## Projeto de Graduação

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

06 de Julho de 2022

## PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE COLHEITA DE ENERGIA BASEADO EM PVDF PARA APLICAÇÃO EM VANTS

Leonardo Ferreira Chaves Estrella Guimarães Marcos Vinicius Majeveski de Angeli



www.ele.puc-rio.br

## Projeto de Graduação

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

## PROJETO E SIMULAÇÃO DE SISTEMA DE COLHEITA D ENERGIA BASEADO EM PVDF PARA APLICAÇÃO EM VANTS Aluno(s): Leonardo F. Chaves E. Guimarães Marcos Vinicius Majeveski de Angeli Orientador: Carlos Roberto Hall Barbosa

Trabalho apresentado com requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.



#### Resumo

A utilização de meios de aproveitar a energia da natureza existe na sociedade desde os primórdios da civilização, porém, com o advento tecnológico e a necessidade cada vez maior de novos meios de coletar o máximo da energia do meio ambiente, se fez necessário o desenvolvimento de diversos novos modelos de colheita de energia em pequena escala, como por exemplo os sistemas baseados em sensores piezoelétricos.

Aliado a isso, uma nova tecnologia também está ganhando popularidade devido à sua enorme gama de aplicações, os veículos aéreos não tripulados, VANTs. Eles são cada vez mais populares, sendo usados em diversos setores como logística, agricultura, cinema e até militar. Porém, sua baixa autonomia de voo reduz sua aplicabilidade em diversos setores.

É com base nesses dois contextos que o projeto busca integrar as duas tecnologias. Realizou-se um estudo dos possíveis modelos de colheita de energia, seguido de um estudo mais aprofundado do PVDF, um material piezoelétrico, de forma que pudesse ser usado para coletar energia da vibração de um VANT. De forma a validar essa hipótese, foram realizadas simulações em LTSpice usando circuitos eletrônicos para conseguir canalizar a energia gerada por sensores piezoelétricos para o carregamento da bateria, contribuindo para o aumento do tempo de voo de um drone.

Palavras-chave: energy harvesting; colheita de energia; piezoelétrico; PVDF; VANT



# DESIGN AND SIMULATION OF ENERGY HARVESTING SYSTEM BASED ON PVDF FOR APPLICATION IN UAVS

### Abstract

Multiple ways of harnessing the energy of nature have existed in society since the dawn of civilization, but with the advancement of technology and the increasing need for new ways to collect as much energy as possible, it has become necessary to develop several new models of small-scale energy harvesting, such as the ones based on piezoelectric sensors.

At the same time, a new technology is also gaining popularity due to its enormous range of applications, the unmanned aerial vehicles, UAVs. They are increasingly popular and are used in various sectors such as logistics, agriculture, film, and even the military. But their low autonomy diminishes their usefulness in those applications.

It is based on these two contexts that the project aims at integrating the two technologies. We conducted a study of possible energy harvesting models, followed by a more in-depth study of PVDF, a piezoelectric material, so that we could use this material to collect energy from the vibration of the UAV. To validate this hypothesis, we ran simulations within LTSpice using electronic circuits to be able to channel the energy generated by the piezoelectric into battery charging, contributing to the increased flight time of a drone.

#### Keywords: energy harvesting, piezoelectric, PVDF, UAV



## Lista de Figuras

<ul> <li>Figura 2. Representação de um modelo de um TEG [3].</li> <li>Figura 3. Exempla de geração de energia dentro de um relógio de pulso usado do movimento de uma bola de aço. [6].</li> <li>S</li> <li>Figura 4. Esquemático de um sistema hibrido de células solares e ano geradores triboelétricos [7]</li></ul>	Figura 1 - Componentes básicos de um sistema de coleta de energia [2]	2
Figura 3 - Exemplo de geração de energia dentro de um relógio de puiso usado do movimento de uma bola de aço. [6]	Figura 2 - Representação de um modelo de um TEG [3]	3
Figura 4       Esquemático de um sistema hibrido de células solares en TGS [7].       7         Figura 5       Sistema hibrido de células solares en ano geradores triboelétricos [7].       7         Figura 6       Esquemático de um suberaira em carga e recarga [11].       8         Figura 7       Esquemático de um suberaira em carga e recarga [11].       9         Figura 8       Modelo da estrutura atômica do cristal piezoelétrico peroskita [15].       11         Figura 10       Diferentes Modos de atuação de um piezoelétrico [19].       13         Figura 11       Modelo 3 estuação de um piezoelétrico [19].       13         Figura 12       Figura 12       Figura 12       16         Figura 13       Exemplo comercial de um captador de som piezoelétrico [22].       15         Figura 14       Modelo de piezoelétrico utilizado no projeto [25].       17         Figura 15       Nodelo de modelo de piezoelétrico realizado no L'Spice.       18         Figura 14       Netlicador de completa utilizado pare evita o cancelamento de sinais do piezoelétrico.       19         Figura 24       Nodelo de mapiticador de carga Passivo com cendução de tensão [20].       20         Figura 25       Simulação com umento da sensa stensão do piezo [29].       21         Figura 24       Induição com aumento da secleração (a=100 g; k=11 V/g; f=40 Hz).       26	Figura 3 - Exemplo de geração de energia dentro de um relógio de pulso usado do movimento de uma bola de aço. [6]	5
Figura 3 - Sistema à base de fibras hibrido de células solares e nano geradores triboelétricos [7].       7         Figura 6 - Esquemático de um supercapacitor [11].       8         Figura 7 - Squemático de um supercapacitor [11].       9         Figura 7 - Statumata do cristal piezoelétrico perosskita [15].       11         Figura 10 - Diferentes Modos de atuação de um piezoelétrico [19].       13         Figura 12 - Filmo PVOF da empresa Measurement Specialities [20].       15         Figura 12 - Nodelo da piezoelétrico [21].       15         Figura 13 - Modelo de piezoelétrico realizado no LTSpice.       16         Figura 15 - Modelo de piezoelétrico realizado no LTSpice.       17         Figura 15 - Modelo de de reitificador no projeto [25].       17         Figura 14 - Reutificador de orda completa utilizado no LTSpice.       19         Figura 15 - Modelo de de reitificador realizado no LTSpice.       19         Figura 24 - Reutificador de carga Passivo com redução de tensão [20].       20         Figura 24 - Circuito inicidador Ativa com o AmOpO AD549.       20         Figura 25 - Simulação com umento da sensibilidade de tensão [21].       27         Figura 24 - Circuito inicidador Ativa com o AmOpO AD549.       20         Figura 25 - Simulação com umento da sensibilidade de tensão [24].       27         Figura 25 - Simulação com umento da senside la 2, g. k. = 1, 1/g. f=40 H2).	Figura 4 - Esquemático de um sistema híbrido de células solares e TEGs [7]	6
Figura 6       Esquemático de uma bateria em carga e recarga [11]	Figura 5 - Sistema à base de fibras híbrido de células solares e nano geradores triboelétricos [7]	7
Figura 7- Esquemático de um supercapacitor [11]       9         Figura 8- Modelo da estrutura atômica do cristal piezoelétrico perovskita [15]       11         Figura 10- Diferentes Modos de atuação de um piezoelétrico [19]       13         Figura 11- Modo 3-3 de atuação de um piezoelétrico [18]       14         Figura 12- Filme PVDF da empresa Measurement Specialties [20]       15         Figura 13- Exemplo comercial de um captador de som piezoelétrico [12]       15         Figura 13- Exemplo comercial de um captador de som piezoelétrico [21]       16         Figura 15- Modelo de piezoelétrico realizado no L'Spice       18         Figura 16- Resultado do modor de realizado no L'Spice       19         Figura 19 - Amplificador de Carga Passivo abastecendo uma carga [20]       20         Figura 20 - Amplificador de Carga Passivo abastecendo uma carga [20]       20         Figura 22 - Pinagem do L'C3588-2[29]       21         Figura 23 - Circuito interno do L'C3588-2[29]       22         Figura 24 - Circuito interno do L'C3588-2[29]       22         Figura 25 - Simulação com aumento da sensibilidade de tensão (a=100 g; k=1, 1 V/g; f=40 Hz)       27         Figura 25 - Simulação com aumento da sensibilidade de tensão (a=100 g; k=1, 1 V/g; f=40 Hz)       27         Figura 25 - Simulação com aumento da sensibilidade de tensão (a=100 g; k=1, 1 V/g; f=50 Hz)       28         Figura 24 - Circuito interno d	Figura 6 - Esquemático de uma bateria em carga e recarga [11]	8
Figura 8 - Modelo da estrutura atòmica do cristal piezoelétrico peroxekita [15]	Figura 7- Esquemático de um supercapacitor [11]	9
Figura 9 - Polaridade dos microcristais antes, durante e depois da Polarização [15]       12         Figura 10 - Diferentes Modos de atuação de um piezoelétrico [19]       13         Figura 11 - Modo 3-3 de atuação de um piezoelétrico [19]       14         Figura 12 - Filme PVDF da empresa Measurement Specialties [20]       15         Figura 13 - Exemplo comercial de um captador de som piezoelétrico [21]       15         Figura 14 - Modelos Simplificados de Piezoelétrico realizado no LTSpice.       18         Figura 17 - Retificador de onda completa utilizado para evitar o cancelamento de sinais do piezoelétrico.       19         Figura 19 - Amplificador de Carga Passivo abatecendo um carga [20]       20         Figura 21 - Nodelo de Amplificador Ativo com o AmpOp AD549       20         Figura 22 - Pinagem do LTC3588-2[29]       21         Figura 22 - Pinagem do LTC3588-2[29]       22         Figura 24 - Circuito inicialmente proposto, usando apenas a tensão do piezo [29]       22         Figura 24 - Circuito inicialmente proposto, usando apenas a tensão do piezo [29]       22         Figura 25 - Simulação com aumento da sensibilidade de tensão [a-100 g; k=1,1 V(g; f=40 Hz)       27         Figura 24 - Simulação com aumento da sensibilidade de tensão [a-100 g; k=1,1 V(g; f=40 Hz)       27         Figura 25 - Simulação com aumento da sensibilidade de tensão [a-100 g; k=1,1 V(g; f=40 Hz)       27         Figura 24 - Simulação com aum	Figura 8 - Modelo da estrutura atômica do cristal piezoelétrico perovskita [15]	11
Figura 10 - Diferentes Modos de atuação de um piezoelétrico [19]	Figura 9 - Polaridade dos microcristais antes, durante e depois da Polarização [15]	12
Figura 11 - Modo 3-3 de atuação de um piezoelétrico [18]	Figura 10 - Diferentes Modos de atuação de um piezoelétrico [19]	13
Figura 12 - Filme PVDF da empresa Measurement Specialties [20].       15         Figura 13 - Exemplo comercial de um captador de som piezoelétrico [21].       15         Figura 14 - Modelos Simplificadors de Piezoelétrico [22].       16         Figura 15 - Modelos do piezoelétrico realizado no LTSpice.       18         Figura 17 - Retificador de onda completa utilizado par evitar o cancelamento de sinais do piezoelétrico.       19         Figura 18 - Resultado do modelo de piezoelétrico realizado no LTSpice.       19         Figura 12 - Modelo de Amplificador com redução de tensão [20].       20         Figura 21 - Modelo de Amplificador a Carga Passivo abastecendo uma carga [20].       20         Figura 22 - Amplificador de Carga Passivo abastecendo uma carga [20].       20         Figura 23 - Circuito interno do LTC3588-2 [29].       21         Figura 24 - Circuito interno do LTC3588-2 [29].       21         Figura 25 - Simulação com aumento da aceleração (a=100 g; k=1, 1 V/g; f=40 Hz).       26         Figura 25 - Simulação com aumento da sensibilidade de tensão (a=100 g; k=1, 1 V/g; f=40 Hz).       27         Figura 24 - Circuito inicialmente proposto, usando apenas a tensão do piezo [29]       28         Figura 25 - Simulação com aumento da sensibilidade de tensão (a=100 g; k=1, 1 V/g; f=40 Hz).       27         Figura 24 - Simulação com aumento da sensibilidade de tensão (a=100 g; k=1, 1 V/g; f=50 Hz).       28         Figur	Figura 11 - Modo 3-3 de atuação de um piezoelétrico [18]	14
Figura 13 - Exemple comercial de um captador de som piezoelétrico [21]	Figura 12 - Filme PVDF da empresa Measurement Specialties [20]	15
Figura 14 - Modelos Simplificados de Piezoelétricos [22]       16         Figura 15 - Modelo de piezoelétrico utilizado no projeto [25]       17         Figura 17 - Retificador de ondelo de piezoelétrico realizado no LTSpice.       18         Figura 17 - Retificador de ondelo de piezoelétrico realizado no LTSpice.       19         Figura 19 - Amplificador de Carga Passivo com redução de tensão [20]       20         Figura 20 - Amplificador de Carga Passivo abastecendo uma carga [20]       20         Figura 22 - Pinagem do LTC3588-2[29]       21         Figura 23 - Circuito interno do LTG3588-2[29]       22         Figura 24 - Simulação com um Sensor (a=5 g; k=1, 1 V/g; f=40 Hz)       26         Figura 25 - Simulação com um Sensor (a=5 g; k=1, 1 V/g; f=40 Hz)       27         Figura 25 - Simulação com aumento da aceleração (a=100 g; k=1, 1 V/g; f=40 Hz)       27         Figura 25 - Simulação com aumento da aceleração (a=100 g; k=1, 1 V/g; f=40 Hz)       27         Figura 25 - Simulação com aumento a frequência (a=100 g; k=1, 1 V/g; f=50 Hz)       28         Figura 25 - Simulação com aumento na frequência (a=100 g; k=1, 1 V/g; f=50 Hz)       28         Figura 31 - Simulação com aumento na frequência (a=100 g; k=4, 1 V/g; f=50 Hz)       28         Figura 32 - Simulação com Bapeas um sensor (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)       29         Figura 33 - Simulação com 3 piezoelétricos em série a 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz) <td< td=""><td>Figura 13 - Exemplo comercial de um captador de som piezoelétrico [21]</td><td> 15</td></td<>	Figura 13 - Exemplo comercial de um captador de som piezoelétrico [21]	15
Figura 15 - Modelo de piezoelétrico utilizado no projeto [25]17Figura 16 - Resultado do modelo de piezoelétrico realizado no LTSpice.18Figura 17 - Resultado do modelo de retificador realizado no LTSpice.19Figura 18 - Resultado do modelo de retificador realizado no LTSpice.19Figura 19 - Amplificador de Carga Passivo com redução de tensão [20]20Figura 21 - Modelo de Amplificador Ativo com o AmpOp AD549.20Figura 22 - Pinagem do LTC3588-2[29]21Figura 23 - Simulação com um Sensor (a=5 g; k=1) V/g; f=40 Hz)26Figura 24 - Circuito interion do LTC3588-2[29]22Figura 25 - Simulação com um Sensor (a=5 g; k=1) V/g; f=40 Hz)26Figura 25 - Simulação com aumento da aceleração (a=100 g; k=1) V/g; f=40 Hz)27Figura 25 - Simulação com aumento da sensibilidade de tensão (a=100 g; k=6 V/g; f=40 Hz)27Figura 26 - Simulação com aumento a frequência (a=100 g; k=1) V/g; f=500 Hz)28Figura 28 - Simulação com apenas um sensor (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)28Figura 30 - Simulação com apenas um sensor (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)29Figura 31 - Simulação com 3 piezoelétricos em série (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 32 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 33 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)31Figura 34 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)31Figura 35 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g	Figura 14 - Modelos Simplificados de Piezoelétricos [22]	16
Figura 16Resultado do modelo de piezoelétrico realizado no LTSpice.18Figura 17Retificador de onda completa utilizado para evitar o cancelamento de sinais do piezoelétrico.19Figura 18Resultado do modelo de retificador realizado no LTSpice.19Figura 19Amplificador de Carga Passivo abastecendo uma carga [20].20Figura 20Amplificador telicador no argo AmpOp AD549.20Figura 21Nodelo de Amplificador telicavico com o AmpOp AD549.20Figura 22Pinagem do LTC3588-2[29].21Figura 23Circuito interno do LTC3588-2[29].22Figura 24Circuito interno do LTC3588-1[29].26Figura 25Simulação com um Sensor (a 5 g; k=1,1 V/g; f=40 Hz).26Figura 26Simulação com aumento da aceleração (a=100 g; k=6 V/g; f=40 Hz).27Figura 27Simulação com aumento da sensibilidade de tensão (a=100 g; k=6 V/g; f=40 Hz).27Figura 29Simulação com aumento da sensibilidade de tensão (a=100 g; k=6 V/g; f=300 Hz).28Figura 30Simulação com 25 sensores em paralelo (a 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 31Simulação com 3 piezoelétricos em série (a 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 32Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 33Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 34Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 35Simulação com apacit	Figura 15 - Modelo de piezoelétrico utilizado no projeto [25]	17
Figura 17Retificador de onda completa utilizado para evitar o cancelamento de sinais do piezoelétrico.19Figura 13Resultado do modelo de retificador realizado no LTSpice.19Figura 12Maplificador de Carga Passivo com redução de tensão [20].20Figura 22Amplificador de Carga Passivo com redução de tensão [20].20Figura 22Modelo de Amplificador Ativo com o AmpOp ADS49.20Figura 23Circuito interno do LTC3588-2 [29].21Figura 24Circuito interno do LTC3588-2 [29].22Figura 25Simulação com aumento da aceleração (a=100 g; k=1,1 V/g; f=40 Hz).26Figura 26Simulação com aumento da aceleração (a=100 g; k=1,1 V/g; f=40 Hz).27Figura 25Simulação com aumento da aceleração (a=100 g; k=1,1 V/g; f=50 Hz).28Figura 26Simulação com aumento na frequência (a=100 g; k=1,1 V/g; f=500 Hz).28Figura 30Simulação com 25 piezos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).20Figura 31Simulação com 25 piezos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 32Simulação com 3 piezoelétricos em série (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 34Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).31Figura 35Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).31Figura 34Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).32Figura 35Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a =	Figura 16 - Resultado do modelo de piezoelétrico realizado no LTSpice	18
Figura 18 - Resultado do modelo de retificador realizado no LTSpice.19Figura 19 - Amplificador de Carga Passivo com redução de tensão [20].20Figura 20 - Amplificador de Carga Passivo abastecendo uma carga [20].20Figura 21 - Modelo de Amplificador Ativo com o AmpOp AD549.20Figura 22 - Inagem do LTC3588-2[29].21Figura 23 - Circuito interno do LTC3588-2[29].22Figura 24 - Circuito interno do LTC3588-2[29].22Figura 25 - Simulação com um Sensor (a=5 g; k=1,1 V/g; f=40 Hz).26Figura 26 - Simulação com aumento da aceleração (a=100 g; k=10 Hz).27Figura 27 - Simulação com aumento da sensibilidade de tensão (a=100 g; k=6 V/g; f=40 Hz).27Figura 27 - Simulação com aumento da sensibilidade de tensão (a=100 g; k=6 V/g; f=40 Hz).28Figura 29 - Simulação com aumento na frequência (a=100 g; k=1,1 V/g; f=500 Hz).28Figura 29 - Simulação com apenas um sensor (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).29Figura 31 - Simulação com 25 piezos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 32 - Simulação com 3 piezoelétricos em série (a 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 33 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).31Figura 34 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).32Figura 35 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).32Figura 35 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).32Figura 36 - Simulação com	Figura 17 - Retificador de onda completa utilizado para evitar o cancelamento de sinais do piezoelétrico.	19
Figura 19 - Amplificador de Carga Passivo com redução de tensão [20]20Figura 20 - Amplificador de Carga Passivo abastecendo uma carga [20]20Figura 21 - Modelo de Amplificador Ativo com o AmpOp AD549.20Figura 22 - Pinagem do LTC3588-2[29]21Figura 23 - Circuito interio do LTC3588-2[29]21Figura 24 - Circuito inicialmente proposto, usando apenas a tensão do piezo [29]24Figura 25 - Simulação com aumento da aceleração (a=100 g; k=1,1 V/g; f=40 Hz)26Figura 25 - Simulação com aumento da aceleração (a=100 g; k=1,1 V/g; f=40 Hz)27Figura 26 - Simulação com aumento da sensibilidade de tensão (a=100 g; k=6 V/g; f=40 Hz)27Figura 28 - Simulação com aumento da sensibilidade de tensão (a=100 g; k=6 V/g; f=40 Hz)28Figura 29 - Simulação com aumento na frequência (a=100 g; k=1,1 V/g; f=500 Hz)28Figura 30 - Simulação com 25 pensores em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 31 - Simulação com 25 piezos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 32 - Simulação com 3 piezoelétricos em série (a 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 33 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)31Figura 34 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)31Figura 35 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)32Figura 36 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)31Figura 37 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de entra	Figura 18 - Resultado do modelo de retificador realizado no LTSpice	
Figura 20 - Amplificador de Carga Passivo abastecendo uma carga [20].20Figura 21 - Modelo de Amplificador Ativo com o AmpOp AD549.20Figura 22 - Pinagem do LTC3588-2[29].21Figura 23 - Circuito inicialmente proposto, usando apenas a tensão do piezo [29].24Figura 24 - Circuito inicialmente proposto, usando apenas a tensão do piezo [29].24Figura 25 - Simulação com um Sensor (a=5 g; k=1,1 V/g; f=40 Hz).26Figura 26 - Simulação com aumento da aceleração (a=100 g; k=1,1 V/g; f=40 Hz).27Figura 27 - Simulação com aumento da aceleração (a=100 g; k=1,1 V/g; f=40 Hz).27Figura 28 - Simulação com aumento da sensibilidade de tensão (a=100 g; k=6 V/g; f=40 Hz).28Figura 29 - Simulação com aumento na frequência (a=100 g; k=1,1 V/g; f=50 Hz).28Figura 30 - Simulação com 25 sensores em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).29Figura 31 - Simulação com 25 piezos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 32 - Simulação com 3 piezoelétricos em série (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 33 - Simulação com 3 piezoelétricos em série (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 34 - Simulação com 3 piezoelétricos em série (a grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).31Figura 37 - Simulação com a paecitância do capacitor de entrada em 50 μF.33Figura 38 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada em 50 μF.33Figura 39 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada com 24; Cin=100 μF.33Figura 34 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada; Cin=100 μF.33Figura 37 - Simulaçã	Figura 19 - Amplificador de Carga Passivo com reducão de tensão [20]	20
Figura 21Modelo de Amplificador Ativo com o AmpOp AD54920Figura 22Pinagem do LTC3588-2[29]21Figura 23Circuito interno do LTC3588-2[29]22Figura 24Circuito interno do LTC3588-2[29]24Figura 25Simulação com aumento da aceleração (a=100 g; k=1,1 V/g; f=40 Hz)26Figura 26Simulação com aumento da aceleração (a=100 g; k=1,1 V/g; f=40 Hz)27Figura 28Simulação com aumento da aceleração (a=100 g; k=1,1 V/g; f=500 Hz)28Figura 29Simulação com aumento na frequência (a=100 g; k=1,1 V/g; f=500 Hz)28Figura 30Simulação com 25 sensores em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)29Figura 32Simulação com 25 peizos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 32Simulação com 3 piezoelétricos em série (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 35Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)31Figura 36Simulação com 3 piezoelétricos em série e 8 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)32Figura 37Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)32Figura 38Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de entrada em 50 µF33Figura 39Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de entrada dobrada; Cin=100 µF33Figura 34Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de entrada; Cin=500 µF33Figura 34Simulação com capacitância do capacitor de entrada; Cin=500 µF33Figu	Figura 20 - Amplificador de Carga Passivo abastecendo uma carga [20]	20
Figura 22Pinagem do LTC3588-2[29]21Figura 23Circuito interno do LTC3588-2[29]22Figura 24Circuito inicialmente proposto, usando apenas a tensão do piezo [29]22Figura 25Simulação com um Sensor (a=5 g; k=1,1 V/g; f=40 Hz)26Figura 25Simulação com aumento da aceleração (a=100 g; k=1,1 V/g; f=40 Hz)27Figura 27Simulação com aumento da sensibilidade de tensão (a=100 g; k=6 V/g; f=40 Hz)27Figura 29Simulação com aumento na frequência (a=100 g; k=1,1 V/g; f=500 Hz)28Figura 29Simulação com aumento na frequência (a=100 g; k=1,1 V/g; f=500 Hz)28Figura 30Simulação com 25 sensores em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)29Figura 31Simulação com 35 piezoelétricos em série (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 32Simulação com 3 piezoelétricos em série (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 34Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 35Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)31Figura 36Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)32Figura 37Simulação com apacitância do capacitor de entrada em 50 μF.33Figura 38Simulação com capacitância do capacitor de entrada em 50 μF.33Figura 37Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de entrada; Cin=500 μF.33Figura 40Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de entrada ed bard	Figura 21 - Modelo de Amplificador Ativo com o AmpOn AD549	20
Figura 23 - Circuito interno do LTC3588-2 [29]	Figura 22 - Pinagem do I TC 3588-2[29]	21
Figura 24Circuito inicialmente proposto, usando apenas a tensão do piezo [29]24Figura 25Simulação com um Sensor (a=5 g; k=1,1 V/g; f=40 Hz)26Figura 26Simulação com aumento da aceleração (a=100 g; k=1,1 V/g; f=40 Hz)27Figura 28Simulação com aumento da sensibilidade de tensão (a=100 g; k=6 V/g; f=40 Hz)27Figura 28Simulação com aumento na frequência (a=100 g; k=1,1 V/g; f=5H z)28Figura 29Simulação com aumento na frequência (a=100 g; k=1,1 V/g; f=50 Hz)28Figura 30Simulação com 25 sensores em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)29Figura 31Simulação com 25 sensores em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 32Simulação com 3 piezoelétricos em série (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 34Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 35Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)31Figura 37Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)32Figura 38Simulação com capacitância do capacitor de entrada em 50 µF32Figura 39Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de entrada ficin=100 µF33Figura 41Simulação com carga Rout = 100 kΩ36Figura 42Circuito utilizado para simulação de carga35Figura 43Simulação com carga Rout = 100 kΩ36Figura 44Simulação com carga Rout = 100 kΩ36Figura 45Simu	Figure 23 - Circuito interno do LTC3588-2 [29]	21
Figura 25 - Simulação com um Sensor (a=5 g; k=1, 1 V/g; f=40 Hz)	Figura 24 - Circuito inicialmente proposto, usando apenas a tensão do piezo [29]	24
Ingenta DSimulação com aumento da aceleração (a=100 g; k=1,1 V/g; f=40 Hz)27Figura 26 - Simulação com aumento da sensibilidade de tensão (a=100 g; k=6 V/g; f=40 Hz)27Figura 27 - Simulação com aumento da sensibilidade de tensão (a=100 g; k=6 V/g; f=40 Hz)28Figura 28 - Simulação com aumento na frequência (a=100 g; k=1,1 V/g; f=5 Hz)28Figura 30 - Simulação com apenas um sensor (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)29Figura 31 - Simulação com 25 piezos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 32 - Simulação com 3 piezoelétricos em série (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 33 - Simulação com 3 piezoelétricos em série (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 35 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 36 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)31Figura 37 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)32Figura 38 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de entrada em 50 μF32Figura 39 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de entrada; Cin=500 μF33Figura 40 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de entrada; Cin=500 μF33Figura 41 - Simulação com aumento da capacitor de entrada em 100 μF36Figura 42 - Circuito utilizado para simulação de carga35Figura 43 - Simulação com aumento da capacitor de saída; Rout = 10 kΩ36Figura 44 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do asaída; Cin=100 μF; Cout	Figure 25 - Simulação com um Sensor (a=5 $\sigma$ : k=1 1 V/ $\sigma$ : f=40 Hz)	26
Figura 27Simulação com aumento da sensibilidade de tensão (a=100 g; k=6 V/g; f=40 Hz)ZrFigura 28Simulação com aumento na frequência (a=100 g; k=1,1 V/g; f=50 Hz)28Figura 29Simulação com aumento na frequência (a=100 g; k=1,1 V/g; f=50 Hz)28Figura 30Simulação com 25 sensores em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)29Figura 31Simulação com 25 piezos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 32Simulação com 25 piezos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 33Simulação com 3 piezoelétricos em série (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 34Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)31Figura 35Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)31Figura 37Simulação com 8 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)32Figura 37Simulação com capacitância do capacitor de entrada em 50 μF32Figura 38Simulação com capacitância do capacitor de entrada cobrada; Cin=100 μF33Figura 39Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de entrada; Cin=500 μF33Figura 41Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de saída em 100 μF36Figura 42Circuito utilizado para simulação de carga35Figura 43Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de saída; Cout=1 mF35Figura 43Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do da saída; Cin=100 μF; Cout=4	Figura 26 - Simulação com aumento da aceleração (a=100 g; k=1 1 V/g; f=40 Hz)	20
Figura 27Simulação em baixa frequência (a=100 g; k=1,1 V/g; f=5 Hz).28Figura 29Simulação com aumento na frequência (a=100 g; k=1,1 V/g; f=500 Hz).28Figura 30Simulação com apenas um sensor (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).29Figura 31Simulação com 25 sensores em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 32Simulação com 35 piezoes em paralelo (a = 3 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 34Simulação com 3 piezoelétricos em série (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 35Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 36Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).31Figura 36Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).31Figura 37Simulação com a piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).32Figura 38Simulação com capacitância do capacitor de entrada em 50 µF33Figura 39Simulação com capacitância do capacitor de entrada em 50 µF33Figura 40Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de entrada; Cin=500 µF33Figura 41Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de saída; Cout=1 mF35Figura 42Circuito utilizado para simulação de carga36Figura 43Simulação com agra simulação de carga36Figura 44Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do da saída; Cin=100 µF; Cout=47 µF;R	Figure 27 - Simulação com aumento da sensibilidade de tensão (a=100 g· k=6 V/g· f=40 Hz)	27
Ingura 20 - Simulação com aumento na frequência (a=100 g; k=1,1 V/g; f=500 Hz)28Figura 30 - Simulação com apenas um sensor (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)29Figura 31 - Simulação com 25 sensores em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 32 - Simulação com 3 piezoelétricos em série (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 33 - Simulação com 3 piezoelétricos em série (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 34 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 35 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)31Figura 36 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)31Figura 37 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)32Figura 39 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada em 50 μF32Figura 39 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de entrada; Cin=500 μF33Figura 40 - Simulação com capacitância do capacitor de saída em 100 μF35Figura 43 - Simulação com capacitância do capacitor de saída; Cout=1 mF35Figura 43 - Simulação com carga Rout = 100 kΩ36Figura 44 - Simulação com agentância do capacitôr de entrada e diminuição do da saída; Cin=100 μF; Cout=47 μF;Rout=10 kΩ37Figura 45 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do asída; Cin=100 μF; Cout=47 μF;Rout=10 kΩ37Figura 46 - Circuito usando sinal de PGood38Figura 47 - Simulação para análise	Figure 28 - Simulação com baiva frequência (a=100 g, k=0 v/g, i=40 r/g)	27
Inguna 20 - Simulação com abinento in nequencia (a - 100 kg), - 1,1 - 100 kg)20Figura 30 - Simulação com 25 sensores em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 31 - Simulação com 25 piezos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 32 - Simulação com 8 piezoelétricos em série (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 33 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 34 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).31Figura 35 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).31Figura 36 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).32Figura 37 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada em 50 μF32Figura 38 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada em 50 μF32Figura 40 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de entrada conte de saída; Cin=100 μF33Figura 41 - Simulação com capacitância do capacitor de saída em 100 μF34Figura 42 - Cincuito utilizado para simulação de carga35Figura 43 - Simulação com diminuição da carga de saída; Rout = 10 kΩ36Figura 44 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do asaída; Cin=100 μF; Cout=47 μF;Rout=10 kΩ36Figura 45 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do da saída; Cin=100 μF; Cout=47 μF;Rout=10 kΩ36Figura 46 - Cincuito usando sinal de PGood38F	Figure 20 - Simulação com sumento na frequência (a-100 g, k-1,1 v/g, i-3 $\pi/2$ ).	20 20
Ingulação25 piezos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).25Figura 31 - Simulação com 25 piezos em paralelo (a = 3 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 32 - Simulação com 8 piezoelétricos em série (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 33 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).30Figura 34 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).31Figura 35 - Simulação com 8 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).31Figura 36 - Simulação com a piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz).32Figura 37 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada em 50 μF.32Figura 38 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada em 50 μF.33Figura 40 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada em 100 μF.33Figura 41 - Simulação com capacitância do capacitor de saída em 100 μF.34Figura 42 - Circuito utilizado para simulação de carga35Figura 43 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de saída; Cout=1 mF36Figura 44 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição da saída; Cin=100 μF; Cout=47 μF;Rout=10 kΩ36Figura 45 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição da saída; Cin=100 μF; Cout=47 μF;Rout=10 kΩ36Figura 45 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição da saída; Cin=100 μF; Cout=47 μF;Rout=10 kΩ37Figura 46 - Circuito usan	Figure 20 – Simulação com admento na nequencia $(a=100 \text{ g}, k=1,1 \text{ v/g}, 1=300 \text{ Hz})$	20 20
Figura 31 - Simulação com 25 piezos em paralelo (a - 2 g, k - 6 V/g; f - 300 Hz)30Figura 32 - Simulação com 25 piezos em paralelo (a = 3 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 33 - Simulação com 3 piezoelétricos em série (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 34 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)31Figura 35 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)31Figura 36 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)32Figura 37 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada em 50 μF32Figura 38 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada dobrada; Cin=100 μF33Figura 39 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada do fon μF33Figura 40 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de saída; Cout=1 mF34Figura 42 - Circuito utilizado para simulação de carga35Figura 43 - Simulação com carga Rout = 100 kΩ36Figura 44 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do da saída; Cin=100 μF; Cout=47 μF;Rout=10 kΩ36Figura 45 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do da saída; Cin=100 μF; Cout=47 μF;Rout=10 kΩ36Figura 45 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do da saída; Cin=100 μF; Cout=47 μF;Rout=10 kΩ36Figura 45 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do da saída; Cin=100 μF; Cout=47 μF;Rout=10 kΩ37 </td <td>Figura 21 Simulação com 25 concoros om paralolo <math>(a - 2g) k = 6 V/g</math>; <math>f = 200 Hz</math></td> <td> 29 20</td>	Figura 21 Simulação com 25 concoros om paralolo $(a - 2g) k = 6 V/g$ ; $f = 200 Hz$	29 20
Figura 32 - Simulação com 25 piezos em paralelo (a - 3 g, k - 6 V/g; f = 300 Hz)	Figure 31 - Simulação com 25 sensores em paralelo (a - 2 g, k - 6 V/g, f - 200 Hz).	30
Figura 33 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)30Figura 34 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 8 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)31Figura 35 - Simulação com 8 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)31Figura 36 - Simulação com 8 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)32Figura 37 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada em 50 μF32Figura 38 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada dobrada; Cin=100 μF33Figura 39 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de entrada cin=500 μF33Figura 40 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de saída em 100 μF34Figura 42 - Circuito utilizado para simulação de carga35Figura 43 - Simulação com carga Rout = 100 kΩ36Figura 43 - Simulação com diminuição da carga de saída; Rout = 10 kΩ36Figura 45 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do da saída; Cin=100 μF; Cout=47 μF;Rout=10 kΩ37Figura 46 - Circuito usando sinal de PGood38Figura 47 - Simulação do circuito da figura 46 com o sinal PGood38Figura 48 - Simulação do circuito da figura 46 com o sinal PGood39Figura 49 - Simulação com cargeamento completo de Cin40	Figura 32 - Simulação com 2 piezos em parateio (a - 5 g, k - 6 V/g, f - 300 Hz).	30
Figura 34 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)31Figura 35 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)31Figura 36 - Simulação com 8 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)32Figura 37 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada em 50 μF32Figura 38 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada dobrada; Cin=100 μF33Figura 39 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada dobrada; Cin=100 μF34Figura 39 - Simulação com capacitância do capacitor de saída em 100 μF34Figura 40 - Simulação com capacitância do capacitor de saída em 100 μF34Figura 41 - Simulação com capacitância do capacitor de saída em 100 μF35Figura 42 - Circuito utilizado para simulação de carga35Figura 43 - Simulação com carga Rout = 100 kΩ36Figura 45 - Simulação com diminuição da carga de saída; Rout = 10 kΩ36Figura 45 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do asaída; Cin=100 μF; Cout=47 μF;Rout=10 kΩ36Figura 45 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do da saída; Cin=100 μF; Cout=47 μF;Rout=10 kΩ <td>Figura 33 - Simulação com a piezoelétricos em série a 4 grupos em paralele <math>(a - 2g, k - 6V/g, f - 300 Hz)</math></td> <td> 50</td>	Figura 33 - Simulação com a piezoelétricos em série a 4 grupos em paralele $(a - 2g, k - 6V/g, f - 300 Hz)$	50
Figura 35 - Simulação com 2 piezoeletricos em série e a grupos em paralelo (a - 2 g, k - 6 V/g, f - 500 Hz)S1Figura 36 - Simulação com 8 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)32Figura 37 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada em 50 μF32Figura 38 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada dobrada; Cin=100 μF33Figura 39 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada dobrada; Cin=500 μF33Figura 40 - Simulação com capacitância do capacitor de saída em 100 μF34Figura 41 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de saída; Cout=1 mF35Figura 42 - Circuito utilizado para simulação de carga35Figura 43 - Simulação com carga Rout = 100 kΩ36Figura 45 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do da saída; Cin=100 μF; Cout=47 μF;Rout=10 kΩ37Figura 46 - Circuito usando sinal de PGood38Figura 47 - Simulação para análise do sinal PGood38Figura 48 - Simulação para análise do sinal PGood39Figura 49 - Simulação com carregamento completo de Cin40	Figura 34 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a - 2 g, k - 6 V/g, f - 500 Hz).	51 21
Figura 36 - Simulação com a piezoeretricos em serie e 4 grupos em paratelo (a - 2 g, k - 6 V/g, 1 - 300 Hz)32Figura 37 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada em 50 μF32Figura 38 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada dobrada; Cin=100 μF33Figura 39 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de entrada; Cin=500 μF33Figura 40 - Simulação com capacitância do capacitor de saída em 100 μF34Figura 41 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de saída; Cout=1 mF35Figura 42 - Circuito utilizado para simulação de carga35Figura 43 - Simulação com carga Rout = 100 kΩ36Figura 44 - Simulação com diminuição da carga de saída; Rout = 10 kΩ36Figura 45 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do da saída; Cin=100 μF; Cout=47 μF;37Figura 46 - Circuito usando sinal de PGood38Figura 47 - Simulação para análise do sinal PGood38Figura 48 - Simulação com carregamento completo de Cin39Figura 49 - Simulação com carregamento completo de Cin40	Figura 35 - Simulação com S piezoelétricos em série e 6 grupos em paralelo (a – 2 g, k – 6 V/g, f – 500 Hz).	51 CC
Figura 37 - Simulação com capacitancia do capacitor de entrada em so μF32Figura 38 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada dobrada; Cin=100 μF33Figura 39 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de entrada; Cin=500 μF33Figura 40 - Simulação com capacitância do capacitor de saída em 100 μF34Figura 41 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de saída; Cout=1 mF35Figura 42 - Circuito utilizado para simulação de carga35Figura 43 - Simulação com carga Rout = 100 kΩ36Figura 44 - Simulação com diminuição da carga de saída; Rout = 10 kΩ36Figura 45 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do da saída; Cin=100 μF; Cout=47 μF;37Rout=10 kΩ37Figura 46 - Circuito usando sinal de PGood38Figura 47 - Simulação para análise do sinal PGood38Figura 48 - Simulação estabilizada com o sinal PGood39Figura 50 - Simulação com carregamento completo de Cin40	Figure 35 - Simulação com oppositência de conceitor de controle com $[0, w]$	52
Figura 38 - Simulação com capacitancia do capacitor de entrada dobrada; Cin=100 μF.33Figura 39 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de entrada; Cin=500 μF.33Figura 40 - Simulação com capacitância do capacitor de saída em 100 μF34Figura 41 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de saída; Cout=1 mF35Figura 42 - Circuito utilizado para simulação de carga35Figura 43 - Simulação com carga Rout = 100 kΩ36Figura 44 - Simulação com diminuição da carga de saída; Rout = 10 kΩ36Figura 45 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do da saída; Cin=100 μF; Cout=47 μF;Rout=10 kΩ37Figura 46 - Circuito usando sinal de PGood37Figura 47 - Simulação do circuito da figura 46 com o sinal PGood38Figura 49 - Simulação para análise do sinal PGood39Figura 49 - Simulação com carregamento completo de Cin40	Figura 37 - Simulação com capacitánsia do capacitor de entrada em 50 μF	32
Figura 39 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de entrada; Cin=500 $\mu$ F	Figura 38 - Simulação com capacitáncia do capacitor de entrada dobrada; Cin=100 μF	33
Figura 40 - Simulação com capacitância do capacitor de saída em 100 μF34Figura 41 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de saída; Cout=1 mF35Figura 42 - Circuito utilizado para simulação de carga35Figura 43 - Simulação com carga Rout = 100 kΩ36Figura 44 - Simulação com diminuição da carga de saída; Rout = 10 kΩ36Figura 45 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do da saída; Cin=100 μF; Cout=47 μF;37Figura 46 - Circuito usando sinal de PGood37Figura 47 - Simulação do circuito da figura 46 com o sinal PGood38Figura 48 - Simulação para análise do sinal PGood39Figura 49 - Simulação com carregamento completo de Cin40	Figura 39 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de entrada; Cin=500 µF	33
Figura 41 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de saída; Cout=1 mF35Figura 42 - Circuito utilizado para simulação de carga35Figura 43 - Simulação com carga Rout = 100 kΩ36Figura 44 - Simulação com diminuição da carga de saída; Rout = 10 kΩ36Figura 45 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do da saída; Cin=100 µF; Cout=47 µF;37Figura 45 - Circuito usando sinal de PGood37Figura 46 - Circuito usando sinal de PGood38Figura 47 - Simulação do circuito da figura 46 com o sinal PGood38Figura 48 - Simulação para análise do sinal PGood39Figura 50 - Simulação com carregamento completo de Cin40	Figura 40 - Simulação com capacitância do capacitor de saída em 100 µF	34
Figura 42 - Circuito utilizado para simulação de carga35Figura 43 - Simulação com carga Rout = 100 kΩ36Figura 44 - Simulação com diminuição da carga de saída; Rout = 10 kΩ36Figura 45 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do da saída; Cin=100 µF; Cout=47 µF;37Rout=10 kΩ37Figura 46 - Circuito usando sinal de PGood38Figura 47 - Simulação do circuito da figura 46 com o sinal PGood38Figura 48 - Simulação para análise do sinal PGood39Figura 50 - Simulação com carregamento completo de Cin40	Figura 41 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de saída; Cout=1 mF	35
Figura 43 - Simulação com carga Rout = 100 kΩ36Figura 44 - Simulação com diminuição da carga de saída; Rout = 10 kΩ36Figura 45 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do da saída; Cin=100 µF; Cout=47 µF; Rout=10 kΩ37Figura 46 - Circuito usando sinal de PGood37Figura 47 - Simulação do circuito da figura 46 com o sinal PGood38Figura 48 - Simulação para análise do sinal PGood39Figura 50 - Simulação com carregamento completo de Cin40	Figura 42 - Circuito utilizado para simulação de carga	35
Figura 44 - Simulação com diminuição da carga de saída; Rout = 10 kΩ36Figura 45 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do da saída; Cin=100 µF; Cout=47 µF;37Rout=10 kΩ37Figura 46 - Circuito usando sinal de PGood38Figura 47 - Simulação do circuito da figura 46 com o sinal PGood38Figura 48 - Simulação para análise do sinal PGood39Figura 50 - Simulação com carregamento completo de Cin40	Figura 43 - Simulação com carga Rout = 100 k $\Omega$	36
Figura 45 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do da saída; Cin=100 μF; Cout=47 μF;Rout=10 kΩ37Figura 46 - Circuito usando sinal de PGood38Figura 47 - Simulação do circuito da figura 46 com o sinal PGood39Figura 49 - Simulação estabilizada com o sinal PGood39Figura 50 - Simulação com carregamento completo de Cin	Figura 44 - Simulação com diminuição da carga de saída; Rout = 10 k $\Omega$	36
Rout=10 kΩ37Figura 46 - Circuito usando sinal de PGood38Figura 47 - Simulação do circuito da figura 46 com o sinal PGood38Figura 48 - Simulação para análise do sinal PGood39Figura 49 - Simulação estabilizada com o sinal PGood39Figura 50 - Simulação com carregamento completo de Cin40	Figura 45 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do da saída; Cin=100 µF; Cout=47	7μF;
Figura 46 - Circuito usando sinal de PGood38Figura 47 - Simulação do circuito da figura 46 com o sinal PGood38Figura 48 - Simulação para análise do sinal PGood39Figura 49 - Simulação estabilizada com o sinal PGood39Figura 50 - Simulação com carregamento completo de Cin40	Rout=10 kΩ	37
Figura 47 - Simulação do circuito da figura 46 com o sinal PGood38Figura 48 - Simulação para análise do sinal PGood39Figura 49 - Simulação estabilizada com o sinal PGood39Figura 50 - Simulação com carregamento completo de Cin40	Figura 46 - Circuito usando sinal de PGood	38
Figura 48 - Simulação para análise do sinal PGood39Figura 49 - Simulação estabilizada com o sinal PGood39Figura 50 - Simulação com carregamento completo de Cin40	Figura 47 - Simulação do circuito da figura 46 com o sinal PGood	38
Figura 49 - Simulação estabilizada com o sinal PGood	Figura 48 - Simulação para análise do sinal PGood	39
Figura 50 - Simulação com carregamento completo de Cin 40	Figura 49 - Simulação estabilizada com o sinal PGood	39
	Figura 50 - Simulação com carregamento completo de Cin	40



### Lista de Tabelas

Tabela 1 - Tabela de comparação entre supercapacitores e baterias Íon de Lítio [11]	9
Tabela 2 - Tabela com os parâmetros do piezoelétrico Minisense 100 [25]	17
Tabela 3 - Valores dos pinos D1 e D0 de acordo com a saída deseiada [29]	22
Tabela 4 - Diferenças entre os tipos 1 e 2 do LTC3588	23



## Sumário

1 Introdução	1
2 Energy Harvesting	2
2.1 O que é energy harvesting	2
2.2 Tipos de fontes de energias alternativas	2
2.2.1 Células solares fotovoltaicas	2
2.2.2 Geradores termoelétricos (TEGs)	3
2.2.3 Eletromagnéticos (RF)	4
2.2.4 Biocombustíveis (BFC)	4
2.2.5 Cinéticos (KEH)	4
2.2.6 Soluções híbridas	6
2.3 Formas de armazenamento de energia	7
2.3.1 Baterias	8
2.3.2 Supercapacitores	8
3 Piezoeletricidade e Polímero PVDF	11
3.1 Piezoeletricidade	11
3.1.1 Estrutura dos materiais	11
3.1.1.1 Materiais piezocerâmicos	12
3.1.1.2 Polímeros piezoelétricos	12
3.1.2 Grandezas	13
3.2 PVDF	15
4 Projeto de Circuito de Energy Harvesting para Filmes PVDF	16
4.1 Escolha do sensor piezoelétrico	16
4.2 Amplificadores de Carga	18
4.3 Circuito integrado de energy harvesting LTC3588	21
4.3.1 Funcionamento dos pinos do CI	21
4.3.2 Funcionamento do circuito interno do LTC3588	22
4.3.3 Escolha do Circuito Integrado	23
4.3.4 Utilização do Circuito Integrado	24
5 – Resultados	26
5.1 Variação nos valores do filme piezoelétrico	26
5.1.1 Tensão	26
5.1.2 Frequência	28
5.2 Quantidade de sensores e suas disposições	29
5.2.1 Comparação entre disposição em série e paralelo	29
5.3 Valores dos componentes	32
5.3.1 Capacitor de entrada	32
5.3.2 Capacitor de saída	34
5.4 Aplicação com Carga	35
5.4.1 Carga diretamente na saída	35
5.4.2 Carga liberada pelo sinal PGood	37
6 Conclusões	41
Referências	42



### 1 Introdução

Em grande parte da história da humanidade, ela usufruiu da energia da natureza, convertendo-a para uma forma de energia mais útil ao homem, desde a criação dos moinhos de água, do barco à vela até a construção de hidrelétricas e usinas eólicas. Mais recentemente, a humanidade evoluiu dessa colheita de energia de larga escala para o que se entende como *Energy Harvesting* (EH).

A partir do final de 2015, a tecnologia de *energy harvesting* começou a crescer de importância dentro do mercado, tendo como objetivo servir de fonte de energia para aparelhos e sensores de baixa potência [1]. Apesar de o início da explosão dessa tecnologia ter se dado em laboratórios, atualmente ela já está difundida no mercado e é encontrada em centenas de aplicações no mundo, permitindo o surgimento de novos mercados devido aos problemas que essa tecnologia começou a resolver.

Apesar de a maior parte das aplicações na atualidade estarem voltadas para energizar sensores de baixa potência dentro de um contexto de Internet das Coisas (IoT), um campo de estudo em constante evolução está olhando para o acúmulo de energia usando desses processos de colheita para poder recarregar a bateria de algum equipamento de maior potência, dessa forma aumentando a duração da bateria durante a utilização do equipamento, extremamente útil em equipamentos de uso contínuo que têm como principal problema a baixa duração de suas baterias, como os Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANTs, também conhecidos como drones), que, mesmo dentro os modelos profissionais, possuem uma limitação de tempo de voo de tipicamente 30 minutos.

Baseando-se no estudo realizado por esse campo, esse projeto tem como objetivo a colheita da energia de vibrações, utilizando de um material piezoelétrico integrado à estrutura de VANTs para poder gerar energia elétrica. Esta energia será coletada, de forma eficiente através de um circuito eletrônico, para ser enviada diretamente para a bateria, aumentando assim a duração de seu tempo de voo. O projeto tem como base o estudo dos diversos sistemas existentes de colheita e armazenamento de energia da atualidade, junto com a explicação do funcionamento do sensor piezoelétrico, em especial o PVDF. Em seguida apresenta-se uma explicação completa do que seria o circuito de *Energy Harvesting* para o caso piezoelétrico, explicando os resultados obtidos no circuito proposto.





### 2 Energy Harvesting

#### 2.1 O que é energy harvesting

*Energy Harvesting* (EH) se refere ao processo de converter pequenas quantidades de energia disponíveis no ambiente que, em princípio, seriam desperdiçadas, em energia elétrica para poder gerar energia para pequenos circuitos eletrônicos. Através desse processo é possível coletar energia de diversas fontes como luz, calor, ondas de rádio, vibrações, fogo, entre outros, energizando aparelhos de forma sustentável, aumentando o tempo de uso de diversos acessórios ou diminuindo o tamanho da bateria necessária para um bom funcionamento dos aparelhos. Exatamente por essa vantagem esse processo é muito usado em aparelhos e processos em que o tamanho da bateria é extremamente importante ou a existência de uma bateria é impraticável. Essa colheita de energia pode também ser utilizada com o intuito de otimização de alguns dispositivos que funcionam à base de baterias, a fim de estender o seu tempo de operação ou tempo entre cargas.

Diversos materiais diferentes são usados para essa coleta, cada um com sua utilidade prática e obtendo energia de um meio específico. Alguns exemplos atuais são materiais eletrostáticos, termoelétricos, eletromagnéticos e piezoelétricos, este último sendo o assunto principal deste Projeto de Graduação (figura 1). Esses transdutores, após coletar a energia no ambiente, são conectados, caso necessário, a algum circuito de conversão, que alimenta o subsistema de armazenagem de energia do circuito, como uma bateria ou um supercapacitor. A comunicação entre o circuito dos transdutores e o circuito do armazenamento de energia é gerida por uma ferramenta de gerenciamento de energia que regula e controla a energia fornecida de acordo com a necessidade.



Figura 1 - Componentes básicos de um sistema de coleta de energia [2]

O desempenho e potencial dos diferentes métodos de colheita de energia são extremamente dependentes do meio em que o material está inserido, assim como do desempenho e de certas propriedades específicas do material. Atualmente já há diversos exemplos de aplicações de *Energy Harvesting*, considerando a possibilidade de instalação de sensores em áreas remotas e de difícil acesso, como por exemplo monitores de poluição do ar, estresse de pontes, fogo florestal, corrosão de sistemas remotos e sinais vitais, além de servir para sistemas de RFID e IoT.

#### 2.2 Tipos de fontes de energias alternativas

#### 2.2.1 Células solares fotovoltaicas

As células solares fotovoltaicas são dispositivos que usam o efeito fotovoltaico para converter energia da luz diretamente em eletricidade, produzindo cargas elétricas que podem se mover livremente nos condutores. Ao longo dos anos, com o desenvolvimento da tecnologia de célula solar de película fina e com estudos de eficiência dos materiais, conseguiu-se reduzir as dimensões e massa das células solares, de forma que, atualmente, uma área de 20 cm<sup>2</sup> contendo 200 células solares é suficiente para carregar um telefone celular. Essas melhorias vêm permitindo um uso cada vez mais amplo desse método em diversos dispositivos.



Em geral, as células solares são um dos métodos de EH que têm a maior eficiência na conversão de energia, porém a mesma pode ser extremamente reduzida de acordo com o aumento da temperatura ou com uma baixa luminosidade, variando de acordo com o material escolhido.

Apesar de que, para o conhecimento comum, as células solares possam parecer muito similares entre si, existem diversos tipos de placas solares diferentes, sendo algumas mais eficazes para aplicações em arquitetura e outras mais utilizadas para objetos portáteis, como as de Perovskita, que começou com uma eficiência de 3,8 % e, atualmente, após 10 anos de desenvolvimento, está em 25,2 %. Em fevereiro de 2020, o instituto belga IMEC anunciou ter conseguido, usando células solares CIGS, chegar a uma eficiência de 25 %, enquanto se acredita no potencial de alcançar 30 %.

Para aplicações em objetos portáteis, as células fotovoltaicas podem servir como carregadores integrados em peças de roupas, acessórios e diversos equipamentos, sendo introduzidas no mercado de forma a deixar os equipamentos mais leves e eficientes. Com isso, pode haver falhas no material da célula e degradação do desempenho devido à fadiga mecânica, dependendo de sua aplicação.

#### 2.2.2 Geradores termoelétricos (TEGs)

O termo TEG vem do inglês *thermoelectric generator*, mas também existe o termo gerador de Seebeck, dado que este método converte o calor em energia elétrica utilizando o efeito Seebeck, em que é produzida uma diferença de potencial entre dois lados do gerador, quando estão, cada um, a temperaturas diferentes. Ao se esquentar um lado ao mesmo tempo em que se esfria o outro, elétrons do lado quente vão ter mais energia do que os do lado frio, assim os elétrons do lado quente viajam mais rápido do que os do lado frio e com isso o lado frio do gerador fica carregado negativamente, enquanto o lado quente fica positivo. Dessa forma, a tensão gerada pelos geradores aumenta linearmente com a diferença de temperatura entre os dois condutores, como ilustrado abaixo (figura 2). Este é o mesmo fenômeno físico no qual se baseiam os sensores de temperatura conhecidos como termopares.



Figura 2 - Representação de um modelo de um TEG [3]

Para os TEGs, considerando as aplicações típicas, a flexibilidade do material é um dos aspectos mais essenciais do dispositivo. O maior problema existente é que os materiais que tendem a apresentar um grande efeito Seebeck são frágeis.

Uma das aplicações que se pode imaginar com esse gerador é utilizar o calor do corpo humano, que é um ótimo gerador de energia mesmo em repouso, sendo que uma pequena parcela da energia emitida pelo corpo humano é suficiente para energizar pequenos dispositivos de baixo consumo de energia. Somado a isso, os TEGs têm uma geração de energia constante, proporcional à diferença entre a temperatura ambiente e do corpo humano, que costuma não ter variações bruscas. Esses dois fatores acabam dando uma vantagem desta tecnologia sobre os sistemas que requerem energia mecânica, que serão descritos mais à frente, ou sobre aqueles que requerem ambientes com forte luminosidade, como no caso das células solares.



Basicamente, dado que o corpo humano se mantém em uma temperatura aproximadamente constante de 36,5° C, o calor produzido pelo corpo em uma troca constante com o ambiente é captado pelos TEGs e convertido em eletricidade. A saída de calor varia de acordo com os locais do corpo e com as vestimentas usadas, mas como, especialmente em países frios, a troca de temperatura entre o corpo e o ambiente é algo constante, é possível utilizar os TEGS para energizar equipamentos que requerem uma fonte de energia pequena, mas constante e ininterrupta, como por exemplo aqueles para monitorar sinais vitais, alimentar equipamentos para tratar de doenças crônicas e aparelhos auditivos e diversas aplicações na área automotiva, como a utilização da energia do uso dos freios [4].

#### 2.2.3 Eletromagnéticos (RF)

*Energy Harvesters* de Radiofrequência utilizam transferência de energia sem fio e exploram a energia emitida por fontes que geram grandes campos eletromagnéticos, como sinais de TV, redes de rádio e torres de celular, sendo apropriados para aplicações que requerem um maior nível de energia. Dentre essa categoria há diversas opções com diferentes níveis de maturidade e aplicações, geralmente variando de acordo com o alcance da rede sem fio.

Os sistemas de curta distância tendem a ter uma perda de eficiência muito alta quando o transmissor e receptor são separados e não geram energia suficiente sem o alinhamento perfeito no sistema, enquanto que os sistemas de média e longa distância perdem eficiência em altas frequências, acima de 10 GHz. Como essa faixa já tem uma eficiência na conversão de energia baixa, pode não ser suficiente para alguns sensores.

Assim sendo, embora a energia de RF pareça agir como uma fonte de energia desejável, controlável, constante e confiável, ainda há espaço para avanços constantes, especialmente em relação à baixa energia fornecida. Esse tipo de EH é muito utilizado em aplicações de IoT, justamente por apresentarem de forma geral esse baixo consumo.

#### 2.2.4 Biocombustíveis (BFC)

As *Biofuel Cells*, ou Células de Biocombustíveis (BFC), são outro método de colheita de energia muito utilizado para sensores que podem ser utilizados em roupas. Uma célula de biocombustível refere-se a uma célula eletroquímica na qual a corrente é gerada por reações que ocorrem entre a espécie química que flui para a célula no ânodo e o oxidante no cátodo. As células a combustível são diferentes das baterias padrão, porque podem produzir energia contínua enquanto os reagentes estiverem presentes, dado que a corrente é gerada por reações que ocorrem entre reagentes do cátodo e do ânodo.

O tipo mais comumente utilizado é o que uma membrana separa o combustível do oxidante, permitindo apenas prótons no lado do ânodo passarem para o cátodo. Os elétrons do ânodo, por sua vez, não conseguem passar pelo cátodo, buscando um caminho alternativo e assim gerando a corrente.

A maior vantagem desse modelo é não haver necessidade de trocar as baterias, além de, para equipamentos que ficam próximos ao usuário, ser possível usar reagentes presentes no corpo humano, como por exemplo o suor, que gera dez vezes mais energia do que qualquer outro biocombustível. Devido a essa característica do suor, uma das aplicações mais comuns dessas células é em dispositivos usáveis durante o exercício.

No geral, as células biocombustíveis são muito úteis para carregar objetos com baixa potência, são biocompatíveis e com baixo custo de fabricação. Os maiores pontos de atenção desse sistema são a alta dependência da concentração no ânodo e a baixa eficiência na conversão de energia.

#### 2.2.5 Cinéticos (KEH)

Esse é um método de obtenção de energia a partir do acúmulo de energia cinética, por fenômenos naturais ou não, e da conversão desta em energia elétrica. Elas são consideradas soluções ecológicas e voltadas para sistemas de baixa potência. Normalmente, esse método pode ser classificado de acordo com os princípios físicos responsáveis pela obtenção da energia, podendo-se citar a eletromagnética, eletrostática, piezoelétrica e triboelétrica [5].

Olhando pela perspectiva da energia eletromagnética, o sistema possui transdutores eletromagnéticos que geram uma força eletromotriz em resposta a mudanças no fluxo eletromagnético. Pode-se, por exemplo, converter movimentos simples como andar, correr e pular em energia por meio desses métodos.



No caso da energia eletrostática, o método utiliza um capacitor composto de dois eletrodos, um fixo e um oscilante. Quando esse capacitor é submetido a vibrações externas, a variação na área sobreposta entre os dois eletrodos gera uma mudança na capacitância. Para compensar e voltar o sistema ao equilíbrio existe uma movimentação dos elétrons, gerando corrente e por consequência, a energia. Devido a esse processo o nível de tensão é proporcional à frequência de operação do objeto, assim, a fim de se obter maior ganho de energia elétrica, busca-se operar sempre na frequência de ressonância. A maior desvantagem desse modelo é precisar de uma tensão externa para iniciar o processo, porém essa tensão pode vir a ser providenciada por outro meio de EH, cinética ou não.

No caso do princípio piezoelétrico, o sistema utiliza materiais piezoelétricos, sejam cristais simples, cerâmicos, polímeros ou compósitos de polímeros, utilizando da deformação destes materiais para converter energia cinética em elétrica. Eles são os mais relevantes quando a aplicação envolve alta tensão, densidade de energia, capacitância e baixo amortecimento mecânico. Pode-se, por exemplo, usar esses materiais para obter energia da corrente das águas, movimentação e impacto das ondas.

Apesar de não serem amplamente utilizados, são os mais promissores de utilização em micro-sistemas, que precisam de energia entre microwatts e miliwatts. Eles possuem como vantagens o fato de serem flexíveis, permitindo diversas gamas de aplicações. A maior restrição desse sistema é que, tradicionalmente, eles produzem corrente alternada, sendo assim necessários retificadores no circuito.

Abaixo (figura 3), apresenta-se um exemplo deste método sendo usado em um relógio de pulso, que aproveita os movimentos do braço humano ao longo da rotina de quem o estiver usando, para gerar movimento na bola de aço e ela, por sua vez, choca-se com o material piezoelétrico, deformando-o e com isso gerando energia elétrica nas placas de circuito impresso. Por ainda ser um campo de estudo muito amplo e com muito potencial, este princípio de colheita de energia é a base deste Projeto de Graduação e é detalhado no Capítulo 3.



Figura 3 - Exemplo de geração de energia dentro de um relógio de pulso usado do movimento de uma bola de aço. [6]

Por fim, a colheita de energia triboelétrica gera energia por meio da fricção entre diferentes materiais, que gera cargas eletrostáticas opostas na superfície conjunta. Essa perturbação cria uma diferença de potencial elétrico que gera a corrente elétrica pela superfície de contato. Gera uma tensão alternada, que também precisa ser convertida em tensão contínua, aumentando a complexidade, sendo outros pontos negativos a confiabilidade e a durabilidade. Essa forma também provê alta densidade de energia, alta eficiência de conversão e flexibilidade. Uma aplicação prática desse modelo é na medicina, sendo possível utilizar micro movimentos mecânicos, como a pulsação arterial, desde que se tenha sensibilidade suficiente para a coleta.



#### 2.2.6 Soluções híbridas

Considerando os exemplos anteriores, é possível imaginar diversas outras aplicações em que duas ou mais soluções pudessem ser usadas em conjunto, definindo um gerador híbrido.

Em geral, os geradores híbridos têm menos aplicações que os com apenas uma fonte, porque são geralmente menos versáteis, mas são capazes de compensar as limitações causadas pela colheita de energia de uma única fonte e por isso são comumente encontrados em aplicações mais específicas. Para obter uma alta compatibilidade com várias aplicações, um bom coletor de energia híbrida deve oferecer grande flexibilidade.

Por exemplo, quando se consideram as células solares, percebe-se que não conseguem fazer uso completo dos prótons fora da sua banda de energia e isso faz com que estes sejam convertidos em calor. Como visto anteriormente, este calor pode ser aproveitado usando os TEGs, colocando um dos condutores no material em que é dissipado e outro em um material que estaria em uma temperatura mais fria, como ilustrado na figura 4. Além disso, para aumentar ainda mais a sinergia entre as duas fontes, sabe-se que um aumento de temperatura diminui a eficiência na conversão de energia das placas solares, porém a energia gerada pelos TEGs é diretamente proporcional ao aumento de temperatura. Com um sistema eficiente em termos de custo e energia, ele é desejável e econômico como fonte de energia no futuro, porém, no momento, há poucas aplicações efetivas dele no mercado. Um exemplo seria o de iluminar um LED comercial, algo que no momento não seria possível com os modelos separados.



Figura 4 - Esquemático de um sistema híbrido de células solares e TEGs [7]

Ainda falando das células solares, também há uma grande sinergia entre elas e os nano geradores triboelétricos (TENGs), ambas as formas de *Energy Harvesting* possuindo aplicações práticas nas vestimentas, sendo, portanto, a combinação de ambas em um tecido algo natural para se considerar. Com essa combinação, consegue-se captar tanto a energia do Sol, quanto a do movimento do corpo, simultaneamente. Armazenando a energia gerada em um supercapacitor, pode-se ver a estrutura com mais detalhes (figura 5).





Figura 5 - Sistema à base de fibras híbrido de células solares e nano geradores triboelétricos [7]

Por fim, pode-se também combinar dois geradores cinéticos, como o piezoelétrico e o triboelétrico. Como ambos podem gerar energia de forma efetiva usando a mobilidade do corpo humano ou de ambientes que geram energia mecânica, eles se somam de forma a gerar mais energia dentro de um mesmo sistema. Uma das aplicações atuais desse método é o de gerar energia para telefones celulares a partir de vibrações manuais.

#### 2.3 Formas de armazenamento de energia

Atualmente já existem diversas opções de armazenamento de energia e diversas outras formas estão surgindo ao redor do mundo, com o cenário atual, em que há uma crescente necessidade do setor de armazenamento de energia, respondendo às demandas mais específicas e gerando maiores inovações nessa tecnologia.

Os sistemas de armazenamento são usados em diversos tipos de aplicações, como, por exemplo, gerenciamento de potência, balanceamento de carga e backup para gerenciamento de queda de energia. Suas aplicações podem exigir desde respostas extremamente rápidas até de longa duração e, portanto, existem diferentes tipos de sistemas de armazenamento que atendem a diferentes tipos de demandas, que são: baterias, supercapacitores, sistemas térmicos, sistemas mecânicos, bombas hídricas e hidrogênio [8].

As baterias são sistemas eletroquímicos e são as formas mais comuns e conhecidas de armazenamento de energia, podendo ser compostas por uma ou mais células, geralmente de íon de lítio e chumboácido, mas também podendo ser de níquel-cádmio, sódio-enxofre e zinco-ar.

Os supercapacitores também são encontrados na mesma categoria de sistemas eletroquímicos da bateria, mas têm uma aplicação mais voltada para uma resposta bem mais rápida. Ambas as duas formas serão vistas de forma mais aprofundada abaixo.

Os sistemas de armazenamento térmico, em essencial, envolvem a captura e liberação do calor ou frio em um sólido, líquido ou ar, potencialmente envolvendo a troca de estado, possuindo uma gama bem variada de aplicações, já que podem ser de curta ou longa duração e centralizadas ou não [9]. Algumas formas mais conhecidas desse armazenamento usam sal fundido, ar líquido[10] e nitrogênio líquido.

Usando como exemplo o sal fundido, o mesmo é utilizado por ter um alto ponto de ebulição, baixa viscosidade, baixa pressão de vapor e alta capacidade de calor volumétrico. Uma maior capacidade térmica corresponde a um volume menor de tanque de armazenamento. O sal é armazenado em um recipiente isolante enquanto é aquecido e, quando a energia é necessária, é bombeado para um gerador de vapor que ferve água, gira uma turbina e gera eletricidade.



Os sistemas mecânicos são os mais simples, usando a força cinética da rotação ou gravidade para armazenar energia. Geralmente utilizam turbinas, compressores ou outras máquinas que permitem armazenar energia. Um uso bem comum desse tipo de armazenamento de forma a se aproveitar da aceleração da gravidade é por meio de bombas hídricas. Essas são compostas de sistemas com dois grandes reservatórios de água em diferentes alturas, em que a água dentro do reservatório com altura superior é a que serve como armazenamento de energia, que é liberada quando a água do reservatório superior é enviada para o reservatório.

Por fim, o armazenamento com hidrogênio é feito utilizando a energia elétrica para alimentar a eletrólise dentro de tanques de água. De lá, essa energia potencial armazenada na forma de H2 pode ser reconvertida em energia elétrica, usada para aplicações no transporte.

A escolha do correto sistema de armazenamento depende de algumas características desejadas para o sistema elétrico, como carga, descarga, capacidade de armazenamento, escalabilidade, custo e vida útil, com cada diferente aplicação tendo seu sistema ideal, dependendo dessas características.

#### 2.3.1 Baterias

As baterias dependem apenas de reações químicas entre seus dois terminais, um positivo e outro negativo, ambos submergidos em um meio eletrolítico e separados de forma que apenas os íons passem. Durante a carga e recarga da bateria os íons tendem a passar do anodo para o cátodo, como ilustrado na figura 6. Durante esse processo a bateria tende a esquentar, expandir e depois contrair. Todo esse processo gera uma degradação gradual da bateria, resultando na diminuição da vida útil da bateria.



## **BATERIA LÍTIO-ÍON**

FONTE: Let's Talk Science



As baterias acabam sendo usadas para aplicações de densidades de energia muito maiores, onde o aparelho precisa funcionar por longos períodos em uma única carga. Elas também acabam sendo muito úteis em aplicações onde o armazenamento por longos períodos é importante. Atualmente, nas grandes cidades, há baterias que são usadas como sistema de armazenamento de energia em casas, para utilizar essa energia armazenada em momentos de pico de energia, evitando que as pessoas paguem um valor premium para utilizar a energia elétrica da concessionária.

Mesmo amplamente utilizada, a bateria ainda possui algumas limitações bem críticas, como a pouca resistência a impactos físicos [12], a sensibilidade a fontes externas de externo, a sobrecarga e questões ambientais como seu descarte.

#### 2.3.2 Supercapacitores

Os supercapacitores, também chamados de ultracapacitores, são, no geral, capacitores com alta capacidade, não dependendo de reações químicas e armazenando energia eletroestática na forma de carga elétrica.



São considerados o meio caminho entre as baterias e os capacitores, dado que apresentam alta capacitância e baixo limite de tensão se comparados aos capacitores mais comuns no mercado. Eles possuem dielétricos ou isolantes entre suas placas para separar as cargas positivas e negativas que se acumulam em cada uma, como ilustrado na figura 7. Essa separação permite que esses capacitores guardem energia e depois a liberem rapidamente.



Figura 7- Esquemático de um supercapacitor [11]

Na prática, os supercapacitores se carregam muito mais rápido que as baterias e armazenam muito mais energia do que os capacitores eletrolíticos. Possuem também uma vida útil menor que os capacitores eletrolíticos, mas maior quando comparados às baterias. Para se ter uma ideia da diferença, enquanto os capacitores eletrolíticos são considerados tendo número ilimitado de ciclos de carga, um supercapacitor tem de 100 mil a 1 milhão de ciclos, enquanto que as baterias teriam até 10 mil ciclos, ou seja, seriam pelo menos 10 vezes piores que os supercapacitores nesse quesito.

No geral, os supercapacitores têm dois grandes benefícios, sendo o primeiro deles conseguir balancear o armazenamento de energia devido à sua velocidade de carga que, em alguns casos, é 1000 vezes mais rápida do que a de uma bateria de similar capacidade. Além disso, os supercapacitores conseguem operar em uma faixa de temperaturas maior do que as baterias [13], de forma que não são comuns tantos problemas com superaquecimento. Pode-se ver grande parte dessas características na Tabela 1.

Característica	Supercapacitor	Lítio-ion
Tempo de Carga	1-10 segundos	10-60 minutos
Ciclo de Vida	1 milhão ou 30 000 h	500 ciclos
Tensão da Célula	2,3 V a 2,75 V	3,6 V a 3,7 V
Energia Específica (Wh / kg)	5	100 - 200
Potência Específica (W / kg)	Até 10 000	1 000 - 3 000
Custo por Wh	US\$ 20,00	US \$0,50 - \$1,00
Tempo de vida (em carros)	10 a 15 anos	5 a 10 anos
Temperatura de carga	-40 a 65 ºC (-40 a 149 ºF)	0 a 45 ºC (32 a 113 ºF)
Temperatura de descarga	-40 a 65 ºC (-40 a 149 ºF)	-20 a 60 ºC (-4 a 140 ºF)

		~ .		· · · · · ·	/	
Tabela 1 -	· Tabela de	comparação entre	supercapacitores	e baterias Io	n de Litio	11



Por outro lado, a própria natureza dos supercapacitores faz com que eles tenham duas principais características que podem influenciar em sua escolha para uma aplicação. Primeiramente, eles chegam a perder até 20 % da carga por dia devido a sua taxa de autodescarga, não sendo muito úteis para armazenamento de energia no longo prazo. Além disso, enquanto as baterias conseguem fornecer uma tensão praticamente constante, a saída de um supercapacitor declina linearmente com a carga, dessa forma não é uma boa alternativa para uma fonte constante de energia.

Devido a essas características, os supercapacitores são extremamente úteis para aplicações que esperam frequentes ciclos de carga e descarga, temperaturas de operação extremas ou descarga rápida de uma enorme quantidade de energia. Algumas das aplicações no horizonte para supercapacitores são, por exemplo, o aumento do tempo de operação de certas aplicações, como os ônibus híbridos, que já são usados na China para aumentar a aceleração e criação de novos sistemas de estabilização de potência, para buffers e sistemas de backup.



### 3 Piezoeletricidade e Polímero PVDF

#### 3.1 Piezoeletricidade

Piezoeletricidade é a capacidade de materiais gerarem tensão elétrica a partir de um estímulo mecânico e, ao estímulo de uma tensão elétrica, sofrerem alteração mecânica, sendo este segundo fenômeno também conhecido como efeito piezoelétrico inverso. O efeito foi descoberto por Pierre e Jacques Curie em 1880 a partir de estudos com cristais de quartzo [14].

#### 3.1.1 Estrutura dos materiais

Os materiais piezoelétricos possuem em grande maioria uma formação cristalina em escala microscópica e essa, por sua vez, não é da classe centrossimétrica, o que significa dizer que possuem um íon descentralizado dentro de suas formações, como se pode observar na estrutura molecular do mineral perovskita (CaTiO3) na figura 8.



Figura 8 - Modelo da estrutura atômica do cristal piezoelétrico perovskita [15]

Esse íon descentralizado permite que essas formações sejam levemente polarizadas em uma direção, tendo assim uma parte da estrutura mais carregada negativamente do que a outra.

Alguns materiais já exibem o efeito piezoelétrico de forma inerte, como ocorre com o quartzo. Entretanto, outros materiais podem ser produzidos artificialmente a fim de buscar uma otimização do efeito e do material para determinadas aplicações.

Esses materiais artificiais são geralmente produzidos a fim de se obter uma estrutura que possa ser polarizável, já que sua microestrutura apresenta essa característica. Esses materiais apresentam uma polarização aleatória quando produzidos, mas, devido ao efeito da ferroeletricidade, têm a capacidade de reorganizar os cristais dentro de sua microestrutura a partir de uma exposição a um elevado campo elétrico, a fim de forçar seus cristais a se polarizar em um mesmo sentido.

Essa etapa de polarização da microestrutura dentro do processo de fabricação de alguns desses cristais é conhecida como Poling. Esta consiste em submeter o material a altos campos elétricos e temperatura, a fim de orientar a polarização das partes dessa estrutura cristalina o máximo possível em um só sentido.

Durante a exposição ao campo elétrico, os cristais podem ficar completamente polarizados, entretanto, após o fim da etapa de polarização estes se reorganizam internamente se orientando praticamente no mesmo sentido. Pode-se ver essa mudança de forma mais clara na figura 9.

## Projeto de Graduação





Figura 9 - Polaridade dos microcristais antes, durante e depois da Polarização [15]

Essa orientação é necessária para a observação do efeito piezoelétrico no material, pois, com os cristais orientados em uma mesma direção, os pequenos campos elétricos desses são somados quando há uma deformação mecânica no material. Caso essa microestrutura não estivesse polarizada, seu direcionamento seria aleatório e com isso o campo elétrico total seria próximo de nulo, já que haveria um cancelamento de campos devido a esses cristais polarizados em sentidos opostos.

Mesmo após o processo de polarização do material, caso esse seja exposto a um elevado campo elétrico novamente, seus cristais podem se reorganizar, aumentando ou diminuindo a capacidade piezoelétrica desse. Um efeito semelhante pode ocorrer caso este ultrapasse a temperatura de Curie do material, uma grandeza que representa a temperatura a partir da qual esse material começa a perder sua polarização e consequentemente suas habilidades piezoelétricas.

#### 3.1.1.1 Materiais piezocerâmicos

Por conta dos cristais piezoelétricos possuírem um processo de fabricação demorado e caro, o uso de materiais piezocerâmicos é mais visto em certas áreas de aplicação [16]. Esses não possuem algumas das vantagens vistas nos cristais, entretanto, podem possuir uma fabricação mais rápida, barata e, como são feitos industrialmente, podem possuir geometrias diversas, levando em consideração as aplicações previstas para esse.

Os materiais piezocerâmicos, por serem ferroelétricos, precisam ser polarizados antes de apresentarem o efeito piezoelétrico. Isto pode ser uma vantagem, dependendo da aplicação, pelo fato de se poder polarizar esse tipo de material em qualquer sentido desejado a fim de buscar um melhor aproveitamento dessa sua característica.

Por conta de não serem cristais, os piezocerâmicos apresentam menor temperatura de Curie e podem apresentar uma baixa estabilidade de suas propriedades piezoelétricas em função de sua temperatura, que é tratada pelo termo estabilidade térmica, o que torna os cristais decisivos em certas aplicações.

O mineral Perovskita, abordado anteriormente, se encaixa como um material piezocerâmico. Outro material dessa categoria que tem sido bastante utilizado é o titanato zirconato de chumbo (PZT), que pode ser encontrado com diferentes características a partir da sua fabricação.

#### 3.1.1.2 Polímeros piezoelétricos

Os polímeros com efeito piezoelétrico foram inicialmente estudados por Kawai no final da década de 1960 [17]. Esses podem ser divididos em duas grandes categorias: Amorfos e Semicristalinos, que são a maioria dos polímeros com essa característica.

Os polímeros amorfos geralmente apresentam menor resposta piezoelétrica quando comparados com os semicristalinos. Isso ocorre pelo fato de que, para que haja alguma resposta piezoelétrica nos polímeros amorfos, é necessária a presença de fortes moléculas dipolares dentro da estrutura do polímero, enquanto a estrutura semicristalina pode ser polarizada de forma semelhante à que ocorre com os piezocerâmicos.

Uma das grandes vantagens da utilização de materiais poliméricos para aplicações piezoelétricas é que esses podem ser mais facilmente fabricados em forma de filme fino, o que facilita a utilização desses materiais em diversas outras aplicações.

O material dessa categoria mais utilizado é o fluoreto de polivinilideno (PVDF), que será abordado mais à frente em mais detalhes. Outros são o Nylon-11, cloreto de polivinilideno (PVDCN) e o policloreto de vinila (PVC) que, apesar de ser bastante utilizado na indústria, na grande maioria de suas aplicações não se considera o aproveitamento desse efeito, por apresentar baixa propriedade piezoelétrica comparado a outros polímeros.



Um grande desafio para uma maior utilização dos polímeros piezoelétricos é seu menor coeficiente piezoelétrico quando comparado com os piezocerâmicos. Dessa forma, diversos estudos são realizados a fim de se entender melhores formas de aumentar a resposta piezoelétrica desses materiais. Técnicas desenvolvidas incluem: Co-Polimerização, Aditivos e Nanoestruturação [17].

#### 3.1.2 Grandezas

Para entender o funcionamento dos dispositivos piezoelétricos e mais à frente suas possíveis aplicações em *Energy Harvesting*, deve-se ter em mente as principais grandezas presentes dentro do efeito piezoelétrico e como um material é capaz de gerar energia elétrica a partir de tensão mecânica.

Para entender tais grandezas, inicia-se pelas seguintes equações com as relações lineares da piezoeletricidade [18]:

$$S_p = s_{pq}^E T_q + d_{kp} E_k \tag{1}$$

$$D_i = d_{iq}T_q + \varepsilon_{ik}^T E_k$$
(2)

Onde S é a deformação em uma direção,  $s^{\epsilon}$  é a conformidade elétrica em um campo elétrico constante, T é a tensão mecânica em uma direção, d é a constante piezoelétrica, E é o campo elétrico em uma direção, D é a polarização elétrica e  $\epsilon$  é a constante dielétrica a uma tensão mecânica constante.

Outro fator importante para realizar os cálculos dentro do efeito piezoelétrico é entender como se observam as diferentes formas e direções de aplicação de forças, tendo em vista o eixo em que o material foi polarizado. Os modos são diversos, já que existem diferentes formas de se polarizar diferentes formatos de materiais e com isso aplicar diferentes perfis de força nesses e por isso não cabem ser abordados aqui em sua total abrangência, entretanto vale expor dois dos modos mais estudados, o modo 3-3 e o modo 3-1. O primeiro se configura como uma força de tração ou compressão no mesmo eixo de polarização do material, o eixo 3, com isso é observada uma tensão entre as duas faces ao longo desta mesma direção (figura 10b). Esse modo também é conhecido como *thickness mode*. Já no modo 3-1 a força é aplicada ao longo do próximo eixo a partir do eixo de polarização, ou seja, no eixo 1 e com isso é observada uma diferença de potencial entre as duas faces de semesmo eixo de compressão ou expansão (figura 10a).



Figura 10 - Diferentes Modos de atuação de um piezoelétrico [19]



Este projeto é baseado em filmes de PVDF, com geometria bidimensional. Com isso, será observada a tensão majoritariamente em um só eixo, arbitrado como eixo X (figura 11). Assume-se que o material está polarizado também no eixo X, ou seja, atuando no modo 3-3 e com isso será observada uma tensão elétrica ao longo do mesmo.



Figura 11 - Modo 3-3 de atuação de um piezoelétrico [18]

Utilizando das equações (1) e (2) para descrever o caso acima, tem-se a polarização do material e a força aplicada, sendo possível definir as seguintes equações representando essa configuração:

$$S_{3} = s_{33}^{E} T_{3} + d_{33} E_{3}$$
(3)

$$D_{3} = d_{33}T_{3} + \varepsilon_{33}^{T}E_{3}$$
(4)

Na Figura 11 é observada a aplicação dessa força um potencial elétrico no eixo de polarização do material.

Por meios de simplificação, a tensão gerada a partir de uma aceleração aplicada ao material será considerada como diretamente proporcional à deformação no piezoelétrico, que por sua vez pode ser modelada como uma função da frequência de oscilação e da aceleração. Com isso pode-se modelar a tensão de saída como uma função dessa deformação e de um fator de conversão K.

$$V = K.s, onde \tag{5}$$

$$s = g(f.a) \tag{6}$$

Esse modelo será utilizado para as simulações em LTSpice mais à frente no trabalho e, apesar de ser uma simplificação, representa o sinal gerado pelo piezoelétrico suficientemente bem para que seja possível discorrer sobre as necessidades de amplificação de carga e as características do circuito a ser implementado para a colheita de energia.



#### 3.2 PVDF

Dentre os polímeros piezoelétricos mais utilizados estão o titanato zirconato de chumbo (PZT) e outras variações desse material, polivinilideno (PVDF) e alguns polímeros compostos com o próprio PVDF, como o PVDF-TrFE. Esses polímeros apresentam suas peculiaridades em relação aos outros tipos de materiais piezoelétricos e também entre si.

Como o intuito do projeto é utilizar filmes piezoelétricos, o PVDF se encontra como a melhor opção, por ser mais acessível com as características desejadas e também por apresentar evidentes qualidades piezoelétricas.

Os filmes PVDF são bastante versáteis e geralmente atuam em uma faixa entre 1 Hz e 100 kHz mas, dependendo do seu processo de fabricação, pode alcançar faixas mais específicas de atuação.

O mesmo pode ser encontrado quanto às suas características de tensão. Existem modelos de PVDF que podem gerar altos valores de tensão como os 630 V de tensão em aberto gerados por um modelo da Measurement Specialties [20] quando aplicada uma deformação de apenas 1 %. Outros, no entanto, não chegam a um valor tão alto de tensão por baixas deformações ou devido a diferentes processos de fabricação. Esses modelos com menor tensão podem atuar na faixa de mV e até mesmo V e, por isso, os dispositivos de EH que utilizam esses filmes podem fazer o uso de algum amplificador dependendo de sua funcionalidade.



Figura 12 - Filme PVDF da empresa Measurement Specialties [20]

O PVDF é um material bastante utilizado para aplicações com a utilização do efeito piezoelétrico e é encontrado em muitas dessas como filme (figura 12), apresentando diversas características que diferenciam de uma aplicação para a outra, como o formato, espessura e organização de suas camadas internas, e essas são características fundamentais para sua geração de energia para os dispositivos de EH. Tomando a espessura como exemplo, os filmes comerciais podem ser da escala de m, entretanto, determinados modelos podem apresentar um filme mais espesso e consequentemente com maior tensão, caso camadas mais finas sejam empilhadas com sua tensão sendo somada, gerando dessa forma uma maior tensão.

Além de aplicações em EH, os filmes de PVDF podem ser encontrados em dispositivos de áudio. Um exemplo dessa aplicação é um dispositivo conhecido como captador de som que, ao receber ondas sonoras, transforma essas em pulsos elétricos que podem ser utilizados em outros dispositivos, como acontece com violões elétricos (Figura 13).



Figura 13 - Exemplo comercial de um captador de som piezoelétrico [21]



### 4 Projeto de Circuito de Energy Harvesting para Filmes PVDF

Nesta pesquisa, como já mencionado anteriormente, serão utilizados filmes piezoelétricos para a colheita de energia em sistemas de EH, mais especificamente filmes de PVDF.

Já foram abordadas formas de EH, os possíveis armazenamentos dessa coleta de energia e os materiais que realizam essa conversão. Entretanto, ainda é necessário um sistema de amplificação e retificação de carga, visto que o filme piezoelétrico escolhido não tem uma saída elétrica apropriada para o armazenamento direto.

Serão apresentadas duas possíveis topologias de amplificação de carga e suas principais vantagens e desvantagens quanto a essa e outras aplicações. A principal diferença entre essas topologias é o fato de uma ser ativa e outra passiva, ou seja, a primeira requer uma fonte de alimentação, o que pode não ser vantajoso quando o objetivo é a colheita de energia, enquanto não é necessária essa alimentação para a segunda, sendo a um olhar superficial mais adequada ao sistema.

Será também apresentado um circuito integrado capaz de realizar essa coleta de forma mais eficiente e sem maiores complicações. Como o intuito deste projeto não é a elaboração de um circuito para tal e sim sua utilização e resultados obtidos do processo, será apresentado o LTC3588, circuito integrado próprio para EH com sensores piezoelétricos.

#### 4.1 Escolha do sensor piezoelétrico

Em altas e baixas frequências o sensor piezoelétrico se comporta como um capacitor, apresentando ressonância em frequências intermediárias. No geral, na maioria das aplicações o sensor será usado nas frequências abaixo da ressonância. Como a impedância do sensor normalmente é muito alta, com baixo valor de capacitância e elevada resistência de perda, ele costuma vir acompanhado do uso de amplificadores especiais como os eletrômeros ou amplificadores de carga.

O modelo que melhor representa o comportamento de um sensor piezoelétrico é visto na figura 14, correspondendo a uma fonte de corrente em paralelo a um resistor e um capacitor (Fig. 14a). Porém, existe uma forma mais intuitiva de representação obtida transformando o modelo Norton no de Thevenin, colocando uma fonte de tensão em série com o capacitor e o resistor (Fig. 14b).



Figura 14 - Modelos Simplificados de Piezoelétricos [22]

Dentre os 3 modelos de sensores piezoelétricos analisados (LDT0-028K [23], FDT1-028K [24] e LDTC-Minisense 100), o julgado como o melhor para a aplicação é o Minisense 100 devido a algumas vantagens presentes em relação aos outros dois modelos, em especial o detalhamento de informações em seu datasheet vistas na tabela 2, sua alta sensibilidade de tensão de 1,1 V/g fora da ressonância e sua capacidade de atuar como um capacitor ativo, o que permite modelá-lo como uma fonte de tensão ideal, retirando a resistência Rp vista na figura 14.



Parâmetros	Valor	Unidade
Sensibilidade da Tensão	1,1	V/g
Sensibilidade de Carga	260	pC/g
Frequência de Ressonância	75	Hz
Sensibilidade da Tensão em Ressonância	6	V/g
Limite Superior de Frequência (+3dB)	42	Hz
Linearidade	+/- 1	%
Capacitância	244	pF
Fator de Dissipação	0,018	-
Massa Inercial	0,3	gramas

Tabela 2 - Tabela com os parâmetros do piezoelétrico Minisense 100 [25]

\* 1 g = 9,8 m/s2

Dessa forma, utilizando o modelo ideal de um piezoelétrico como fonte de tensão e considerando que a resistência interna do sensor utilizado é nula e o capacitor possui um valor de 244 pF, é possível modelar o circuito do sensor piezoelétrico como na figura 15.



Figura 15 - Modelo de piezoelétrico utilizado no projeto [25]



Os parâmetros de entrada no circuito, que geram as senoides apresentadas na figura 16, são os valores mais susceptíveis a alterações de acordo com testes futuros. Basicamente, com os parâmetros que podem ser observados na figura 15, o circuito em questão opera sob uma frequência de 40 Hz, com uma aceleração de 2g, o que daria uma tensão de pico a pico de 2,2 V (2g \* 1,1 V/g). Porém, por serem valores estimados, eles podem sofrer mudanças significativas no futuro, alterando os resultados vistos no capítulo 5.

Em geral, as alterações seriam nos parâmetros de entrada do circuito, por exemplo no parâmetro que representa a aceleração aplicada nos piezoelétricos, que pode vir a ser maior do que o estimado, especialmente ao se falar de drones de corrida ou militares. Além disso, outro parâmetro que pode vir a sofrer grandes alterações é a frequência de trabalho esperada pois, como não foram feitos testes físicos do modelo, os valores obtidos de frequência podem ser diferentes da estimada na simulação, o que pode afetar os resultados finais, já que uma frequência acima de 42 Hz para este sensor representa um aumento da sensibilidade de tensão, em especial ao se atingirem faixas próximas da frequência de ressonância (75 Hz), o que geraria uma tensão de saída do piezo maior do que a esperada, dado que sua sensibilidade aumenta de 1,1 V/g para mais de 5 V/g, podendo gerar uma tensão da magnitude de 10 V assumindo os 2g de aceleração.



Figura 16 - Resultado do modelo de piezoelétrico realizado no LTSpice.

#### 4.2 Amplificadores de Carga

Amplificadores de carga são circuitos em que a impedância de entrada é capacitiva e que oferecem uma impedância extremamente elevada para baixas frequências. Eles são responsáveis por tratar o sinal recebido a fim de obter um sinal com menor impedância e de uma utilização mais simples em outros circuitos, por isso são muito utilizados em circuitos com sensores capacitivos e piezoelétricos.

Seu nome, amplificador de carga, vem do fato de que as variações de carga na entrada são transformadas em tensão em sua saída [22]. Sua configuração consiste em um amplificador com um capacitor de realimentação, ele sendo o único responsável pelo ganho, não dependendo da capacitância do sensor ou dos cabos aos quais estão conectados.

A ideia desse circuito é muito semelhante com a utilização de um amplificador de transimpedância [26], porém com um capacitor na realimentação, no lugar do resistor. No caso do amplificador de transimpedância, a corrente é multiplicada pela resistência de realimentação, convertendo-a em tensão e aumentando a amplitude. Algo semelhante acontece em um amplificador de carga, pois este utiliza a capacitância para criar um aumento de tensão proporcional ao acúmulo da corrente ao longo do tempo, funcionando, portanto, como um circuito integrador.



Em um sensor piezoelétrico, por exemplo, a quantidade que é mensurada é a carga e o sinal de entrada seria uma corrente proporcional à carga. Ao ser integrada a corrente utilizando esse circuito de carga, obtém-se a carga.

Contudo, um circuito apenas com uma capacitância de feedback não é prático, já que o capacitor irá carregar e causar o amplificador a saturar [27]. Dessa forma precisa-se de uma resistência, criando um caminho de descarga, em paralelo ao capacitor.

Além disso, antes de o sinal do piezo ser enviado para o amplificador de carga, como o principal intuito do sistema de EH é a maior colheita de energia possível, é necessário que o sinal gerado seja retificado para que seus picos não se cancelem quando direcionados ao sistema de amplificação de carga. Dessa forma, utiliza-se um retificador de onda completa, como é possível ver na figura 17, com o sinal de saída da ponte apresentado na figura 18.



Figura 17 - Retificador de onda completa utilizado para evitar o cancelamento de sinais do piezoelétrico.



Figura 18 - Resultado do modelo de retificador realizado no LTSpice.

Após a retificação do sinal do sensor piezoelétrico, é possível a amplificação desse por meio de um amplificador de carga. Nesse quesito, deve ser feita uma escolha quanto ao tipo de amplificador de carga a ser utilizado, quanto ao consumo ou não de energia para fazer essa amplificação. Os amplificadores que não necessitam de uma alimentação externa para realizar tal processo são chamados de Amplificadores Passivos, enquanto os que necessitam de uma fonte de energia externa e consequentemente, possuem um maior consumo de energia, são chamados de Amplificadores Ativos.



Foram realizados estudos em ambas as topologias para se entender as vantagens e desvantagens de cada uma. Entretanto, como no mercado já existem circuitos integrados com esse propósito, optou-se pela utilização desses, já que com isso existe uma maior garantia de confiabilidade e eficiência, que não seria possível alcançar com modelos simples de amplificadores.

Os Amplificadores Passivos partem do princípio de reduzir a impedância do sinal por meio de capacitores e com isso tornar viável a utilização do sinal gerado. Esses amplificadores também são capazes de reduzir a tensão de entrada com a utilização de mais capacitores em série, visto que a tensão será dividida entre eles, como ilustrado na figura 19.



Figura 19 - Amplificador de Carga Passivo com redução de tensão [20]

Com o carregamento em cada um desses capacitores, é necessária uma reorganização desses a fim de obter um circuito capaz de abastecer uma carga. Nessa etapa é necessário que os capacitores em paralelo supram a carga quando necessário, necessitando de um chaveamento complexo nos polos dos capacitores para tornar viável esse tipo de amplificador, como mostrado na Fig. 20.



Figura 20 - Amplificador de Carga Passivo abastecendo uma carga [20]

Já os amplificadores Ativos são encontrados em diferentes modelos, entretanto os mais simples possuem uma topologia que também é utilizada para filtros de frequência. A topologia mais conhecida é também utilizada como um filtro passa-baixa em muitas aplicações como mostrado na figura 21.



Figura 21 - Modelo de Amplificador Ativo com o AmpOp AD549



O modelo AD549 apresenta um ganho de aproximadamente -0,45 V/V e converte o sinal de entrada em um sinal de baixa impedância a partir do AmpOp AD549, de baixo consumo e próprio para utilização em sinais de alta impedância. Um ponto importante a ser destacado é que existe uma limitação do sinal diferencial de entrada a ±20 V, ou seja, caso o terminal V\_piezo\_retificado forneça uma tensão maior em módulo que 20 V, esse sinal será limitado.

Um ponto interessante a ser abordado sobre essa topologia é que é possível alterar o ganho alterando principalmente a relação entre os valores de R e Rf, mas essa mudança também pode interferir na frequência de corte do filtro. Por isso é necessário um entendimento de que, além de ser um amplificador de carga, esse circuito também é uma topologia de filtro e precisa ser ajustada de acordo com sua aplicação.

Com as explicações de dificuldades da modelagem de circuitos de Amplificadores de Carga e suas diferenças, vantagens e desvantagens, foi optado por trabalhar com o circuito integrado LTC3588 apresentado a seguir, que possui o propósito de transformar o sinal de alta impedância e de tensão extremamente variável do piezoelétrico em uma saída de baixa impedância e tensão praticamente constante.

#### 4.3 Circuito integrado de energy harvesting LTC3588

Uma possibilidade mais confiável, já testada no mercado e de fácil acesso, é um circuito integrado (CI) para gerenciamento de energia chamado LTC3588. Esse CI é um retificador de onda completa de baixa perda com um conversor de alta eficiência, funcionando como uma solução completa de colheita de energia otimizada para fontes de energia com alta impedância de saída, que é o caso quando se trata do PVDF.

Esse circuito tem características que permitem com que o conversor buck acumule carga em um capacitor de entrada e transfere parte dessa energia acumulada para a saída, que pode ser dada em quatro tensões diferentes: 1,8 V, 2,5 V, 3,3 V e 3,6 V para o modelo LTC3588-1 [28]; 3,45 V, 4,1 V, 4,5 V, e 5,0V para o modelo LTC35880-2, todos com a possibilidade de uma corrente contínua de saída de, no máximo, 100 mA.

#### 4.3.1 Funcionamento dos pinos do CI

Antes da explicação do circuito interno do LTC3588, deve-se entender os pinos que ele possui e a utilidade de cada um dentro do planejamento. A figura 22 mostra uma representação da configuração dos pinos do CI.



Figura 22 - Pinagem do LTC3588-2[29]

- PZ1: Entrada CA do elemento piezoelétrico, é onde se coloca um dos polos do sensor piezoelétrico.
- PZ2: Segunda entrada CA para o elemento piezoelétrico, usada juntamente à entrada 1 com o outro polo do sensor piezoelétrico.
- Vin: Tensão de entrada retificada. Funciona como fonte de energia para o BUCK.
- SW: Pino conectado ao conversor buck. É necessário conectar um indutor de no mínimo 22 μH ou maior entre esse pino e o Vout.
- CAP: Referência interna para o Vin, servindo de gate para o PMOS switch do buck. Um capacitor de 1 μF deve ser conectado entre o CAP e o Vin, e esse pino não deve ser usado para outro circuito.



- Vout: Pino com a tensão de saída do circuito.
- Vin2: Tensão baixa interna que serve como *gate* para o *buck* NMOS *switch*. Essa entrada também serve como tensão para os pinos D0 e D1, caso seja necessário manter esses pinos em high.
- Pgood: Um campo de lógica que representa quando a tensão Vout está acima de 92 % da tensão que foi selecionada pelos pinos D0 e D1.
- D0: Pino do primeiro bit da escolha da tensão.
- D1: Pino do segundo bit da escolha da tensão.

Utilizando os dois pinos D1 e D0, pode ser decidido qual será a tensão de saída desejada a partir das definições de quais os pinos estão em high ou em low.

		LTC3588-1		L	LTC3588-2	
D1	D0	Vout	Ivout (Corrente Quiescente)	Vout	Ivout (Corrente Quiescente)	
0	0	1,8 V	44 nA	3,45 V	86 nA	
0	1	2,5 V	62 nA	4,1 V	101 nA	
1	0	3,3 V	81 nA	4,5 V	111 nA	
1	1	3,6 V	89 nA	5,0 V	125 nA	

Tabela 3 - Valores dos pinos D1 e D0 de acordo com a saída desejada [29]

#### 4.3.2 Funcionamento do circuito interno do LTC3588

Com a pinagem explicada, parte-se para o entendimento do funcionamento do circuito de forma que seja possível entender as duas possíveis aplicações propostas posteriormente relacionadas a esse componente em EH de sensores piezoelétricos. O circuito integrado pode ser resumido como na figura 23. Esse é composto de subsistemas eletrônicos a fim de compor uma aplicação mais eficiente e abranger mais casos de uso.



Figura 23 - Circuito interno do LTC3588-2 [29]



Primeiramente, logo nos pinos de entrada do piezoelétrico PZ1 e PZ2, observa-se um retificador como o apresentado anteriormente para adequar o sinal gerado para amplificadores de carga. A queda de tensão desse retificador é da ordem de 400 mV e a corrente máxima é da ordem de 50 mA [29].

O componente UVLO (Undervoltage Lockout ou Bloqueio de Baixa Tensão) é responsável por permitir o início de ciclos no conversor buck nos casos em que a tensão de entrada atingir um nível de operação determinado. Caso o nível da tensão de operação não seja atingido, esse sistema desabilita o conversor buck e o circuito entra em modo de baixa tensão, em que é consumida uma corrente quiescente perto do valor de 830 nA, o que economiza energia por parte do circuito até que seja armazenada energia suficiente no capacitor de entrada, elevando sua tensão e retirando o sistema do modo de baixa tensão.

O Gerador de referências internas é responsável por controlar duas tensões de referência Vin2 e CAP para serem utilizadas no conversor buck. Vin2 é regulado 4,8 V acima da terra e CAP é regulado para 4,8 V abaixo de Vin. É necessário que haja um capacitor entre esses dois pinos a fim de manter o conversor buck energizado durante seus chaveamentos.

O Controle Buck ou Conversor Buck é responsável por realizar um chaveamento a fim de se obter a tensão final desejada num patamar pré-especificado. Como será visto mais à frente, por conta do conversor buck, a tensão de saída oscila em uma onda em formato de dente de serra perto da tensão de saída para a qual foi configurado. O procedimento desse componente inclui o carregamento de um capacitor por meio de um indutor a um ponto um pouco acima do desejado de tensão, realizando um conjunto de chaveamentos controlados a fim de oscilar a corrente no indutor e obter um carregamento no capacitor. No caso de baixas fontes de potência, pode haver um corte na operação pelo componente UVLO, dessa forma o conversor buck é desligado em parte, havendo somente o consumo de uma corrente quiescente usada para monitorar a tensão de saída.

O Comparador Sleep é responsável por identificar a tensão de saída a fim de entender se o conversor buck é capaz ou não de realizar um de seus ciclos eficientemente. Caso não seja, é dito que o componente está em modo *sleep*, já que não irá realizar ciclos no conversor buck até que seja possível gerar um ciclo no conversor com um aproveitamento eficiente. O modo descrito acima é ativado quando a tensão de saída se encontra dentro do patamar estipulado e não há a necessidade de mais um ciclo do dispositivo buck.

Por fim, o comparador PGood indica quando a tensão Vout passa de 92 % da tensão desejada e definida pelos pinos D0 e D1. Ele se mantém ativo enquanto a tensão Vout continuar maior do que 92 % da tensão desejada. Mesmo que Vin fique abaixo da tensão de threshold UVLO, Pgood ainda continuará ativo até Vout ficar abaixo de 92 % da tensão nominal. Esse pino permite com que a saída seja usada apenas em casos em que a tensão já está num nível desejado e que se continue a usá-lo mesmo quando a alimentação estiver interrompida.

#### 4.3.3 Escolha do Circuito Integrado

Como pode-se observar, o fato de existirem componentes ativos dentro do circuito integrado torna a colheita de energia menos eficiente, entretanto, traz uma confiabilidade mais alta na saída do sistema.

Dentro do propósito de *energy harvesting* do projeto, devem ser estudadas as principais diferenças nas utilizações dos diferentes modelos do LTC3588-1 e LTC3588-2, como visto na Tabela 4, e com isso entender qual o melhor CI a ser utilizado visto as necessidades do trabalho.

Modelo	Tensão de Operação [V]	Corrente Quiescente (Baixa Tensão) [nA]	Tensões de Saída [V]
LTC-3588-1	2,7 – 20	450	1,8; 2,5; 3,3; 3,6
LTC 3588-2	14 - 20	830	3,45; 4,1; 4,5; 5,0

Tabela 4 - Diferenças entre os tipos 1 e 2 do LTC3588

A tensão de operação é a faixa em que o CI opera como tensão de entrada em Vin. Com isso é necessário que as tensões coletadas pelos sensores piezoelétricos e retificadas pelo CI estejam de acordo com tal limitação. Em algumas aplicações de EH pode não ser viável manter esta tensão em 14 V de tensão de saída, o que pode vir a ser um fator decisivo para essas aplicações.



Outro ponto importante a ser explicado é o consumo de energia que é feito pelo CI enquanto não há uma geração suficiente de energia por conta dos piezoelétricos. Esse consumo é relacionado à corrente quiescente desses dispositivos em modo de baixa tensão. No caso do modelo LTC3588-2 essa é cerca de 84 % maior que a encontrada no modelo LTC3588-1. Em cenários de baixa geração, ou de geração em períodos específicos, este torna-se um fator fundamental na escolha entre os CIs.

Entende-se que o LTC3588-2 compromete algumas das facilidades encontradas no outro modelo a fim de entregar uma maior tensão na saída, como a tensão de operação e seu consumo de energia em modo de baixa tensão. Isso o torna um componente não muito atrativo para aplicações de baixa tensão ou sistemas onde o consumo de energia é bem próximo do nível de energia gerada, sendo necessário uma melhor utilização dessa.

Quando é levada em consideração a tensão de saída, existem sistemas lógicos eletrônicos que utilizam uma tensão de 3,3 V para sua operação, entretanto grande parte dos sistemas lógicos de VANTs comerciais utilizam 5 V como tensão de operação, o que é um fator decisivo na escolha do CI a ser utilizado no projeto, o LTC3588-2.

É a princípio viável a utilização de um dispositivo como um conversor boost na saída do dispositivo para o aumento da tensão caso necessário, porém, o mesmo gera um aumento no consumo de energia, assim, visando aproveitar ao máximo a energia produzida pelos sensores, foi optado por utilizar o LTC3588-2 com uma saída de tensão configurada para 5 V.

#### 4.3.4 Utilização do Circuito Integrado

Seguindo o modelo proposto no próprio datasheet do LTC3588-2 para *energy harvesting*, visto na figura 24, no qual é usada apenas a tensão do sensor piezoelétrico para carregar o CI, obteve-se um resultado que não seria satisfatório para um carregamento rápido da bateria do drone quando se utiliza apenas um sensor piezoelétrico. O modelo precisa de vários minutos para completar um ciclo e enviar a energia para Vout, de forma que, em diversos modelos de VANTs, esse circuito acabaria não sendo eficaz antes mesmo do fim da bateria do veículo em que se encontrasse.



Figura 24 - Circuito inicialmente proposto, usando apenas a tensão do piezo [29]

Para essa primeira simulação, utilizaram-se valores padrões de capacitores e indutor, apresentados pelo datasheet do LTC3588-2, junto com o sensor piezoelétrico escolhido, gerando no máximo 12 V na saída de tensão do piezoelétrico. Com isso em vista, existem algumas alterações que podem ser feitas tanto no circuito como nos dados de entrada de forma que se altere o resultado da simulação. Há, no total, 3 principais graus de liberdade que podem alterar de forma a se obter um acúmulo de energia mais satisfatório.

O primeiro ponto que é possível alterar vem do próprio sensor piezoelétrico e seus parâmetros, a aceleração sobre ele, sua frequência de vibração e sua sensibilidade de tensão. Por exemplo, variando a aceleração a esperada no sensor é possível conseguir uma tensão diferente na saída, gerando um acúmulo mais rápido de energia. O mesmo aconteceria para uma alteração na sensibilidade de tensão do sensor, que pode acontecer, por exemplo, se for considerada uma frequência de operação mais próxima da ressonância, o que aumentaria, para o sensor piezoelétrico escolhido, mais de 5 vezes sua sensibilidade. Caso seja necessário, a escolha de um novo piezoelétrico para a aplicação também pode ser considerada, caso seja necessária uma maior sensibilidade ou uma operação em uma faixa de frequência na qual o piezoelétrico em questão não opera bem.



A segunda alteração que pode ser feita, ainda no âmbito dos piezoelétricos, é a quantidade de piezoelétricos utilizados em um circuito, tendo em vista que muito provavelmente não será utilizado apenas um sensor no VANT, é razoável imaginar que existirá a possibilidade de realizar associações em série e paralelo de forma que seja possível aumentar a energia coletada por um único desses CIs.

Por fim, a terceira alteração que se pode ter é nos capacitores de entrada (Cin) e saída (Cout) do circuito. Alterar o valor dos dois implica na mudança do tempo que o circuito demora para atingir a tensão desejada de saída. Quanto maior o capacitor de entrada, mais tempo o circuito demora para atingir um valor de operação que comece a carregar o capacitor da saída. Quanto maior o capacitor de saída, maior o tempo que este demora para ser carregado, demorando mais para atingir uma tensão satisfatória para ativar a saída do PGood.

De forma a entender melhor como alterar cada um desses graus de liberdade, é necessário intercalar o objeto que sofrerá alteração, simulando diferentes valores dentro de cada uma dessas alterações, todas sem carga na saída. Após o entendimento de como a mudança desses graus de liberdade afeta o funcionamento do circuito, é possível estudar a aplicação da carga, de forma a confirmar a viabilidade de se alimentar os sistemas do VANT com essa configuração.



### 5 - Resultados

Para entender a influência de cada um dos componentes e informações assumidas durante as simulações, com o intuito de validar a possibilidade de colheita de energia em VANTs por meio de filmes piezoelétricos, é necessário comparar as variações de resultados a partir de uma variação em algum valor imposto para os dados de simulação.

Visando uma melhor abordagem nessas comparações, é viável separar essas variações em 3 graus de liberdade: valores do filme piezoelétrico, quantidade de sensores utilizados e os valores de capacitores de entrada e saída escolhidos para o circuito.

Neste capítulo serão apresentadas as influências de cada um desses graus de liberdade e os fatores que os alteram a fim de chegar a um modelo satisfatório a servir de base para uma futura implementação em VANTs.

Inicialmente as simulações serão feitas em vazio a fim de entender primeiro o comportamento do sistema e após esse processo serão feitas simulações para compreender a influência de uma carga no circuito para melhor simular uma aplicação prática do projeto.

#### 5.1 Variação nos valores do filme piezoelétrico

Quanto aos valores do filme PVDF, foi assumido que esse pode ser modelado como uma fonte de tensão cuja tensão é definida pela multiplicação do valor de aceleração à qual o sensor é exposto e por sua sensibilidade de tensão, que por sua vez varia de acordo com o valor de frequência de vibração do piezoelétrico.

Como o valor de frequência não é afetado por nenhum outro parâmetro dentro do modelo proposto, essa será estudada separadamente da aceleração e sensibilidade.

#### 5.1.1 Tensão

Para os estudos de tensão, foram feitas simulações com um mesmo valor de frequência (40 Hz) a fim de facilitar a comparação entre as variações propostas no sistema.

Inicialmente foi feita uma simulação assumindo um valor de sensibilidade correspondente ao modelo de filme escolhido para o valor de frequência selecionado, próximo de 1,1 V/g. Foi escolhido o valor de aceleração em 5g a fim de obter um resultado mais rápido. O resultado pode ser visto na figura 25 abaixo.



Por conta da baixa energia gerada, observa-se que mesmo dentro dos 5 minutos de simulação, a tensão de entrada Vin só chega a 1,4 V, sendo que o modelo escolhido de CI precisa de 14 V para que inicie os ciclos do conversor buck. Um maior valor de tensão na entrada garante um carregamento mais rápido, como é visto na figura 26, que representa uma simulação próxima à anterior, na qual alterou-se o valor de aceleração para 100g. Esse valor é exageradamente grande, com o intuito de entender mais facilmente sua influência, sendo que muito possivelmente não será alcançado na prática.





Figura 26 - Simulação com aumento da aceleração (a=100 g; k=1,1 V/g; f=40 Hz)

Com esse novo valor gerado pelo piezo, observa-se um carregamento bem rápido quando comparado ao resultado anterior. Perto de 100 s ambos os capacitores de entrada e de saída já se encontravam carregados e um pouco antes de 60 s foi atingida a tensão de entrada de 14 V necessária para a ativação do CI.

Isso mostra que, com o aumento da tensão gerada pelo sensor piezoelétrico, obtém-se um carregamento do sistema mais rápido e consequentemente sua energia consegue ser aproveitada mais rapidamente dentro do sistema do VANT.

Para validar a influência da tensão no circuito, foi feita uma última simulação alterando o valor da sensibilidade para o valor encontrado quando o filme PVDF se encontra em ressonância, 6 V/g. Os outros parâmetros continuam os mesmos e o resultado é visto na figura 27 abaixo.



Como inicialmente comentado, foi observado um carregamento significativamente mais rápido, entretanto pode-se afirmar que esse cenário é bem improvável de ocorrer por conta do alto valor de aceleração presente no cenário proposto.

Pode-se então afirmar que, para uma melhor colheita da energia pelos sensores piezoelétricos, é necessário que se gere o maior valor de tensão possível tendo em vista as limitações do sistema.



#### 5.1.2 Frequência

Quanto aos valores de frequência, é também necessário entender sua influência no modelo do piezo e com isso sua influência no sistema. Durante a implementação desse sistema em um VANT, é necessário ter em vista a frequência a que este é exposto durante sua operação e a influência desta sobre outros parâmetros do piezo como a sensibilidade.

Para cenários de estudo de frequência, serão ignoradas as influências que a frequência de vibração possui sobre a sensibilidade de tensão do piezoelétrico apresentada durante o entendimento do modelo dele. Isso foi feito a fim de extrair a influência que a frequência por si só apresenta no sistema, que não é a mesma encontrada na prática e varia de acordo com o modelo de filme PVDF escolhido.

Foi realizada uma primeira simulação tendo em vista o cenário analisado na figura 26, entretanto com um valor de frequência de 5 Hz. O resultado visto na figura 28 mostra que, para uma frequência menor, menos energia é colhida pelo circuito eletrônico e com isso mais tempo é necessário para que o sistema entre em estado de operação.



Figura 28 - Simulação em baixa frequência (a=100 g; k=1,1 V/g; f=5 Hz)

É possível observar também que, dentro do intervalo de 300 s simulado, a tensão acumulada no capacitor de entrada não chegou a 5 V.

Em seguida é feita uma nova simulação com um valor de frequência de 500 Hz. O novo resultado é visto na figura 29. Nesse gráfico é possível observar um carregamento mais rápido do sistema. Esse carregamento se deve à diminuição da reatância capacitiva do sistema, inversamente proporcional ao aumento da frequência, permitindo a passagem de mais corrente.



Figura 29 - Simulação com aumento na frequência (a=100 g; k=1,1 V/g; f=500 Hz)



Como pode ser observado neste último cenário, o tempo de carregamento do sistema é perto de 10s, confirmando que a frequência individualmente tem uma influência na energia colhida pelo sistema, sendo maior com o aumento da frequência.

Esse ponto pode ser considerado verdadeiro ao desconsiderar a influência da frequência nos outros parâmetros do material, o que se entende como diferente na prática, onde o valor da frequência está atrelado ao valor da sensibilidade de tensão.

Tal influência deve ser levada em consideração ao entender a qual faixa de frequência o filme PVDF será exposto para que seja mais bem aproveitada a energia a ser colhida.

#### 5.2 Quantidade de sensores e suas disposições

Como visto nos cenários analisados anteriormente, foram obtidos alguns resultados satisfatórios para o tempo de carregamento do sistema, entretanto esses resultados não necessariamente se baseiam em valores reais, a fim de facilitar o entendimento. Dessa forma, para que seja possível obter uma quantidade de energia mais satisfatória, outro grau de liberdade que se tem controle sobre o sistema é a quantidade de sensores que pode ser utilizada para aumentar a colheita de energia.

Assim, serão apresentadas simulações a fim de entender qual a influência de um maior número de filmes PVDF colhendo energia para o sistema, assim como uma comparação entre a disposição destes em paralelo e série.

#### 5.2.1 Comparação entre disposição em série e paralelo

De forma a melhor aproveitar a disposição limitada dos piezoelétricos no VANT, é necessário entender as limitações entre as disposições dos sensores em série e em paralelo. Durante todas as simulações nesta parte, serão utilizados valores mais baixos de aceleração e sensibilidade, de forma que seja possível ter uma situação mais próxima da realidade, já que, se a tensão de um único piezo já for muito alta, a disposição em série não apresenta uma real utilidade, como será visto adiante. Dessa forma, os dados do sensor usados a seguir foram uma aceleração de 2g, uma sensibilidade de 6 V/g, comparável à sensibilidade do piezoelétrico escolhido em ressonância e uma frequência de 300 Hz, utilizando Cin = 20  $\mu$ F e Cout = 700  $\mu$ F. Na figura 30, é possível ver a simulação com apenas um sensor, para servir de base para as próximas comparações, nas quais o sistema não consegue obter uma tensão Vin que ultrapasse 8 V.



Já na figura 31, em que são utilizados 25 sensores idênticos em paralelo, é visível que existe um carregamento de Cin muito mais rápido, conseguindo chegar próximo a 12 V em menos de 30 segundos, contudo a tensão de entrada ainda não ultrapassa o valor de 14 V necessário para a inicialização do ciclo, pois é limitada pela tensão que os sensores piezoelétricos conseguem entregar.

## Projeto de Graduação





Figura 31 - Simulação com 25 sensores em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)

Caso seja utilizada a mesma disposição dos sensores piezoelétricos da simulação acima, mas com um aumento da aceleração à qual está imposto para 3g, a tensão fornecida pelo modelo do sensor piezoelétrico pode chegar até 18 V, o que representa um aumento na tensão limite de Vin como é possível ver na Figura 32, iniciando o sistema, mas ainda não permitindo que Vin chegue até a tensão máxima de 20 V suportada pelo CI, o que só aconteceria se os sensores fossem dispostos em série ou se houvesse um aumento da tensão máxima produzida por um único sensor piezoelétrico.



Com isso em mente, o questionamento do porquê colocar os sensores em paralelo ao invés de em série pode parecer algo natural, já que existirá um aumento da tensão com a qual a entrada do CI conseguirá trabalhar. Para responder a esse questionamento, foram colocados 8 sensores em série, todos com uma aceleração de 2g em seus parâmetros e uma sensibilidade de 6 V/g, de forma que fosse obtida uma tensão conjunta maior do que a necessária para atingir a tensão máxima do CI. Como é possível ver na Figura 33, apesar da entrada chegar mais próxima a 20 V e estar carregando a saída, o tempo de carregamento dela é extremamente maior do que na disposição dos sensores em paralelo.



30



Esse comportamento do circuito se dá por conta do aumento da reatância capacitiva, inversamente proporcional à capacitância do capacitor do modelo proposto para o filme. Quando os sensores piezoelétricos estão dispostos em série, sua capacitância também fica em série, de forma que exista uma diminuição da capacitância total do sistema e um consequente aumento da reatância capacitiva. Esse aumento da reatância capacitiva cria um maior impedimento à passagem da corrente, diminuindo assim a energia transmitida para o capacitor de entrada. O inverso acontece quando os sensores piezoelétricos são colocados em paralelo, aumentando a capacitância total do sistema, conseguindo assim diminuir a reatância capacitiva.

Dessa forma, é possível entender que a melhor forma de seguir com a entrada do circuito é utilizar uma combinação eficiente de piezoelétricos em série e paralelo, de forma que seja possível atingir a tensão desejada ao mesmo tempo em que se tenha um tempo de carregamento satisfatório.

Abaixo esses casos são exemplificados em alguns resultados, primeiramente colocando um conjunto de 3 sensores em série, com 4 desses agrupamentos em paralelo, em um total de 12 sensores. Com essa distribuição é possível chegar na tensão máxima do circuito, porém essa tensão é atingida apenas após 3 minutos.



Figura 34 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)

Como é possível ver na figura 35, ao se duplicar a quantidade de grupos de sensores em paralelo, é possível ter o tempo de ativação do CI encurtado pela metade e o tempo de carregamento total de Cin em mais da metade, sendo, respectivamente, 17 segundos e 78 segundos.



Figura 35 - Simulação com 3 piezoelétricos em série e 8 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)

Já quando são dispostos 4 grupos em paralelo, mas 8 sensores em série, existe uma melhoria de resultado do tempo de carregamento, como é visto na Figura 36, com Vin chegando a 16 V apenas aos 30 segundos, quase o mesmo tempo para carregar que em uma disposição de sensores com apenas 3 em série, e um tempo de quase 120 segundos para carregar totalmente Vin, mais de 30 segundos se comparado à disposição acima. Assim, mesmo usando 8 sensores a mais, a transferência de energia para a carga seria menor na disposição com 8 sensores em série.

## Projeto de Graduação





Figura 36 - Simulação com 8 piezoelétricos em série e 4 grupos em paralelo (a = 2 g; k = 6 V/g; f = 300 Hz)

Dessa forma, é possível concluir que é sim desejável usar mais sensores dentro de um mesmo circuito, aumentando a geração de energia, possibilitando um carregamento mais rápido e uma tensão adequada ao sistema. Porém, a disposição desses deve ser bem pensada de forma que haja sensores suficientes em série para atingir a tensão desejada ao mesmo tempo que não sejam colocados em excesso, desperdiçando a energia gerada por eles.

#### 5.3 Valores dos componentes

Depois de se entender as possíveis variações na magnitude de energia gerada pelos filmes PVDF, é necessário entender como os valores dos componentes presentes no circuito afetam a colheita e as tensões de entrada e saída. Será dado foco somente nos capacitores de entrada e saída, visto que sua influência é maior e que os demais componentes tiveram seus valores extraídos dos modelos sugeridos no datasheet, sendo que alguns são valores padrões para referências internas.

Para as seguintes simulações é importante levar em consideração que a disposição ideal de capacitores dependerá da carga a ser aplicada, com isso, será feita essa abordagem mais à frente no capítulo. É proposto para as próximas simulações o mesmo circuito da figura 24, com a=5, k=6, f=100 Hz e com 8 piezoelétricos em paralelo a fim de minimizar o tempo de carregamento do sistema.

#### 5.3.1 Capacitor de entrada

O capacitor de entrada é responsável por armazenar a energia vinda diretamente dos sensores piezoelétricos, que passa pela ponte retificadora. É necessário entender que esse valor influencia o tempo de carregamento necessário para que Vin alcance os 14 V a fim de iniciar as operações do CI. Com um valor muito grande para este capacitor, é visto que a energia gerada ou o tempo de operação do sistema tem que ser maior. Isso porque é necessária uma quantidade muito maior de energia (na forma de carga elétrica) para que o capacitor alcance um mesmo valor de tensão. A primeira simulação envolve os valores propostos anteriormente, com o valor de Cin alterado para 50  $\mu$ F e os resultados podem ser vistos na figura 37.



Figura 37 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada em 50 µF



Pode-se observar nesse primeiro resultado que, por conta de um valor armazenado de energia de Cin maior que a de Cout, o carregamento do capacitor de saída é feito com apenas uma descarga do capacitor de entrada. Isto pode ser interessante para elevar a tensão de saída para a desejada com somente um degrau. Apesar de apresentar esse lado vantajoso, é interessante dizer que, caso a carga de Cout seja consumida rapidamente, este só será reabastecido novamente depois de um ciclo de carregamento, que é visto como um pouco menos que 60 s. Para uma carga mais elevada, onde a energia de Cout pode ser consumida mais rapidamente que um ciclo de carregamento de Cin, essa relação entre capacitores não seria vantajosa.

EH\_circuito\_final sem boost - O 🗙 V(vin) V(vout) 2V 20V 18V 16V 10V 8V 6V 4V-2V 0V 30s 60s 90s 120s 150s 180s 210s 240s 270s 0s 300s

Para um próximo cenário, é proposto um valor de Cin de 100 µF. O resultado é visto na figura 38.

Figura 38 - Simulação com capacitância do capacitor de entrada dobrada; Cin=100 µF

Observa-se que com esse valor de capacitância bem maior, ocorre uma menor queda de tensão em Vin quando é feita a passagem de energia de Cin para Cout por meio do conversor buck. Fora essa mudança, os comentários feitos sobre a simulação anterior também se encaixam nesse cenário.

Um último estudo a ser feito é com um valor muito grande de Cin quando comparado aos outros valores do sistema. O valor simulado é de 500  $\mu$ F e o resultado se encontra na figura 39.



Figura 39 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de entrada; Cin=500 µF



Como é possível observar, o fato de a capacitância de Cin ser maior do que nos cenários anteriores faz com que a energia que esse precisa para alcançar ao menos os 14 V desejados seja consequentemente maior. Com isso, mesmo dentro de um intervalo de 300 s não é visto um carregamento deste capacitor até o valor de tensão para o início de operações no CI.

Dessa forma, mesmo com uma grande quantidade de energia armazenada, é necessário levar em consideração o tempo de operação dentro da aplicação. Para um cenário onde é necessário que a tensão de entrada seja mantida acima do patamar de ativação do circuito, é interessante que o valor de Cin seja consideravelmente maior que os demais, já que teria uma redução menor de tensão para cada ciclo de carregamento de Cout, entretanto isso leva a um tempo maior de carregamento do circuito e consequentemente um tempo maior para o início do fornecimento de tensão de saída.

#### 5.3.2 Capacitor de saída

O capacitor de saída é responsável por armazenar a energia liberada pelo CI após o mesmo atingir a tensão de entrada necessária para iniciar esse processo. Quanto maior o capacitor, maior será a energia que será armazenada antes de atingir a tensão necessária para que o sinal PGood fique ativo. Para essas simulações, o valor de Cin foi fixado em 50  $\mu$ F, enquanto o valor de Cout foi variado entre 100  $\mu$ F e 1 mF.

Como é visto na figura 40, um capacitor de apenas 100  $\mu$ F na saída permite que, com apenas um ciclo do conversor buck, esse seja carregado com a tensão desejada na saída, fazendo com que o sinal de PGood ative mais rapidamente, podendo fornecer, antes mesmo dos 60 s, energia para o sistema.



Figura 40 - Simulação com capacitância do capacitor de saída em 100  $\mu\text{F}$ 

Ao ser aumentado o valor do capacitor em 10 vezes, de 100  $\mu$ F para 1 mF, observa-se na Figura 41 a diferença nos degraus da tensão de saída, aumentando o tempo de carregamento de Cout em quase 100 segundos, mais de duas vezes o tempo de carregamento anterior.





Figura 41 - Simulação com 10 vezes a capacitância do capacitor de saída; Cout=1 mF

Apesar de isso parecer um cenário negativo, é importante entender que, apesar de a tensão ser a mesma, a energia armazenada nesse maior capacitor acaba sendo muito maior do que a energia armazenada no cenário anterior, o que pode ser algo extremamente valioso dependendo da aplicação desejada.

#### 5.4 Aplicação com Carga

Foram analisadas acima as diferentes alterações que o sistema sofre ao serem alterados parâmetros específicos para as simulações. O mesmo deve ser levado em conta em um cenário prático, sendo necessário um entendimento da aceleração e frequência ao qual os filmes PVDF são expostos, para, com isso, chegar a uma satisfatória disposição e quantidade de sensores, assim como valores interessantes para os capacitores de entrada e saída do circuito.

Por outro lado, todos esses fatores não podem ser definidos sem antes se ter um entendimento do tipo e magnitude de carga que o sistema proposto terá de abastecer energeticamente. A influência que a carga possui sobre o sistema é de extrema importância, visto que podem existir cenários em que a carga demande mais energia do que o sistema pode produzir, o que impediria o sistema de se manter carregado.

#### 5.4.1 Carga diretamente na saída

Para um estudo de cargas, é proposto um circuito semelhante ao escolhido para os ensaios anteriores, com alterações em alguns dos valores dos componentes e com a inserção, em Vout, de uma carga puramente resistiva a fim de entender o comportamento do sistema para tal. Na figura 42 abaixo é visto o circuito proposto.



Figura 42 - Circuito utilizado para simulação de carga



Tendo em vista o circuito apresentado, é feita uma primeira simulação com um resistor Rout de valor 100 k $\Omega$ . A proposta desta simulação é entender o comportamento do sistema para um baixo consumo de corrente na saída, o que se espera não impactar gravemente no comportamento do mesmo. O resultado obtido é encontrado na figura 43. Para acelerar os resultados dispostos nos gráficos, as simulações foram feitas com a=5g, k=6 V/g e f=100 Hz.



Figura 43 - Simulação com carga Rout = 100 k $\Omega$ 

É observado que apesar de o circuito ter uma flutuação na saída e não chegar efetivamente aos 5 V propostos, o sistema consegue suprir a carga comprometendo um pouco suas características. Apesar de o sistema nunca se carregar completamente, entende-se que esse sistema apresenta certa estabilidade, já que permanece em um nível de tensão abaixo do desejado.

Para reverter esses baixos valores de tensão, mantendo a carga fixa, seria necessário aumentar a quantidade de energia colhida pelos sensores, utilizando alguns dos artifícios comentados anteriormente.

Uma nova simulação é proposta para um menor valor de Rout, de 10 k $\Omega$ . O resultado se encontra na figura 44 e percebe-se que o sistema também não se comporta de forma satisfatória.



Figura 44 - Simulação com diminuição da carga de saída; Rout = 10 k $\Omega$ 



É visto que, mesmo o sistema conseguindo enviar uma corrente para a carga, que por sua vez é maior que a vista no cenário anterior, o sistema não consegue manter Vout em um nível satisfatório, visto que esse se encontra perto de 1 V, cerca de 20 % da tensão de saída proposta.

Com uma diminuição ainda maior na carga, o sistema não é capaz de suprir uma corrente contínua na carga, visto que o capacitor de saída não armazena energia suficiente para tal e a energia armazenada em Vin não é suficiente para abastecê-lo.

Um outro cenário necessário de ser entendido é quando se altera a relação entre os capacitores de entrada e saída e seu resultado é visto na figura 45. Para esta simulação, os valores desses capacitores são respectivamente 100  $\mu$ F e 47  $\mu$ F. O valor de Rout sendo o mesmo do exemplo anterior, 10 k $\Omega$ .



Figura 45 - Simulação com aumento da capacitância do capacitor de entrada e diminuição do da saída; Cin=100  $\mu$ F; Cout=47  $\mu$ F; Rout=10 k $\Omega$ 

Como no exemplo anterior, o sistema não é capaz de suprir a demanda de energia por conta da carga aplicada. Por outro lado, é observado um comportamento diferente, onde a tensão de Vout flutua entre 0 V e 5 V. Isso ocorre por conta do que já foi comentado anteriormente quando estudando a influência de diferentes valores de Cin e Cout. Como Cin consegue armazenar uma energia bem maior que Cout, cada ciclo de carregamento do conversor buck é capaz de levar Vout a um valor de 5 V, entretanto o sistema necessita suprir uma carga que consome mais energia do que a armazenada em Cout em um intervalo de tempo menor que um ciclo de carregamento. O ciclo de carregamento, por sua vez, apresenta um intervalo de tempo grande por conta da grande quantidade de energia necessária a fim de abastecer o capacitor Cin.

Nesse cenário é interessante ressaltar que, mesmo com um aumento da geração de energia, Cin teria seu carregamento feito mais rapidamente, entretanto, por conta do valor de Cout, esse não seria capaz de suprir a energia demandada pela carga dentro do intervalo de tempo de um ciclo de carregamento.

#### 5.4.2 Carga liberada pelo sinal PGood

Como foi visto anteriormente, mesmo em cenários onde o sistema se encontra estável, conseguindo suprir a carga imposta, a tensão de saída fica abaixo do patamar desejado de 5 V. Com isso, serão apresentadas formas de se utilizar a tensão do terminal PGood a fim de alimentar a carga somente quando o capacitor de saída Cout se encontrar com tensão acima de 92% da desejada, que nos casos das simulações feitas, é de 5 V, tornando PGood ativo.

Com o intuito de aproveitar a tensão desse terminal, o circuito, visto na figura 46, apresenta um MOSFET, inserido com a finalidade de só permitir a passagem de corrente na carga quando PGood estiver ativo. Com isso, espera-se observar nas seguintes simulações, um quase completo carregamento de Cout antes de qualquer carga externa requisitar sua energia.





Figura 46 - Circuito usando sinal de PGood

Dessa forma, foram realizadas simulações a fim de entender esse novo comportamento da carga e da energia armazenada nos capacitores de saída e de entrada. A primeira simulação, com resultados vistos na figura 47 abaixo, foi realizada para efeito de comparação, visto que seu circuito apresenta a mesma configuração do cenário da figura 44 com a adição do tratamento do terminal de PGOOD. No resultado anterior foi visto que Vout se nivelava em um nível abaixo de 5 V, mas com a utilização da saída de PGood espera-se amenizar tal problema.



Figura 47 - Simulação do circuito da figura 46 com o sinal PGood

Com os resultados vistos acima, pode-se entender que, diferentemente do exemplo anterior utilizado para comparação, a tensão de saída passou a oscilar em um nível de tensão mais próximo do desejado de 5 V, o que garante uma segurança maior quanto a tensão em que a carga estará operando.

Por outro lado, também é possível observar que, por conta de uma grande quantidade de energia ser exigida na carga quando comparada à energia armazenada em Cout, a corrente presente na carga (R2) possui um formato de uma onda quadrada. Isso se dá devido ao sinal de PGood sair do seu modo ativo quando a tensão Vout se encontra abaixo de 92 % do seu valor desejado. Como pode ser visto na figura 48, o sinal de PGood é alterado e os tempos em que há corrente na carga coincidem com os ciclos do terminal.





Figura 48 - Simulação para análise do sinal PGood

Para uma próxima simulação, o circuito utilizado será o mesmo da figura 46 com os mesmos valores, com a remoção do capacitor CPGood, que será analisado na simulação da figura 50 e alterando somente a quantidade de energia gerada, com 64 piezoelétricos em paralelo, com valores de aceleração, sensibilidade e frequência sendo respectivamente 2g, 10 V/g e 70 Hz. Foi removido também o capacitor CPGood, que será analisado na próxima simulação mais adiante. O resultado pode ser visto na figura 49 e o intuito é observar um sistema que consiga suprir a energia requerida pela carga sem que seja comprometido o valor desejado de tensão de saída para o sistema.



Como pode ser visto nos resultados acima, a tensão de saída consegue ser estabilizada em 5 V como desejado e a carga possui uma corrente sem oscilações muito grandes, entretanto observa-se um equilíbrio do sistema em uma tensão Vin um pouco abaixo do que esta poderia chegar, no valor de 20 V. Este cenário não apresenta um problema caso o sistema esteja realmente em equilíbrio e a carga não aumente ao longo do tempo. Por outro lado, existe uma maior quantidade de ciclos do conversor buck, que por sua vez está fazendo conversões menores.

Por fim, é visto um cenário onde a energia gerada é superior à energia requerida pela carga. O circuito utilizado para tal é o da figura 46, com 64 sensores piezoelétricos dispostos em paralelo e seus valores de aceleração, sensibilidade e frequência sendo respectivamente 3g, 10 V/g e 70 Hz. Em relação ao exemplo anterior, foi inserido um capacitor a fim de gerar um *delay* entre o sinal de PGood e a atuação da carga. O objetivo desse novo componente é fazer com que haja um carregamento a mais em Cin, já que o sinal de PGood pode ser ativado enquanto Vin está em patamar inferior da sua operação, o que pode levar o sistema a se desligar e entrar novamente em estado de carregamento. O resultado obtido é visto na figura 50.

## Projeto de Graduação





Figura 50 - Simulação com carregamento completo de Cin

Observa-se que, como no cenário anterior, a energia gerada é suficiente para abastecer a carga, só que um comportamento novo e interessante de ser ressaltado é que a tensão Vin atingiu seu patamar superior de 20 V, o que significa dizer que existe mais energia armazenada em Cin do que quando comparado à simulação anterior. Esse tipo de comportamento é vantajoso justamente quando não existe a garantia de geração de uma grande quantidade de energia durante todo o tempo de operação do sistema.



### 6 Conclusões

Após o entendimento sobre o conceito e processos de *Energy Harvesting*, juntamente com as diferentes formas de armazenamento, foi visto que a colheita de energia pode ser feita de diversas formas para diversos propósitos.

Com o propósito apresentado neste trabalho, vimos que é possível a utilização de filmes PVDF para um processo de EH dentro de operações em VANTs. Apesar de algumas suposições feitas, como os dados de aceleração sofrida pelo sensor piezoelétrico, a frequência que este opera e valores de tensão satisfatórios, conseguiu-se desenvolver um sistema capaz de realizar a colheita de energia através da vibração de um filme PVDF.

É necessário, porém, entender que, com essas suposições feitas, alguns cenários foram entendidos como aceitáveis e dependendo da aplicação em que o circuito se encontra, pode ser que haja algum comprometimento, por isso é necessário entender as diferenças de aplicações e adequar os componentes a elas.

Este trabalho é parte de uma pesquisa mais ampla e por isso dados mais específicos para a aplicação em VANTs ainda serão coletados e com esses será possível utilizar este como base para elaborar um circuito mais confiável e eficiente para a aplicação, assim como uma melhor elaborada escolha de componentes que se julgarem mais adequados.

É visto como viável a utilização de circuitos e materiais como os mostrados neste trabalho a fim de aumentar a eficiência de VANTs e com isso estender a duração de operações desses veículos.



### Referências

- 1. SWAMINATHEN, A. A brief history f energy harvesting. ONiO. 2021. Disponível em: https://www.onio.com/article/brief-history-of-energy-harvesting.html. Acesso em: 28/06/2022
- KINGATUA, A. The How and Why of Energy Harvesting for Low-Power Applications. ALL ABOUT CIRCUITS. 2016. Disponível em: https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/how-why-ofenergy-harvesting-for-low-powerapplications/#:~:text=Applications%20for%20Energy%20Harvesting%20Technologies&text=These %20sensors%20can%20monitor%20and,devices%20and%20remote%20patient%20monitoring. Acesso em: 28/06/2022
- 3. YA, G.; KAPAПETЯH, Г.; DNEPROVSKI, V. RESEARCH OF OPPORTUNITY TO USE MISM STRUCTURES FOR COOLING OF LIGHT-EMITTING DIODES. Publisher: Nova Science Publishers, IncEditor: Ivah Parinov and Shun-Hsyung-Chang. ISBN: 978–1–62618–535–7
- JOUHARA, H.; Żabnieńska-Góra, A.; Khordehgah, N.; Doraghi, Q.; Ahmad, L.; Norman, L.; Axcell, B.; Wrobel, L.; Dai, S. Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications, International Journal of Thermofluids, Volume 9, 2021, 100063, DOI: 10.1016/j.ijft.2021.100063.
- 5. DOLEZ, P.I. Energy Harvesting Materials and Structures for Smart Textile Applications: Recent Progress and Path Forward. Sensors 2021, 21, 6297. DOI: 10.3390/s21186297
- NASTRO, A.; PIENAZZA, N.; BAÙ, M.; ACETI, P.; ROUVALA, M.; ARDITO, R.; FERRARI, M.; CORIGLIANO, A.; FERRARI, V. Wearable Ball-Impact Piezoelectric Multi-Converters for Low-Frequency Energy Harvesting from Human Motion. Sensors 2022, 22, 772. DOI: 10.3390/s22030772
- 7. RONG, G.; ZHENG, Y.; SAWAN, M. Energy Solutions For Wearable Sensors: A Review. Sensors 2021, 21, 3806. DOI: 10.3390/s21113806
- 8. JONES, J. S. The different types of energy storage and their opportunities. SMART ENERGY INTERNATIONAL. 2021. Disponível em: https://www.smart-energy.com/storage/the-different-types-of-energy-storage-and-their-opportunities/. Acesso em: 28/06/2022
- 9. CELSIUS CITY. Thermal Energy Storage. 2020. Disponível em: https://celsiuscity.eu/thermalenergy-storage/. Acesso em: 28/06/2022
- 10. ENERGY STORAGE ASSOCIATION, Liquid Air Energy Storage (LAES). Disponível em: https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/liquid-air-energy-storagelaes/#:~:text=Liquid%20Air%20Energy%20Storage%20(LAES)%20uses%20electricity%20to%20c ool%20air,a%20turbine%20and%20generate%20electricity. Acesso em: 28/06/2022
- 11. FUTUREBRIDGE, Supercapacitors A Viable Alternative to Lithium-Ion Battery Technology. 2020. Disponível em: https://www.futurebridge.com/industry/perspectives-mobility/supercapacitors-a-viable-alternative-to-lithium-ion-battery-technology/. Acesso em: 28/06/2022
- 12. SUSTAINABLE SOLAR SERVICES, Pros and Cons of battery storage. Disponível em: http://www.sustainablesolarservices.com.au/pros-cons-battery-storage. Acesso em: 28/06/2022
- 13. ARROW, Supercapacitor vs Battery Ultracapacitor Pros & Cons. 2018. Disponível em: https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/supercapacitor-vs-battery-ultracapacitorpros-and-cons. Acesso em: 28/06/2022
- 14. ROSEN, C. Z.; HIREMATH, B. V.; NEWNHAM, R. Piezoelectric Materials: Crystal Orientation and Poling Direction. Piezoelectricity. American Institute of Physics. 1992
- 15. DATTA, S. Piezoelectric Materials: Crystal Orientation and Poling Direction. COMSOL. 2014. Disponível em: https://www.comsol.com/blogs/piezoelectric-materials-crystal-orientation-polingdirection/. Acesso em: 28/06/2022
- 16. KUBRUSLY, A. C. Efeito Piezoelétrico e transdutores. CETUC. Disponível em: http://www.cpti.cetuc.puc-rio.br/~kubrusly/fouta/Piez.pdf. Acesso em: 28/06/2022

## Projeto de Graduação



- 17. SMITH, M.; KAR-NARAYAN, S. Piezoelectric polymers: theory, challenges and opportunities. International Materials Reviews, Volume 67, Issue 2, 2022, DOI: 10.1080/09506608.2021.1915935
- DAHIYA, R. S.; VALLE, M.; LORENZELLI, L. SPICE Model for Lossy Piezoelectric Polymers. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 56, no. 2, pp. 387-395, February 2009, DOI: 10.1109/TUFFC.2009.1048
- 19. KARGAR, S.M.; HAO, G. An Atlas of Piezoelectric Energy Harvesters in Oceanic Applications. Sensors 2022, 22, 1949. DOI: 10.3390/s22051949
- 20. BROWN, R. H. Piezo Film for Energy Harvesting. Measurement SPECIALTIES. 2013
- 21. DHgate. Microfone de contato piezoelétrico 3 Captadores de transdutor com conector de pino final para Kalimba. DHgate. Disponível em: https://pt.dhgate.com/product/piezo-contact-microphone-3-transducer-pickups/411158558.html. Acesso em: 28/06/2022
- 22. Instrumentação e Técnicas de Medida. UFRJ. 2017. Disponível em: http://www.peb.ufrj.br/cursos/eel710/EEL710\_Texto.pdf. Acesso em: 28/06/2022
- 23. TE CONNECTIVITY, LDT with Crimps Vibration Sensor/Switch. 2017. Disponível em: https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+S heet%7FLDT\_with\_Crimps%7FA1%7Fpdf%7FEnglish%7FENG\_DS\_LDT\_with\_Crimps\_A1.pdf%7FCA T-PFS0006. Acesso em: 28/06/2022
- 24. TE CONNECTIVITY, FDT Series Elements with Lead Attachment. 2017. Disponível em: https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchrtrv&DocNm=FDT\_S eries&DocType=Data+Sheet&DocLang=English&DocFormat=pdf&PartCntxt=11031269-00. Acesso em: 28/06/2022
- 25. MEASUREMENT SPECIALTIES, MiniSense 100 Vibration Sensor. 2009. Disponível em: https://www.digikey.com.br/en/datasheets/te-connectivity-measurement-specialties/teconnectivity-measurement-specialties-minisense\_100. Acesso em: 28/06/2022
- 26. STRINGFIXER, Amplificador de trasimpedância. 2020. Disponível em: https://stringfixer.com/pt/Transimpedance\_amplifier. Acesso em: 28/06/2022
- 27. KEIM, R. Understanding and Implementing Charge Amplifiers for Piezoelectric Sensor Systems. ALL ABOUT CIRCUITS. 2018. Disponível em: https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/understanding-and-implementing-charge-amplifiers-for-piezoelectric-sensor-s/#:~:text=Charge%20Amplifiers%20for%20Piezoelectric%20Sensors,is%20not%20lost%20throu gh%20leakage. Acesso em: 28/06/2022
- 28. LINEAR TECHNOLOGY, Nanopower Energy Harvesting Power Supply with 14V Minimum VIN.. 2010. Disponível em: <u>https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/35881fc.pdf</u>. Acesso em: 28/06/2022
- 29. LINEAR TECHNOLOGY, Nanopower Energy Harvesting Power Supply.. 2010. Disponível em: <u>https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/35882fc.pdf</u>. Acesso em: 28/06/2022