



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

**Programa de Iniciação Científica (PROIC)
Construção de um Acelerômetro Capacitivo**

Aluno: Rafael Ryuichi Yamamoto
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Carvalho Tosin
Departamento: Departamento de Engenharia Elétrica (DEEL-CTU)

Londrina
2022

RAFAEL RYUICHI YAMAMOTO

Construção de um Acelerômetro Capacitivo

Sub-projeto de Iniciação Científica do
Departamento de Engenharia Elétrica
da Universidade Estadual de Londrina.

Orientador:
Prof. Dr. Marcelo Carvalho Tosin.

1 RESUMO

Este projeto pretende construir e caracterizar um acelerômetro em malha aberta utilizando sanduíches de placas de circuito impresso, formando um transdutor de aceleração capacitivo diferencial. Este dispositivo pode ser classificado como um meso sistema, pois congrega características construtivas de um dispositivo MEMS. Para o condicionamento do sinal do transdutor será adaptada uma técnica de condicionamento de utilizada em LVDTs, baseada em um circuito integrado específico para este dispositivo. Na caracterização, serão obtidos os parâmetros lineares do sensor (fator de escala e bias) e os termos de ordem superior que caracterizam a não linearidade do sistema. Adicionalmente, projeto almeja medir a resposta em frequência do dispositivo. O acelerômetro construído poderá ser testado em voo no foguete de sondagem em desenvolvimento no âmbito do Projeto Vetor II.

2 PALAVRAS-CHAVE

Acelerômetro, MEMS, Transdutor Capacitivo, Sensor Eletromecânico, Condicionamento e Aquisição de Sinais.

3 ADERÊNCIAS ÀS ÁREAS PRIORITÁRIAS

Este projeto enquadra-se na seguinte área de Tecnologias Prioritárias do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações:

TECNOLOGIAS ESTRATÉGICAS: ESPACIAL.

3.1 Argumentação Sobre a Inserção do Projeto na Área Prioritária Tecnologias Estratégicas - Espacial

Acelerômetros são empregados na construção de sistemas de navegação inercial e, em alguns casos, em sistemas de posicionamento angular. Estes sistemas são imprescindíveis para a operação de sistemas aeroespaciais, tais como: foguetes lançadores de satélites, drones, aeronaves tripuladas civis e militares, satélites, entre outros. Este sensor também encontra aplicação em sistemas que fazem parte do nosso cotidiano, tais como em celulares, navegadores automotivos, airbags, interfaces homem-máquina para jogos, etc.

O projeto de acelerômetros discretos como uma primeira etapa para a construção de um meso sistema integrado ao processo de produção de placas de circuito impresso, permitiria o projeto e a confecção de um sensor com características customizadas e otimizadas para dada aplicação em larga escala. Além disso, sua integração ao processo de produção de PCs diminuiria os custos de produção.

O projeto 10178 ao qual este projeto de iniciação científica está vinculado possui fomento externo da Agência Espacial Brasileira (AEB).

O acelerômetro a ser construído poderá ser embarcado para testes no foguete de sondagem que está em desenvolvimento no Projeto Vetor II, cadastrado sob o número PROPPG/Uel 13028-2022.

4 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

Dada a argumentação apresentada no item 3.1, dentre os 17 objetivos de desenvolvimento sustentável previstos na Agenda 2030 da ONU, este projeto enquadra-se no objetivo: Indústria, Inovação e Infraestrutura.

5 INTRODUÇÃO

Cada vez mais empregado no dia-a-dia, o acelerômetro possibilita uma nova interação com as máquinas e um avanço para a tecnologia. Esse instrumento abre uma série de funções inovadoras, com as mais variadas aplicações para o mercado civil, industrial e militar.

Na tabela 1, pode-se visualizar algumas aplicações para qual os acelerômetros são utilizados seguido de alguns dados propostos para cada uso. Nota-se também que a escala utilizada comumente na indústria é o “ g ”, porém a escala no Sistema Internacional (SI) é o “ m/s^2 ” ($1g = 9,81m/s^2$).

Aplicação	Banda	Resolução	Alcance Dinâmico
Air Bag	$0 - 0,5kHz$	$< 500mg$	$100g$
Estabilização de Automóveis	$0 - 0,5kHz$	$< 10mg$	$2g$
Navegação Inercial	$0 - 100Hz$	$< 5\mu g$	$1g$
Aplicações Médicas	$0 - 100Hz$	$< 10mg$	$100g$
Medida de Vibrações	$1 - 100kHz$	$< 100mg$	10^4g
Realidade Virtual	$0 - 100kHz$	$< 1mg$	$10g$
Medida de Microgravidade	$0 - 10Hz$	$< 1\mu g$	$1g$
Munição inteligente	$10 - 100kHz$	$1g$	10^5g
Monitoramento de pacotes frágeis	$0 - 1kHz$	$< 100mg$	10^3g

Tabela 1: Aplicações para acelerômetros e suas características desejáveis.

Para cada emprego, é exigido uma série de especificações mínimas que atendam a necessidade de cada aplicação. Por exemplo, para aplicações em navegação inercial exige-se que o acelerômetro tenha resoluções da ordem de μg , já para aplicações automotivas, no caso o sensor para o acionamento do Air Bag, a resolução de $500 mg$ é suficiente. Logicamente, além das informações mostradas na Tabela 1, também são analisados outros recursos, como o custo benefício para identificar a viabilidade do sensor para cada utilidade proposta.

Com a ampla versatilidade e aplicabilidade dos acelerômetros, foram criados diversos mecanismos e transdutores para realizar esta função. O resultado disso é uma ampla gama de acelerômetros para as mais variadas funções. Classificando quanto ao efeito observado pelo sensores seguem alguns exemplos de acelerômetros, que são: piezoresistivo, piezoelétrico, capacitivo, de efeito Hall, magnetoresistivo, por transferência de calor, de redes de Bragg, entre outros. Classificando quanto à

sua construção tempo os acelerômetros dos tipos: Microsistema MEMS, Mesossistema MEMS, Pendular de malha aberta, QFlex, entre outros.

Os acelerômetros MEMS (Micro Eletro Mechanical Systems) foram desenvolvidos em meados de 1960 por Harvey C. Nathanson, que patenteou a tecnologia. Entretanto os MEMS alavancaram somente no final da década de 1980, devido ao amadurecimento da microeletrônica, que possibilitou a inserção funções mecânicas juntamente com eletrônicas no mesmo chip.

Esta inovação rapidamente ganhou possíveis aplicações, sendo iniciadas pesquisas em diversas áreas na época, tais como nos setores de telecomunicações, automobilístico, medicina, biomedicina, eletrônica de consumo, instrumentação, controle de processos, aeronáutica aeroespacial e militar. Na tabela 2, observa-se algumas aplicações específicas dos sensores MEMS para alguns destes setores:

Automotiva	Eletrônica	Médica	Comunicações	Militar
Sensores internos de navegação	smartphones e vídeo games	Sensores de pressão arterial	Componentes de redes de fibra óptica	Sistemas de orientação de mísseis
Sensor do compressor do ar condicionado	Cabeças de impressão de impressoras jato-de-tinta	Estimuladores musculares	Chaves, filtros e relês para sinais RF	Vigilância
Sensores de frenagem e controle de suspensão	Projetores de vídeo	Sensores implantados	Osciladores controlados por tensão (VCO)	Veículos e sistemas de apontamento
Sensores de nível de combustível e pressão de vapores	Sistemas de armazenamento de dados	Próteses	Divisores e acopladores	Sensores embarcados
Sensores de sistemas airbag	Deteção de terremotos	Marca-passos	Lasers sintonizáveis	Controle de aeronaves

Tabela 2: Aplicações típica de sensores MEMS.

O sensor MEMS utiliza conceitos da eletrônica, mecânica, ciência dos materiais, física e química. A tecnologia MEMS pode integrar em um único sistema funções de sensoriamento, controle e atuação. Obviamente, quanto melhor a qualidade da resolução do sensor, maior é o custo e mais específico é sua atuação, como pode-se observar no gráfico ilustrado na Figura 1:

O funcionamento destes dispositivos tem como base um ou mais capacitores formados por sistemas de massas inerciais móveis, formando capacitâncias, que por sua vez, são alteradas proporcionalmente com o deslocamento da placa móvel assim

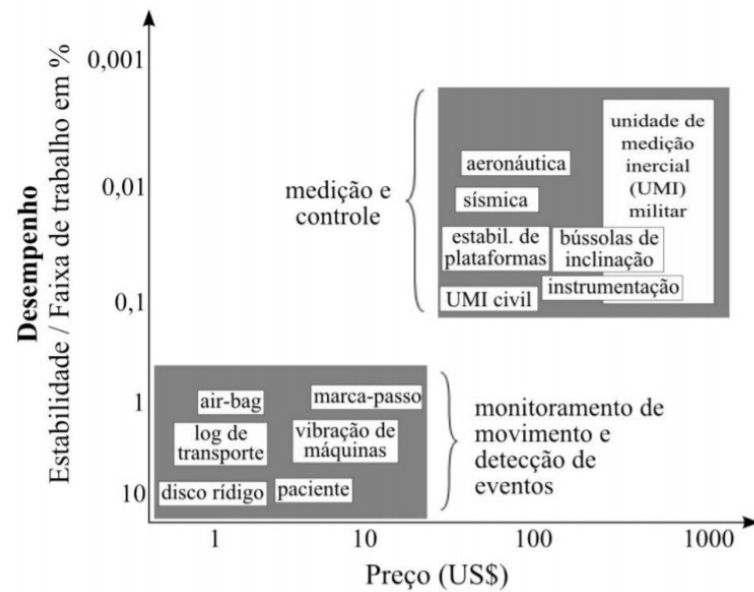


Figura 1: Gráfico de relação entre desempenho e custo dos sensores.

como descrito na Figura 2, este com um sistema de 2 capacitores (Acelerômetro tipo *Bulk*). As alterações das capacitâncias são captadas pelo circuito eletrônico e por sua vez, convertidas em uma medida de aceleração.

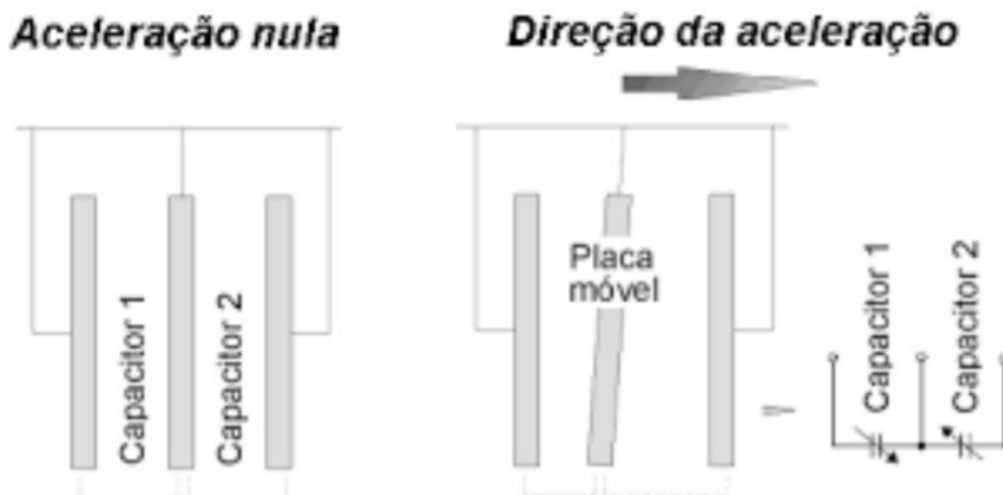


Figura 2: Sistema simplificado de um sensor de aceleração MEMS capacitivo.

Essa massa inercial pode adquirir diversas topologias e variados números e formatos de vigas flexíveis que a sustenta, como apresentado na Figura 3 a seguir:

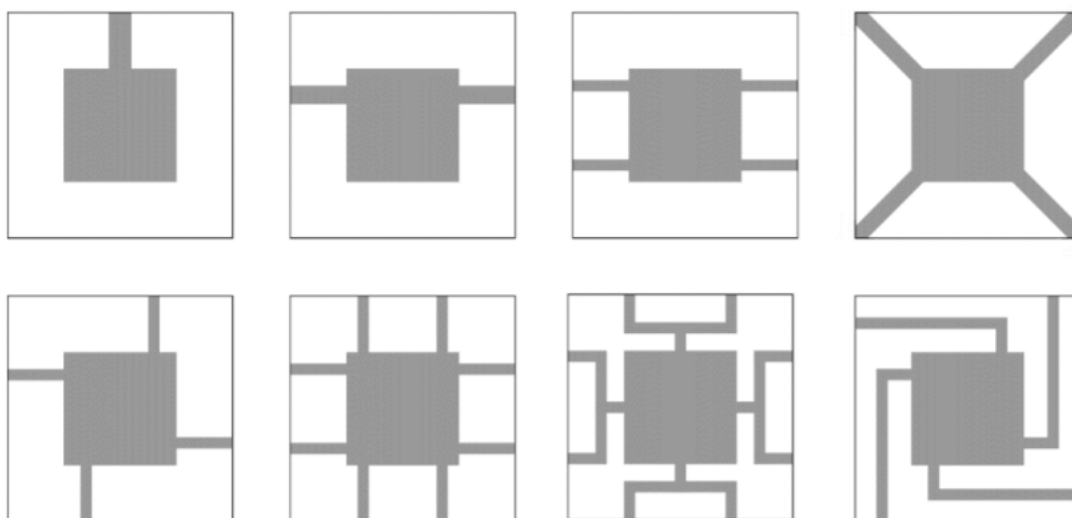


Figura 3: Topologias típicas de acelerômetros capacitivos.

Além disso, o mesmo sinal elétrico do sistema também pode ser destinado a um circuito de controle de bobinas que elevarão a massa sísmica do sensor de volta a sua posição nula. Essa elevação é feita através de eletromagnetismo e a intensidade do fluxo magnético gerado pelas bobinas é proporcional a aceleração aplicada ao sensor. A Figura 4 ilustra a estrutura interna deste tipo de sensor com os eletroímãs inseridos.

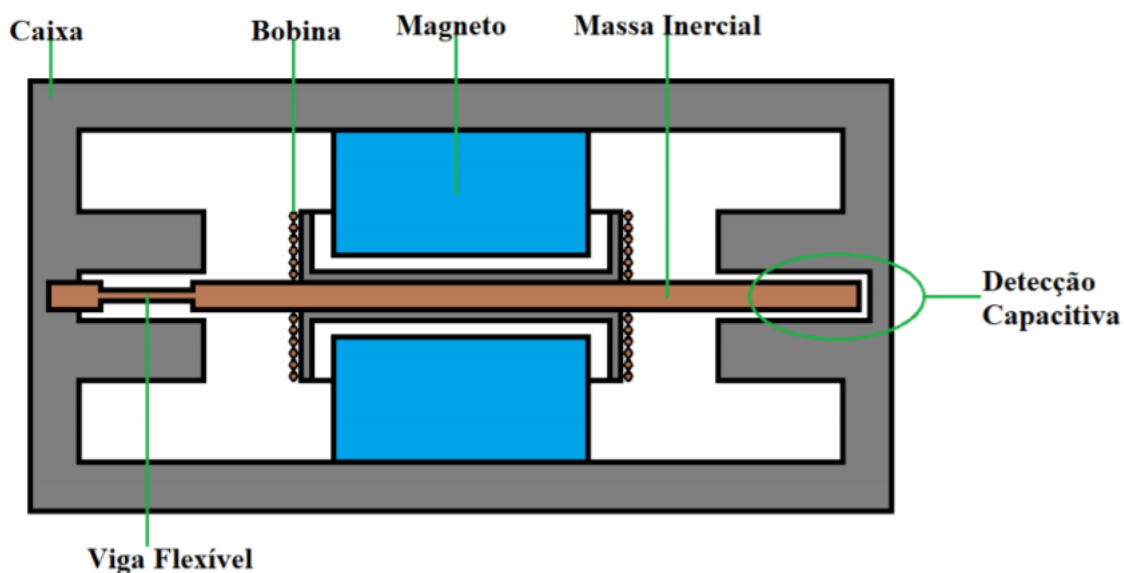


Figura 4: Estrutura interna do sensor capacitivo com eletroímãs.

Dispositivos MEMS podem ser classificados quanto ao seu tamanho e tecnologia empregada. Sistemas MEMS dividem-se em dois grupos, os micro sistemas e os meso sistemas. A tecnologia empregada na fabricação dos micro sistemas é derivada da tecnologia de fabricação da microeletrônica. Nestes sistemas, é possível integrar, por exemplo, sistemas mecânicos e eletrônicos em uma única pastilha de silício. Os meso sistemas normalmente possuem dimensões e estruturas visíveis a olho nu, podendo ser construídos por diversas tecnologias, tais como a usinagem, síntese

aditiva, litografia sub milimétrica empregada na produção de placas de circuito impresso (PCI), entre outros. Como exemplos temos sistemas microfluídicos, sistemas ópticos, tais como o espelho e seu mecanismo em impressoras laser, entre outros.

Este projeto pretende construir um acelerômetro em malha aberta que pode ser classificado como um mesossistema MEMS. Para este fim, serão adaptadas tecnologias de síntese aditiva (impressão 3D), de produção de PCIs e outras para a construção do transdutor e de sua eletrônica associada.

6 OBJETIVOS

O projeto tem como objetivo o estudo e a construção de um acelerômetro do tipo MEMS através de processos com placa de circuito impresso e/ou de síntese aditiva, como a impressão 3D, por exemplo. A ação será feita em duas vertentes, desenvolvimento do transdutor e do circuito eletrônico.

7 METODOLOGIA

O método de transdução escolhido para o projeto é a detecção da variação da capacitância entre placas. Esta escolha baseia-se no fato que seria possível a construção do acelerômetro usando tecnologias de fabricação de placas de circuito impresso e também de síntese aditiva, opções estas disponíveis para o projeto. Além disso, há literatura farta sobre o assunto, onde se apresentam diversas topologias para a construção de um acelerômetro baseado no efeito capacitivo de placas paralelas. Como forma de organizar o trabalho, o projeto será dividido em duas vertentes que devem ser desenvolvidas em paralelo. São elas o transdutor ou o dispositivo mecânico e a seu circuito eletrônico, que irá converter a capacitância em um sinal de aceleração.

7.1 Transdutor

Como proposta, o projeto pretende construir um transdutor capacitivo diferencial. Para isto, são analisados dois métodos, o primeiro com base em uma estrutura tipo *Bulk*. Este sensor basicamente será construído através de três placas de circuito impresso compostas de fibra de vidro (representadas em marrom) e espaçadores (representados em cinza) para permitir a mobilidade da placa central ao se aplicar uma aceleração, como pode ser visto na Figura 5.



Figura 5: Representação do sensor tipo Bulk.

O segundo método propõe a construção de uma topologia onde a placa central é suspensa por tirantes presos em seus vértices, conforme mostra a Figura 6.

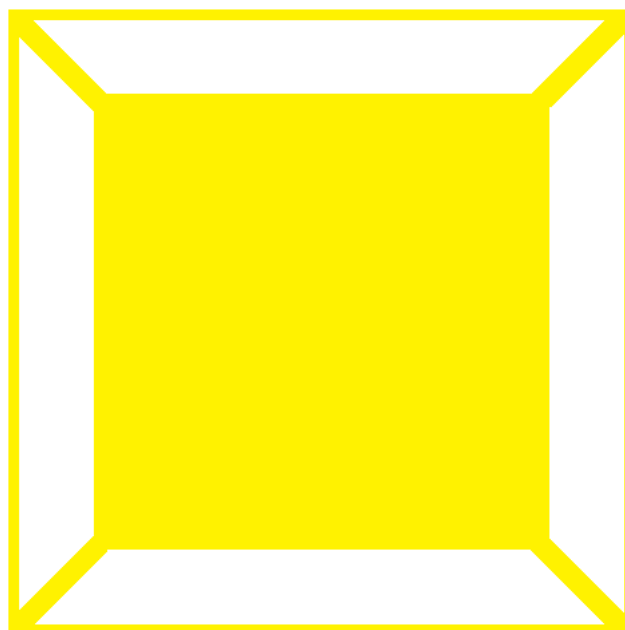


Figura 6: Representação do eixo central.

O material utilizado é flexível o suficiente para realizar o deslocamento necessário para a variação das capacitâncias do sensor. Esta movimentação é prevista de acordo com a constante elástica do material utilizado e das dimensões do sistema. Então ao visualizar a seção transversal do sensor, obtêm-se a seguinte configuração ilustrada na Figura 7.

Os possíveis transdutores para o projeto serão modelados de modo a se obter a sensibilidade do sistema (capacitância em função do deslocamento da placa central), resposta em frequência e outras características em função dos parâmetros de projeto, tais como dimensões, materiais, etc. Estes modelos serão alimentados e desenvolvidos de acordo com a capacidade tecnológica encontrada para a execução das partes do sistema. Por exemplo, nossa indústria de fabricação de PCIs utiliza determinados tipos de materiais e o projeto é restrito a algumas tecnologias de impressão 3d disponíveis. O projeto também deve ser pensado para que a eletrônica associada possa ser integrada, formando um sensor completo. É desejado que tanto o transdutor quanto a sua eletrônica estejam integrados pela tecnologia de fabricação utilizada e não sejam somente parte mecânica (transdutor) e eletrônica em módulos separados.

7.2 Circuito eletrônico

Concomitantemente ao desenvolvimento do sensor, serão pesquisadas formas para converter o sinal gerado pelas capacitâncias em um sinal de aceleração. A primeira ideia é utilizar um circuito que produza um PWM (Pulse Width Modulation) como sinal de aceleração, que consiste em uma variação de largura de pulso de acordo com as capacitâncias fornecidas pelo elemento sensor. Quanto menor a capacitância, maior o período e pulso do sinal. A vantagem deste é que o sinal pode ser



Figura 7: Representação do sensor suspenso.

convertido facilmente para o domínio digital, utilizando-se temporizadores e contadores presentes em um microcontrolador moderno, por exemplo. O circuito em questão é representado na Figura 8.

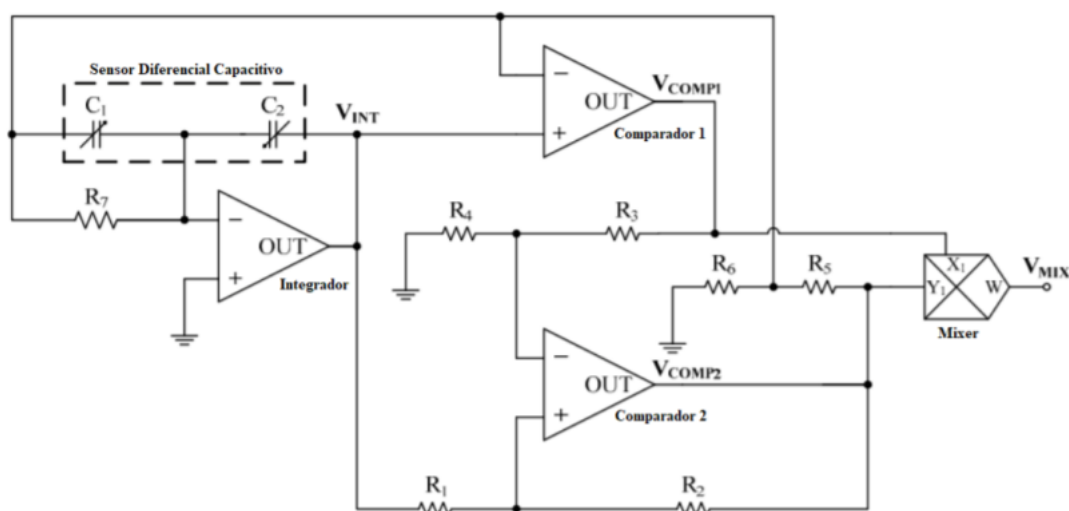


Figura 8: Circuito PWM para capacitâncias variáveis.

A Figura 9 ilustra um exemplo gráfico dos sinais previamente simulados e gerados em determinados pontos no circuito. Além disso, também demonstra suas magnitudes, formas de onda e parâmetros com relação ao tempo. Resumidamente, o sinal de PWM (em laranja) é proporcional à diferença na capacitância apresentada por C1 e C2 (Figura 8), que representam os dois capacitores que compartilham a placa central, tal como nas topologias de sensor ilustradas na Figura 5 e na Figura 7.

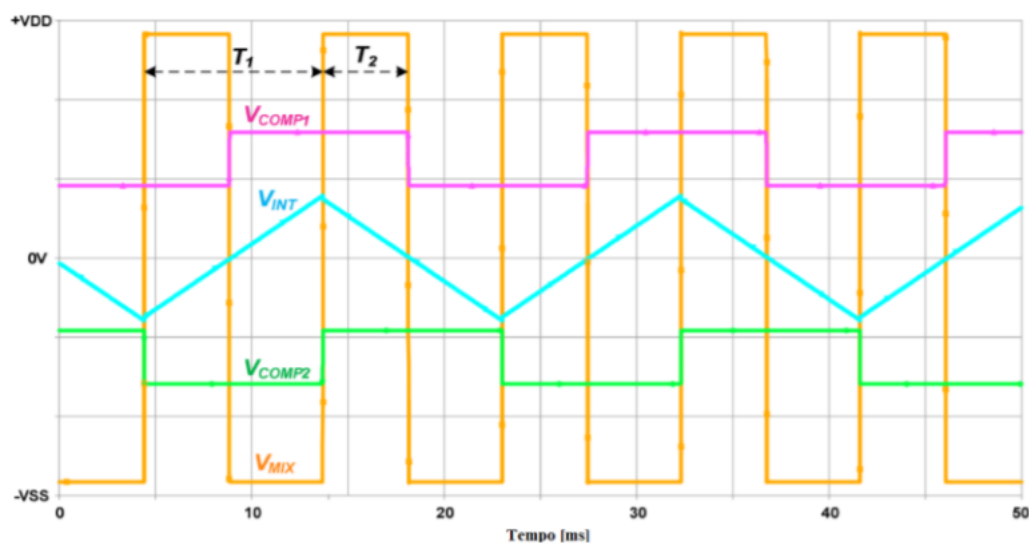


Figura 9: Exemplo gráfico dos sinais produzidos no circuito.

A segunda ideia é utilizar um subsistema de condicionamento de sinais LVDT (Transformador Diferencial Variável Linear). Este componente é específico para conversões de sinais obtidos por um transdutor (no projeto, este seria o sensor) em um sinal de corrente contínua unipolar ou bipolar. O componente em questão é o AD698, que possui alto grau de precisão e repetibilidade. A Figura 10 a seguir exemplifica o diagrama de blocos do componente.

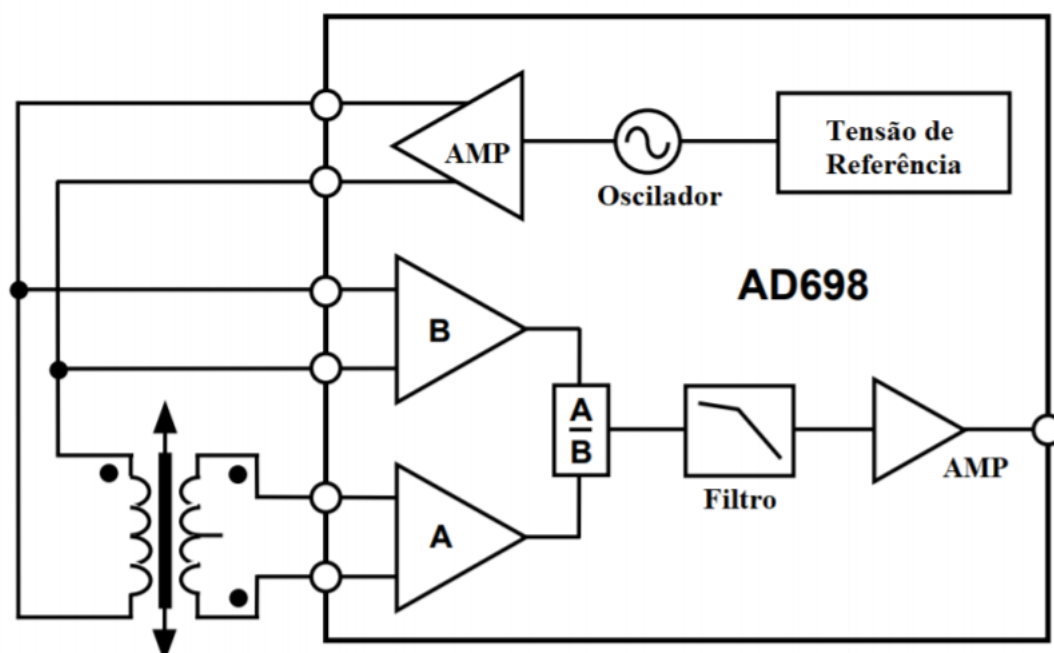


Figura 10: Diagrama de Blocos Funcional do AD698.

Para utilizar o circuito é necessário ligar os capacitores que formam o elemento sensor em paralelo com os braços do secundário do transformador da Figura 10, de forma que este elemento seja um divisor de impedâncias para a entrada do amplificador A. Basicamente o circuito coleta os sinais de entrada do sensor e do sinal

de excitação fazendo a divisão de ambos para obter um sinal independente da amplitude do oscilador. Este sinal, por sua vez passa por um filtro “passa-baixa” e um amplificador de forma a se obter um sinal de aceleração proporcional a uma tensão simétrica. O sinal da tensão representa o sentido da aceleração imposta ao sistema.

Para a conversão do sinal de aceleração para o domínio digital é necessária uma etapa de conversão analógico-digital. Isto pode ser feito por um microcontrolador moderno que possua um conversor analógico-digital integrado como periférico.

8 RESULTADOS E IMPACTOS ESPERADOS

O resultado principal deste projeto é a obtenção de um acelerômetro construído com tecnologias de fabricação de circuitos impressos e de síntese aditiva (impressão de polímeros em 3D). Durante o processo de desenvolvimento são esperados os seguintes resultados e impactos:

1. Aprendizado e domínio de ferramentas de projeto CAD para projetos mecânicos e para projeto de circuitos e PCIs;
2. Entendimento das tecnologias para a produção de circuitos impressos, das tecnologias de síntese aditiva e de tecnologias para usinagem e corte de materiais a laser;
3. Compreensão dos diferentes materiais e técnicas que serão utilizadas e listar as empresas nacionais capazes de realizar os serviços técnicos e fornecer os materiais necessários a construção do sensor;
4. Adaptar as possíveis tecnologias existentes na indústria nacional de PCIs para a construção do transdutor;
5. Desenvolvimento da metodologia para caracterizar o transdutor;
6. Desenvolvimento de um circuito de condicionamento de sinais que possa ser integrado ao sensor;
7. Desenvolvimento da metodologia de caracterização do sensor, onde os termos lineares e de ordem superior do modelo do sensor serão obtidos. Será também desenvolvida uma metodologia para a caracterização da resposta em frequência do sensor;
8. Divulgação na forma de um artigo para congresso;
9. Formação de mão de obra especializada nas áreas relacionadas ao projeto e produção de circuitos com futuro impacto na indústria local;
10. Possível teste do acelerômetro no foguete de sondagem que está em desenvolvimento no Projeto Vetor II (Projeto 13028/2022 - PROPPG/UEL);
11. Complementação na formação do estudante que irá desenvolver este trabalho de I.C.

9 REFERÊNCIAS

1. Engerey. Tipos e aplicações de sensores na indústria. Disponível em: <http://www.engerey.com.br/blog/tipos-e-aplicacoes-de-sensores-na-industria>. Acesso em: 20/05/2022.
2. Calache, D. Caracterização de um Acelerômetro Baseado em Sistemas Microeletromecânicos (MEMS). Disponível em: <http://www.lee.eng.uerj.br/jpaulo/PG/2013/PG-Acelerometro-MEMS2013.pdf>. Acesso em: 06/01/2020.
3. Torres, H. MEMS - Sistemas Microeletromecânicos. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/mems/>. Acessado em: 20/05/2022.
4. Teves, A. C. Otimização de Acelerômetros MEMS Eléctroestáticos de Alto Desempenho. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3152/tde-01082013-144527/publico/Dissertacao_AndreTeves_unprotected.pdf. Acesso em: 10/01/2020.
5. Rocha, F. S.; Marranghello, G. F. Propriedades de um acelerômetro eletrônico e possibilidades de uso no ensino de mecânica. Disponível em: http://www.lajpe.org/march13/6_LAJPE_739_Fabio_Saraiva_preprint_corr_f.pdf. Acesso em: 10/01/2020.
6. Marcellis, A.; Reig, C; Beltrán, M. D. C. A Capacitance-to-Time ConverterBased ElectronicInterface for Differential Capacitive Sensors. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/1/80/pdf>. Acesso em: 14/01/2020.
7. Analog Devices. AD698. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ad698.pdf>. Acessado em: 17/01/2020
8. Beitia, J.; Clifford, A.; Fell, C.; Loisel, P. Quartz Pendulous Accelerometers for Navigation and Tactical Grade Systems. Disponível em: http://www.innalabs.com/wp-content/uploads/2017/08/Quartz_Pendulous_Accelerometers_for_Navigation_and_Tactical_Grade_Systems.compressed.pdf. Acesso em: 13/02/2020.
9. Lawrence, Anthony. Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control. Springer Science & Business Media, 2001.

