteja em operação, usualmente utiliza-se uma centrífuga. Baseado na orientação do equipamento e na categoria do mesmo, determina-se o nível de força G a que deve ser submetido como pode ser observado na figura 2.3 abaixo.

DIRECTION OF MOTION

Fore	$1.5 \times A = G$ Test Level
Aft	$0.5 \times A = G$ Test Level
Up	$0.75 \times A = G$ Test Level
Down	$2.25 \times A = G$ Test Level
Lateral	$1.0 \times A = G$ Test Level

Figura 2.3 - Níveis recomendados para testes estruturais.

Onde A é a maior aceleração para frente possível assumida, calculada ou medida.

Para o teste operacional, deve-se colocar o equipamento em operação e submeter o mesmo a níveis de força G conforme a figura 2.4 abaixo.

DIRECTION OF MOTION

r	Fore	-3	ł,	1.1 0.33	××	A A	Ē	G	Test Test	Level Level
	. Uр.э	48	1	0.5	×	А	=	G	Test	Level
	1 Down	11		1.5	×	А	=	G	Test	Level
-	' Lateral	. 1		0.66	×	А	=`	G	Test	Level
		-						÷.,		

Figura 2.4 - Níveis recomendados para testes operacionais.

Após a realização de ambos os testes por usualmente 1 minuto, pode-se estender a duração caso seja necessário, é realizada uma comparação dos resultados de operação antes e depois além de uma inspeção mecânica. Caso não haja nenhuma diferença significativa o equipamento é tido como aprovado no ensaio de aceleração.

Para o ensaio de vibração, inicialmente o equipamento a ser ensaiado passa por uma classificação com base no veículo ao qual ele será instalado ou ao método de fixação, essa classificação é necessária para determinar a curva de teste a ser realizada, além do tempo em que o equipamento deve ficar em ressonância. As tabelas 2.1 e 2.2 abaixo, demonstram a aplicação de tal classificação, já a figura 2.5 apresenta algumas das curvas que podem ser aplicadas em tal ensaio.

TEST NOMENCLATURE, Para. 6		MECHANICS OF TEST, Para. 7							
Equip. Class Para. 3	Mount- ing Para.4	Test Fig. 514-	Curve, Para. 5 Curve	No	tes	Performant Cycling Sinusoidal	e, Part I Random	Resonance Dwell Part II	Time Table 514-II
	A	1	B.C.D. or E		-	X ·	-	x	1
. 1	P	1	B.C.D. or E	Step 1	Note 1	X	-	X	I
Acft.	ь.	1	A	Step 2	Note 1	x		x	II
	C	1	A	-	-	X	-	x	1
2	A	2	B	-	-	x	-	x	I
Helicop-	р	2	B	Step 1	Note 1	X	-	X .	I
ters	В.	2	A	Step 2		<u>x</u>	-	X	II
•	С	_ 2	A	-	-	X	-	X	I
•		1	B or C	Captiv	e Phase	<u> </u>	-	x	v
	A	3	B,C,D, or E	Flight	Phase	<u> </u>	-		11
•		4	B thru F	1			X		II
3		1	B or C	Captive Phase Step 1		x	·	x	v
Air		1	Δ	Step 2	Note :1	x	· - ·	x	11
Missiles	в	3	B.C.D. or E			x		-	п.
MISSNES		4	B thru F	Flight	Phase	-	X		II .
•		1	A	Captiv	e Phase	X	-	х	v
N	c	3	A			x		-	II
	- T	4	A	Flight	Phase	-	X	-	II
		3	B thru G	-	-	X	e e	-	II
· 4	A	4 .	A thru K	-	-		X	-	II
Ground		3	B thru G	-	-	X		-	· II
Launched	В	4	A thru K	Step 1		-	x	-	II
Missiles		3	A	Step 2	Note 1	x	-	-	11
		3	A	-	-	x		-	11
	C	4	A		-	-	X	-	II
5 Ground Vehicles	-	.5	A or B	Not	e 2	x		x	111
6 Shipment by common carrier and 7 Ground Equip.	-	6	•	Not	e3.	x		x	IV

Tabela 2.1 - Classificação do equipamento a ser ensaiado.

	RESONANCE DWELL		PERFORMANCE			
Time Schedule	Number of Resonances	Total Time at Resonance	Total Cycling Time	Random Time (When Required by Table 514–I)		
	0	_	3 Hr.			
	1	1/2 Hr.	21/2 Hr.			
I	2	1 Hr.	2 Hr.			
	3	11/2 Hr.	11/2 Hr.			
	4	2 Hr.	1 Hr.			
	Dwell 30 r re:	minutes at each sonance				
	0			∧		
	1	10 min.				
п	2	20 min.	30 min.	30 min.		
	3	30 min.				
	4	40 min.	¥	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		
	Dwell 10 r	ninutes at each				
	re	sonance				
	0	_	4 Hr.			
	1	3/4 Hr.	3¼ Hr.			
III	2	11/2 Hr.	21/2 Hr.			
	3	2¼ Hr.	13/1 Hr.			
l .	4	3 Hr.	1 Hr.			
	Dwell 45 re	minutes at each sonance				
	0		1	_		
1	1	1/2 Hr.				
IV	2	1 Hr.	Note 4	_		
1	3	11/2 Hr.				
[4	2 Hr.	V			
	Dwell 30 minutes at each					
	re	sonance				
	0		2 Hr.	_		
	1	1/2 Hr.	11/2 Hr.			
v	2	1 Hr.	1 Hr.			
	3	11/2 Hr.	1/2 Hr.	-		
I .	4	2 Hr.	0.			
	Dwell 30 re	minutes at each esonance				

Tabela 2.2 - Tempo recomendado de ensaio a ser executado.



Figura 2.5 - Curvas para ensaio de vibração mecânica.

2.4.2. MIL-STD-883H

Para o ensaio de aceleração desta norma, o aparato de ensaio deve ser qualquer que seja capaz de aplicar a aceleração desejada pelo tempo requerido. O procedimento experimental se assemelha a norma anterior onde o dispositivo será submetido a aceleração pelo tempo total de 1 minuto para cada orientação desejada com o nível de aceleração em força G segundo a figura a seguir.

Test condition	Stress level (g)
Α	5,000
В	10,000
С	15,000
D	20,000
E	30,000
F	50,000
G	75,000
н	100,000
J	125,000

Tabela 2.3 - Níveis adequados de teste para ensaio de aceleração.

O teste de vibração deverá ser realizado em aparato capaz de vibrar nas frequências definidas nos níveis específicos. Uma vez que o equipamento a ser ensaiado esteja fixado, o aparato deverá vibrar com um movimento harmônico simples com amplitude de pico a pico de 0.06" ou aceleração de pico de acordo com a figura abaixo.

Test condition	Peak acceleration, g
А	20
в	50
С	70

Tabela 2.4 - Níveis adequados de teste para ensaio de vibração.

Ao longo do ensaio, a frequência deverá variar logaritmicamente entre 20 e 2000 Hz e retornar para 20 Hz e não demorar mais de 4 minutos. Esse ciclo deverá ser repetido 4 vezes para cada orientação que se deseja realizar o ensaio.

Ao fim dos ensaios uma verificação visual do equipamento é realizada, além de qualquer outra verificação que o examinador desejar, como comparação do funcionamento do dispositivo antes e depois dos testes. Caso haja alguma falha perceptível ao longo dos ensaios ou após o término seja verificado qualquer anormalidade nos resultados apresentado, o teste será definido como falha e deverá ser refeito.

3. MODELO ANALÍTICO

3.1. Modelagem via grafos de ligação

Inicialmente é possível simplificar o sistema em análise como um sistema massa-mola-amortecedor de 2 graus de liberdade, e conforme se varia a massa m, a rigidez da mola k e o coeficiente de amortecimento b do amortecedor, verifica-se as alterações nas respostas a perturbações. Para a análise com Grafos de ligação, é trivial acoplar modelos mais simples afim de se obter modelos mais complexos e representativos do sistema final, portanto inicia-se o modelo com um sistema massa-mola-amortecedor com apenas 1 grau de liberdade.



Figura 3.1 - Diagrama sistema Massa-Mola-Amortecedor com 1 GL

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{f}_{1} \\ \dot{e}_{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{3}}{I_{1}} & \frac{1}{I_{1}} \\ -\frac{1}{C_{2}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{1} \\ e_{2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{I_{1}} & \frac{R_{3}}{I_{1}} \\ 0 & \frac{1}{C_{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{6} \\ f_{7} \end{bmatrix} \\ \begin{cases} e_{7} \\ f_{6} \\ f_{5} \\ e_{3} \\ f_{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_{3} & 1 \\ 1 & 0 \\ -1 & 0 \\ -R_{3} & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{1} \\ e_{2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & R_{3} \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & R_{3} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{6} \\ f_{7} \end{bmatrix} \\ \begin{cases} e_{6} \\ f_{7} \end{bmatrix} \\ \end{cases}$$

Após o equacionamento do sistema para obtenção do modelo de estados em variáveis de potência, pôde-se chegar ao sistema com 2 graus de liberdade.



Figura 3.2 - Diagrama sistema Massa-Mola-Amortecedor com 2 GL

Para realização das simulações optou-se por utilizar o sistema na forma de estado em variáveis de potência, para tal o método dos grafos de ligação foi utilizado para simplificar e facilitar a visualização das interações e fluxos através os elementos, pode-se perceber abaixo pela indicação em vermelho que o modelo se assemelha aos grafos de ligação para dois sistemas com 1 grau de liberdade acoplados, além do fato que possui apenas causalidades naturais.



Figura 3.3 - Grafos de ligação do sistema em questão

Abaixo é mostrado o equacionamento para obtenção das matrizes para análise do modelo de estado em variáveis de potência, tendo como saídas as posições e velocidades de ambas as massas.

$$\begin{cases} \dot{p}_{1} = e_{1} \\ f_{1} = \frac{1}{I_{1}} p_{1} \end{cases} \begin{cases} \dot{p}_{4} = e_{4} \\ f_{4} = \frac{1}{I_{4}} p_{4} \end{cases} \begin{cases} \dot{q}_{2} = f_{2} \\ e_{2} = \frac{1}{C_{2}} q_{2} \end{cases} \begin{cases} \dot{q}_{5} = f_{5} \\ e_{5} = \frac{1}{C_{5}} q_{5} \\ e_{6} = R_{6} f_{6} \\ \begin{cases} f_{2} = f_{9} \\ f_{3} = f_{9} \\ e_{9} = e_{2} + e_{3} \end{cases} \begin{cases} f_{5} = f_{11} \\ f_{6} = f_{11} \\ e_{11} = e_{5} + e_{6} \end{cases} \begin{cases} e_{10} = e_{11} \\ e_{13} = e_{11} \\ f_{11} = f_{13} - f_{10} \\ f_{11} = f_{13} - f_{10} \\ f_{8} = f_{1} \\ e_{1} = e_{12} + e_{8} \end{cases} \begin{cases} f_{4} = f_{10} \\ f_{7} = f_{10} \\ e_{10} = e_{4} + e_{7} \end{cases} \begin{cases} e_{8} = e_{9} \\ e_{7} = e_{9} \\ f_{9} = f_{7} - f_{8} \end{cases} \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{f}_1\\ \dot{e}_2\\ \dot{f}_4\\ \dot{e}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_3/_{I_1} & 1/_{I_1} & R_3/_{I_1} & 0\\ -1/_{C_2} & 0 & 1/_{C_2} & 0\\ 1/_{I_4} & -1/_{I_4} & -R_3 - R_6/_{I_4} & 1/_{I_4}\\ 0 & 0 & -1/_{C_5} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1\\ e_2\\ f_4\\ e_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/_{I_1} & 0\\ 0 & 0\\ 0 & R_6/_{I_4}\\ 0 & 1/_{C_5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{12}\\ f_{13} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_4 \\ \dot{f}_1 \\ \dot{f}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -R_3/_{I_1} & 1/_{I_1} & R_3/_{I_1} & 0 \\ 1/_{I_4} & -1/_{I_4} & -R_3 - R_6/_{I_4} & 1/_{I_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ e_2 \\ f_4 \\ e_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & R_6/_{I_4} \\ 0 & 1/_{C_5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{12} \\ f_{13} \end{bmatrix}$$

Figura 3.4 - Equacionamento e matrizes de estados em variáveis de potência

Variável	Significado			
f_1	Velocidade Massa 1 (v_1)			
$\dot{f_1}$	Aceleração Massa 1 (v_1)			
e ₂	Deslocamento Mola 1			
ė ₂	Velocidade Mola 1			
f_4	Velocidade Massa 2 (v_2)			
\dot{f}_4	Aceleração Massa 2 (v_2)			
e ₅	Deslocamento Mola 2			
ė ₅	Velocidade Mola 2			
e ₁₂	Força F aplicada (F_1)			
f_{13}	Deslocamento de base			
R ₃	Dissipação amortecedor 1 (b_1)			
R ₆	Dissipação amortecedor 2 (b_2)			
l ₁	Inércia da massa 1 (l_1)			
I_4	Inércia da massa 2 (l_1)			
C ₂	Deformação mola 1			
C ₅	Deformação mola 2			

Tabela 3.1 – Nomenclatura utilizada para montagem das matrizes de estados em variáveis de potência.

3.2. Simulação e resultados

Para realizar as análises e simulações necessárias, foi criado um programa em *Matlab* e *Simulink*, ambos presentes em sua totalidade no Anexo 1 deste trabalho. Com ele é possível verificar a diferença de comportamento dos sistemas quando ambas as massas, e rigidez do sistema são iguais e quando elas diferem por um fator de 20.



Figura 3.5 - Comparação do lugar das raízes para o deslocamento da massa 2 entre o sistema com valores iguais e diferentes para massa e rigidez



Figura 3.6 - Comparação da resposta ao degrau para a velocidade da massa 2 entre o sistema com valores iguais e diferentes para massa e rigidez



Figura 3.7 - Comparação do diagrama de Bode para o deslocamento da massa 1 entre o sistema com valores iguais e diferentes para massa e rigidez

Fica evidenciado pela demonstração gráfica acima que a fase e a frequência de ressonância do sistema são alteradas quando há a alteração nos valores de rigidez e massa do sistema.

4. MODELAGEM COMPUTACIONAL

4.1. Modelagem em CAD

Com o uso de ferramentas e *softwares* de CAD (*Computer Aided Design*) como o *SolidWorks*, é possível cria um modelo tridimensional e com dimensões e propriedades realistas para que se possa realizar diversas análises em um ambiente computacional antes mesmo de fabricar tal peça ou equipamento.

Para este trabalho, foram concebidos dois diferentes tipos de suportes de fixação conforme apresentados na figura 4.1 abaixo, além de um modelo de placa eletrônica para simular o objeto de ensaio



Figura 4.1 – Suportes projetados em CAD

4.2. Simulação e resultados

Optou-se por realizar no próprio ambiente de simulações do *SolidWorks*, uma análise modal de ambas as bases para verificar a influência de seus parâmetros físicos (massa e rigidez) em suas frequências e modos naturais.



Figura 4.2 – Modo de vibração com flexão em torno do eixo Y para ambos os suportes

Para o mesmo modo de vibração natural (flexão em torno do eixo Y), apresentado para ambos os acessórios na figura 4.2 acima, obteve-se uma redução de 631,96 Hz para 565,96 Hz quando comparado o suporte maior com o suporte menor.

Tal resultado está de acordo com o esperado para a análise em questão, visto que se pode verificar uma redução de rigidez equivalente do acessório menor quando comparado ao acessório maior, fazendo com que o sistema reduza também sua frequência natural.

Com resultados adequados tanto na análise analítica quanto computacional, inicia-se os experimentos físicos realizados em um ambiente de ensaios reais.

5. TESTES DE VERIFICAÇÃO

5.1. Materiais Utilizados

Para realização dos ensaios de vibração segundo a norma MIL-STD-810 conforme mencionado no capítulo 2 deste trabalho, se faz necessário o uso de um *shaker* eletrodinâmico, um gerador de sinais capaz de manipular a frequência, intensidade e formato de onda enviada, assim como um amplificador de potência, onde este recebe o sinal enviado pelo gerador, e o transmite para o *shaker*.

Para os testes foram utilizados os seguintes equipamentos: dois *shakers* modelos K2007E1 e 2060E, ambos da fabricante *The Modal Shop*, ilustrados nas figuras 5.1(a) e 5.1(b), onde são capazes de operar com acelerações máximas de 70g e 100g respectivamente, um amplificador de sinais modelo 2050E09 também da fabricante The Modal Shop, apresentado na figura 5.1(c), capaz de operar em uma faixa de frequência entre 1Hz e 10kHz, além de um gerador de sinais modelo VR-8500 da fabricante Vibration Research capaz de operar na faixa de frequência entre 1 μ Hz e 20kHz, conforme mostrado na figura 5.1(d).



Figura 5.1 – Equipamentos utilizados: (a) *Shaker* eletrodinâmico 1; (b) *Shaker* eletrodinâmico 2; (c) Amplificador de potência; (d) Gerador de Sinais

Além dos equipamentos para fazer a excitação do *shaker*, foram utilizados 2 acelerômetros da marca PCB Piezotronics modelos 352A24, mostrado na figura 5.2, capazes de trabalhar na faixa de frequência entre 1 e 10kHz. Tanto o envio para o amplificador quanto a aquisição dos sinais eram feitos pelo gerador de sinais apresentado acima, que por sua vez era controlado por um computador utilizando o software VibrationView.



Figura 5.2 – Acelerômetro utilizado

5.2. Procedimento Experimental

O ensaio de vibração a ser realizado segue a norma MIL-STD-810 Método 514, onde se é definido as curvas de aceleração a qual o objeto de interesse deve ser submetido. Todos os ensaios foram realizados no laboratório de Mecatrônica e Dinâmica de Estruturas do Cepel (Centro de Pesquisa de Energia Elétrica).

Para este trabalho foram adotadas as seguintes hipóteses sobre o corpo a ser ensaiado: (1) Placa eletrônica a ser instalada em um veículo terrestre, (2) equipamento fixado de forma rígida diretamente no veículo sem o uso de isoladores de vibração, (3) veículo apenas transita em terrenos suaves. Após adotadas tais hipóteses, a curva 'A' a seguir representa a faixa de frequência e aceleração a que o corpo deve ser submetido para o ensaio.



Figura 5.3 – Curvas para teste de vibração segundo norma MIL-STD-810

Com o objetivo deste trabalho de verificar a influência da forma de fixação do corpo de ensaio nos resultados em testes de vibração, primeiramente foi utilizado uma placa PCB genérica, conforme apresentado na figura 5.4(a), como corpo de ensaio a fim de se manter próximo a hipótese número 1 acima. Também foram desenvolvidas e fabricadas em impressora 3D, duas bases de diferentes tamanhos, onde para a primeira,

a placa PCB fica totalmente apoiada, já para a segunda, a placa PCB fica apoiada somente no centro, deixando em ambos os lados uma parcela em balanço. Ambas as placas estão apresentadas na figura 4.1.



(a) Figura 5.4 – Placa PCB utilizada

Com o intuito de se realizar o ensaio na placa em 3 eixos diferentes, foram fabricados em impressora 3D alguns suportes capazes de realizar a fixação da placa em diferentes orientações, as figuras 5.5(a) até 5.5(c) ilustra as orientações utilizadas, sendo elas denominadas respectivamente: Eixo X, eixo Y, eixo Z.



Figura 5.5 – Placa para teste na orientação eixo X (a), eixo Y (b), eixo Z (c)

Segundo a curva A apresentada acima, deve-se realizar o ensaio com uma varredura de frequências entre 5Hz e 500Hz, mantendo-se um nível de aceleração de 1,3G ao longo de todo o procedimento. Para tal foram utilizados os dois acelerômetros da seguinte forma: um acelerômetro de controle localizado no meio da placa PCB exatamente acima do eixo de excitação do *shaker*, ele se faz necessário para que o programa consiga manter um nível de aceleração fixo em torno de 1,3G conforme determina a norma. Já o segundo acelerômetro localizado no ponto mais extremo da placa PCB, aquisitando os valores de aceleração em G. A figura 5.6 apresenta os arranjos experimentais para os ensaios realizados no *shaker* modelo 2060E com a base maior.





Figura 5.6 – Demonstração dos arranjos experimentais para as diferentes orientações da placa PCB com *shaker* 2060E

Para o shaker modelo 2060E foram realizados 6 ensaios, 3 com a base maior, um para cada orientação da placa PCB e 3 com a base menor, novamente um para cada orientação. Todos com as definições apresentadas acima. Já para o shaker modelo K2007E01 foram realizados os mesmos 6 ensaios, porém com valor de aceleração de controle de apenas 0,65G, isso se deve ao fato deste shaker possuir limitação de amplitude máxima de apenas 13mm. A figura 5.7 apresenta os arranjos experimentais para os ensaios realizados no shaker modelo K2007E01 com a base menor.





(b)



Figura 5.7 – Demonstração dos arranjos experimentais para as diferentes orientações da placa PCB com shaker K2007E01

5.3. Resultados Experimentais

A fim de facilitar a visualização dos resultados, foram gerados gráficos com os valores das acelerações para toda a faixa de frequência comparando as diferentes bases na mesma orientação e no mesmo *shaker*. Sendo assim as figuras abaixo mostram os gráficos comparativos para o *shaker* modelo 2060E nas três orientações ensaiadas.



Figura 5.8 – Aceleração para ambas as bases com shaker 2060E no Eixo X



Figura 5.9 – Aceleração para ambas as bases com shaker 2060E no Eixo Y



Figura 5.10 – Aceleração para ambas as bases com shaker 2060E no Eixo Z

Por fim, nas figuras a seguir são apresentados os gráficos comparativos dos resultados para ambas as bases, porém com os resultados obtidos pelo *shaker* K2007E01.



Figura 5.11 – Aceleração para ambas as bases com shaker K2007E01 no Eixo X



Figura 5.12 – Aceleração para ambas as bases com shaker K2007E01 no Eixo Y



Figura 5.13 – Aceleração para ambas as bases com *shaker* K2007E01 no Eixo Z

6. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi a verificação da influência de diferentes tipos de fixação nos resultados de testes de vibração. Ao longo da análise teórica realizada no capítulo 3 e das simulações computacionais realizadas no capítulo 4, pôde-se ter uma confirmação de que para um sistema com o mesmo número de graus de liberdade, a mudança de valores para rigidez, massa ou coeficiente de amortecimento, é capaz de influenciar nos resultados dos ensaios de forma bastante relevante.

Diante desta análise teórica, foi proposta uma abordagem experimental em um ambiente real de ensaios normalizados, para verificação dos resultados. Com isso, foi realizada a concepção e fabricação dos elementos de base de forma a modificar o termo de rigidez do sistema e que permitisse termos resultados para três eixos de orientação. Após realizados os ensaios experimentais, os resultados foram considerados satisfatórios, visto que em todas as três orientações, e para ambos os *shakers* utilizados, quase que em toda a faixa de frequência verificada (5Hz a 500Hz) os níveis de aceleração para a base menor, esta que possibilita uma parte da placa PCB ficar em balanço, são maiores que para a base onde a placa PCB fica toda apoiada.

Esta variação na aceleração pode ser atribuída a redução de rigidez no sistema quando se utiliza a base menor, visto que a diferença de massa entre as bases pode ser desconsiderada. Importante notar o fato de que a depender da orientação escolhida, a variação de aceleração entre as bases se torna mais evidente em diferentes faixas de frequência, como pode ser percebido quando para a orientação no eixo Y em ambos os *shakers* a maior diferença ocorre abaixo de 200Hz, já para a orientação no eixo Z, essa variação ocorre acima de 300Hz.

Além de afetar os resultados obtidos, acessórios de fixação mecânica quando mal projetados, podem levar à falha do componente, ocasionando prejuízos, portanto antes mesmo de realizar ensaios de vibração, análises modais de modelos CAD do acessório e amostra, em *softwares* como *SolidWorks Simulation* e *Comsol* são aconselháveis visando a mitigação do risco.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Petroleum Institute. "Recommended Practice on Subsea Equipment Qualification". API Recommended Practice 17Q. Second Edition. Maio, 2018.

PRCI. "Technology Readiness Levels". Pipeline R&D Specific. Novembro, 2017.

U.S. Department of Defense. MIL-STD-810: Environmental Test Methods for Aerospace and Ground Equipment. Junho, 1962

U.S. Department of Defense. MIL-STD-883H: Test Method Standard -Microcircuits. Fevereiro, 2010

8. APÊNDICES

APÊNDICE A: Código Matlab para obtenção dos resultados da análise da variação de massa e rigidez

```
9. clear all
10.clc
11.
12.%Massas e Rigidez iguais (ambas "leves")
13.E = 2*10^{11}; Ar = 0.5; L = 0.1;
14.m1 = 1; m2 = m1; k1 = E*Ar/L; k2 = k1; b1 = 0.02; b2 = b1;
15.
16.I1 = m1; I4 = m2; C2 = 1/k1; C5 = 1/k2; R3 = b1; R6 = b2;
17.
18.A = [-R3/I1 1/I1 R3/I1 0; -1/C2 0 1/C2 0; 1/I4 -1/I4 (-R3-R6)/I4
   1/I4; 0 0 -R6/I4 1/C5];
19.B = [1/I1 0; 0 0; 0 R6/I4; 0 1/C5];
20.C = [1 0 0 0; 0 0 1 0; -R3/I1 1/I1 R3/I1 0; 1/I4 -1/I4 (-R3-
   R6)/I4 1/I4]; %f1 f4 f1ponto f4ponto
21.D = [0 0; 0 0; 1/I1 0; 0 R6/I4];
22.
23.EE = ss(A,B,C,D);
24.rlocus(EE(1,1)) %f1
25.rlocus(EE(2,1)) %f4
26.rlocus(EE(3,1)) %f1ponto
27.rlocus(EE(4,1)) %f4ponto
28.bode(EE(1,1)) %f1
29.bode(EE(2,1)) %f4
30.bode(EE(3,1)) %f1ponto
31.bode(EE(4,1)) %f4ponto
32.step(EE(1,1)) %f1
33.step(EE(2,1)) %f4
34.step(EE(3,1)) %f1ponto
35.step(EE(4,1)) %f4ponto
36.impulse(EE(1,1)) %f1
37.impulse(EE(2,1)) %f4
38.impulse(EE(3,1)) %f1ponto
39.impulse(EE(4,1)) %f4ponto
40.
41.%Massas e Rigidez diferentes
42.m2 = 20*m1; k2 = 20*k1;
43.
44.14 = m2; C5 = 1/k2;
45.
46.Adif = [-R3/I1 1/I1 R3/I1 0; -1/C2 0 1/C2 0; 1/I4 -1/I4 (-R3-
   R6)/I4 1/I4; 0 0 -R6/I4 1/C5];
47.Bdif = [1/I1 0; 0 0; 0 R6/I4; 0 1/C5];
48.Cdif = [1 0 0 0; 0 0 1 0; -R3/I1 1/I1 R3/I1 0; 1/I4 -1/I4 (-R3-
   R6)/I4 1/I4]; %f1 f4 f1ponto f4ponto
```

```
49.Ddif = [0 0; 0 0; 1/I1 0; 0 R6/I4];
50.
51.EEdif = ss(Adif,Bdif,Cdif,Ddif);
52.rlocus(EEdif(1,1)) %f1
53.rlocus(EEdif(2,1)) %f4
54.rlocus(EEdif(3,1)) %f1ponto
55.rlocus(EEdif(4,1)) %f4ponto
56.bode(EEdif(1,1)) %f1
57.bode(EEdif(2,1)) %f4
58.bode(EEdif(3,1)) %f1ponto
59.bode(EEdif(4,1)) %f4ponto
60.step(EEdif(1,1)) %f1
61.step(EEdif(2,1)) %f4
62.step(EEdif(3,1)) %f1ponto
63.step(EEdif(4,1)) %f4ponto
64.impulse(EEdif(1,1)) %f1
65.impulse(EEdif(2,1)) %f4
66.impulse(EEdif(3,1)) %f1ponto
67.impulse(EEdif(4,1)) %f4ponto
```



Figura A.1 – Diagrama de blocos para simulação no Simulink

9. ANEXOS

ANEXO A: Datasheet Shaker K2007E01

SPECIFICATIONS		
Performance	K2004E01	K2007E01
Shaker Performance		
Output Force, sine pk		
Natural Air Cooling	4.5 lbf (20 N)	7 lbf (31 N)
Output Force, random RMS		
Natural Air Cooling	3 lbf (13.3 N)	5 lbf (22 N)
Output Force, shock pk	9 lbf (40 N)	15 lbf (67 N)
Stroke Length		
Continuous pk-pk	0.2 in (5 mm)	0.5 in (13 mm)
Between Stops	0.35 in (9 mm)	0.55 in (14 mm)
Frequency Range [1]	DC-11 kHz	DC-9 kHz
Acceleration [1, 2]		
No load	64 g pk	70 g pk
0.1 lb (0.045 kg) load	26 g pk	35 g pk
1 lb (0.454 kg) load	4.2 g pk	6.4 g pk
2 lb (0.907 kg) load [max payload]	2.2 g pk	3.3 g pk
Maximum Current	5 A	8 A
DC Resistance, armature nominal	1.5 Ω	0.37 Ω
Amplifier Performance		
Efficiency	92	%
Input Voltage, RMS	0-1 V	AC PI
Input Voltage (absolute maximum), RMS	1.9	/AC
Input Power H	12-21	VDC
Output Power PI	55	w
Distortion, typical 19	< 0.0	2%
Cooling	Conve	ction
Discrete Gain Stages, nominal ^[7]	Muted, 10 dB,	18 dB, 24 dB
Warning Indication [7]	Clipping and ov	er temperature
Shutdown Protection [7]	Over temperature	and over current
Physical		
Armature Mass, nominal	0.07 lb (0.032 kg)	0.1 lb (0.045 kg)
Suspension Stiffness, nominal	15 lbf/in (2	.63 N/mm)
Input Connector	BNC	jack
Output Connector	Mini bind	ling post
Table Mounting	10-32	thread
Dimensions (H x W x D), nominal	5.3 x 6.75 x 3.5 in (1	35 x 171 x 89 mm)
Weight	7 lb (3.	10 kg)

Supplied Accessories				
K2007E01-PS	Power supply, 60 W, 19 V DC output, 100-240 V AC input			
2110G06	Nylon Stinger kit, 10-32 thread, pack of three			
Related Products				
288D01	PCB ICP® impedance head driving point sensor, PCB 208 series ICP® force sensors			
2025E	Modal Shaker, 25 lbf pk sine force, 0.75 in stroke, through-hole armature design			
2060E	Modal Shaker, 60 lbf pk sine force, 1.4 in stroke, with through- hole armature design			
2100E11	Modal Shaker, 100 lbf pk sine force, 1 in stroke, through-hole armature design			
2075E	Shaker, 75 lbf pk sine force, 1 in stroke, 3.25 in mounting platform with through-hole armature for stinger attachment			

 [1] Load dependent

 [2] Please see systems ratings for additional specifications

 [3] Typical, full output, gain dependent

 [4] Supplied with universal power supply, 60 W (19 V DC - 3.15 A output)

 [5] Based upon supplied universal power supply, 92 % efficiency

 [6] THD - nisca 11 kHz, 1 W

 [7] Indicated via LEDs



Model K200xE01 Technical Drawing Dimensions in inches

THE MODAL SHOP

10310 Aerohub Boulevard, Cincinnati, OH 45215 USA

modalshop.com | info@modalshop.com | 800 860 4867 | +1 513 351 9919

DS-0079 revD

Light 🗲				
Component	Powerline Assembly	Appliance	Vehicle / NVH	Aero GVT
← 2004E, 20 ←	07E 202	5E	2060E	00E11

SPECIFICATIONS				
Performance				
Output Force, sine pk, ambient air cooling	30 lb (133 N)			
Output Force, sine pk, forced air cooling	60 lb (267 N) PI			
Stroke Length, pk-pk	1.4 in (36 mm) 🕫			
Frequency Range, nominal	DC - 6000 Hz [3] [4]			
First Resonance Frequency, nominal	> 4000 Hz ^[4]			
Maximum Acceleration, bare table	100 g (1000 m/s²) pk			
Maximum Velocity	120 ips (3 m/s) pk			
Protection Features	Mechanical stops			
Protection realures	Over-current (in-line fuse)			
Physical				
Maximum Current, ambient air cooling	9 A rms			
Maximum Current, forced air cooling	18 A rms			
DC Resistance, armature, nominal	1 Ω ⁽⁹⁾			
Armature Suspension System	8 pcs carbon fiber composite flexures			
Effective Armature Mass	0.6 lb (0.272 kg)			
Dimensions (H x W x D), nominal	10.8 x 12.6 x 6.5 in (273 x 319 x 165 mm) 🕫			
Weight, nominal	37 lb (17 kg)			
Operating Range	40 - 100 °F (4 - 38 °C), < 85% RH			

Supplied Accessories		
Trunnion base with EasyTurn [™] handles		
Shaker cable 10 ft (3 m)		
Chuck with collets		
10-32 mounting adaptor		
Variety of rod and plano wire stinger kits (Models 2150G12, 2155G12 and K2160G)		
Suggested Accessories		
2100E21	SmartAmp [™] Power Amplifier 400 W, 92% efficient, continuous gain adjustment	
PCB 288D01	ICP® impedance head driving point sensor	
PCB 208	PCB 208 series ICP® force sensors	
2050A	Lateral Excitation Stand	
2100E13	Modal Accessory Kit, for use with 2050A excitation stand	

 [1] Full force range requires optional forced air cooling with appropriate power amplifier

 [2] Mechanical stops at 0.75" (19 mm)

 [3] Frequency range based upon ISO \$344 recommended useful range of 1.5 times first resonance frequency

 [4] Load dependent

 [5] Room temperature, 68 °F (20 °C)

 [6] Reference utiline drawing for exact dimensions

 Front left photo taken in cooperation with Belgian Defense



10310 Aerohub Boulevard, Cincinnati, OH 45215 USA

modalshop.com | info@modalshop.com | 800 860 4867 | +1 513 351 9919

© 2021 PG9 Pecetronics - all rights reserved. PCB Piceotronics is a wholly-owned subsidiary of Anghe red Corporation. Endorce is an assumed name of PCB Piceotronics of Month Carolina, Inc. ... which is a wholly-owned subsidiary of PCB Piceotronics, Inc. Accumulting, Inc. and The Modul Shop, Inc. are wholly-owned subsidiary of PCB Piceotronics, Inc. MIS ansars and Larson Davis are Divisions of PCB Piceotronics of Month Carolina, Inc. ... (drive a wholly-owned subsidiary of PCB Piceotronics, Inc. ... PCB Piceotronics, Inc. ... PCB Piceotronics of Month Carolina, Inc. ... (drive Endorce), The Modul Shop, Inc. are Analyticated trademarks of PCB Piceotronics, Inc. ... PCB Piceotronics of North Carolina, Inc. ... (drive Endorce), The Modul Shop, Inc. are Accumulation in available at www.pcb.com/trademarksownership.

DS-0076 revD

ANEXO C: Datasheet amplificador de potência 2050E09



ANEXO D: Desenho técnico da placa PCB e ambas as bases