

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Tales Luiz Bortolin

**MODELAGEM COMPORTAMENTAL COMO FERRAMENTA DE
ANÁLISE E PROJETO DE UM COLETOR DE ENERGIA PIEZELÉTRICO
COM INVESTIMENTO DE ENERGIA CONTROLADO PARA BUSCA DO
PONTO DE MÁXIMA COLETA**

Santa Maria, RS
2019

Tales Luiz Bortolin

**MODELAGEM COMPORTAMENTAL COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE E PROJETO
DE UM COLETOR DE ENERGIA PIEZELÉTRICO COM INVESTIMENTO DE ENERGIA
CONTROLADO PARA BUSCA DO PONTO DE MÁXIMA COLETA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Área de Concentração em Ciência da Computação, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciência da Computação**.

ORIENTADOR: Prof. André Luiz Aita

Santa Maria, RS
2019

Bortolin, Tales Luiz

Modelagem Comportamental, como Ferramenta de Análise e Projeto, de um Coletor de Energia Piezelétrico com Investimento de Energia Controlado para Busca do Ponto de Máxima Coleta / Tales Luiz Bortolin.- 2019.

78 p.; 30 cm

Orientador: André Luiz Aita

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação , RS, 2019

1. Coletor de Energia Piezelétrico 2. Transdutor Piezelétrico 3. Descrição Comportamental do Circuito I. Aita, André Luiz II. Título.

©2019

Todos os direitos autorais reservados a Tales Luiz Bortolin. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Roraima, n. 1000, Prédio 7, Anexo B, Sala 287

End. Eletr.: taleslbd@gmail.com

Tales Luiz Bortolin

**MODELAGEM COMPORTAMENTAL COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE E PROJETO
DE UM COLETOR DE ENERGIA PIEZELÉTRICO COM INVESTIMENTO DE ENERGIA
CONTROLADO PARA BUSCA DO PONTO DE MÁXIMA COLETA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Área de Concentração em Ciência da Computação, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciência da Computação**.

Aprovado em 23 de agosto de 2019:

André Luiz Aita, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Mario Lucio da Silva Martins, Dr. (UFSM)

Alessandro Gonçalves Girardi, Dr. (UNIPAMPA)

Santa Maria, RS
2019

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Marili Brondani Bortolin e Antoninho Luiz Bortolin (In Memoriam) pelo incentivo e amor incondicional. À minha esposa e minha filha pelo apoio contínuo, dedicação e carinho. Às minhas irmãs Tatiana Bortolin e Natana Brondani Bortolin pela força em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela nossa saúde e por permitir estarmos sempre em busca de novos conhecimentos e desafios.

Aos meus pais que sempre estão me apoiando em tudo que necessito, incentivam meus estudos até nos momentos mais difíceis e formaram a base para minha educação.

Ao meu orientador Prof^o Dr^o André Luiz Aita, pela oportunidade, confiança, incentivo e intensa contribuição no processo de elaboração deste trabalho.

RESUMO

MODELAGEM COMPORTAMENTAL COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE E PROJETO DE UM COLETOR DE ENERGIA PIEZELÉTRICO COM INVESTIMENTO DE ENERGIA CONTROLADO PARA BUSCA DO PONTO DE MÁXIMA COLETA

AUTOR: Tales Luiz Bortolin
ORIENTADOR: André Luiz Aita

Coletar energia das vibrações por meio de transdutores está tornando-se uma solução promissora, dentro do contexto de IoT (*Internet of Things*), para a alimentação de nós microsensores e microcircuitos. Contudo, para extrair energia elétrica a partir das vibrações é necessária a utilização de transdutores piezelétricos, que por sua vez, convertem a energia cinética das vibrações em energia elétrica. Para tal, este trabalho busca desenvolver um coletor de energia vibracional, o qual é composto por um indutor comutado como meio de transferência de energia de baixa perda, e por módulos funcionais requeridos pelo coletor para transformação e condicionamento do sinal. De forma sistemática, os diversos módulos sensores do sistema, necessários para o efetivo controle do processo de coleção de energia, são catalogados e as variáveis de controle são definidas em função desses sensores por meio de um módulo de controle lógico descrito e modelado em linguagem Verilog-A. Os diversos módulos que compõem o sistema de coleta de energia (*Energy-Harvester System*) foram simulados e o controle verificado. Resultados de simulação mostraram o correto funcionamento do sistema, o impacto do investimento de energia no perfil de carga da bateria e a possibilidade de se operar com máxima coleta de energia a partir do controle dos tempos de investimento e coleta com a adição de um algoritmo de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*).

Palavras-chave: Coletor de energia piezelétrico. Transdutor piezelétrico. Descrição comportamental do circuito.

ABSTRACT

BEHAVIORAL MODELING, AS A TOOL FOR ANALYSIS AND DESIGN, OF A PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTER WITH CONTROLLED ENERGY-INVESTMENT FOR MAXIMUM HARVESTING POINT TRACKING

AUTHOR: Tales Luiz Bortolin

ADVISOR: André Luiz Aita

Harvesting energy from vibrations by means of transducers is becoming a promising solution, within the context of IoT (Internet of Things), for supplying microsensor nodes and microcircuits. However, in order to extract electrical energy from the vibrations, piezoelectric transducers are necessary, which in turn convert the kinetic energy of the vibrations into electrical energy. For this, this work seeks to develop a vibrational energy collector, which consists of a switched inductor as low-loss energy transfer device, and functional modules required by the harvester for signal transformation and conditioning. Systematically, the various sensor modules of the system, necessary for the effective control of the energy harvesting process, are cataloged and the control variables are defined in function of these sensors by means of a control logic module described and modelled in Verilog-A language. The several modules used to build the energy harvester system (Energy-Harvester System) were simulated and its control verified. Simulation results showed the correct functioning of the system, the effect of the energy investment on the battery charging profile and the possibility of operating with maximum energy harvesting through the control of investment and harvesting times with the addition of an MPPT algorithm (Maximum Power Point Tracking).

Keywords: Piezoelectric energy harvesting. Piezoelectric transducer. Circuit behavioral description.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fontes de energia alternativas para possível substituição das baterias. . . .	18
Figura 2 – Fontes de energia e suas possíveis aplicações.	18
Figura 3 – Número de publicações sobre captadores de energia piezelétricos, eletromagnéticos e eletrostáticos na Web of Science entre os anos de 2003 e 2013.	19
Figura 4 – Topologias dos coletores eletromagnéticos. (a) Gerador ressonante. (b) Gerador rotacional. (c) Gerador híbrido.	20
Figura 5 – Modelo do coletor eletrostático de capacitância variável produzido com a tecnologia MEMS por Meninger et al. (2001).	20
Figura 6 – Esquema do transdutor piezelétrico de feixe cantiléver.	21
Figura 7 – Esboço do circuito eletromecânico equivalente do transdutor piezelétrico. (a) Transdutor tipo feixe de cantiléver. (b) Modelo equivalente do transdutor evidenciando o domínio mecânico acoplado ao domínio elétrico por meio de um transformador (transcondutor) que converte tensão em corrente. (c) Coletor modelado no domínio elétrico.	22
Figura 8 – Retificador de onda completa e suas curvas associadas.	25
Figura 9 – Circuito ressonante típico destacando as curvas da tensão V_{PZ} , a curva de V_{PZ} em circuito aberto $V_{PZ(OC)}$ e o sinal V_S de controle da chave S	26
Figura 10 – Circuito esquemático e respectivas formas de onda do (a) retificador P-SSHI e do (b) retificador S-SSHI.	26
Figura 11 – Circuito SECE com suas respectivas curvas de V_{PZ} , $V_{PZ(OC)}$ e o sinal de comutação de V_S	27
Figura 12 – (a) Circuito coletor de indutor comutado e (b) suas respectivas formas de onda de V_{PZ} representando o conceito de reinvestimento de energia.	29
Figura 13 – (a) Circuito coletor de indutor comutado e (b) suas respectivas formas de onda de V_{PZ} que representam o conceito de re-investimento (investimento e reinvestimento) de energia.	30
Figura 14 – Perfil de carga da bateria para os conceitos de (a) reinvestimento apenas, (b) investimento apenas e, (c) investimento e reinvestimento combinados.	31
Figura 15 – Diagrama em blocos de um coletor de energia vibracional com transdutor piezelétrico e indutor. A energia coletada, após condicionada, é armazenada em uma bateria ou utilizada diretamente pela carga Z_L	34
Figura 16 – Circuito equivalente do coletor de energia vibracional com investimento de energia.	35
Figura 17 – Tensão no elemento piezelétrico V_{PZ} , corrente no indutor i_L e na bateria i_{BAT} gerados pelo controle lógico.	35
Figura 18 – Modelo do coletor piezelétrico proposto evidenciando os seus principais módulos.	41
Figura 19 – Máquina de estados do circuito de controle do coletor de energia vibracional proposto. As saídas estão evidenciadas dentro do estado, assim como a condição de saída/permanência no estado, a cada estado.	42
Figura 20 – Detalhamento dos sinais de entrada e de saída do bloco de controle a cada estado do sistema.	46
Figura 21 – Gráficos (tensão V_{PZ} e V_{BAT} , corrente i_L e controle das chaves MN_{PZ} e MP_{BAT}) que detalham os períodos de investimento e de coleta de ener-	

gia. Os estados do sistema foram adicionados para maior clareza.	47
Figura 22 – Formas de onda da tensão V_{PZ} , da corrente no indutor i_L e da tensão na bateria V_{BAT}	48
Figura 23 – Tensão V_{BAT} para diferentes τ_I , evidenciando a descarga da bateria para investimentos elevados.	50
Figura 24 – Tensão V_{BAT} para diferentes I_{PZ} e τ_I , salientando que para diferentes amplitudes, o ajuste do tempo de investimento mostra-se importante ao evitar a descarga da bateria ou melhorar o perfil de carga da bateria. ...	50
Figura 25 – Algoritmo MPPT P&O proposto. Consiste em perturbar o tempo de inves- timento τ_I enquanto se observa a variação de V_{BAT} , para cada ciclo de coleta K	52
Figura 26 – Diferentes curvas de V_{BAT} para diferentes I_{PZ} com $\tau_I=0$ e τ_I ajustável, destacando as curvas com vibrações moderadas ($I_{PZ}=6\mu A$) onde há um aumento considerável no perfil de carga.	55
Figura 27 – Curvas de V_{PZ} , τ_I e V_{BAT} que destacam a limitação do sistema para vibra- ções de choque, onde τ_I começa a decrescer antes de alcançar o tempo de investimento ideal.	56
Figura 28 – Esse gráfico esboça as curvas de V_{PZ} , V_{BAT} e τ_I enfatizando os instantes onde o sistema efetua os cortes do investimento e reinvestimento quando as vibrações diminuem sua intensidade.	58
Figura 29 – Esse gráfico esboça as curvas de V_{PZ} , V_{BAT} e τ_I destacando a descon- tinuidade do investimento e reinvestimento quando a bateria está com carga máxima.	59
Figura 30 – As curvas de V_{PZ} , V_{BAT} , τ_I e ΔV_{BAT} buscam mostrar que o conceito de investimento proporciona à bateria uma carga mais rápida quando com- parada com o perfil sem investimento.	60
Figura 31 – Comparação do perfil de carga da bateria usando tempo de investimento fixo (KWON; RINCÓN-MORA, 2014) e investimento ajustável (esse traba- lho).	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição das variáveis de entrada e de saída do Módulo de Controle Lógico do sistema coletor.....	43
Tabela 2 – Tabela Descritiva da Máquina de Estados	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MPPT	Maximum Power Point Tracking
MPP	Maximum Power Point
IoT	Internet of Things
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
PZT	Titanato de Zirconato de Chumbo
MOS	Metal Oxide Semiconductor
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
SSHI	Synchronized Switch Harvesting on Inductor
P-SSHI	Parallel-Synchronized Switch Harvesting on Inductor
S-SSHI	Serie-Synchronized Switch Harvesting on Inductor
SECE	Synchronous Electric Charge Extraction
PEH	Piezoelectric Energy Harvester
FLC	Four-Leaf Clover
P&O	Algorithm perturb and observe
C_{PZ}	Capacitância intrínseca do transdutor piezelétrico
C_P	Capacitância intrínseca
C_H	Rigidez mecânica
C_S	Capacitor de armazenamento
C_{SS}	Capacitor para estabelecer a tensão de substrato
DRV_N	Drive da chave MOS M_N
DRV_P	Drive da chave MOS M_P
E_{MEC}	Energia mecânica das vibrações
E_{ELE}	Energia elétrica
Enb_{INVEST}	Sinal de <i>enable</i> para o bloco de controle do investimento
<i>High</i>	Sinal de nível alto
i_{BAT}	Corrente que passa para a bateria
i_L	Corrente que passa pelo indutor

I_{PZ}	Corrente do transdutor piezelétrico
L_{ow}	Sinal de nível baixo
L_H	Indutor
L_M	Massa mecânica
MC_{RS}	Chave CMOS
MN_{PZ}	Chave MOS do tipo N
MP_{BAT}	Chave MOS do tipo P
M_N	Chave MOS do tipo N
M_P	Chave MOS do tipo P
M_C	Chave CMOS
R_{PZ}	Resistência intrínseca do transdutor piezelétrico
S	Chave comutadora
P_T	Transdutor
τ_{CHG}	Período de carga da bateria
τ_{H-}	Período de <i>harvesting</i> do ciclo negativo
τ_{H+}	Período de <i>harvesting</i> do ciclo positivo
τ_I	Período de investimento de energia no sistema
τ_{PC}	Período de pré carga
$\tau_{HARVEST}$	Sinal proveniente do sensor de passagem por zero da tensão V_{PZ}
τ_{INVEST}	Sinal proveniente do bloco de controle do tempo de investimento
V_{BAT}	Tensão da bateria
V_L	Tensão no indutor
V_S	Tensão sobre o capacitor C_S
V_D	Tensão sobre os diodos
V_{AUX}	Tensão auxiliar
V_{OC}	Tensão de circuito aberto
V_{PC}	Tensão de pré carga
V_{PT}	Tensão do transdutor P_T
V_{PK}	Tensão de pico

V_{PZ}	Tensão do transdutor piezelétrico
$V_{PZ(OC)}$	Tensão piezelétrica de circuito aberto
$V_{PZ(PK+)}$	Tensão de pico positivo do transdutor piezelétrico
$V_{PZ(PK-)}$	Tensão de pico negativo do transdutor piezelétrico
Z_L	Impedância inerente da carga
ΔV_{BAT}	Variação de V_{BAT}
$\Delta V_{BAT}(MED)$	Média de ΔV_{BAT}
$\Delta V_{BAT}(K)$	Variação atual de V_{BAT}
$\Delta V_{BAT}(MAIOR)$	ΔV_{BAT} máxima
$\Delta V_{BAT}(K - 1)$	Variação anterior de V_{BAT}

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	MOTIVAÇÃO	15
1.2	OBJETIVO GERAL	15
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	16
2	FUNDAMENTOS SOBRE COLETORES DE ENERGIA	17
2.1	ESTADO DA ARTE DOS COLETORES DE ENERGIA	17
2.1.1	Coletores de Energia Vibracional	18
2.1.2	Métricas de Desempenho de Coletores Piezelétricos	23
2.2	CONVERSORES AC-DC	24
2.3	CONCEITOS DE INVESTIMENTO E REINVESTIMENTO DE ENERGIA	28
2.4	ALGORITMOS DE MPPT	31
2.5	LINGUAGEM COMPORTAMENTAL VERILOG-A	33
2.6	TOPOLOGIA TÍPICA DE SISTEMAS COLETORES DE ENERGIA	33
2.6.1	Descrição da Operação do Sistema de Coleta de Energia	33
2.6.2	Módulos Requeridos pelo Sistema	36
2.7	CONTRIBUIÇÕES	37
3	MODELAGEM DO SISTEMA COLETOR PROPOSTO	39
3.1	SISTEMA COLETOR PROPOSTO	39
3.2	MÓDULO DE CONTROLE LÓGICO	40
3.3	FUNCIONAMENTO DO SISTEMA COLETOR DE ENERGIA	45
3.4	MODELO VERILOG-A	46
3.5	IMPACTO DO TEMPO INVESTIMENTO SOBRE O PERFIL DE CARGA	49
4	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	51
4.1	SIMULAÇÕES COMPORTAMENTAIS DO CONTROLE DO INVESTIMENTO PELO ALGORITMO MPPT	51
5	CONCLUSÃO	62
5.1	PRINCIPAIS DESCOBERTAS	62
5.2	CONTRIBUIÇÕES	63
5.3	TRABALHOS FUTUROS E PERSPECTIVAS	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
	ANEXO A – ARTIGO ACEITO NO SBCCI19	69
	ANEXO B – ALGORITMO VERILOG-A MODELADO NO SISTEMA COLETOR	75

1 INTRODUÇÃO

A mesma evolução tecnológica que permite o projeto de dispositivos como micros-sensores e microcircuitos para IoT (Internet of Things) cada vez menores, também impõe limitações na operação, uma vez que mantê-los funcionando requer o uso de baterias também muito pequenas, com capacidade limitada de armazenamento de energia (GLEONEC et al., 2016) (IANNACCI et al., 2015). Ainda que esses microcircuitos sejam projetados para trabalhar com um consumo ultra-baixo de energia, isto apenas ajuda a prolongar o tempo de operação, sem contudo eliminar a necessidade eventual de substituição da fonte de energia (NAIKWAD et al., 2017).

Tendo em vista que a substituição destas baterias revela-se impraticável em determinadas situações seja por razões técnicas ou por custo financeiro elevado, como no caso de uma rede de inúmeros sensores ou até mesmo em implantes biomédicos (CHEN et al., 2017) (KWON; RINCON-MORA, 2010), o desafio é portanto manter estes sistemas em funcionamento a partir de outras fontes de energia. Dentre essas outras fontes de energia, observa-se aquelas provenientes do meio ambiente, por exemplo, como uma ideia viável, já que as energias renováveis como a energia solar, eólica e vibratória são abundantes, baratas e ambientalmente seguras. Desta forma a utilização da coleta de energia a partir do meio ambiente permite reduzir o uso de baterias, reduz o tamanho dos dispositivos e torna o sistema relativamente autossuficiente.

Como as vibrações são abundantes no meio ambiente, soluções de coleta de energia a partir de transdutores piezelétricos são encontradas na literatura, pois conseguem extrair energia mecânica das vibrações e transformá-las em energia elétrica (KIZU; OKANO; KOIZUMI, 2016) (KWON; RINCÓN-MORA, 2014) (SANCHEZ et al., 2016) (FAN et al., 2018) (SHAREEF et al., 2016) (SHIM et al., 2014). Alinhado portanto com a literatura, esse trabalho revisita o coletor de energia vibracional conforme descrito em (KWON; RINCÓN-MORA, 2014) e descreve em linguagem Verilog-A o sistema coletor e a sistemática de seu sistema de controle, necessária para o gerenciamento efetivo do processo de coleta de energia mecânica das vibrações a partir de um transdutor piezelétrico. Apresenta também mecanismo para controle do tempo de investimento (τ_I) de energia da bateria no sistema e do tempo de coleta (τ_{H-}), com o auxílio de algoritmos de MPPT para que o sistema opere com máxima (ou pelo menos maior) coleta de energia. O sistema conta também com o auxílio de um elemento indutor, base para aplicação do conceito de investimento de energia (KWON; RINCÓN-MORA, 2012) (LALLART; GUYOMAR, 2010) (PRABHA et al., 2011) em sistemas ressonantes.

1.1 MOTIVAÇÃO

O projeto de dispositivos miniaturizados tem-se mostrado sempre desafiador, uma vez que manter esses dispositivos em operação requer uma fonte de energia também muito pequena, e a limitação de área e capacidade de armazenamento em função do tamanho revela-se afinal grande desvantagem. Para contornar essas limitações, os dispositivos vem sendo desenvolvidos para trabalhar com consumo ultra-baixo, o que não elimina a necessidade de trocas eventuais das baterias.

A manutenção desses dispositivos, seja para reposição ou recarga das baterias, em alguns casos, mostra-se inviável como por exemplo em implantes biomédicos ou nós sensores instalados em locais de difícil acesso. Para tanto, o desafio é reduzir ou até mesmo eliminar esta manutenção provendo energia de outras fontes, tornando, desta forma, os dispositivos menores e mais autônomos.

As energias renováveis mostram-se bastante oportunas, tendo em vista que são fontes inesgotáveis e limpas, e também porque causam um pequeno impacto ambiental. Dessa forma, o presente trabalho busca otimizar o processo de coleta de energia desenvolvido por Kwon e Rincón-Mora (2014), adicionando um algoritmo de MPPT ao modelo do coletor descrito em Verilog-A.

1.2 OBJETIVO GERAL

Devido a necessidade de minimizar a substituição das baterias que alimentam microcircuitos para IoT, o presente trabalho tem como objetivo modelar um coletor de energia piezelétrica (PEH - *Piezoelectric Energy Harvester*) que seja capaz de colher a energia mecânica das vibrações, convertê-la em energia elétrica para posterior armazenagem em uma bateria (ou super capacitor) ou disponibilizá-la até mesmo diretamente para a carga, e a adição de um algoritmo de MPPT para a busca do ponto de máxima coleta.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para a modelagem do coletor piezelétrico, é necessário o projeto dos módulos responsáveis pelo efetivo funcionamento do circuito de coleta, para tanto foram seguidos os seguintes passos:

- análise de métodos, tecnologias e conceitos dos coletores de energia piezelétricos.
- descrição em Verilog-A dos módulos sensores necessários para o funcionamento do coletor.
- descrição em Verilog-A do módulo de controle lógico para gerenciamento do coletor de energia, especificando a sua máquina de estados e incorporando o algoritmo de

MPPT para otimização do tempo de investimento (τ_I), evidenciando o mecanismo de coleta de energia para a carga de uma bateria até 3,3V.

- apresentação dos dados das simulações do referido coletor, com discussões a respeito e conclusões.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O presente trabalho discute no Capítulo 2 os conceitos e arquiteturas utilizadas nos projetos dos coletores atuais, também é apresentada e discutida a topologia de coleta de energia vibracional que utiliza o conceito de investimento de energia para maior desempenho de coleta. No Capítulo 3, é modelado o coletor de energia com seus módulos necessários e o algoritmo MPPT é inserido. Por fim, no Capítulo 4 são mostradas as simulações e resultados obtidos com o modelo criado neste trabalho, seguido das conclusões no Capítulo 5.

2 FUNDAMENTOS SOBRE COLETORES DE ENERGIA

Neste capítulo, serão abordados os conceitos e trabalhos que se relacionam com os objetivos deste trabalho, com o propósito de nortear e identificar as premissas necessárias para o desenvolvimento do sistema coletor de energia piezelétrica.

2.1 ESTADO DA ARTE DOS COLETORES DE ENERGIA

O ambiente nos proporciona enorme fonte de energia renovável. Recentes pesquisas tem concentrado seus estudos nas formas de extraí-la e utilizá-la para alimentação de microcircuitos. Para acompanhar essa evolução, os dispositivos móveis como: sensores sem fio, implantes biomédicos, circuitos para IoT, etc., buscam reduzir não somente a sua área, mas o seu consumo de energia, o que favorece a vida útil das baterias que, em última instância, mantém a operação destes dispositivos. No entanto, há ainda a necessidade de reservatórios de energia para que os dispositivos mantenham o seu pleno funcionamento, pois eventualmente as baterias resultam sem carga. Com o objetivo de minimizar ou até mesmo eliminar o uso de baterias, estudos buscam extrair a energia que o ambiente tem para oferecer, tornando estes sistemas autossuficientes. Das fontes possíveis, estas tem sido as mais estudadas: energia solar, térmica, vibracional, eólica e radiofrequência (Dell'Anna et al., 2018) (Fan et al., 2015) (KILNER JOHN, 2012).

A Figura 1 mostra as densidades de energia que cada uma das técnicas de coleta de energia pode fornecer, bem como as suas vantagens e desvantagens.

Considerando as estratégias de captação exibidas na Figura 2, observa-se que as fontes de energia solar e térmica são as que apresentam maior densidade de potência em condições favoráveis. É fato que, tanto a luz quanto a temperatura, suficientes para gerar potência máxima (até $10\text{mW}/\text{cm}^2$), não estão presentes na natureza de forma constante, o que impõe limite a estas técnicas de coleta. De outra forma, as ondas de radiofrequência são encontradas em praticamente todos os locais - em áreas rurais e urbanas, internas e externas, durante todo o dia, evidentemente, desde que "iluminadas". Apesar de as ondas de RF serem uma fonte de coleta confiável, a densidade de energia e a potência disponibilizada é fortemente dependente da distância dos transmissores (TRAN; CHA; PARK, 2017).

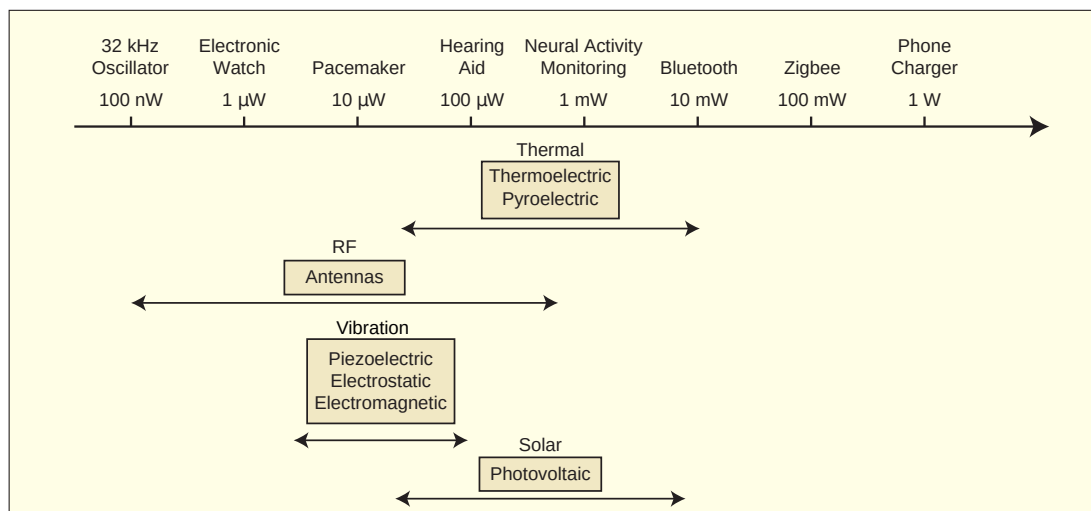
Por outro lado, a energia mecânica das vibrações é abundante no meio que nos cerca, como por exemplo nas estruturas móveis e imóveis, bem como nos movimentos do corpo humano. Apesar das vibrações possuírem densidade de potência moderadas (até $100\mu\text{W}/\text{cm}^2$), em comparação as sua contrapartes solar, térmica e RF, os pesquisadores concentraram seus estudos nestes transdutores, em função da possibilidade de integração dos materiais piezelétricos no chip e também, a facilidade de encontrar os estímulos mecânicos vibracionais no ambiente. A Figura 3 mostra o número de publicações, no pe-

Figura 1 – Fontes de energia alternativas para possível substituição das baterias.

Source	Power density	Harvesting tech.	Advantages	Disadvantages
Solar	Indoor: 10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ Outdoor: 10 mW/cm^2	Photovoltaic	High power density Mature	Not always available Required exposure to light (not implantable) Expensive
Vibration	Human: 4 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ Industrial: 100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Piezoelectric Electrostatic Electromagnetic	Implantable High efficiency	Not always available Material physical limitation
Thermal	Human: 30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ Industrial: 1–10 mW/cm^2	Thermoelectric Pyroelectric	High power density Implantable	Not always available Excess heat
RF	GSM: 0.1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ Wi-Fi: 1 mW/cm^2	Antenna	Always available Implantable	Low density Efficiency inversely proportional to distance

Fonte: Adaptado de Tran, Cha e Park (2017)

Figura 2 – Fontes de energia e suas possíveis aplicações.



Fonte: Adaptado de Dell'Anna et al. (2018)

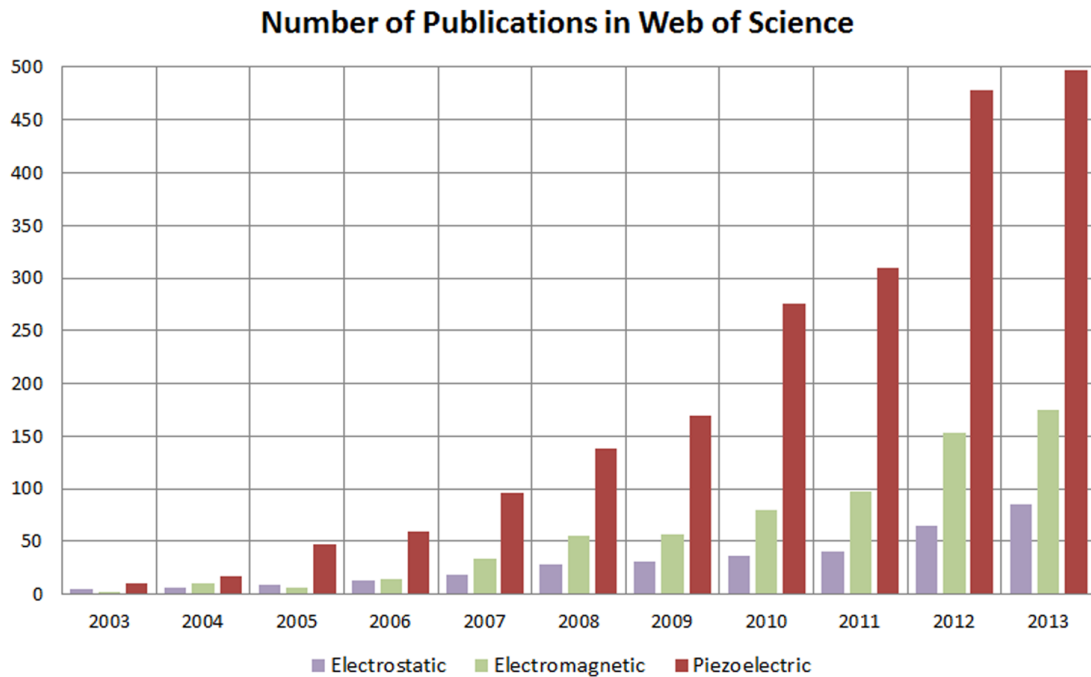
ríodo dos anos de 2003 á 2013, que envolveram as fontes de energia mais utilizadas em trabalhos científicos. De fato a coleta de energia vibracional obteve os maiores níveis de pesquisa (TOPRAK; TIGLI, 2014).

Por fim, cabe mencionar que o processamento de resíduos de baterias é um problema crítico. A maioria das baterias acaba em aterros sanitários, levando à poluição da terra e da água. A solução mais eficaz para reduzir os resíduos da bateria é de fato evitar o seu uso. A aplicação de tecnologias de coleta de energia, piezelétrica por exemplo, é importante também para reduzir a dependência que se tem das baterias, o que apresenta interessantemente impacto positivo no meio ambiente (TRAN; CHA; PARK, 2017) (BHALLA SURESH, 2017).

2.1.1 Coletores de Energia Vibracional

Atualmente diversas pesquisas vem sendo conduzidas para promover o desenvolvimento de métodos e sistemas para a geração de energia elétrica a partir da extração de energia do meio ambiente que nos cerca. Para tanto, existem três métodos principais de

Figura 3 – Número de publicações sobre captadores de energia piezoeletrônicos, eletromagnéticos e eletrostáticos na Web of Science entre os anos de 2003 e 2013.



Fonte: (TOPRAK; TIGLI, 2014)

extração de energia vibracional do meio ambiente (CARDOSO, 2006) (SHAREEF et al., 2016), a saber:

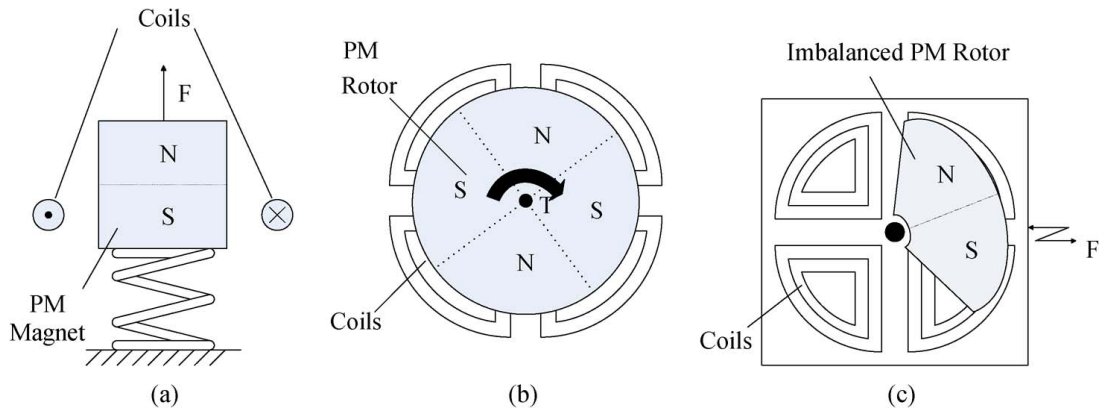
- Eletromagnético (que converte energia indutiva em elétrica)
- Eletrostático (que converte energia capacitiva em elétrica)
- Piezoeletrico (converte energia cinética em elétrica)

Os coletores eletromagnéticos, por sua vez, são classificados em três categorias: ressonantes, rotacionais e híbridos. A Figura 4 ilustra essas categorias dos coletores.

O coletor eletromagnético ressonante consiste basicamente em uma estrutura oscilante capaz de coletar a energia gerada pelo deslocamento entre um ímã permanente e uma bobina, conforme mostrado na Figura 4(a). De outra forma, o coletor rotacional tem o mesmo princípio de operação dos geradores magnéticos de grande escala, por exemplo as turbinas eólicas. Essa topologia está ilustrada na Figura 4(b). Por fim, o coletor híbrido converte o movimento linear em movimento de rotação usando um rotor de ímã permanente desequilibrado, conforme o modelo que pode ser visualizado na Figura 4(c). Detalhes do funcionamento podem ser encontrados na literatura mencionada.

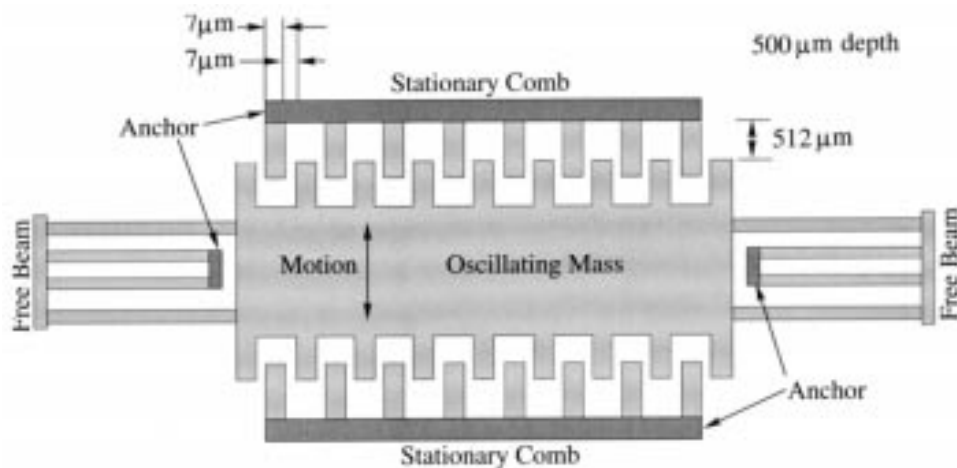
Os coletores vibracionais eletromagnéticos, por sua vez, tem sido amplamente utilizados nos projetos de coletores vibracionais híbridos, pois com a tecnologia MEMS é possível integrar o coletor eletromagnético e o piezoeletrico na mesma pastilha de silício (Awal et al., 2015). De fato, a integração dos coletores eletromagnéticos e piezoeletricos

Figura 4 – Topologias dos coletores eletromagnéticos. (a) Gerador ressonante. (b) Gerador rotacional. (c) Gerador híbrido.



Fonte: (Khaligh; Zeng; Zheng, 2010)

Figura 5 – Modelo do coletor eletrostático de capacitância variável produzido com a tecnologia MEMS por Meninger et al. (2001).



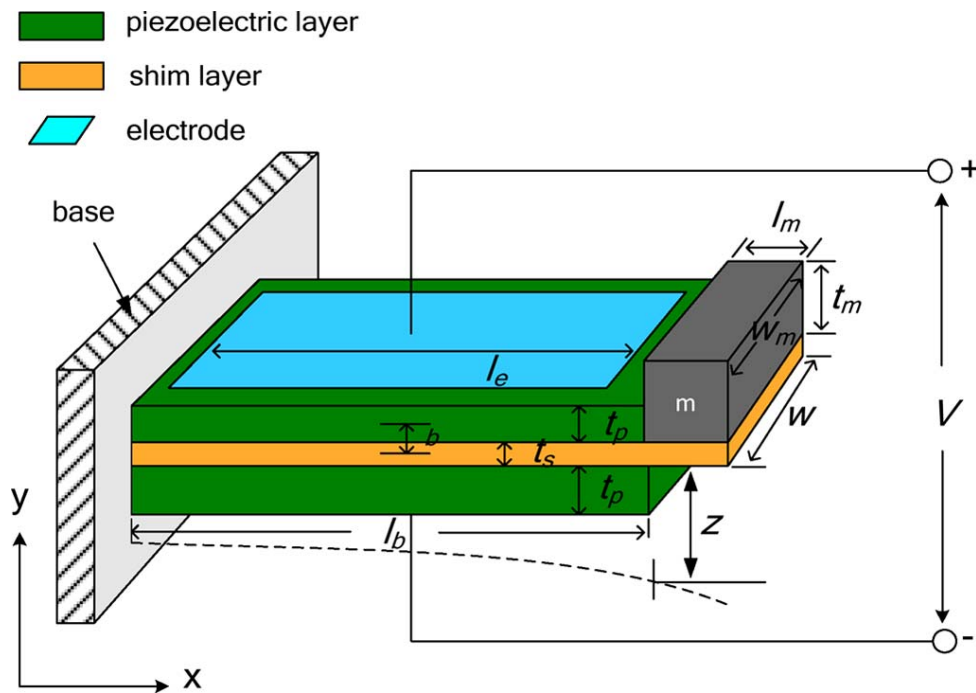
Fonte: (Meninger et al., 2001)

possuem uma complexidade mais elevada quando comparados com os coletores eletrostáticos (THAKARE; THAKARE; SHAHAKAR, 2018).

Com respeito aos coletores eletrostáticos, estes possuem duas placas separadas por um dielétrico que, com as vibrações, fazem as placas se movimentarem, alterando assim a capacitância do sistema. A principal vantagem deste coletor é facilidade de se incorporar no chip tanto os circuitos condicionadores quanto o próprio coletor. A desvantagem está na necessidade de uma fonte externa para iniciar o processo de conversão e as tensões geradas pelo transdutor, que usualmente não ultrapassam 1V (CARDOSO, 2006). A Figura 5 mostra o modelo de um coletor eletrostático.

Em contraste aos métodos anteriores, os transdutores piezelétricos convertem energia mecânica do movimento para o domínio elétrico, através do efeito piezelétrico que se consegue com o material PZT (UCHINO, 2017) com o qual são compostos (TOPRAK;

Figura 6 – Esquema do transdutor piezelétrico de feixe cantiléver.



Fonte: (Khaligh; Zeng; Zheng, 2010)

TIGLI, 2014).

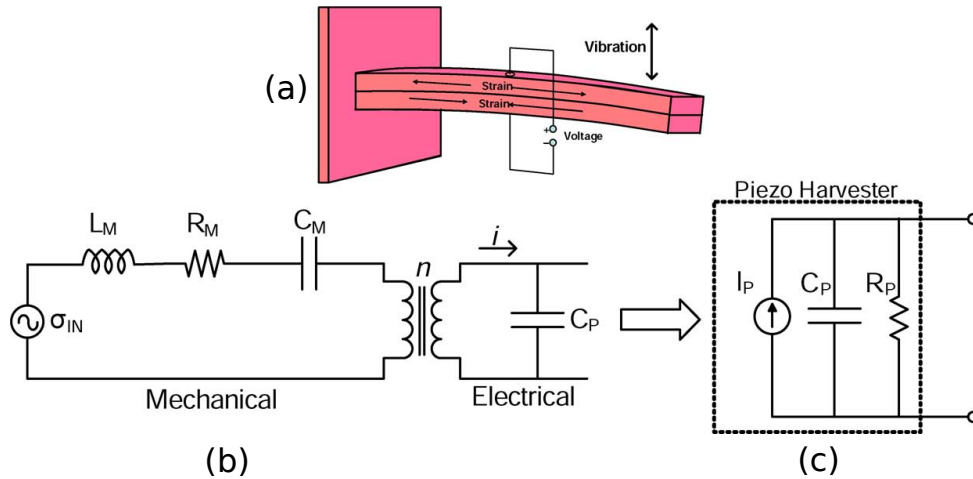
Os pesquisadores tem empregado com sucesso diferentes topologias de estrutura mecânica para a coleta de energia vibracional, algumas das configurações mais utilizadas são: feixe de cantiléver (KWON; RINCÓN-MORA, 2014), "prato"(KIM et al., 2004), placa (Yang; Chen; Hu, 2007), aerogeradores (PRIYA, 2005), polímeros piezelétricos longos (Taylor et al., 2001), *Four-Leaf Clover* (FLC) (IANNACCI et al., 2015), *buzzer* piezelétrico (CARDOSO, 2006), etc..

Dos diversos tipos de estrutura de transdutores piezelétricos encontrados na literatura, o mais utilizado é o que compõe um feixe de cantiléver, que é composto de uma ou mais camadas de material piezelétrico (PZT), montados com adesivo industrial na superfície superior, ou em ambas, do substrato. Uma massa de prova é adicionada na extremidade livre do cantiléver, para ajustar a frequência de ressonância e aumentar a potência de saída. A outra extremidade é presa em uma base fixa (Khaligh; Zeng; Zheng, 2010) (SANCHEZ et al., 2016) (AKTAKKA; NAJAFI, 2014) (DU et al., 2018) (SHAREEF et al., 2018). A Figura 6 representa o modelo do transdutor mencionado.

O processo de conversão de energia mecânica vibracional em carga elétrica é feita por meio do efeito piezelétrico direto, ou seja, sem a necessidade de entradas externas para induzir a conversão (TOPRAK; TIGLI, 2014). Este processo consiste basicamente em causar uma deflexão no transdutor o que produzirá uma deformação mecânica no material piezelétrico, gerando assim uma carga elétrica nas extremidades dos eletrodos.

Baseado neste processo de conversão de energia, é possível esboçar o domínio

Figura 7 – Esboço do circuito eletromecânico equivalente do transdutor piezelétrico. (a) Transdutor tipo feixe de cantiléver. (b) Modelo equivalente do transdutor evidenciando o domínio mecânico acoplado ao domínio elétrico por meio de um transformador (transcondutor) que converte tensão em corrente. (c) Coletor modelado no domínio elétrico.



Fonte: Adaptado de Ramadass e Chandrakasan (2010)

mecânico e elétrico do transdutor piezelétrico que, pode ser representado como um sistema massa-mola acoplado a um domínio elétrico, como mostrado na Figura 7. Nessa figura, L_M simboliza a massa mecânica, C_M simboliza a rigidez mecânica e R_M simboliza as perdas mecânicas. No domínio elétrico, C_P representa a capacitância intrínseca do material piezelétrico (Ramadass; Chandrakasan, 2010).

Quando o modelo eletromecânico do transdutor estiver em ressonância ou próximo dela, ele pode ser convertido para o domínio elétrico, onde as vibrações são modeladas por uma fonte de corrente senoidal em paralelo com a capacitância C_P onde a carga produzida pelo movimento é depositada, e a resistência R_P , que representa as perdas que ocorrem via o dielétrico não ideal do transdutor (Ramadass; Chandrakasan, 2010) (Jina Kim et al., 2008).

A escolha do método de conversão depende, com certeza, do tipo de aplicação pretendido, mas observa-se que os transdutores piezelétricos, mesmo quando as aplicações são de pequeno tamanho (volume reduzido) (KWON; RINCON-MORA, 2010), conseguem extrair mais energia do que os transdutores eletrostáticos e eletromagnéticos (CARDOSO, 2006) (PRABHA et al., 2011) (KWON; RINCON-MORA; TORRES, 2011).

Desta forma, esse trabalho analisa coletores de energia que buscam aumentar a quantidade de energia convertida utilizando o conceito de investimento de energia no transdutor piezelétrico, com o auxílio de um elemento indutor, sem a necessidade da adição de um circuito específico de retificação.

Embora os coletores de energia sejam uma alternativa viável para sistemas autônomos, estes possuem algumas limitações. Diferente de uma bateria, os transdutores possuem suas saídas significativamente dependentes dos fatores ambientais como por

exemplo: luminosidade, variação de temperatura, intensidade das vibrações, velocidade dos ventos e intensidade da radiação, etc. (Fan et al., 2015). Portanto, alimentar um microcircuito diretamente pelo transdutor não é adequado, exigindo assim circuitos adicionais de condicionamento, o que é discutido na seção 2.2. Antes, porém, é importante estudar as métricas mais usuais utilizadas para a avaliação de desempenho de coletores piezelétricos.

2.1.2 Métricas de Desempenho de Coletores Piezelétricos

Com o intuito de suprir o consumo de energia de dispositivos autônomos, os coletores piezelétricos precisam extrair a energia do ambiente eficientemente, maximizando o processo de coleta e minimizando as perdas. Uma das maneiras de se avaliar a eficiência de retificadores é compará-la com a eficiência de um retificador padrão (retificador de onda completa, por exemplo) (DU et al., 2018). Contudo, as condições de teste dos conversores nem sempre são idênticas em ambos, ou até mesmo as perdas intrínsecas do conversor não são contabilizadas, o que de certa forma prejudica a comparação.

Para tanto, algumas métricas para avaliação do desempenho de um sistema coletor foram descritas por Tabesh e Frechette (2010) e Dell'Anna et al. (2018) com o objetivo de melhorar a avaliação desses sistemas. Entre as métricas principais, podem ser citadas:

- **Eficiência:** É a relação entre a potência de saída gerada e a potência de entrada disponível. As perdas de energia do coletor precisam, necessariamente, ser contabilizadas. Assim, quanto menores as perdas, mais alta é a eficiência.
- **Complexidade:** Refere-se, de fato, à complexidade dos circuitos que compõe o coletor, e está diretamente ligado à eficiência. Devido ao fato da potência de entrada disponível ser limitada, circuitos complexos podem consumir muito, tanto que o coletor não consiga gerar energia suficiente para suprir o seu próprio consumo.
- **Adaptabilidade:** A energia que o ambiente disponibiliza nem sempre é consistente e para que essa energia seja extraída eficientemente, o coletor deve, então, monitorar constantemente estas variações ambientais e adaptar o coletor para cada situação. Os principais parâmetros que influenciam na extração de energia é a amplitude e a frequência das vibrações, sem mencionar a disponibilidade e consistência das mesmas.
- **Integração:** Os coletores piezelétricos, via de regra, não são facilmente integráveis, pois, em geral (visto as frequências de operação reduzidas destes sistemas) utilizam indutores e capacitores de valores relativamente elevados para serem integrados. Adicionalmente, os materiais envolvidos e o tamanho do transdutor em si impõem outras dificuldades.

- **Operação de partida:** Trata-se da capacidade do coletor iniciar sua operação sem energia ("partida a frio"). Se o coletor necessitar que os circuitos de controle e condicionamento operem antes do coletor ser excitado pelas vibrações, alguma energia deverá estar disponível a prior. Portanto, se o coletor não possuir um plano de "partida a frio" ou a bateria estiver totalmente descarregada, o sistema não iniciará.
- **Tensão mínima de operação:** Se o coletor de energia não prevê um mecanismo para a "partida a frio", este precisa cessar sua operação ao atingir a tensão mínima de alimentação, na falta de vibrações externas, prevenindo a total descarga da bateria.

2.2 CONVERSORES AC-DC

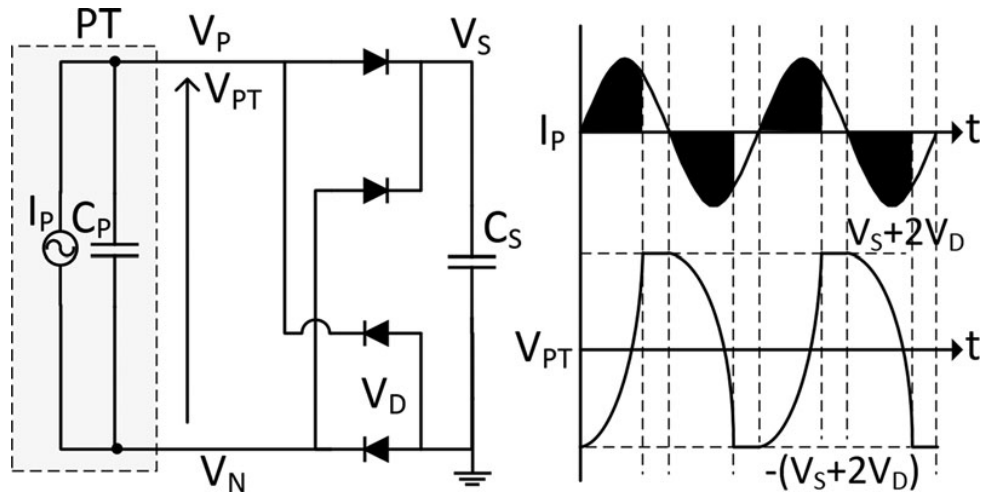
A natureza da energia gerada pelo transdutor piezelétrico não permite carregar uma bateria ou um supercapacitor diretamente, pois a excitação do transdutor pelas vibrações geram, em sua saída, tensões AC que, por sua vez, possuem componente DC nula. Como solução, normalmente conversores AC-DC são empregados.

A interface padrão utilizada para converter energia AC em energia DC são as pontes de diodos passivas. A interface que a Figura 8 mostra, emprega quatro diodos que interligam o transdutor P_T ao capacitor de armazenamento de energia C_S . Contudo, estes retificadores necessitam de uma tensão mínima em sua entrada para conduzirem, a tensão a ser superada é $V_S + 2V_D$ ou $-(V_S + 2V_D)$, ou seja, o capacitor C_S será carregado somente se a tensão V_{PT} superar a queda de tensão dos diodos V_D e a tensão V_S , onde V_S corresponde a tensão sobre C_S . Quando a tensão V_{PT} , em magnitude, for menor que $C_S + 2V_D$, no ciclo positivo, a energia armazenada em C_P não se transfere para C_S , no entanto acaba sendo desperdiçada (LIANG; LIAO, 2009) (LIANG; LIAO, 2010) na troca de polaridade de V_{PT} , de $V_S + 2V_D$ para $-(V_S + 2V_D)$. Isto ocorre da mesma forma no ciclo negativo. A Figura 8 ilustra as perdas de energia nas áreas destacadas em preto (SANCHEZ et al., 2016).

Com o intuito de reduzir o consumo de energia e a tensão de limiar na qual os retificadores operam, diodos *Schottky* ou transistores MOS tem sido propostos (KWON; RINCÓN-MORA, 2014) (NAIKWAD et al., 2017). Ainda assim, existe um pequeno limiar (Tensão de *Threshold*, no caso do transistor MOS) à ser superado e a dependência de uma tensão de polarização (MCCULLAGH, 2018).

Na busca de soluções mais eficientes, que permitam uma maior extração de energia, a literatura vem sistematicamente reportando o uso de circuitos ressonantes (LIANG; LIAO, 2010) (Dell'Anna et al., 2018). Nessas soluções, introduz-se um circuito ressonante (circuito LC), por um curto período de tempo, entre o indutor e o capacitor parasitário do transdutor piezelétrico, o qual permite extrair toda a energia do transdutor (AKTAKKA; NAJAFI, 2014) (SHAREEF et al., 2018). Em função do curto período de utilização do elemento

Figura 8 – Retificador de onda completa e suas curvas associadas.



Fonte: (DU et al., 2018)

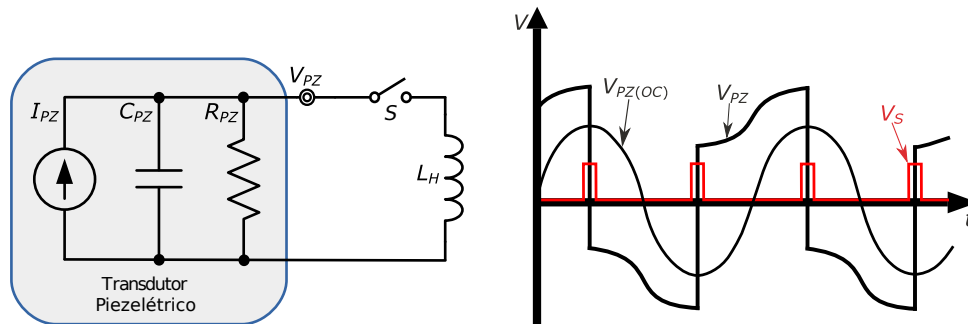
L, os valores de indutância são realizáveis.

Observando as mais diversas técnicas de conversão de energia, de retificadores ressonantes, retratadas na literatura, uma breve classificação mostra-se oportuna. Entre os principais:

- **Retificador Piezelétrico Ressonante Convencional:** Os retificadores ressonantes conseguem aumentar significativamente a eficiência de coleta de energia vibracional, em comparação aos retificadores de onda completa. Para isso, esses retificadores usam componentes magnéticos comutados como indutores ou transformadores. A Figura 9 ilustra o artifício da ressonância, que consiste em conectar o elemento indutor L_H ao transdutor por intervalos de tempo muito curtos e bem definidos. Em contrapartida, ocorre a necessidade de um controle de tempo bastante rigoroso. Desta forma, é criado um circuito oscilador LC entre o indutor e o capacitor parasita C_{PZ} . O resultado deste efeito é a capacidade de gerar uma tensão máxima que eventualmente pode exceder o pico máximo gerado pelo transdutor quando em configuração de circuito aberto $V_{PZ(OC)}$ (Dell'Anna et al., 2018) (GUYOMAR; LALLART, 2011) (Du et al., 2016).
- **Retificador P-SSHI e S-SSHI:** Os SSHI (Coletores de Interruptor Sincronizado no Indutor) são os primeiros retificadores ressonantes relatados pela literatura (GUYOMAR; LALLART, 2011) (Dell'Anna et al., 2018). A configuração tanto do circuito P-SSHI quanto do circuito S-SSHI são bastante similares, pois ambos interligam o transdutor à uma ponte de diodos, seguidos de um capacitor de armazenamento C_{BAT} , porém, um possui a chave S e o elemento indutor L_H conectados em paralelo e o outro em série, respectivamente.

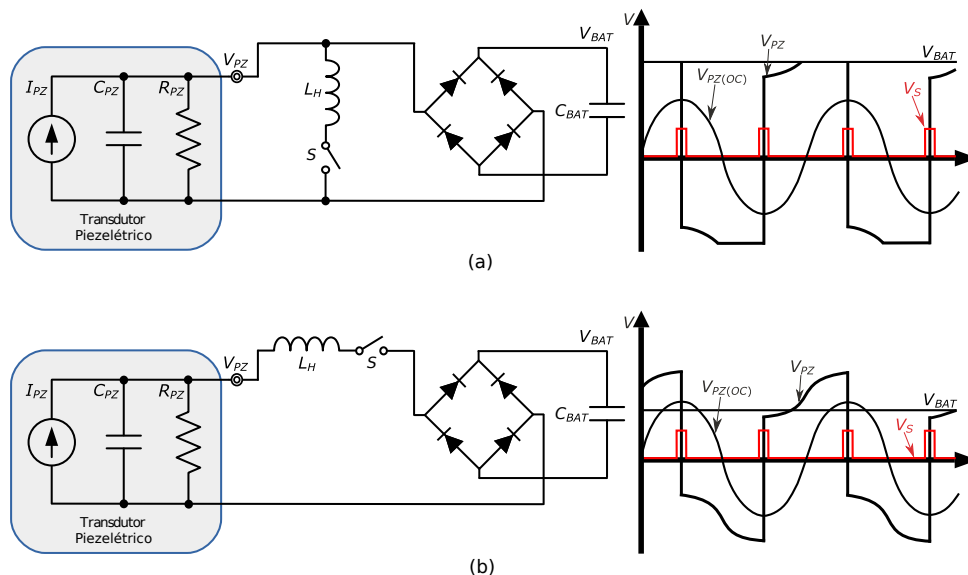
Em ambos retificadores, a chave S é fechada quando a curva da tensão V_{PZ} atinge

Figura 9 – Circuito ressonante típico destacando as curvas da tensão V_{PZ} , a curva de V_{PZ} em circuito aberto $V_{PZ(OC)}$ e o sinal V_S de controle da chave S .



Fonte: Adaptado de Dell'Anna et al. (2018)

Figura 10 – Circuito esquemático e respectivas formas de onda do (a) retificador P-SSHI e do (b) retificador S-SSHI.

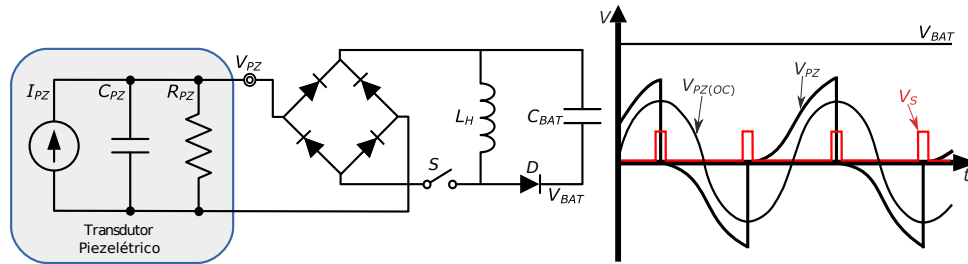


Fonte: Adaptado de Dell'Anna et al. (2018)

seu valor máximo (positivo ou negativo) e permanece com a chave fechada até que a inversão da tensão do transdutor seja obtida. No entanto, o retificador P-SSHI estabelece a sua inversão após o processo de extração de energia, enquanto o retificador S-SSHI tem a sua inversão e extração de energia ao mesmo tempo, conforme pode ser observado na Figura 10.

A inversão de tensão modifica a força eletrostática que se opõe às vibrações do material piezolétrico. Esse efeito é conhecido como amortecimento eletromecânico e em princípio pode afetar a eficiência geral de conversão, e mesmo desacelerar as vibrações. Transdutores com alto fator de acoplamento são afetados diretamente na sua eficiência, no entanto, pequenos transdutores que possuem baixo fator de acoplamento, o efeito é fracamente observável. Assim, em transdutores pequenos,

Figura 11 – Circuito SECE com suas respectivas curvas de V_{PZ} , $V_{PZ(OC)}$ e o sinal de comutação de V_S .



Fonte: Adaptado de Dell'Anna et al. (2018)

o amortecimento não revela-se um problema, e a inversão da tensão no transdutor pode ser empregada de forma a se coletar mais energia (GUYOMAR; LALLART, 2011) (Rincón-Mora; Yang, 2016). Em princípio, essa é a teoria por trás do conceito de (re) investimento de energia, que será abordado na seção 2.3.

- **Retificador SECE:** Os retificadores abordados anteriormente consistiam em conectar o transdutor ao elemento de armazenamento diretamente (ou por meio de um indutor), o que torna as potências coletadas dependentes da carga conectada. Com o propósito de corrigir essa deficiência mantendo o conceito de SSHI, foi proposto a técnica SECE (Extração de Carga Elétrica Síncrona). Essa técnica modifica ligeiramente a interface, inserindo o indutor após o retificador de ponte, desta forma o indutor passa a ser um elemento de armazenamento intermediário. A chave S , exibida na Figura 11, permanece aberta praticamente durante todo o período de vibração, evitando então a ligação direta do transdutor com a carga. Adicionalmente, com a inserção do indutor após o retificador, não ocorre mais a inversão de tensão sobre o transdutor piezoelétrico, o que previne qualquer amortecimento mecânico.

Nessa topologia, a chave S é acionada quando a tensão V_{PZ} atinge seu pico (máximo ou mínimo), instante quando o indutor L_H é magnetizando com a energia disponível no transdutor. A chave é aberta, quando a tensão V_{PZ} cai a zero, e a energia depositada no indutor é então transferida para o armazenamento, contribuindo em V_{BAT} (LEFEUVRE et al., 2007) (GUYOMAR; LALLART, 2011).

Tendo em vista que esse trabalho modela a topologia implementada por Kwon e Rincón-Mora (2014) e que o transdutor piezoelétrico para a conversão de energia mecânica em elétrica, em função do pequeno tamanho, tem um baixo acoplamento eletromecânico, os efeitos do amortecimento mecânicos são insignificantes. Portanto, injetar energia no sistema mostra-se atrativo no domínio dos coletores. Essas topologias, serão vistas na seção a seguir.

2.3 CONCEITOS DE INVESTIMENTO E REINVESTIMENTO DE ENERGIA

Como os coletores de energia vibracional piezelétricos operam em uma banda relativamente estreita em função das vibrações que se mostram disponíveis, (IANNACCI et al., 2015), que se restringe em torno da frequência de ressonância do coletor (SHA-REEF et al., 2018), e devido o seu fator de acoplamento eletromecânico ser baixo (KWON; RINCÓN-MORA, 2014), eles produzem pouca potência. Para contornar essas deficiências e aumentar o poder de conversão do transdutor, o conceito de investimento de energia foi proposto. Esse conceito consiste em injetar energia da bateria no transdutor com o auxílio de um elemento indutor. O investimento concentra-se em injetar energia no transdutor para aumentar a força elástica do material contra a qual as vibrações funcionam (PRABHA et al., 2011).

A capacidade de converter energia mecânica em elétrica diminui os efeitos da força que move o transdutor, ou seja, aumenta a força que se opõe ao movimento. Portanto, investir energia elétrica no elemento transdutor para aumentar a força eletrostática de oposição das vibrações faz com que o transdutor extraia mais energia das vibrações e, como resultado, converte mais energia do domínio mecânico das vibrações para o domínio elétrico (KWON; RINCÓN-MORA, 2014) (LALLART; GUYOMAR, 2010).

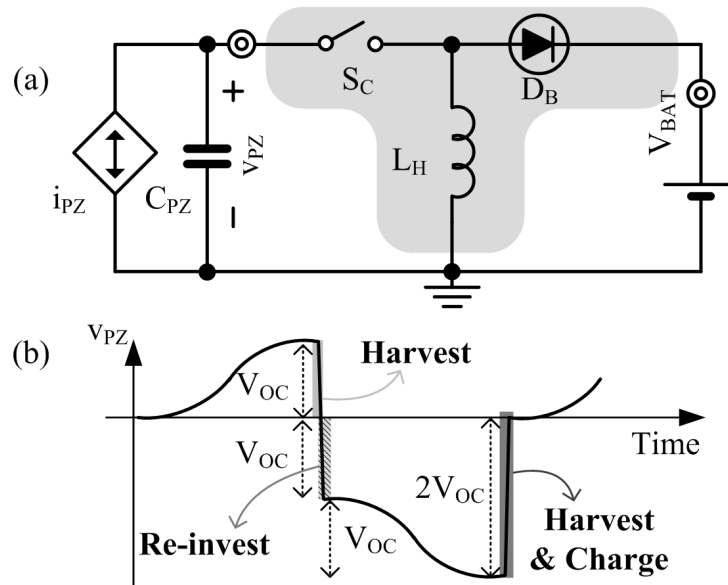
No entanto, investir muita energia, ou seja, aumentar a força de amortecimento acima de um limite crítico pode afetar as vibrações de tal forma que elas podem eventualmente até cessar. Ultrapassar esse limite, no caso de transdutores miniaturizados, por outro lado, dificilmente irá cessar por completo as vibrações, pois o fator de acoplamento eletromecânico do transdutor é proporcionalmente baixo. O investimento excessivo, além de limites práticos, oportuniza um consumo excessivo, pois quanto maior a quantidade de energia investida no sistema, maior serão as perdas (KWON; RINCÓN-MORA, 2014).

De acordo com Kwon e Rincón-Mora (2012):

Irrespective of the electronics used and investment scheme adopted, there is an optimal electrostatic damping force (i.e., pre-charge voltage V_{PC}) with which to draw the most power from a vibrating piezoelectric transducer.

Uma forma de buscar o amortecimento ideal, é utilizar-se do conceito de reinvestimento de energia, que consiste em extrair a energia convertida pelo transdutor, com auxílio do indutor, e transferi-la novamente para o capacitor intrínseco do transdutor (C_{PZ}). A Figura 12 ilustra o conceito de reinvestimento mencionado anteriormente. A Figura 12(a) mostra o circuito esquemático utilizado para gerar as curvas da Figura 12(b). Inicialmente a chave S_C abre para que o transdutor carregue C_{PZ} com I_{PZ} no meio ciclo positivo das vibrações, até o pico de V_{PZ} em V_{OC} . Situação quando a chave S_C fecha e permite drenar a energia coletada de C_{PZ} para L_H . S_C permanece fechada para permitir a transferência da energia de L_H (associado a V_{OC}) de volta para C_{PZ} , só com polaridade invertida ($-V_{OC}$). Esse retorno da energia para C_{PZ} estabelece o conceito de reinvestimento, permitindo

Figura 12 – (a) Circuito coletor de indutor comutado e (b) suas respectivas formas de onda de V_{PZ} representando o conceito de reinvestimento de energia.



Fonte: (KWON; RINCÓN-MORA, 2012)

assim, extrair maior quantidade de energia de um transdutor piezelétrico.

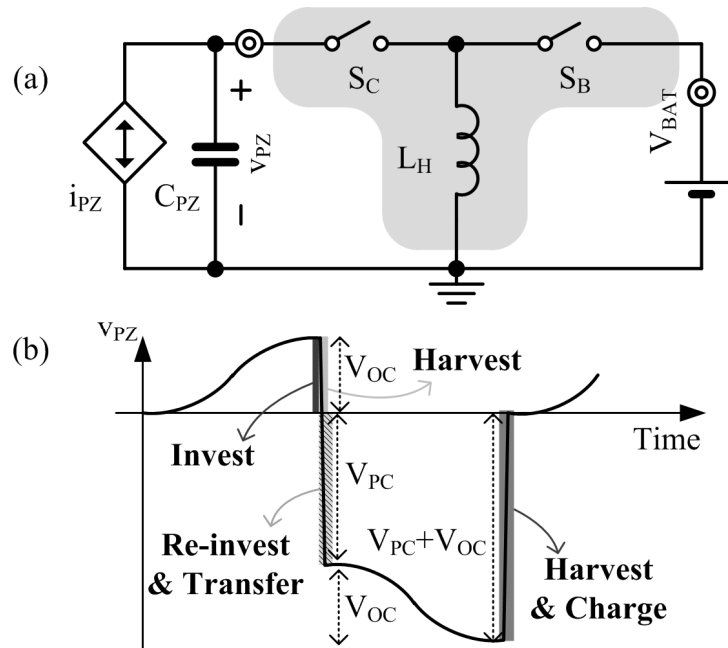
A chave S_C então é aberta para permitir que C_{PZ} seja carregado, com I_{PZ} , durante o ciclo negativo até que V_{PZ} alcance seu pico negativo em $-2V_{OC}$. Nesse instante, S_C é fechada para transferir toda energia, a energia reinvestida inicialmente mais a energia coletada, para L_H . Após, a chave S_C é imediatamente aberta, o que direciona a energia presente em L_H através do diodo D_B para V_{BAT} , até que a corrente no indutor se esgote totalmente.

Como as vibrações nem sempre são constantes e consistentes no ambiente, é improvável que apenas reinvestindo a energia coletada seja alcançado o amortecimento ideal. Para contornar esse contratempo, utiliza-se do investimento de energia da bateria para complementar. Compondo desta forma o conceito de re-investimento (investimento e reinvestimento juntos).

De outra forma, utilizar somente o conceito de investimento de energia trará muitas perdas de energia devido as transferências, portanto, os dois conceitos combinados, investimento e reinvestimento, produzem perdas, mas seus ganhos de coleta superam essas perdas. Como as perdas aumentam com o aumento da quantidade de energia conduzida pelo sistema, para tanto, buscar pela quantidade apropriada de energia a ser investida é um importante aspecto de projeto nos sistemas com investimento (KWON; RINCÓN-MORA, 2012).

A Figura 13 ilustra o conceito de investimento de energia. Vale mencionar para clareza que no investimento de energia, o re-investimento permanece como anteriormente descrito.

Figura 13 – (a) Circuito coletor de indutor comutado e (b) suas respectivas formas de onda de V_{PZ} que representam o conceito de re-investimento (investimento e reinvestimento) de energia.



Fonte: (KWON; RINCÓN-MORA, 2012)

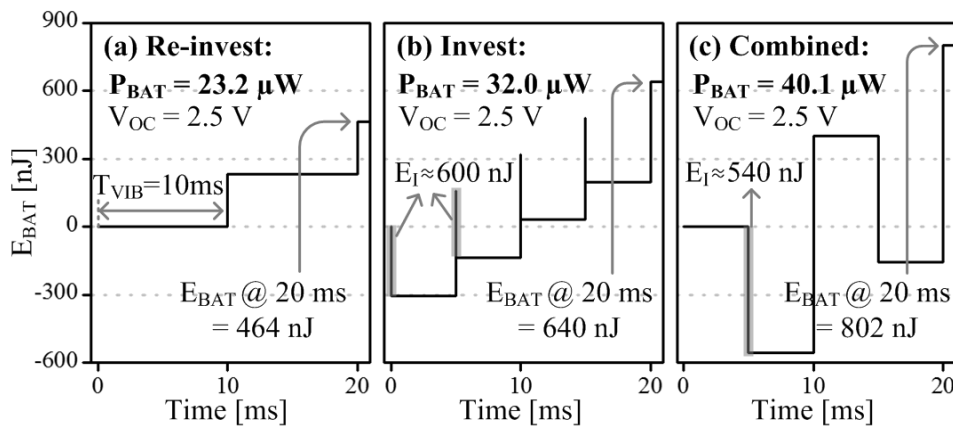
Outrossim, o conceito de re-investimento derivado do esquemático mostrado na Figura 13(a) pode ser compreendido através das curvas da Figura 13(b), onde os interruptores S_C e S_B estão inicialmente abertos, para que V_{PZ} carregue C_{PZ} com I_{PZ} até o pico positivo em V_{OC} . Nesse instante, a chave S_B é fechada durante τ_I para magnetizar o indutor L_H com energia da bateria (o que caracteriza o investimento de energia). Logo após, S_C é fechada, de forma que a energia coletada no ciclo positivo seja transferida para o indutor, energizando L_H ainda mais com a energia armazenada em C_{PZ} . A chave S_C permanece fechada até que toda energia presente no indutor (aquela investida pela bateria mais a energia coletada, caracterizando o conceito de re-investimento) seja transferida para C_{PZ} novamente, pré carregando C_{PZ} para $-V_{PC}$.

Durante o semi-ciclo negativo da vibração, o capacitor C_{PZ} é carregado ainda mais no sentido negativo até que C_{PZ} atinja o pico negativo de V_{PZ} em $-(V_{PC} + V_{OC})$. Em seguida, S_C fecha para extrair toda a energia armazenada em C_{PZ} para L_H . Após a transferência, S_C abre e então S_B , por sua vez, fecha, para depositar toda energia do indutor na bateria (até que a corrente no indutor seja zero).

Em última análise, Kwon e Rincón-Mora (2012) exibe curvas comparativas na Figura 14 que comprovam o poder de colheita para cada conceito individualmente. De fato, o re-investimento mostra-se uma topologia bastante atraente uma vez que o perfil de carga da bateria mostrado, quando na presença do investimento, supera os demais.

Contudo, para que se busque sempre uma coleta de energia ótima ou próxima da

Figura 14 – Perfil de carga da bateria para os conceitos de (a) reinvestimento apenas, (b) investimento apenas e, (c) investimento e reinvestimento combinados.



Fonte: (KWON; RINCÓN-MORA, 2012)

ótima, é importante controlar os sistemas de investimento. Com essa perspectiva, este trabalho busca também modelar um controle de investimento de energia inteligente. A seção 2.4 detalha conceitos e modelos de algoritmos inteligentes que buscam pontos de operação para coleta com elevada eficiência.

2.4 ALGORITMOS DE MPPT

Considerada a perspectiva de que existe uma quantidade ideal de energia a ser investida no transdutor, para a qual haverá uma maior coleta de energia, a inserção de algoritmos de MPPT (Rastreamento de Ponto Máximo de Potência ou coleta de energia) para controle do processo de investimento e da própria quantidade de energia investida é inquestionável. Ainda mais considerando-se que as quantidades de energia coletadas são pequenas, e que buscar qualquer melhoria nesse sentido é essencial.

Na literatura, os algoritmos de MPPT possuem uma ampla aplicação em sistemas de coleta de energia fotovoltaica, dentro da eletrônica de potência, para maximizar continuamente a potência de saída dos geradores fotovoltaicos (BANDYOPADHYAY; CHANDRAKASAN, 2012) (JIANG; HAN; ZHANG, 2017) (ABDELMOATY et al., 2017) (VERMA et al., 2016) (BERIBER; TALHA, 2013) (MOHAPATRA et al., 2017).

A técnica de MPPT constitui basicamente a implementação de um algoritmo capaz de alcançar a máxima potência para a saída com base no processamento de amostragens frequentes da saída da matriz geradora (ELTAWIL; ZHAO, 2013). Na maioria das vezes, estes algoritmos de MPPT estão associados a algum tipo de conversor, geralmente conversores DC-DC, para controlar o sinal de referência do conversor (BENDIB; BELMILI; KRIM, 2015).

Dentre as inúmeras técnicas de MPPT existentes na literatura, as mais utilizadas para a coleta de energia vibracional são (VERMA et al., 2016) (MOHAPATRA et al., 2017)

(Deepti; Sharma, 2016):

- **Tensão em Circuito Aberto:** Essa técnica usa o fato de que a tensão de saída ideal é a metade da tensão de circuito aberto do retificador (KAWAI; KUSHINO; KOIZUMI, 2015).
- **Condutância Incremental:** A técnica da condutância incremental baseia-se no fato de que a inclinação da curva da potência versus a tensão é nula no Ponto de Potência Máxima (MPP). A tensão e a corrente são constantemente monitoradas para a tomada de decisão de aumentar ou diminuir a relação tensão corrente.
- **Perturbar e Observar (P&O):** É uma das técnicas mais utilizadas devido ao seu baixo custo e fácil implementação. A técnica opera perturbando a tensão de operação e observando a potência de carga.

No âmbito dos coletores piezelétricos, as técnicas de rastreamento de ponto máximo de potência também foram propostas com objetivos similares. A aplicação de MPPT nos circuitos coletores piezelétricos, comumente opera utilizando um conversor AC-DC altamente eficiente em conjunto com um conversor DC-DC com MPPT. Na maioria dos casos, os conversores DC-DC utilizam os métodos P&O ou o método de Tensão de Circuito Aberto. O método P&O detecta a tensão e corrente de saída do conversor AC-DC para efetuar o cálculo da potência de entrada e alterar a impedância de entrada do conversor DC-DC para cada ciclo. De outra forma, o método da tensão de circuito aberto detecta o valor da metade da tensão de circuito aberto (V_{OC}) do conversor AC-DC e o tem como tensão de saída ideal. Para isso, o conversor AC-DC deve ser desconectado temporariamente para a medição, o que causa perda de energia (FAN et al., 2018) (SHIM et al., 2014) (KAWAI; KUSHINO; KOIZUMI, 2015).

Observando o funcionamento das técnicas de MPPT, a técnica P&O mostrou-se mais adequada para controlar o tempo de investimento, porque a cada ciclo de coleta, o sistema precisa ajustar o tempo de investimento e observar as variações na saída para a tomada de decisão do próximo ciclo.

A literatura reporta uma numerosa quantidade de trabalhos que focam em maximizar a potência de saída dos coletores. Contudo, esse trabalho se utiliza do poder do MPPT para controlar a quantidade de energia investida no sistema, induzindo o transdutor a extrair ainda mais energia e, de outra forma, evitando que a injeção de energia seja excessiva em vibrações fracas, reduzindo, desta forma, as perdas quando comparado ao sistema projetado por Kwon e Rincón-Mora (2014), o qual não possui controle automático de injeção de energia.

2.5 LINGUAGEM COMPORTAMENTAL VERILOG-A

O Verilog-A é uma linguagem comportamental para a descrição de hardware em sistemas analógicos, destinado a permitir que projetistas possam criar e usar módulos descritos matematicamente.

A linguagem Verilog-A é um padrão IEEE¹ de alto nível com o objetivo de especificar o comportamento e as características de um circuito que, eventualmente, seja implementado em hardware.

Os modelos escritos em linguagem Verilog-A tendem a ser mais compactos e de fácil manutenção, quando comparados aos modelos escritos em linguagem C, que chegam a ser dez vezes mais extensos. Como o Verilog-A é uma linguagem padronizada e os modelos são disponibilizados em formato de código fonte, isso torna esses modelos portáteis, capazes de serem corrigidos, alterados ou aprimorados com facilidade (CONSULTING, 2019) (CADENCE DESIGN SYSTEMS, 2006) (KUNDERT; ZINKE, 2004).

Abordar detalhes dessa linguagem está fora do escopo deste trabalho. Por ora, cabe salientar que a escolha do Verilog-A foi parcialmente função da disponibilidade no *Framework Cadence*. Modelos elétricos foram inicialmente tratados e mesmo considerados, mas na visão deste autor, os resultados obtidos com o modelo Verilog-A do coletor foram comparáveis à literatura.

2.6 TOPOLOGIA TÍPICA DE SISTEMAS COLETORES DE ENERGIA

O diagrama em blocos de um sistema coletor de energia vibracional genérico, com transdutor piezelétrico e indutor está mostrado na Figura 15. O transdutor piezelétrico converte a energia mecânica do movimento E_{MEC} em energia elétrica E_{ELE} . Através de um circuito coletor (de fato um conversor AC-DC), a energia elétrica é então condicionada e armazenada em uma bateria (ou supercapacitor) ou mesmo utilizada diretamente pela carga Z_L ². Excluído o elemento transdutor, é portanto, o circuito coletor o elemento fundamental do sistema coletor de energia vibracional.

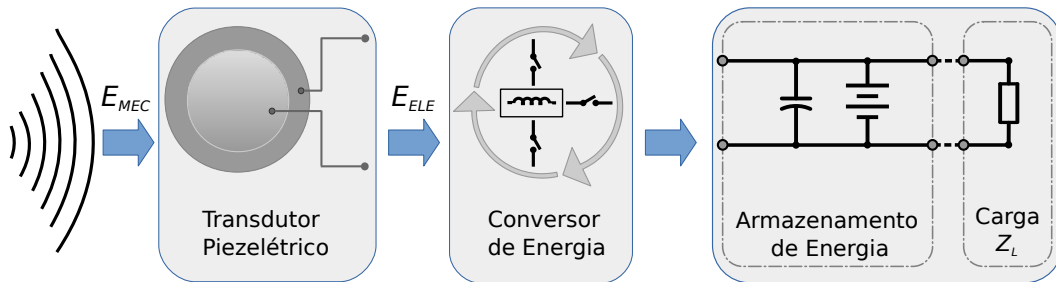
2.6.1 Descrição da Operação do Sistema de Coleta de Energia

O processo de conversão (após transdução) do circuito coletor de energia vibracional analisado neste trabalho é explicado a seguir a partir de seu circuito equivalente, mostrado na Figura 16. Trata-se um coletor de energia que utiliza o conceito de investimento de energia, e para os propósitos deste trabalho foi considerado como estado da arte. A Figura 17 mostra a tensão no elemento piezelétrico V_{PZ} e as correntes no indutor

¹<https://www.ieee.org/>

²Em muitos casos, outros conversores DC-DC e reguladores de tensão podem estar presentes. Estes foram omitidos na figura por simplicidades.

Figura 15 – Diagrama em blocos de um coletor de energia vibracional com transdutor piezelétrico e indutor. A energia coletada, após condicionada, é armazenada em uma bateria ou utilizada diretamente pela carga Z_L .



Fonte: Próprio Autor.

i_L e na bateria i_{BAT} para auxílio à descrição.

A operação do sistema coletor de energia vibracional inicia com as chaves MN_{PZ} e MP_{BAT} abertas durante o semi-ciclo positivo de V_{PZ} , semi-período durante o qual o capacitor C_{PZ} é carregado pela corrente I_{PZ} até a tensão $V_{PZ(PK+)}$. Essa energia coletada pode ser calculada utilizando a fórmula:

$$E_C = \frac{1}{2} \cdot C_{PZ} \cdot V_{PZ}^2 \quad (2.1)$$

Após, a chave MP_{BAT} é fechada, o que permite investir energia da bateria no indutor L_H durante o período de tempo τ_I , até que a corrente no indutor atinja cerca de 20mA, conforme mostrado na Figura 17 e de acordo com Kwon e Rincón-Mora (2014). Os valores de corrente evidentemente podem ser outros. A corrente no indutor pode ser calculada pela fórmula (onde assume-se a corrente inicial no indutor igual a zero):

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \cdot V \cdot t \quad (2.2)$$

Para $t = \tau_I$, então:

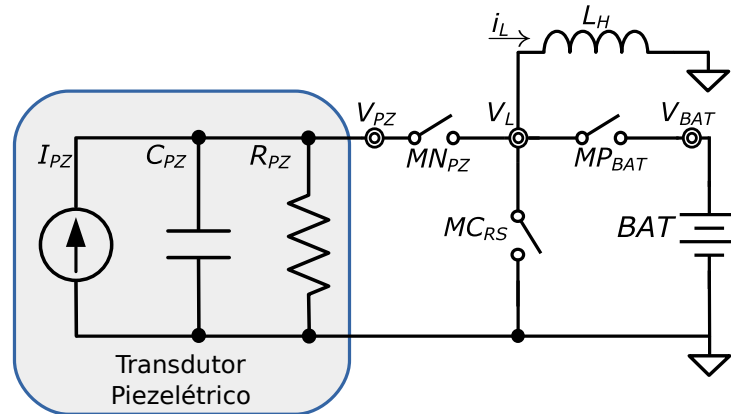
$$i_L(\tau_I) = \frac{1}{L} \cdot V_{BAT} \cdot \tau_I \quad (2.3)$$

Para $i_L(\tau_I)$ a energia investida é dada como:

$$E_{INV} = \frac{1}{2} \cdot L (i_L(\tau_I))^2 = \frac{1}{2} \cdot L \left(\frac{V_{BAT} \cdot \tau_I}{L} \right)^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{BAT}^2 \cdot \tau_I^2}{L} \quad (2.4)$$

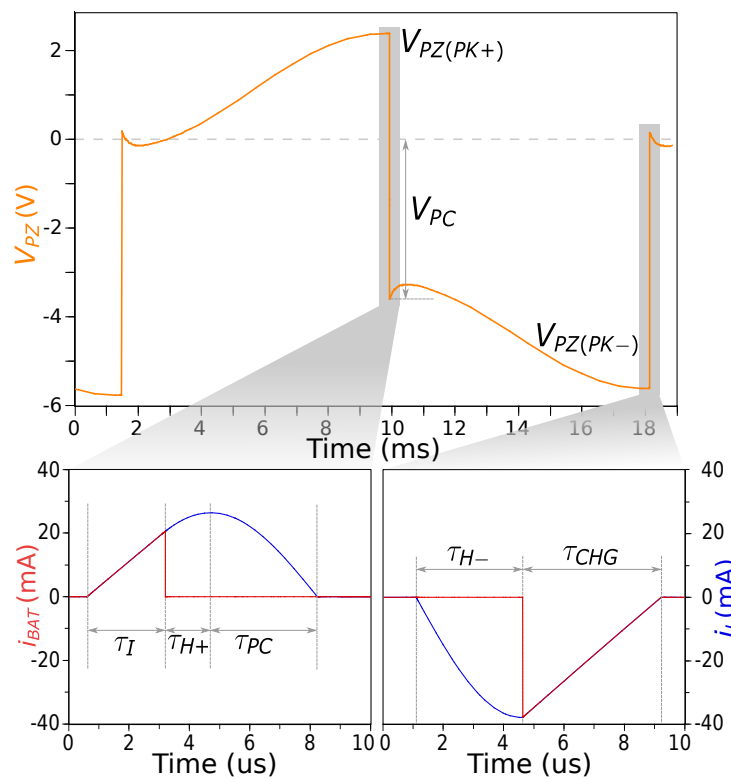
Em seguida, a chave MP_{BAT} abre e a chave MN_{PZ} fecha, o que permite transferir a energia que o transdutor coletou no meio ciclo positivo em C_{PZ} para o indutor, durante o período τ_{H+} . A chave MN_{PZ} permanece fechada para que a energia armazenada em L_H seja transferida (de volta) novamente para C_{PZ} , até que L_H esgote toda a sua energia, ou seja, a corrente i_L seja nula, carregando C_{PZ} desta forma negativamente, levando a tensão no elemento piezo de V_{PZ} para $-V_{PC}$.

Figura 16 – Circuito equivalente do coletor de energia vibracional com investimento de energia.



Fonte: Adaptado de Kwon e Rincón-Mora (2014).

Figura 17 – Tensão no elemento piezelétrico V_{PZ} , corrente no indutor i_L e na bateria i_{BAT} gerados pelo controle lógico.



Fonte: Adaptado de Kwon e Rincón-Mora (2014).

Durante o semi-ciclo negativo de V_{PZ} , as chaves MP_{BAT} e MN_{PZ} estão novamente abertas permitindo que I_{PZ} carregue ainda mais o capacitor C_{PZ} negativamente, levando a tensão V_{PZ} abaixo de $-V_{PC}$, até $-V_{PZ(PK-)}$, quando a chave MN_{PZ} é fechada, o que permite a transferência de energia de C_{PZ} para L_H durante τ_{H-} . Após, a chave MN_{PZ} é aberta e a chave MP_{BAT} é fechada, para que toda a energia de L_H seja transferida para a bateria (o que finda quando a corrente no indutor se aproxima de 0A, ou seja, após (τ_{CHG})), quando se recupera então a energia da bateria inicialmente investida, e se armazena o ganho de energia coletado a partir do transdutor.

Para suprimir altas tensões que ocorrem durante o chaveamento das chaves MN_{PZ} e MP_{BAT} , a chave MC_{RS} alterna no período de investimento onde MN_{PZ} e MP_{BAT} estão abertos, aterrando o ponto V_L . Essa chave, ainda que não participe da função principal do coletor, ajuda a preservar a integridade do circuito coletor. Adiante, estados específicos para supressão de sobretensões serão introduzidos à máquina de controle do coletor.

Para finalizar, cabe antecipar que a explicação feita do sistema coletor permite desde já a identificação de blocos funcionais necessários à operação do coletor, entre estes detectores de pico, circuitos de controle de tempo, etc. Detalhes a respeito serão discutidos a seguir.

2.6.2 Módulos Requeridos pelo Sistema

O sistema de coleta de energia vibracional implementado em (KWON; RINCÓN-MORA, 2014) possui diversos módulos, onde três são módulos sensores analógicos:

- *Inductor L_H Energy-drain Sensor*, que detecta a passagem por zero da corrente no indutor no semi-ciclo positivo de V_{PZ} , por meio de um divisor de corrente capacitivo;
- *Peak Detector*, que detecta a tensão de pico da tensão V_{PZ} , $V_{PZ(PK)}$
- *Charge Control Comparator* que detecta a passagem por zero da corrente no indutor no semi-ciclo negativo de V_{PZ} , por meio de um comparador de tensão sobre a chave MP_{BAT} .

Também, o sistema conta com dois blocos de controle *MN Control Logic* e *MP Control Logic* com *drivers* associados (DRV_N e DRV_P), além de um módulo de ajuste dos tempos de investimento τ_I e de *harvesting* τ_H , *Adjustable Delay*, um gerador de bias (*nA Generator*), além de três chaves MOS (M_N , M_P e M_C). Externamente, o sistema possui um transdutor piezelétrico, um indutor L_H , um capacitor C_{SS} e uma bateria.

Desta forma, estes módulos trabalham em conjunto para extrair energia das vibrações através do transdutor piezelétrico e armazenam em uma bateria.

Observando as lacunas do sistema e buscando a possibilidade de aprimorar seu funcionamento, foi possível destacar quesitos a serem melhorados como, por exemplo, a

não dependência de uma entrada externa para controlar o tempo de *harvesting* τ_{H-} e o tempo de investimento τ_I .

2.7 CONTRIBUIÇÕES

Conforme mencionado, a crescente importância dos sistemas autônomos, e a necessidade de se buscar energia do ambiente, como forma de auxílio à bateria desses sistemas, enseja a busca por soluções nesse tema. Este trabalho, assim, alinha-se com a literatura, e busca modelar um sistema de coleta de energia vibracional para suprir a necessidade de energia que advém dos sistemas autônomos. No modelo, busca-se uma capacitação analítica, para compreensão dos coletores, e também de projeto dos mesmos.

Para isso, revisita-se o sistema desenvolvido por Kwon e Rincón-Mora (2014), que salienta a utilização do conceito de investimento de energia para máxima extração da energia do transdutor. Como contribuição desse trabalho estabeleceu-se então a implementação de um algoritmo de MPPT para o controle automático dos tempos de investimento, diferentemente de Kwon e Rincón-Mora (2014), onde o tempo de investimento é ajustado externamente e de forma manual por meio de controle externo (V_{INV}).

Observe que o sistema deve, em essência, colher energia vibracional do ambiente e converte-la em energia elétrica. Um circuito coletor, com o auxílio de um indutor, faz a interface do transdutor com a bateria possibilitando extrair uma quantidade maior de energia do transdutor com utilização do conceito de investimento e, posteriormente, armazená-la em uma bateria ou supercapacitor.

Como o indutor é acionado apenas nos picos de tensão do transdutor, não há necessidade de inserir um bloco de retificação adicional como nos trabalhos de Chen et al. (2017), Sanchez et al. (2016), Du et al. (2018), Fan et al. (2018) e Kawai, Kushino e Koizumi (2015). A retificação direta, sem bloco retificador, reduz as perdas geradas sobre os diodos (ou diodos ativos).

O trabalho desenvolvido por Chen et al. (2017) é totalmente integrado e utiliza uma matriz de capacitores para extrair a energia do transdutor, contrapartida o circuito não consegue extrair o máximo da energia do capacitor parasitário do transdutor, por não possuir indutor na sua arquitetura. Kwon e Rincón-Mora (2014) reforça que a utilização do indutor garante uma extração aprimorada, porém compromete a incorporação do projeto em um circuito integrado.

Shareef et al. (2018) optou por coletar energia de diversos transdutores com apenas um indutor, mas para tanto foi necessário que alguns módulos do sistema fossem replicados para a mesma quantidade de transdutores, o que possibilita a coleta de uma maior quantidade de energia e conseqüentemente um maior consumo e maior área de circuito integrado.

A implementação de algoritmos de MPPT são amplamente utilizados quando as-

sociados a conversores DC-DC como pode ser visto nos trabalhos de Fan et al. (2018), Kawai, Kushino e Koizumi (2015) e Sanchez et al. (2016), no entanto o presente trabalho busca implementar um algoritmo MPPT em um circuito que não possui conversor DC-DC. Shareef et al. (2018) afirma que não há necessidade de se aplicar algoritmos de MPPT pelo motivo do indutor ser acionado somente nos picos de tensão do transdutor (V_{PZ}), contudo este trabalho contradiz essa teoria implementando um algoritmo de MPPT para o controle do tempo de investimento de energia da bateria no sistema.

3 MODELAGEM DO SISTEMA COLETOR PROPOSTO

Neste capítulo, a modelagem do coletor de energia com investimento de energia, discutido no capítulo anterior, é apresentada. Modificações introduzidas no coletor, são também modeladas. Os módulos sensores são analisados e modelados e os demais componentes requeridos inseridos no sistema. Após, o módulo de controle lógico e sua máquina de estados são detalhados e modelados junto com a descrição do funcionamento do coletor. Durante o capítulo, procura-se justificar o uso da modelagem em linguagem Verilog-A. Por fim, o impacto do investimento no perfil de carga da bateria é discutido.

3.1 SISTEMA COLETOR PROPOSTO

No modelo do coletor proposto, conforme mostrado na Figura 18, foram criados quatro módulos, sendo que três módulos são sensores e um de controle (que inclui o controle lógico propriamente dito e um bloco auxiliar para controle programável do tempo de investimento), além das chaves MN_{PZ} , MP_{BAT} e MC_{RS} . O elemento indutor L_H , o transdutor piezelétrico, a bateria e o sensor de corrente do indutor V_{AUX} foram assumidos fora do circuito integrado (*off-chip*).

Os módulos sensores estão descritos a seguir:

- **VpzPeakDetector**: módulo responsável pela detecção dos picos positivos e negativos do sinal proveniente do transdutor piezelétrico V_{PZ} . O pico positivo é sinalizado por meio de uma transição positiva na saída V_{PK} enquanto o pico negativo por meio de uma transição negativa nesse sinal.
- **ILCrossZero**: módulo responsável pela detecção da passagem por zero da corrente do indutor L_H , gerando uma transição positiva na saída $\tau_{HARVEST}$ quando a corrente no indutor, que é positiva, decresce até zero, ou uma transição negativa, quando a corrente no indutor, que é negativa, cresce até zero.
- **VpzCrossZero**: módulo responsável pela detecção da passagem por zero da tensão V_{PZ} , que implica na detecção do pico máximo da corrente que passa no indutor naquele instante, gerando uma transição positiva quando a tensão passa por zero no sentido decrescente e uma transição negativa no sentido crescente. Este módulo detector elimina a necessidade da entrada externa (V_{HARV}) que determina o tempo de *harvesting* τ_{H-} , citado no capítulo anterior.

Os demais componentes são:

- **InvestControl**: módulo que estabelece o tempo de investimento τ_I , ou seja, a quantidade de energia da bateria que é investida no sistema, gerando um pulso alto quando o investimento deve ser finalizado.

- Chaves MN_{PZ} MP_{BAT} MC_{RS} : as duas primeiras chaves permitem (ou inibem) a transferência de energia do piezo/indutor para o indutor/piezo e do(a) indutor/bateria para a(o) bateria/indutor, respectivamente. A chave MC_{RS} ajuda a eliminar as sobretensões que eventualmente aparecem durante o chaveamento das duas chaves anteriores.
- Indutor L_H : elemento cuja magnetização (durante o investimento de energia a partir da bateria) permite coleção de energia com maior eficiência em função da ressonância que se estabelece desse elemento com o capacitor CP_Z do transdutor.
- Transdutor Piezelétrico: responsável por converter a energia vibracional (mecânica/cinética) em energia elétrica V_{PZ} .
- Bateria ou supercapacitor: elemento fonte a partir do qual se investe a energia no sistema, e após o ciclo de coleção, é utilizado para armazenamento da energia coletada e recuperação da energia investida inicialmente.

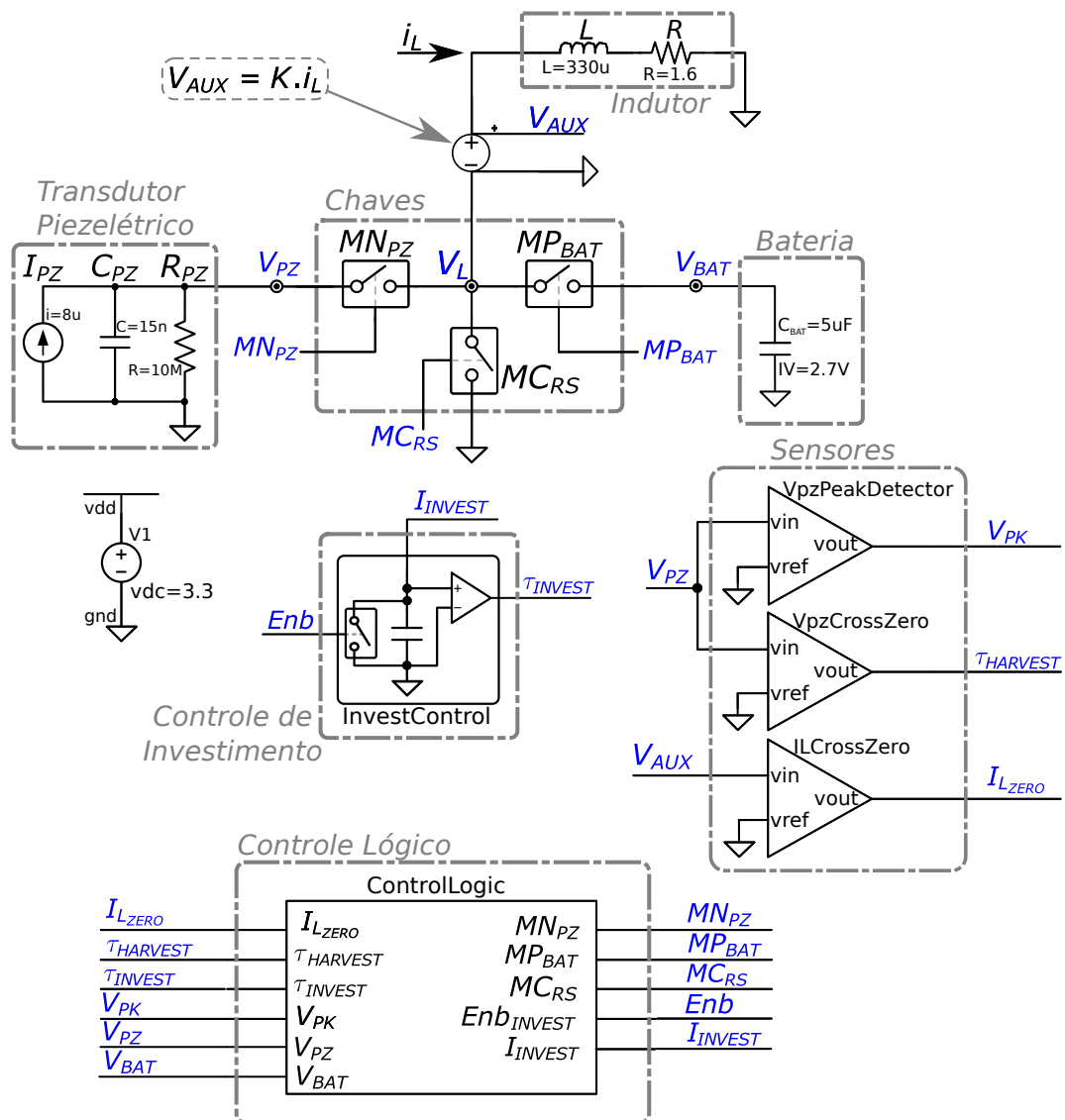
O módulo ControlLogic, desenvolvido neste trabalho para gerenciar o processo de coleta de energia vibracional, é apresentado e discutido na seção 3.2 em função de sua maior complexidade e quantidade de detalhes.

3.2 MÓDULO DE CONTROLE LÓGICO

O módulo de controle lógico do coletor de energia vibracional foi desenvolvido a partir de uma máquina de estados finita, está concebida a partir do estudo das necessidades do coletor apresentado no Capítulo anterior, mas também de outros requisitos, como o controle automático do investimento. A Figura 19 mostra a máquina ou diagrama de estados resultante. Apesar de o sistema em questão estar previsto para trabalhar nominalmente com 2.7V, os níveis associados a *High* e *Low* são 1V e 0V, respectivamente, em função da modelagem Verilog-A adotada.

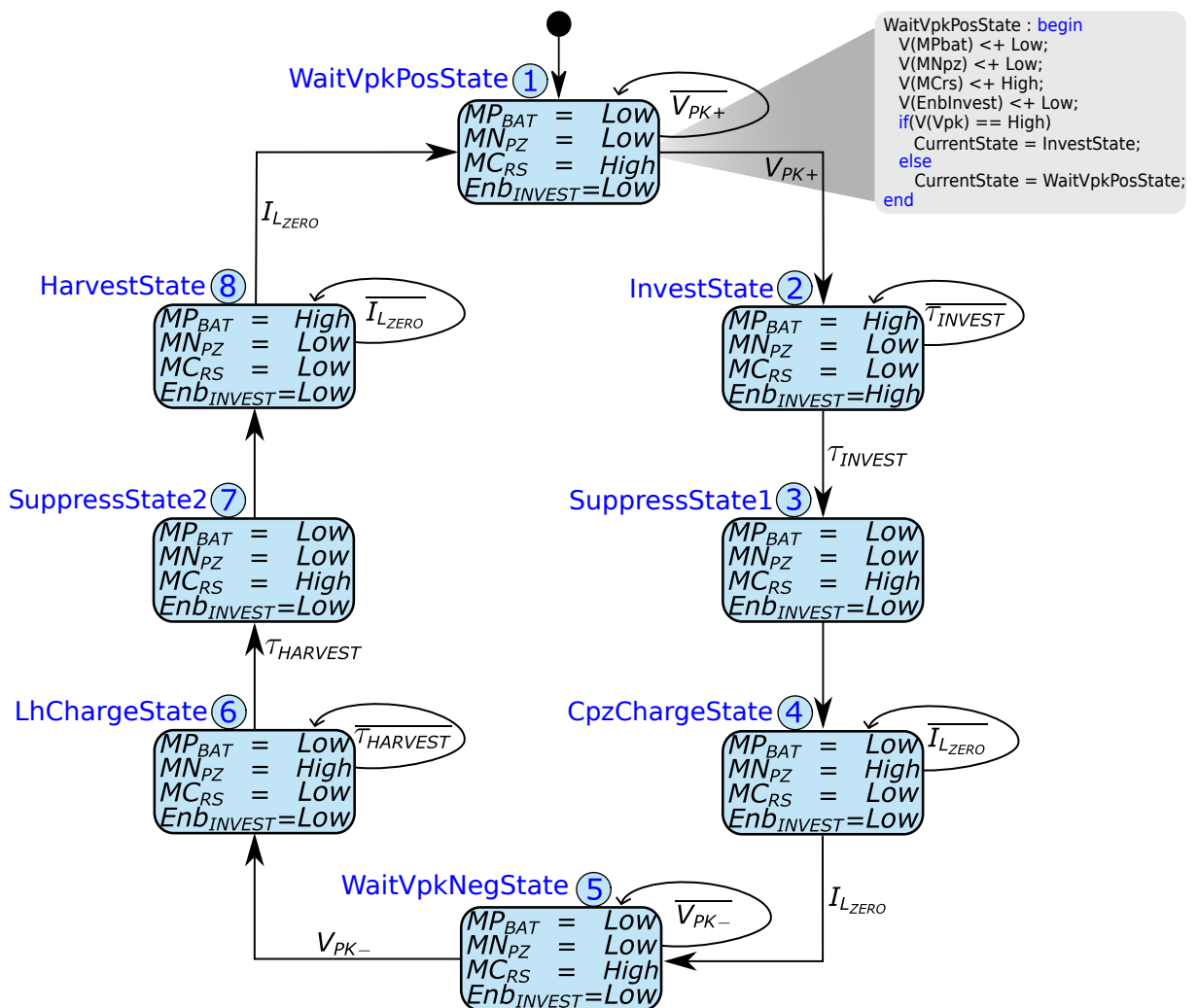
O módulo de controle lógico, conforme já mostrado na Figura 18, possui seis entradas, quatro responsáveis pela leitura dos sinais gerados pelos sensores e duas responsáveis pela leitura da tensão nos pontos V_{PZ} e V_{BAT} . Esse módulo, possui também quatro saídas que são responsáveis pelo controle da abertura ou fechamento das chaves e controle da reinicialização do módulo de investimento. A Tabela 1 sumariza esses sinais. A máquina de estados, por sua vez, mostrada na Figura 19, é detalhada na Tabela 2, através da descrição do processo que ocorre no sistema a cada estado, a atuação das saídas no sistema e a condição de saída do estado presente.

Figura 18 – Modelo do coletor piezelétrico proposto evidenciando os seus principais módulos.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 19 – Máquina de estados do circuito de controle do coletor de energia vibracional proposto. As saídas estão evidenciadas dentro do estado, assim como a condição de saída/permanência no estado, a cada estado.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 1 – Descrição das variáveis de entrada e de saída do Módulo de Controle Lógico do sistema coletor.

-	Nome	Descrição
Entradas	V_{PK}	Sinal proveniente do sensor de pico
	τ_{INVEST}	Sinal proveniente do bloco de controle do tempo de investimento
	I_{LZERO}	Sinal proveniente do sensor de passagem por zero da corrente no indutor
	$\tau_{HARVEST}$	Sinal proveniente do sensor de passagem por zero da tensão V_{PZ}
Saídas	Enb_{INVEST}	Sinal de <i>enable</i> para o bloco de controle do investimento
	MP_{BAT}	Sinal responsável por controlar o acionamento da chave MP_{BAT}
	MN_{PZ}	Sinal responsável por controlar o acionamento da chave MN_{PZ}
	MC_{RS}	Sinal responsável por controlar o acionamento da chave de supressão de sobretensões MC_{RS}

Tabela 2 – Tabela Descritiva da Máquina de Estados

Estado	Nome do Estado	Descrição	Atuação	Condição de Saída
1	WaitVpkPosState	Aguarda a carga de C_{PZ} até $V_{PZ(PK+)}$	As chaves MN_{PZ} , MP_{BAT} e MC_{RS} estão desligadas (OFF)	Quando V_{PZ} alcançar seu pico positivo $V_{PZ(PK+)}$
2	InvestState	Investimento da energia da bateria no sistema durante τ_I	Habilita o módulo de investimento e liga (ON) a chave MP_{BAT}	Término do investimento (τ_I)
3	SuppressState1	Evita o aumento da tensão em V_L durante a transição das chaves MN_{PZ} e MP_{BAT}	Liga a chave MC_{RS} para suprimir altas tensões em V_L	-
4	CpzChargeState	Pré-carga de C_{PZ} com $-V_{PC}$	Liga a chave MN_{PZ}	Quando a corrente i_L no indutor for igual a zero
5	WaitVpkNegState	Aguarda carga de C_{PZ} até $-V_{PZ(PK-)}$	As chaves MN_{PZ} , MP_{BAT} e MC_{RS} estão desligadas	Quando V_{PZ} alcançar seu pico negativo $-V_{PZ(PK-)}$
6	LhChargeState	Transfere a energia armazenada em C_{PZ} para L_H	Liga a chave MN_{PZ}	Quando V_{PZ} passar por zero
7	SuppressState2	Evita o aumento da tensão em V_L durante a transição das chaves MN_{PZ} e MP_{BAT}	Liga a chave MC_{RS} para suprimir altas tensões em V_L	-
8	HarvestState	Armazena a energia de L_H na bateria e/ou capacitor	Liga a chave MP_{BAT}	Quando a corrente i_L no indutor for igual a zero

3.3 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA COLETOR DE ENERGIA

A operação do sistema coletor de energia e o processo de coleta de energia propriamente dito está integralmente definido pelo bloco de controle. O funcionamento do sistema a seguir descrito (e os sinais associados) podem ser visualizados na Figura 20.

O procedimento de coleta de energia inicia no estado 1, onde o sistema aguarda a detecção do pico positivo de V_{PZ} , feita pelo módulo VpzPeakDetector (cuja saída é V_{PK}), e a carga do capacitor C_{PZ} até a tensão $V_{PZ(PK+)}$. Quando V_{PK} assume o nível lógico alto, o sistema passa para o estado 2, estado onde ocorre o investimento de energia no sistema, a partir da bateria. O tempo de investimento é definido pelo módulo InvestControl: a partir do momento em que o controle habilita esse módulo por meio do sinal Enb_{INVEST} , inicia-se o processo de investimento de energia a partir da bateria, através da magnetização do indutor L_H , durante o período τ_I . O término do período de investimento é sinalizado pelo módulo InvestControl a partir de seu sinal de saída τ_{INVEST} , o que determina a passagem do sistema para o próximo estado (estado 3) quando é efetuada a comutação entre MP_{BAT} e MN_{PZ} , com o auxílio da chave MC_{RS} que é fechada entre a abertura de MP_{BAT} e o fechamento de MN_{PZ} , para minimizar sobretensões no ponto V_L devido a flutuação do nó do indutor L_H durante a comutação.

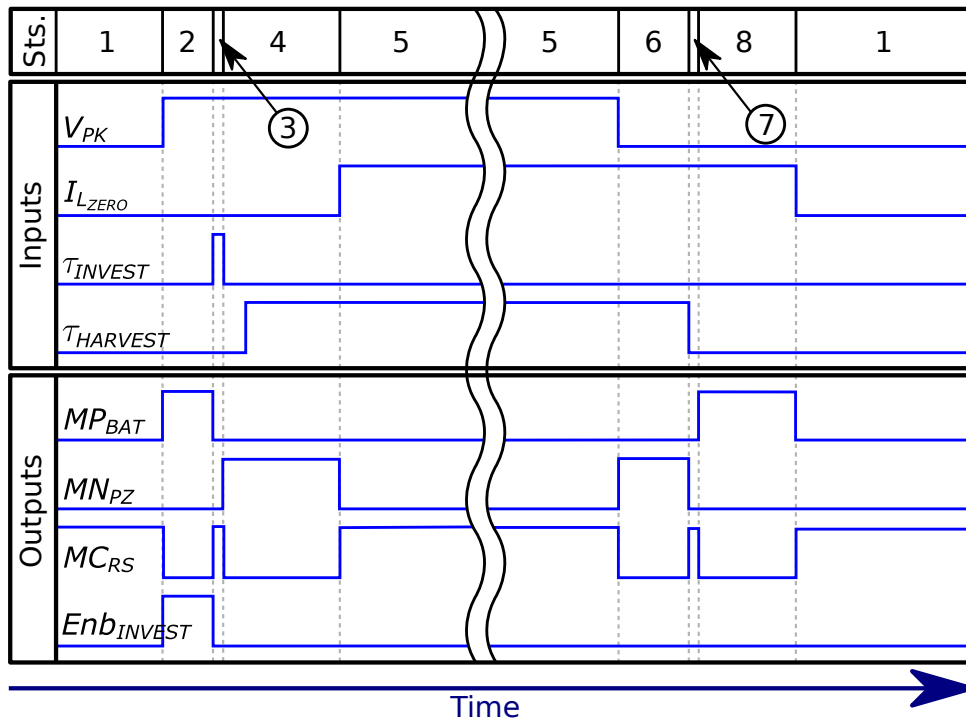
No estado 4, a chave MN_{PZ} é fechada, o que permite a primeira coleta de energia a partir da transferência de energia do capacitor C_{PZ} do piezo para o indutor L_H . Ainda no estado 4, após o término da coleta de energia do piezo, aguarda-se a (re)transferência total da energia do indutor L_H para C_{PZ} , assinalada pela passagem da corrente do indutor L_H por zero, momento esse sinalizado pelo sinal I_{Lzero} , do módulo ILCrossZero, que assume o nível lógico alto, quando o estado 4 finaliza. No estado 5, o capacitor C_{PZ} é carregado durante o semi-ciclo negativo, desde $-V_{PC}$ até $-V_{PZ(PK-)}$. Ao fim do semi-ciclo negativo da tensão no piezo V_{PZ} , o módulo VpzPeakDetector detecta o pico negativo de V_{PZ} $V_{PZ(PK-)}$, o que leva o sistema para o estado 6. Nesse estado, o sistema fecha a chave MN_{PZ} para permitir a transferência de toda a energia coletada no piezo para o indutor L_H , durante o período τ_{H-} , até que a tensão em V_{PZ} seja nula, o que finaliza o estado 6.

O estado 7, por sua vez, da mesma forma que o estado 3, suprime altas tensões no ponto V_L devido a flutuação de L_H com o fechamento da chave MC_{RS} por breve instante, no presente caso, um ciclo de relógio.

No estado 8 o sistema fecha a chave MP_{BAT} o que permite a transferência da energia contida no indutor L_H correspondente a toda a energia investida mais aquela coletada para a bateria, até que a corrente no indutor se esgote totalmente. Novo ciclo de coleta é reiniciado.

Para melhor entendimento do sistema, os resultados das simulações do coletor de energia estão mostradas na Figura 21. O módulo de controle lógico desenvolvido mostrou-se funcional ao controlar corretamente o chaveamento de MN_{PZ} , MP_{BAT} e MC_{RS} , pos-

Figura 20 – Detalhamento dos sinais de entrada e de saída do bloco de controle a cada estado do sistema.



Fonte: Próprio Autor.

sibilitando a reprodução das curvas da tensão V_{PZ} , da corrente no indutor I_L e da tensão na bateria V_{BAT} constantes em (KWON; RINCÓN-MORA, 2014). Em V_{BAT} é possível observar que os ganhos da coleta superam os gastos do investimento.

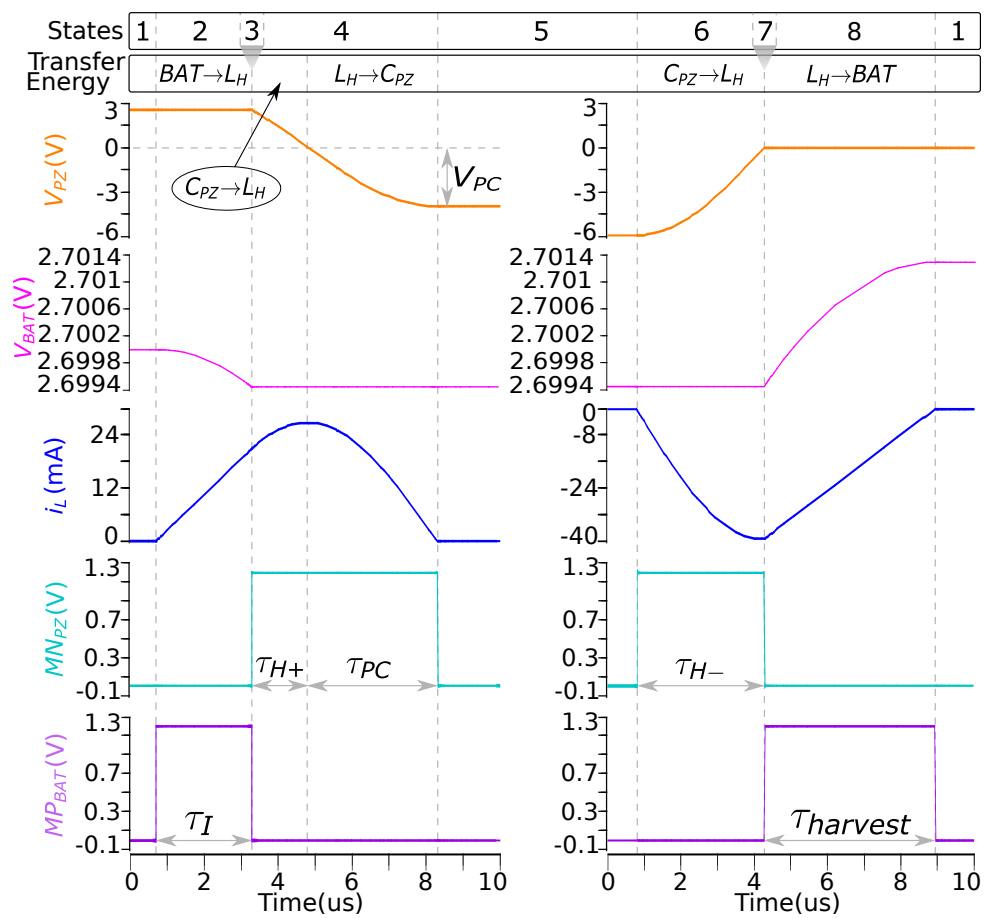
Por fim, a Figura 22 mostra alguns ciclos de coleta de energia, onde V_{BAT} tem sua rampa de carga crescente e constante devido as oscilações geradas por V_{PZ} , nestas simulações, também serem idealmente constantes.

3.4 MODELO VERILOG-A

A descrição em Verilog-A viabiliza aos projetistas criar modelos comportamentais sem a necessidade de implementação. Visto que, a implementação de um projeto é o objetivo final de uma pesquisa, de fato, é necessário que a modelagem permita sua síntese, ou seja, o projetista deve estar ciente de que o código criado seja sintetizável, do contrário sua aplicabilidade será bastante restrita. Por outro lado, se a implementação não é o alvo, é possível realizar a análise de um determinado projeto utilizando-se da descrição comportamental do modelo.

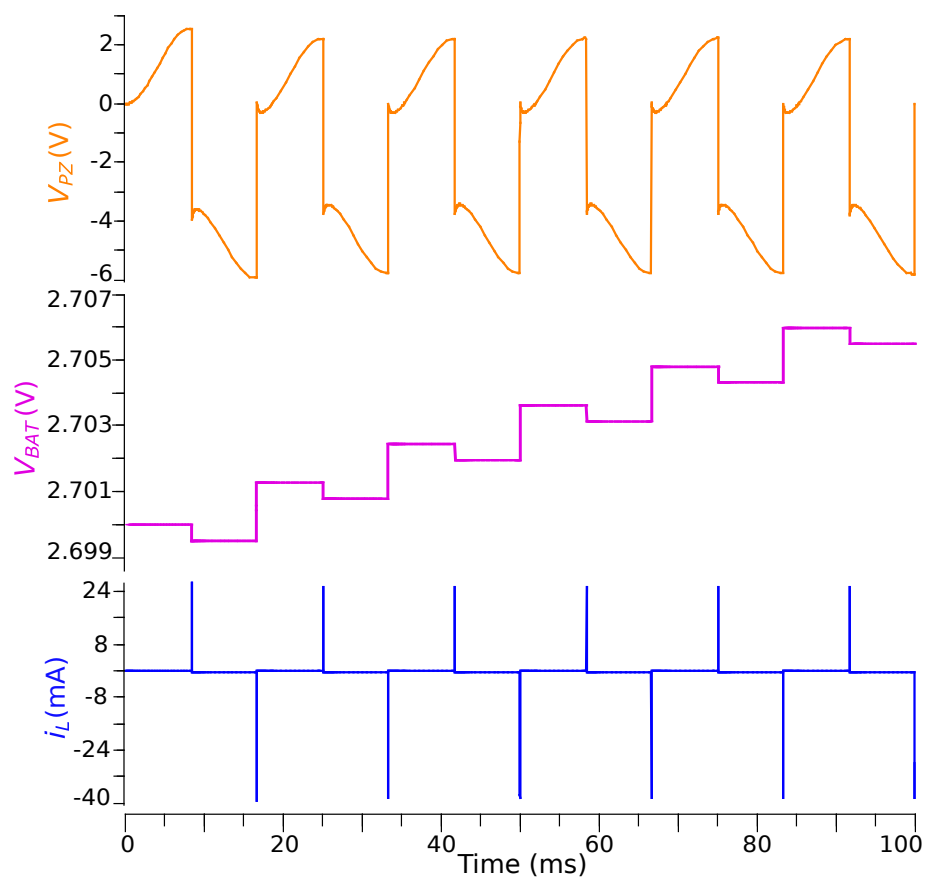
Simulações comportamentais foram realizadas com dois objetivos principais. O primeiro foi validar o modelo comportamental escrito em Verilog-A. Para isso, os resultados da simulação foram plotados e avaliados em relação à literatura (KWON; RINCÓN-MORA, 2014). O segundo foi validar a própria abordagem de projeto com base em um modelo

Figura 21 – Gráficos (tensão V_{PZ} e V_{BAT} , corrente i_L e controle das chaves MN_{PZ} e MP_{BAT}) que detalham os períodos de investimento e de coleta de energia. Os estados do sistema foram adicionados para maior clareza.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 22 – Formas de onda da tensão V_{PZ} , da corrente no indutor i_L e da tensão na bateria V_{BAT} .



Fonte: Próprio Autor.

comportamental.

Como as simulações em nível de circuito são muito mais persuasivas do que as comportamentais, as vantagens do último foram procuradas. Dois foram identificados: facilidade de modificação de projeto e velocidade de simulação. Em relação às modificações de projeto, a maior parte da operação do sistema, que é um sistema de sinais mistos, depende do seu controle. Modificar esse código no Verilog-A é simples e, portanto, muito mais simples do que lidar com circuitos digitais. Além disso, o sistema possui sensores analógicos, que são facilmente implementados usando bibliotecas Verilog-A embutidas. Em relação à velocidade das simulações, no caso particular da colheitadeira modelada, as simulações comportamentais foram observadas mais rapidamente quando comparadas com as elétricas.

3.5 IMPACTO DO TEMPO INVESTIMENTO SOBRE O PERFIL DE CARGA

Kwon e Rincón-Mora (2014) mostram que, dado um tempo de investimento constante τ_I , existe uma potência de entrada mínima abaixo da qual o referido investimento é desvantajoso, uma vez que a energia coletada não supera a investida. Nesse sentido, abaixo desse limite, o sistema apenas reinveste energia impedindo a descarga da bateria. No entanto, se o tempo de investimento for variável, é possível obter um perfil de carregamento superior aquele que seria obtido apenas com reinvestimento, mesmo que na presença de vibrações fracas, desde que reduzindo-se o tempo τ_I de acordo.

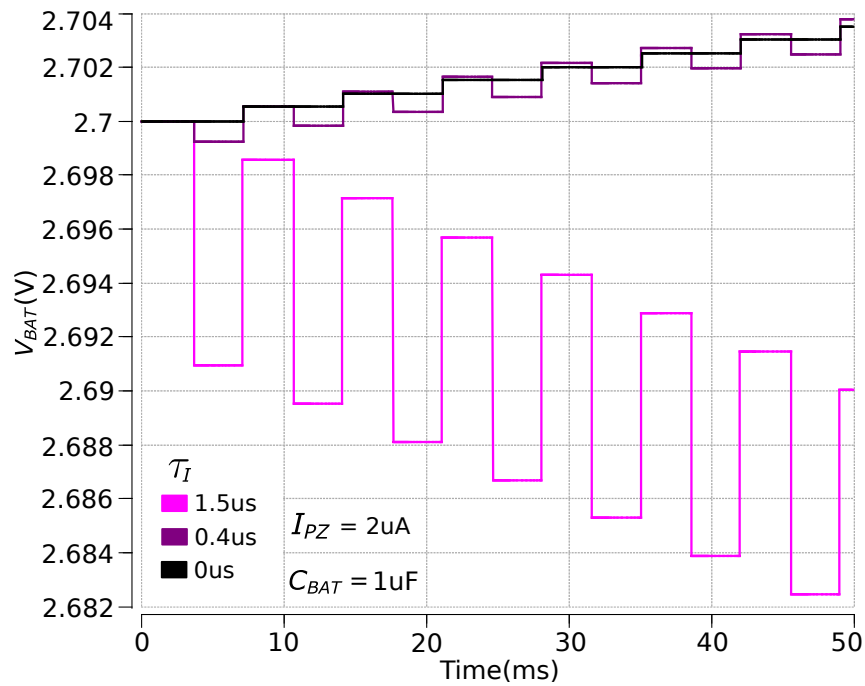
Nesse sentido, o investimento só é cessado na presença de vibrações muito fracas ou muito fortes. Além disso, na presença de fortes vibrações, o investimento pode ser aumentado ainda mais para a coleta, na medida em que as perdas de energia sejam limitadas.

Como o conceito de investimento possui maior efeito em torno do seu investimento ótimo, o aumento excessivo do investimento, em vibrações fortes, causa maior dissipação de energia sobre as chaves e indutor e, de outra forma, quando as vibrações são fracas, investir em excesso causará a descarga da bateria. Por outro lado, reduzir demasiadamente o investimento em ambos os casos não trará perdas, no entanto, não atingirá a ótima coleta.

A Figura 23 retrata esse fato, onde é possível observar que, para uma entrada de $I_{PZ} = 2\mu\text{A}$, por exemplo, existe um tempo de investimento que proporcionará maior coleta ($\tau_I = 0.4\mu\text{s}$), se comparado com a curva de $\tau_I = 0\mu\text{s}$. Em contraste, investir mais energia ($\tau_I = 1.5\mu\text{s}$) causaria a descarga da bateria.

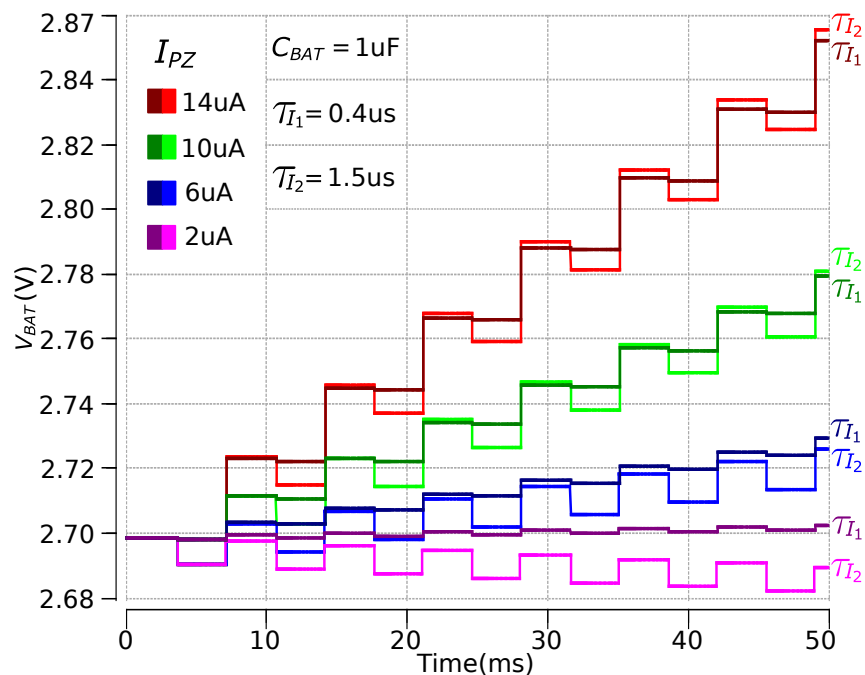
Sob outra perspectiva, a Figura 24 mostra que, para vibrações fortes, um maior tempo de investimento, por exemplo $1.5\mu\text{s}$, é permitido. No entanto, se I_{PZ} for reduzido para modelar pequenos níveis de vibração de entrada, por exemplo $I_{PZ}=2\mu\text{A}$, e o tempo de investimento é mantido em $1.5\mu\text{s}$, a descarga da bateria é observada.

Figura 23 – Tensão V_{BAT} para diferentes τ_I , evidenciando a descarga da bateria para investimentos elevados.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 24 – Tensão V_{BAT} para diferentes I_{PZ} e τ_I , salientando que para diferentes amplitudes, o ajuste do tempo de investimento mostra-se importante ao evitar a descarga da bateria ou melhorar o perfil de carga da bateria.



Fonte: Próprio Autor.

4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Neste capítulo, o funcionamento do sistema será detalhado por meio de simulações comportamentais e os resultados das simulações obtidas serão discutidos, com foco especial no efeito do investimento de energia controlado por meio de algoritmo MPPT, quando comparado com situações de reinvestimento apenas, e sua influência no perfil de carga da bateria.

4.1 SIMULAÇÕES COMPORTAMENTAIS DO CONTROLE DO INVESTIMENTO PELO ALGORITMO MPPT

O algoritmo MPPT, utilizado neste trabalho, usa a técnica Perturba e Observa (P&O), amplamente conhecida por sua simplicidade e facilidade de implementação. O MPPT também foi modelado em Verilog-A e adicionado ao modelo do coletor (durante o estado 8, *HarvestState*, por conveniência¹). O algoritmo opera perturbando τ_I e observando a variação de V_{BAT} (ΔV_{BAT}), a cada ciclo de coleta. Isso é ilustrado na Figura 25.

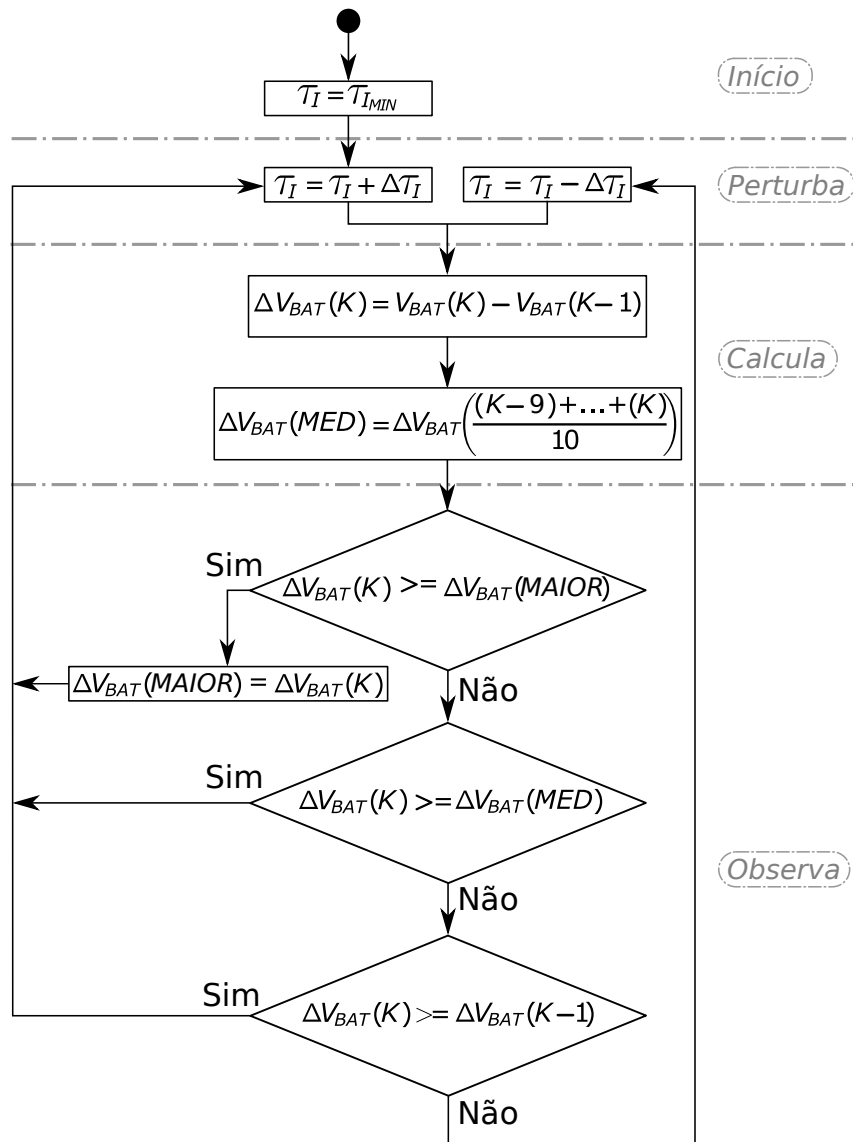
Conforme o algoritmo, se o investimento for perturbado por meio de um acréscimo em τ_I , e por consequência ΔV_{BAT} aumentar, o sistema moverá o ponto de operação em direção ao ponto de maior ΔV_{BAT} . Isso perturba o investimento ainda mais na mesma direção (investe mais energia da bateria no sistema). De outra forma, se ΔV_{BAT} diminuir com o acréscimo de τ_I , afastando portanto o ponto de operação onde se obtém o ponto de maior ΔV_{BAT} , então a direção do investimento é invertida, ou seja, no presente caso deve-se reduzir o tempo de investimento τ_I .

O algoritmo inicia definindo τ_I com o tempo mínimo de investimento. Esse tempo de investimento mínimo foi estabelecido com base nas simulações realizadas, a seguir discutidos. Após, é aplicado a perturbação em τ_I seguido dos cálculos da variação de V_{BAT} (ΔV_{BAT}) e da variação média de ΔV_{BAT} ($\Delta V_{BAT}(MED)$) é a média da soma das últimas dez leituras de ΔV_{BAT}). Para a tomada de decisão, o algoritmo realiza três comparações após observar ΔV_{BAT} :

1. Algoritmo inicia comparando a leitura atual da variação de V_{BAT} ($\Delta V_{BAT}(K)$) com a variação máxima de V_{BAT} ($\Delta V_{BAT}(MAIOR)$) armazenada, se $\Delta V_{BAT}(K)$ for maior ou igual a $\Delta V_{BAT}(MAIOR)$, $\Delta V_{BAT}(MAIOR)$ é atualizado com o novo valor de $\Delta V_{BAT}(K)$, o sistema é perturbado em $+\Delta\tau_I$ e o ciclo inicia novamente. Caso contrário, o algoritmo segue para a próxima comparação. Esta comparação tem como propósito garantir que o incremento do investimento não irá prejudicar o perfil de carga da bateria, pois se $\Delta V_{BAT}(K)$ é maior que $\Delta V_{BAT}(MAIOR)$, existe a garantia de que o sistema está em carga crescente para a intensidade das vibrações

¹O algoritmo de MPPT, na opinião do autor, pode eventualmente ser melhor modelado por processo paralelo ou máquina de estado específica para esse propósito

Figura 25 – Algoritmo MPPT P&O proposto. Consiste em perturbar o tempo de investimento τ_I enquanto se observa a variação de V_{BAT} , para cada ciclo de coleta K .



Fonte: Próprio Autor.

observadas na entrada.

2. Após, $\Delta V_{BAT}(K)$ é comparado com $\Delta V_{BAT}(MED)$. Se $\Delta V_{BAT}(K)$ for maior que $\Delta V_{BAT}(MED)$ o sistema então é perturbado em $+\Delta\tau_I$ e a lógica é iniciada. Caso contrário, o algoritmo segue para a próxima comparação. Esta comparação tem por finalidade evitar que o sistema decresça τ_I devido a eventuais oscilações que ocorram na intensidade das vibrações. De outra forma, $\Delta V_{BAT}(K)$ pode crescer, ainda que com variação menor que $\Delta V_{BAT}(MAIOR)$ anteriormente observada.
3. Por fim, $\Delta V_{BAT}(K)$ é comparado com a leitura anterior de $\Delta V_{BAT}(V_{BAT}(K-1))$. Caso $V_{BAT}(K)$ seja maior que $V_{BAT}(K-1)$ o sistema é perturbado positivamente e reiniciado. Do contrário, o algoritmo decrementa a perturbação $\Delta\tau_I$ e o algoritmo é reiniciado. Esta comparação busca, em última instância, incrementar um passo de investimento quando $\Delta V_{BAT}(K)$ é ligeiramente maior que $\Delta V_{BAT}(K-1)$.

No entanto, a adição do MPPT, na modelagem do sistema, implicou na inserção de duas comparações adicionais na máquina de estados, que foram inseridas no estado 1 para melhorar o controle do investimento de energia, evitando em qualquer hipótese a descarga da bateria.

Desta forma, o detalhamento destas comparações são listadas abaixo, seguido da descrição do seu impacto no funcionamento do sistema:

1. Esta comparação consiste em observar se a amplitude de circuito aberto do elemento piezolétrico ($V_{PZ(OC)}$) cai abaixo de um valor limite para aplicação do reinvestimento ou se a tensão da bateria V_{BAT} está acima do valor limite máximo para a carga total da bateria. Se ambas satisfizerem as condições, o sistema permanecerá no estado 1, caso contrário, seguirá para a segunda comparação.
2. Esta comparação consiste também em observar se $V_{PZ(OC)}$ caiu abaixo de um valor limite para aplicação do investimento de energia ou se V_{BAT} caiu a baixo de um valor limite mínimo para o funcionamento do sistema. Se ambas satisfizerem as condições, o sistema passará para o estado 3, caso contrário, seguirá para o estado 2.

Em vibrações extremamente fracas ($V_{PZ(OC)}$ inferior a 30mV) ou quando a bateria estiver totalmente carregada, tanto o investimento quanto o reinvestimento são descontinuados, buscando impedir a descarga da bateria ou prevenindo a carga excessiva da mesma, respectivamente. No entanto, para vibrações fracas ($V_{PZ(OC)}$ entre 30mV e 230mV) o sistema usa apenas o reinvestimento, pois, neste caso, investir energia da bateria também poderá ocasionar a descarga. Isso porque o passo de investimento inicial do algoritmo implementado (de 400ns) foi estabelecido para tensões de circuito aberto maiores que 230mV.

Quando as vibrações são moderadas ($V_{PZ(OC)}$ ligeiramente maior que 230mV) o sistema, por sua vez, usa o conceito de re-investimento. O investimento de energia da bateria é iniciado com τ_I de 400ns. Esse tempo é relativamente curto, de forma que a bateria dificilmente investe quantidade significativa de energia. Todavia, se a tensão $V_{PZ(OC)}$ aumentar, τ_I aumenta com passos de 20ns². Contudo, esse aumento de τ_I está diretamente relacionado ao aumento da variação de V_{BAT} a cada ciclo.

É importante destacar que o conceito de investimento apresenta maior contribuição, quando submetido a vibrações moderadas. Na Figura 26, as curvas de V_{BAT} para $I_{PZ} = 6\mu A$ (vibrações moderadas), mostram um acréscimo de aproximadamente 140mV (aproximadamente 4,5% superior) em 3.4s de simulação, quando se compara a curva com investimento de energia e a curva onde não foi aplicado investimento. Para curvas com $I_{PZ}=12\mu A$ (vibrações fortes) e $4\mu A$ (vibrações fracas), o investimento não trouxe o mesmo benefício, ainda que contribua positivamente no perfil de carga.

Contudo, os perfis mencionados anteriormente com $I_{PZ}=12\mu A$ e $4\mu A$, revelam um acréscimo de 2,6% e 1,6%, respectivamente, quando comparados com as respectivas curvas onde não foram aplicados o investimento.

O período de investimento τ_I cresce ou decresce com a diferença da variação de V_{BAT} , então, por mais que as vibrações cresçam, investir mais energia não significa necessariamente maior coleta efetiva de energia. Isso porque as perdas ôhmicas aumentam conforme aumenta a quantidade de energia que circula pelo circuito. Por esse motivo, quando as vibrações são fortes o investimento não deve aumentar sem critério.

Como as vibrações dificilmente são constantes no meio ambiente, τ_I precisa ser ajustado constantemente. Em função disso, o passo de τ_I é limitado a 20ns, para evitar que o acréscimo eventual de um passo de investimento ocasione uma possível descarga na bateria. Mantendo, desta forma, um perfil conservativo. Por outro lado, essa resolução temporal pode eventualmente revelar-se de difícil implementação.

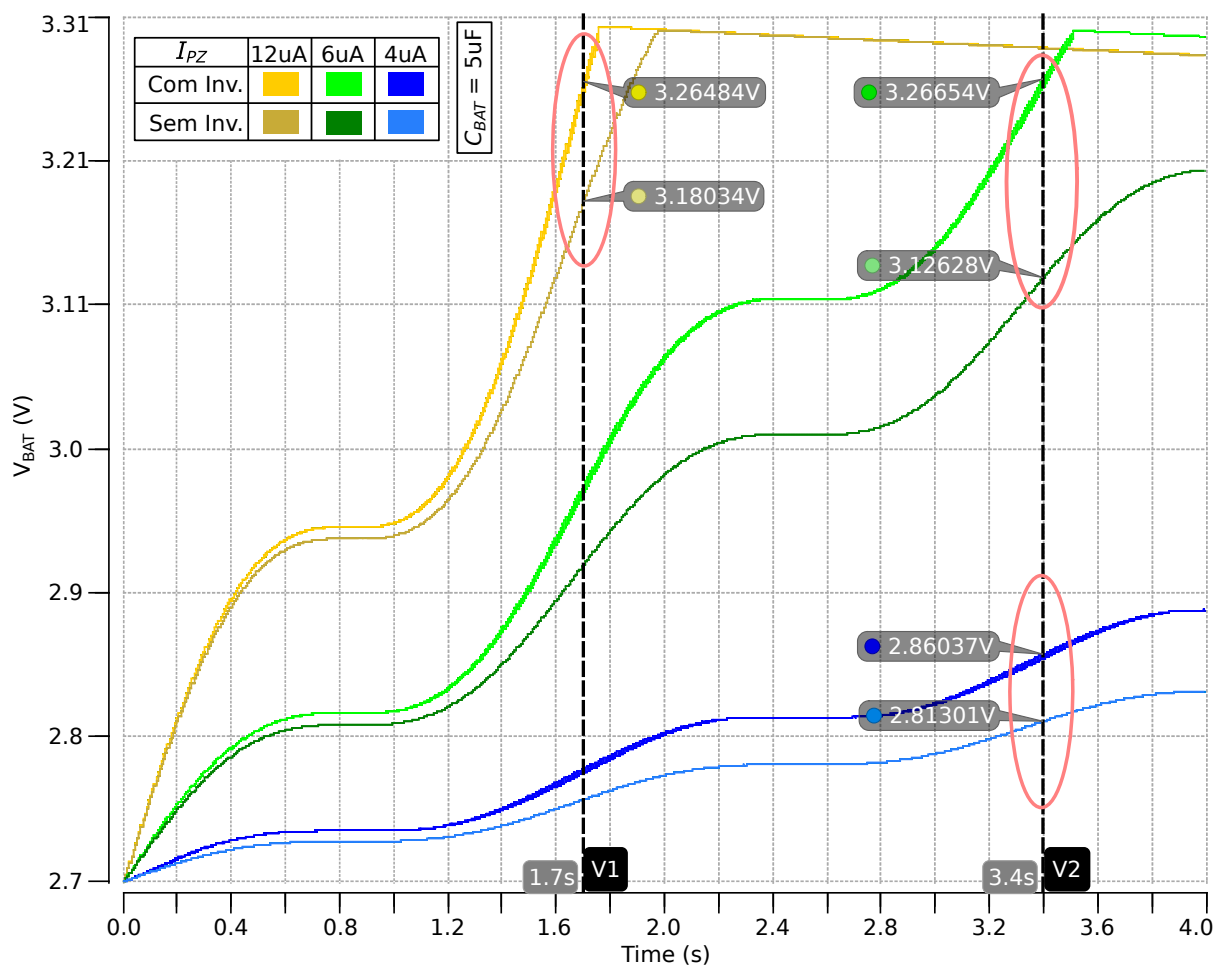
O sistema impõe limitação quando se refere as vibrações de choque, pois $V_{PZ(OC)}$ cresce e cai em intervalos muito curtos, com isso, o sistema não consegue ajustar τ_I em poucos ciclos.

A Figura 27 exhibe essa limitação, onde a curva de τ_I não alcança o tempo de investimento ideal, no intervalo de zero até 200ms. Isso ocorre, pois as vibrações começam a diminuir e τ_I começa a reduzir, sendo que o tempo de investimento mais apropriado seria maior que $0.62\mu s$.

Ao se trabalhar com vibrações que variam sua amplitude com o passar do tempo, é importante enfatizar quando o sistema deve ativar ou desativar tanto o investimento quanto o reinvestimento. Isso com o intuito de prevenir uma eventual descarga ou sobrecarga da bateria indesejada.

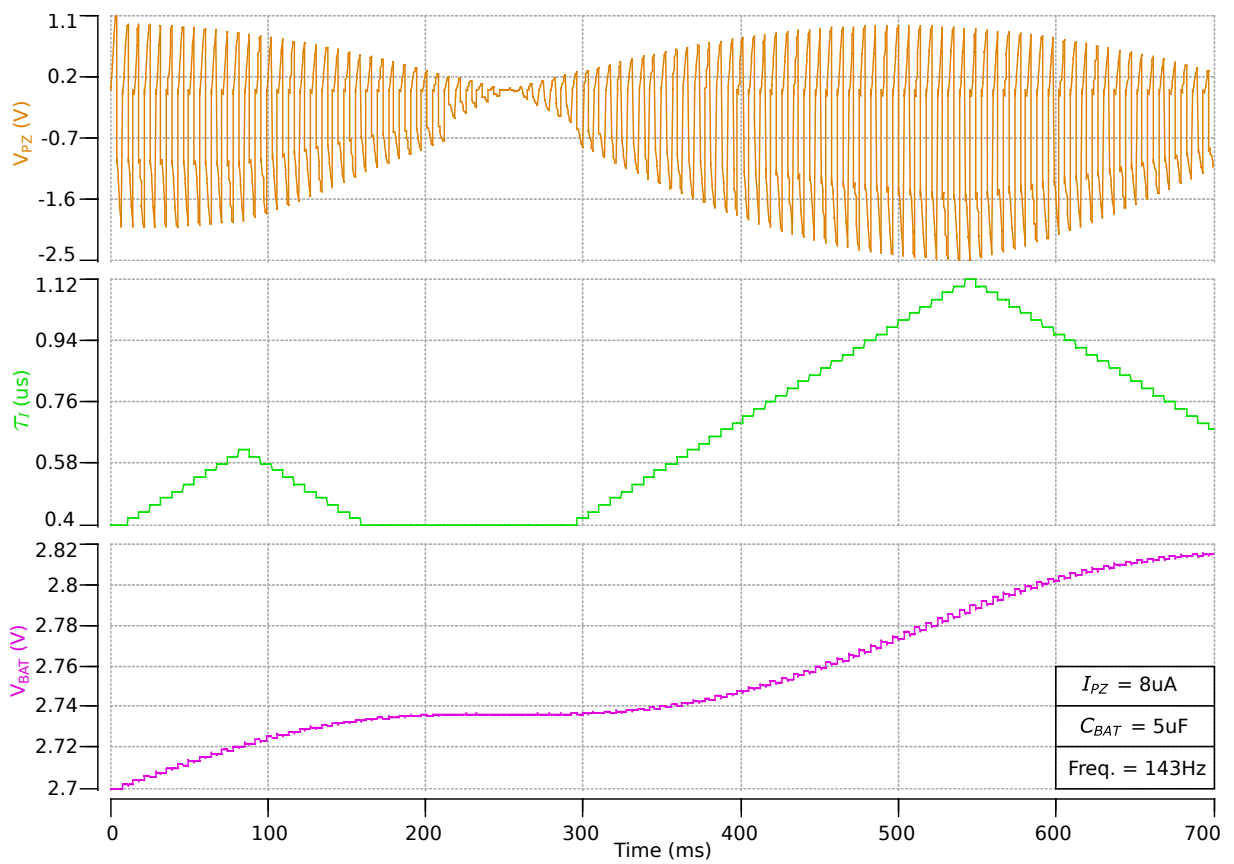
²A resolução temporal de 20ns foi estabelecida no algoritmo, mas o valor prático será função da implementação futura.

Figura 26 – Diferentes curvas de V_{BAT} para diferentes I_{PZ} com $\tau_I=0$ e τ_I ajustável, destacando as curvas com vibrações moderadas ($I_{PZ}=6\mu A$) onde há um aumento considerável no perfil de carga.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 27 – Curvas de V_{PZ} , τ_I e V_{BAT} que destacam a limitação do sistema para vibrações de choque, onde τ_I começa a decrescer antes de alcançar o tempo de investimento ideal.



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 28 mostra em detalhes como o sistema se comporta ao desativar o investimento quando a tensão $V_{PZ(OC)}$ cai abaixo de 230mV e o desativamento do reinvestimento de energia conforme as vibrações continuam a diminuir até que $V_{PZ(OC)}$ caia abaixo de 30mV.

Da mesma forma, a Figura 29 reporta o comportamento do sistema ao interromper o investimento e o reinvestimento de energia quando V_{BAT} alcança sua carga máxima. No entanto, quando V_{BAT} está totalmente carregada, o sistema cessa os dois processos. Com isso o sistema passa a operar em circuito aberto.

O ato de interromper tanto o investimento quanto o reinvestimento é efetuado pelo bloco de controle lógico. O bloqueio do investimento é operado pelo fato da máquina de estados pular o estado de investimento, por outro lado, a ação de interromper o reinvestimento é operado quando a máquina de estados cria um *loop* no estado 1.

É notável, que a curva de carga da bateria (V_{BAT}), na Figura 30, aumenta conforme $V_{PZ(OC)}$ cresce, mesmo sem aplicar o investimento de energia, usando-se apenas do reinvestimento. Contudo, ao aplicar-se o investimento, o perfil de V_{BAT} é aumentado consideravelmente em virtude do ajuste de τ_I .

Esse ajuste é realizado com base nos valores de ΔV_{BAT} que, por sua vez, são calculados e interpretados pelo algoritmo MPPT e operados pela máquina de estados.

A curva de carga da bateria atinge sua tensão máxima em V1, quando o investimento é aplicado no sistema. Por outro lado, quando o investimento de energia não é aplicado, V_{BAT} , em V1, está com 95% de sua carga máxima, atingindo, por fim, sua carga total somente em V2. Isso indica que V_{BAT} , sem investimento, necessita de aproximadamente 45% a mais de tempo para ter sua tensão máxima alcançada, de outra forma, V_{BAT} sem investimento equivale a aproximadamente 145% do tempo de carga do perfil que possui investimento aplicado.

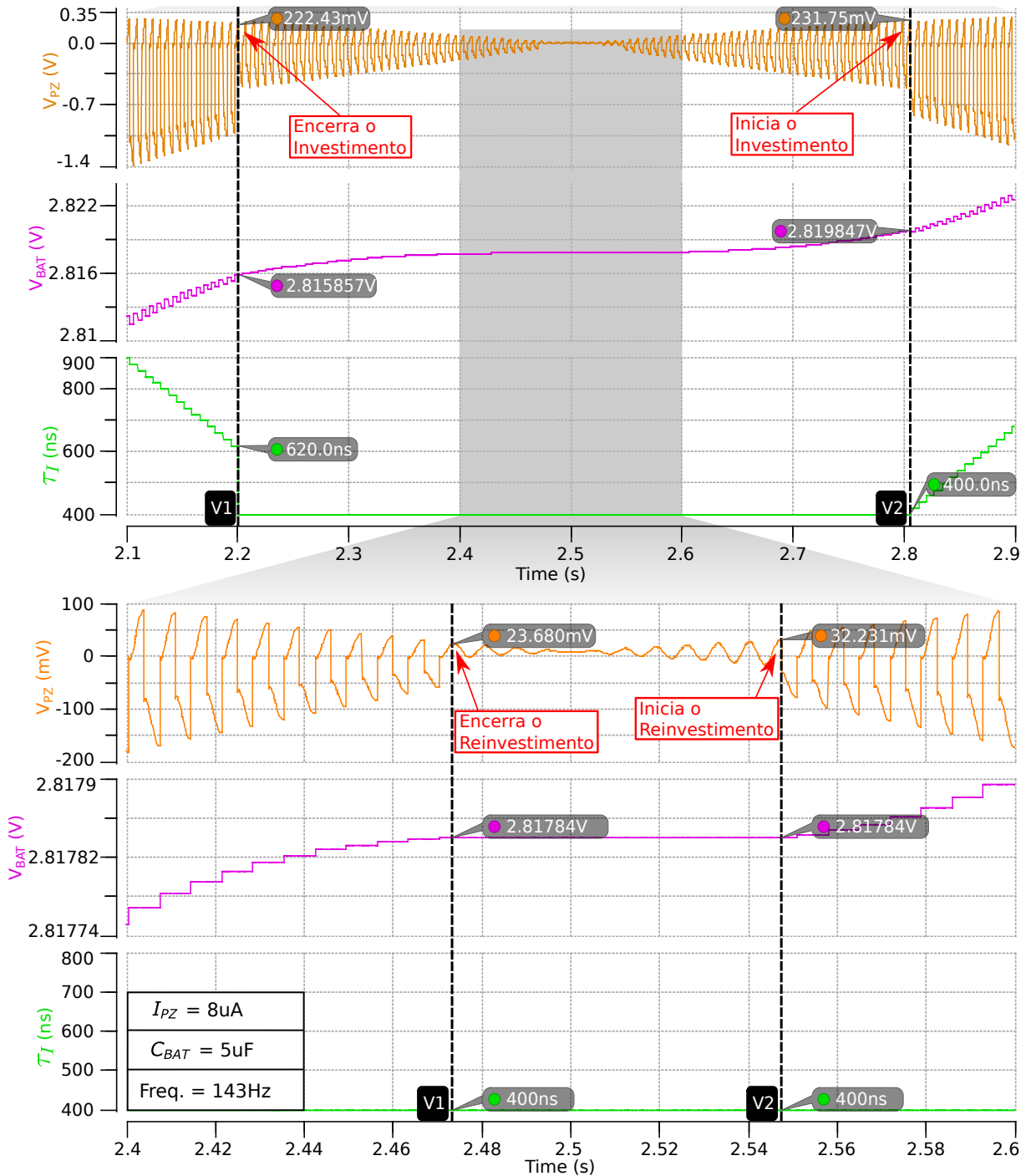
Em última análise, a Figura 31 mostra, sob vibrações fracas com $I_{PZ}=4\mu A$, as curvas de V_{BAT} com investimento ajustável e investimento fixo. O tempo de investimento foi fixado com o tempo de investimento que o algoritmo MPPT encontrou durante a simulação como ideal ($\tau_I=1.9\mu s$).

Levando em conta que as vibrações dificilmente são constantes, aplicar o investimento fixo nem sempre pode ser uma ideia viável. Para tanto, a curva de V_{BAT} com investimento fixo permaneceu com seu perfil de carga aproximadamente 1% abaixo do perfil com o investimento ajustável.

A curva com investimento fixo se manteve, de certa forma, positiva, porque o sistema impediu que o investimento continuasse operando nas vibrações inferiores a 230mV, de outra forma, a descarga seria inevitável. O intuito desta simulação foi apresentar graficamente que o investimento ajustável, para vibrações não constantes, torna-se vantajoso pelo fato de aprimorar o perfil de carga da bateria.

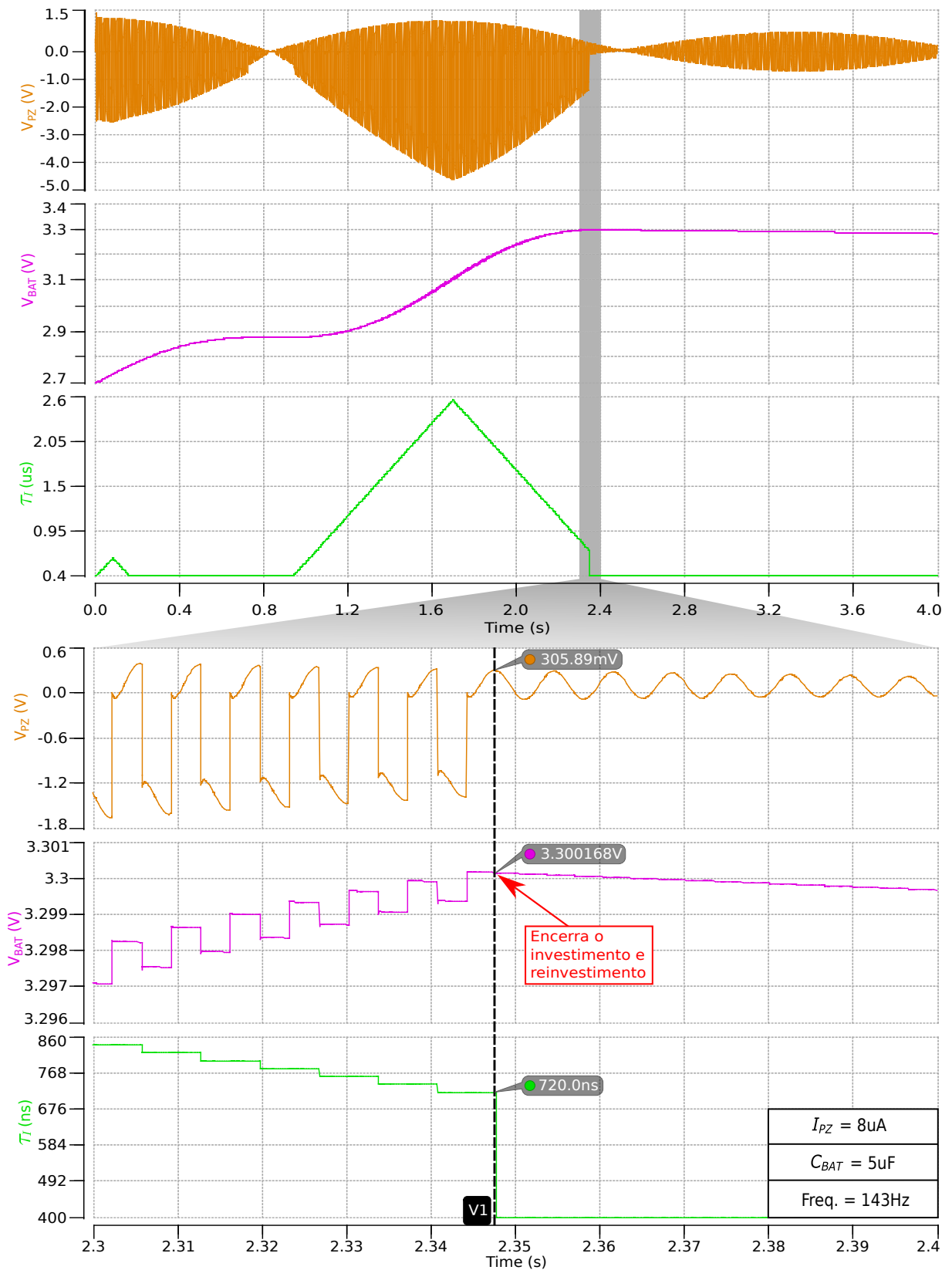
Por fim, o investimento fixo utilizado no trabalho de Kwon e Rincón-Mora (2014)

Figura 28 – Esse gráfico esboça as curvas de V_{PZ} , V_{BAT} e τ_I enfatizando os instantes onde o sistema efetua os cortes do investimento e reinvestimento quando as vibrações diminuem sua intensidade.



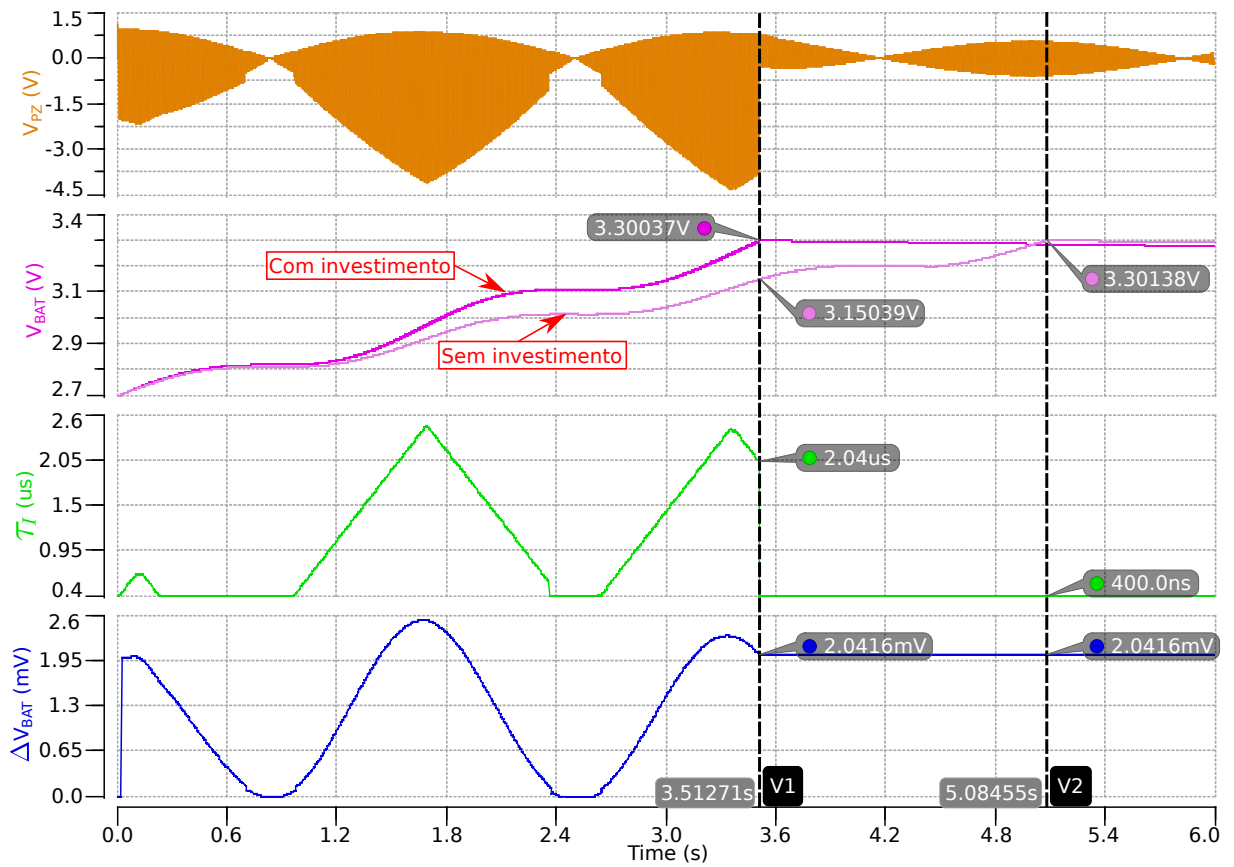
Fonte: Próprio Autor.

Figura 29 – Esse gráfico esboça as curvas de V_{PZ} , V_{BAT} e τ_I destacando a descontinuidade do investimento e reinvestimento quando a bateria está com carga máxima.



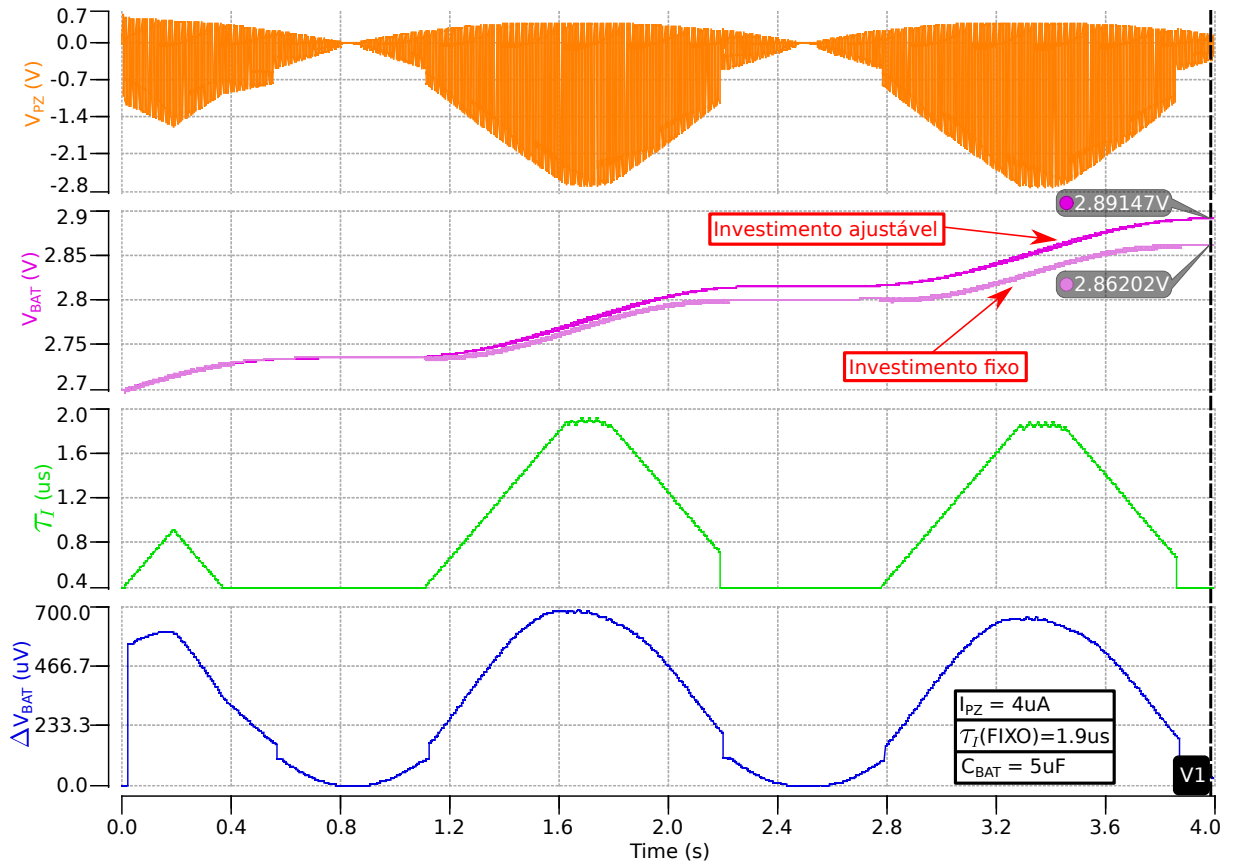
Fonte: Próprio Autor.

Figura 30 – As curvas de V_{PZ} , V_{BAT} , τ_I e ΔV_{BAT} buscam mostrar que o conceito de investimento proporciona à bateria uma carga mais rápida quando comparada com o perfil sem investimento.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 31 – Comparação do perfil de carga da bateria usando tempo de investimento fixo (KWON; RINCÓN-MORA, 2014) e investimento ajustável (esse trabalho).



Fonte: Próprio Autor.

mesmo que sob vibrações variantes, ainda que contribua positivamente, não trouxe o mesmo benefício como no investimento de energia ajustável modelado nesse trabalho.

5 CONCLUSÃO

Conforme destacou-se durante o trabalho, os microcircuitos utilizados para compor os sistemas IoT estão cada vez menores e apresentam consumo de energia cada vez mais reduzido. Ainda assim, observa-se por ora a necessidade de uma fonte de energia ou bateria para manter esse dispositivos em funcionamento. A limitação que o uso dessas baterias impõe é que sua área está relacionada com sua capacidade de armazenamento, no entanto para que os microcircuitos possam manter sua área reduzida, a eliminação do uso de baterias mostram-se uma ideia desejada.

Nesse sentido, o desafio é manter esses circuitos em funcionamento com energia proveniente de outras fontes. Dentre essas fontes, as oriundas do meio ambiente, quando disponíveis, ambientalmente limpas, como por exemplo solar, eólica e vibratória, possuem grande relevância.

Como a energia vibratória é abundante no meio ambiente, soluções para a coleta de energia a partir de transdutores piezelétricos são amplamente encontradas na literatura. É o caso, por exemplo do sistema implementado em (KWON; RINCÓN-MORA, 2014), no qual esse trabalho baseou-se para modelar a sistemática do seu sistema de controle, em Verilog-A, para a coleta de energia vibracional, a partir de um transdutor piezelétrico e posterior conversão para o domínio elétrico.

Além disto, o presente trabalho buscou também estudar o efeito do tempo de investimento de energia da bateria no sistema, por meio do uso de algoritmos de MPPT, visando operação com maior coleta de energia.

Desta forma, este capítulo resume as principais descobertas dessa dissertação, seguido de suas contribuições e das perspectivas para trabalhos futuros.

5.1 PRINCIPAIS DESCOBERTAS

A seguir estão listadas as principais descobertas dessa dissertação:

- O conceito de investimento de energia¹ utilizado para aumentar a energia coletada mostrou-se bastante efetiva em diferentes situações. No entanto, é essencial que o tempo de investimento e a quantidade de energia investida, por consequência, seja devidamente controlado para que se evite, em situações particulares, a descarga indesejável da bateria, quando o investimento não produz o retorno esperado.
- O investimento de energia revela-se vantajoso, mas mostra-se mais eficaz quando aplicado em situações onde as vibrações apresentam amplitude relativamente moderada. Vibrações com intensidade fraca, quando comparadas com vibrações moderadas permitem menor coleta em função da baixa energia vibracional disponível. Além

¹Conceito apresentado por (LALLART; GUYOMAR, 2010) e (PRABHA et al., 2011) e utilizado por (KWON; RINCÓN-MORA, 2014) em seus trabalhos.

disso, investir energia em demasia quando a vibração é fraca provocará a descarga da bateria. De outra forma, investir muita energia em vibrações com intensidade elevada, também não apresentou coleta com desempenho esperado em virtude das perdas ôhmicas do circuito que também aumentam com a energia investida.

5.2 CONTRIBUIÇÕES

Os itens a seguir resumem as principais contribuições dessa dissertação:

- Proposta de um modelo, em Verilog-A, para o sistema coletor de energia vibracional, com especial foco no controle do sistema de coleta e no algoritmo MPPT.

Uma vez que o coletor de energia vibracional é um sistema misto, que envolve blocos analógicos e digitais, a modelagem comportamental revelou-se competitiva à modelagem elétrica. Se as simulações elétricas são relativamente mais confiáveis, em ambos os casos a confiabilidade depende do modelo. Nesse trabalho, os resultados observados mostraram-se bastante similares àqueles resultantes de medidas reportadas na literatura (KWON; RINCÓN-MORA, 2014). Mas deve-se considerar a facilidade de modificação do sistema, quando descrito em uma linguagem de alto nível, como uma vantagem definitiva da descrição comportamental.

- Proposta de um algoritmo de MPPT para controle do tempo de investimento de energia, visando maior coleta de energia.

O algoritmo MPPT mostrou-se bastante eficaz. Através do controle do tempo de investimento no sistema, foi possível maior coleta de energia. Resultados mostraram que um acréscimo de aproximadamente 4,5% na carga da bateria é possível.

- Proposta de um controle para determinar o tempo de *harvesting* (τ_{H-}) aplicado.

O tempo de *harvesting* era controlado externamente no sistema original. Nesse trabalho, a modelagem do sensor *VpzCrossZero* eliminou essa dependência gerando o controle no próprio sistema.

5.3 TRABALHOS FUTUROS E PERSPECTIVAS

Ao término desse trabalho, observa-se que existe margem para trabalhos futuros e melhorias no sistema:

- Implementação integrada dos blocos funcionais do sistema coletor.

O sistema coletor de energia foi integralmente descrito em Verilog-A, sem maior compromisso com os blocos funcionais necessários a sua futura implementação. Evidentemente, houve sempre a preocupação em descrever funções passíveis de implementação. De qualquer forma, adequações no código visando a implementação

e a implementação dos blocos propriamente ditos ficam como proposta de atividade futura.

- Melhorias no algoritmo de MPPT, para tornar o passo de τ_I dinâmico, ou seja, ajustar seu passo conforme a intensidade das vibrações.

As variações em τ_I são constantes, o que implica em um sistema cujo tempo de resposta pode revelar-se lento quando exposto a variações abruptas na intensidade das vibrações. Assim, é necessário um algoritmo capaz de controlar uma variação dinâmica no tempo de investimento, a fim de se acelerar a busca pelo ponto ótimo de coleta, aumentando o tempo de investimento quando ocorrer o aparecimento abrupto de vibrações, ao mesmo tempo evitando-se que um tempo de investimento excessivo perdure quando a vibração na entrada rapidamente desaparecer.

- Melhorias no algoritmo do bloco lógico para prover sua síntese.

A leitura de valores de tensão em determinados pontos do circuito, são provenientes de funções da própria linguagem Verilog-A, o que pode dificultar a síntese, pois seria necessária a conversão desta leitura analógica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELMOATY, A. A. et al. A mppt circuit with $25\mu\text{W}$ power consumption and 99.7% tracking efficiency for pv systems. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers**, v. 64, n. 2, p. 272–282, Feb 2017. ISSN 1549-8328.

AKTAKKA, E. E.; NAJAFI, K. A micro inertial energy harvesting platform with self-supplied power management circuit for autonomous wireless sensor nodes. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, v. 49, n. 9, p. 2017–2029, Sept 2014. ISSN 0018-9200.

Awal, M. R. et al. Power harvesting using dual transformations of piezoelectricity and magnetism: A review. In: **2015 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 527–532.

BANDYOPADHYAY, S.; CHANDRAKASAN, A. P. Platform architecture for solar, thermal, and vibration energy combining with mppt and single inductor. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, v. 47, n. 9, p. 2199–2215, Sept 2012. ISSN 0018-9200.

BENDIB, B.; BELMILI, H.; KRIM, F. A survey of the most used mppt methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 637 – 648, 2015. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115000970>>.

BERIBER, D.; TALHA, A. Mppt techniques for pv systems. In: **4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1437–1442. ISSN 2155-5516.

BHALLA SURESH, M.-S. T. V. K. N. **Piezoelectric Materials - Applications in SHM, Energy Harvesting and Bio-Mechanics**. John Wiley & Sons, 2017. ISBN 978-11-1926-509-2. Disponível em: <<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPMASHME2/piezoelectric-materials/piezoelectric-materials>>.

CADENCE DESIGN SYSTEMS. **Cadence Verilog-A**: Language reference. Product version 6.1. San Jose, 2006. Acesso em 18 jun. 2019. Disponível em: <gmicro0/tools/cadence/installs/>.

CARDOSO, A. J. Sistema para aproveitamento de energia vibracional baseados em transdutores acústicos piezelétricos de baixo custo. **Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)**, 2006.

CHEN, Z. et al. A 1.7mm^2 inductorless fully integrated flipping-capacitor rectifier (fcr) for piezoelectric energy harvesting with 483% power-extraction enhancement. In: **2017 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 372–373.

CONSULTING, D. G. **Introduction to Verilog-A**. 2019. Acesso em 18 jun. 2019. Disponível em: <<https://verilogams.com/tutorials/vloga-intro.html>>.

Deepti; Sharma, S. Piezoelectric energy harvesting and management in wsn using mppt algorithm. In: **2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 2228–2232.

Dell'Anna, F. G. et al. State-of-the-art power management circuits for piezoelectric energy harvesters. **IEEE Circuits and Systems Magazine**, v. 18, n. 3, p. 27–48, thirdquarter 2018. ISSN 1531-636X.

Du, S. et al. An efficient sshi interface with increased input range for piezoelectric energy harvesting under variable conditions. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, v. 51, n. 11, p. 2729–2742, Nov 2016. ISSN 0018-9200.

DU, S. et al. A passive design scheme to increase the rectified power of piezoelectric energy harvesters. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 65, n. 9, p. 7095–7105, Sept 2018. ISSN 0278-0046.

ELTAWIL, M. A.; ZHAO, Z. Mppt techniques for photovoltaic applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 25, p. 793 – 813, 2013. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113003250>>.

Fan, P. M. et al. Energy harvesting techniques: Energy sources, power management and conversion. In: **2015 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–4.

FAN, S. et al. An ultralow quiescent current power management system with maximum power point tracking (mppt) for batteryless wireless sensor applications. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 33, n. 9, p. 7326–7337, Sept 2018. ISSN 0885-8993.

GLEONEC, P. D. et al. Architecture exploration of multi-source energy harvester for iot nodes. In: **2016 IEEE Online Conference on Green Communications (OnlineGreenComm)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 27–32.

GUYOMAR, D.; LALLART, M. Recent progress in piezoelectric conversion and energy harvesting using nonlinear electronic interfaces and issues in small scale implementation. **Micromachines**, v. 2, p. 274–294, 12 2011.

IANNACCI, J. et al. A novel mems-based piezoelectric multi-modal vibration energy harvester concept to power autonomous remote sensing nodes for internet of things (iot) applications. In: **2015 IEEE SENSORS**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–4.

JIANG, R.; HAN, Y.; ZHANG, S. Wide-range, high-precision and low-complexity mppt circuit based on perturb and observe algorithm. **Electronics Letters**, v. 53, n. 16, p. 1141–1142, 2017. ISSN 0013-5194.

Jina Kim et al. Electrical modeling of piezoelectric ceramics for analysis and evaluation of sensory systems. In: **2008 IEEE Sensors Applications Symposium**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 122–127.

KAWAI, N.; KUSHINO, Y.; KOIZUMI, H. Mppt controled piezoelectric energy harvesting circuit using synchronized switch harvesting on inductor. In: **IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 001121–001126.

Khaligh, A.; Zeng, P.; Zheng, C. Kinetic energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic technologies—state of the art. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 57, n. 3, p. 850–860, March 2010. ISSN 0278-0046.

KILNER JOHN, S.-S. J. I. S. J. E. P. P. Materials and techniques for energy harvesting. In: **Functional Materials for Sustainable Energy Applications**. Woodhead Publishing, 2012. cap. 17, p. 541–572. ISBN 978-0-85709-059-1. Disponível em: <<https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt00C56392/functional-materials/theory-motion-energy>>.

KIM, H. W. et al. Energy harvesting using a piezoelectric “cymbal” transducer in dynamic environment. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 43, p. 6178, 08 2004.

KIZU, Y.; OKANO, K.; KOIZUMI, H. A bridgeless buck ac-dc converter for piezoelectric energy harvesting. In: **IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1196–1201.

KUNDERT, K. S.; ZINKE, O. **The Designer's Guide To Verilog-AMS**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004.

KWON, D.; RINCON-MORA, G. A. A 2- μm bicmos rectifier-free ac-dc piezoelectric energy harvester-charger ic. **IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems**, v. 4, n. 6, p. 400–409, Dec 2010. ISSN 1932-4545.

KWON, D.; RINCON-MORA, G. A.; TORRES, E. O. Harvesting ambient kinetic energy with switched-inductor converters. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers**, v. 58, n. 7, p. 1551–1560, July 2011. ISSN 1549-8328.

KWON, D.; RINCÓN-MORA, G. A. Energy-investment schemes for increasing output power in piezoelectric harvesters. In: **2012 IEEE 55th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1084–1087. ISSN 1548-3746.

_____. A single-inductor 0.35 μm cmos energy-investing piezoelectric harvester. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, v. 49, n. 10, p. 2277–2291, Oct 2014. ISSN 0018-9200.

LALLART, M.; GUYOMAR, D. Piezoelectric conversion and energy harvesting enhancement by initial energy injection. **Applied Physics Letters**, AIP, v. 97, n. 1, p. 014104, 2010.

LEFEUVRE, E. et al. Energy harvesting using piezoelectric materials: Case of random vibrations. **J. Electroceram.**, v. 19, p. 349–355, 12 2007.

LIANG, J.; LIAO, W. Piezoelectric energy harvesting and dissipation on structural damping. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 20, n. 5, p. 515–527, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1045389X08098194>>.

LIANG, J.; LIAO, W.-H. Energy flow in piezoelectric energy harvesting systems. **Smart Materials and Structures**, v. 20, p. 015005, 12 2010.

MCCULLAGH, J. An active diode full-wave charge pump for low acceleration infrastructure-based non-periodic vibration energy harvesting. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers**, v. 65, n. 5, p. 1758–1770, May 2018. ISSN 1549-8328.

Meninger, S. et al. Vibration-to-electric energy conversion. **IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems**, v. 9, n. 1, p. 64–76, Feb 2001. ISSN 1063-8210.

MOHAPATRA, A. et al. A review on mppt techniques of pv system under partial shading condition. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 854 – 867, 2017. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117307256>>.

NAIKWAD, S. et al. A single inductor, single input dual output (sido) piezoelectric energy harvesting system. In: **2017 30th International Conference on VLSI Design and 2017 16th International Conference on Embedded Systems (VLSID)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 95–100.

PRABHA, R. D. et al. Increasing electrical damping in energy-harnessing transducers. **IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs**, v. 58, n. 12, p. 787–791, Dec 2011. ISSN 1549-7747.

PRIYA, S. Modeling of electric energy harvesting using piezoelectric windmill. **Applied Physics Letters - APPL PHYS LETT**, v. 87, 10 2005.

Ramadass, Y. K.; Chandrakasan, A. P. An efficient piezoelectric energy harvesting interface circuit using a bias-flip rectifier and shared inductor. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, v. 45, n. 1, p. 189–204, Jan 2010. ISSN 0018-9200.

Rincón-Mora, G. A.; Yang, S. Tiny piezoelectric harvesters: Principles, constraints, and power conversion. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers**, v. 63, n. 5, p. 639–649, May 2016. ISSN 1549-8328.

SANCHEZ, D. A. et al. A parallel-sshi rectifier for piezoelectric energy harvesting of periodic and shock excitations. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, v. 51, n. 12, p. 2867–2879, Dec 2016. ISSN 0018-9200.

SHAREEF, A. et al. Synchronous electric charge extraction for low voltage piezoelectric energy harvester array. In: **2016 International Symposium on Integrated Circuits (ISIC)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–4.

_____. A rectifier-less ac-dc interface circuit for ambient energy harvesting from low-voltage piezoelectric transducer array. **IEEE Transactions on Power Electronics**, p. 1–1, 2018. ISSN 0885-8993.

SHIM, M. et al. 23.7 self-powered $30\mu\text{w}$ -to-10mw piezoelectric energy-harvesting system with 9.09ms/v maximum power point tracking time. In: **2014 IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 406–407. ISSN 0193-6530.

Tabesh, A.; Frechette, L. G. A low-power stand-alone adaptive circuit for harvesting energy from a piezoelectric micropower generator. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 57, n. 3, p. 840–849, March 2010. ISSN 0278-0046.

Taylor, G. W. et al. The energy harvesting eel: a small subsurface ocean/river power generator. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 26, n. 4, p. 539–547, Oct 2001. ISSN 0364-9059.

THAKARE, N. S.; THAKARE, S. S.; SHAHAKAR, R. S. Recent advancement and comparative performance analysis of energy harvesting technique. In: . [S.l.: s.n.], 2018. p. 1631–1634.

TOPRAK, A.; TIGLI, O. Piezoelectric energy harvesting: State-of-the-art and challenges. **Applied Physics Reviews**, v. 1, 09 2014.

TRAN, L.-G.; CHA, H.-K.; PARK, W.-T. Rf power harvesting: a review on designing methodologies and applications. **Micro and Nano Systems Letters**, v. 5, 12 2017.

UCHINO, K. **Advanced Piezoelectric Materials - Science and Technology (2nd Edition)**. Elsevier, 2017. ISBN 978-0-08-102135-4. Disponível em: <<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpAPMSTE01/advanced-piezoelectric/advanced-piezoelectric>>.

VERMA, D. et al. Maximum power point tracking (mppt) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 1018 – 1034, 2016. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115011478>>.

Yang, J.; Chen, Z.; Hu, Y. An exact analysis of a rectangular plate piezoelectric generator. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 54, n. 1, p. 190–195, January 2007. ISSN 0885-3010.

ANEXO A – ARTIGO ACEITO NO SBCCI19

O artigo intitulado "*Behavioral Modeling of an Energy-investing Piezoelectric Harvester*", aceito para apresentação oral no SBCCI'19 *32nd Symposium on Integrated Circuits and Systems Design (SBCCI'19)*, está anexado a seguir.

Behavioral Modeling of a Control Module for an Energy-investing Piezoelectric Harvester

Tales Luiz Bortolin

Post-graduation in Computer Science – CPGCC
Federal University of Santa Maria – UFSM
taleslbd@gmail.com

André Luiz Aita

João Baptista dos Santos Martins
Department of Electronics and Computing – DELC
Federal University of Santa Maria – UFSM
aaita,batista@inf.ufsm.br

ABSTRACT

This work analyzes a piezoelectric energy harvesting system that uses a single inductor and the concept of energy investment. The harvester behavior, with special focus on its control logic module and state machine, is fully described and modeled in Verilog-A. The needed sensors and control variables were also identified and modeled. Simulation results have shown the correct behavioral modeling of the piezoelectric energy harvester system and proposed control, highlighting the harvesting mechanism based on the concept of energy-investment and the effect of the energy invested on the characteristics of the battery charging profile. The speed of the behavioral simulations when compared to electrical ones and the obtained model accuracy, have shown a reliable and prospective higher-level design approach.

CCS CONCEPTS

• **Hardware** → **Modeling and parameter extraction.**

KEYWORDS

Verilog-A behavioral modeling and simulation, Piezoelectric harvesters, Energy-investing harvesters

ACM Reference Format:

Tales Luiz Bortolin, André Luiz Aita, and João Baptista dos Santos Martins. 2019. Behavioral Modeling of a Control Module for an Energy-investing Piezoelectric Harvester. In *32nd Symposium on Integrated Circuits and Systems Design (SBCCI '19)*, August 26–30, 2019, São Paulo, Brazil. ACM, New York, NY, USA, 5 pages. <https://doi.org/10.1145/3338852.3339855>

1 INTRODUCTION

The same technological evolution that allows the design of continuously smaller microsensors and microcircuits for e.g. IoT (Internet of Things), also imposes limitations to their operation, as the batteries required to supply them are also very small, with very limited energy capacity [1]. Although these microcircuits might be designed to work with an ultra-low power consumption, this only helps to extend their operating life-time, without however eliminating the

Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for components of this work owned by others than ACM must be honored. Abstracting with credit is permitted. To copy otherwise, or republish, to post on servers or to redistribute to lists, requires prior specific permission and/or a fee. Request permissions from permissions@acm.org.

SBCCI '19, August 26–30, 2019, São Paulo, Brazil
© 2019 Association for Computing Machinery.
ACM ISBN 978-1-4503-6844-5/19/08...\$15.00
<https://doi.org/10.1145/3338852.3339855>

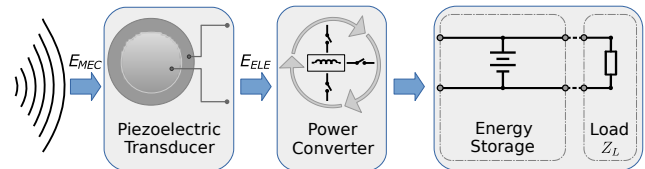


Figure 1: Block diagram of a piezoelectric energy harvester.

need to replace the source of energy, eventually [2]. Since the replacement of these batteries is impractical in many situations due to technical reasons or costs, e.g. smart-dust or biomedical implants [3][4], the challenge is therefore to keep these systems running autonomously.

As the vibrations are abundant in many environments, solutions for electrical energy harvesting from piezoelectric transducers [5][6] have emerged as promising alternatives [7]. In this work, the energy-investing piezoelectric harvester as presented in [8] is modeled in Verilog-A for the sake of having a behavioral description of the energy harvester and energy-investing mechanism [9][10]. The modeling is performed with special focus on its control logic module, targeting a robust control, looking for an also efficient, energy-investment harvesting management.

This paper is organized as follows. In Section 2 the target system, its sensors and variables that require control are introduced for the sake of building its behavioral model. In the Section 3, the proposed model for the harvester is shown and the state machine of its control detailed. Simulation results obtained with the developed model are presented and discussed in Section 4, followed by the conclusions.

2 PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTING SYSTEM

The block diagram of a generic energy harvesting system with a piezoelectric transducer and inductor is shown in Fig. 1. The piezoelectric transducer converts the mechanical energy due to vibrations E_{MEC} into electrical energy E_{ELE} . By means of an AC-DC power converter, the electrical energy is then conditioned and stored in a battery for an eventual use by the load Z_L .

2.1 Energy-investing piezoelectric harvester [8]

The operation of the energy-harvesting circuit discussed and modeled in this work [8] is summarized as follows, based on its equivalent circuit shown in Fig. 2(a) (Fig. 2(b) shows the voltage in the

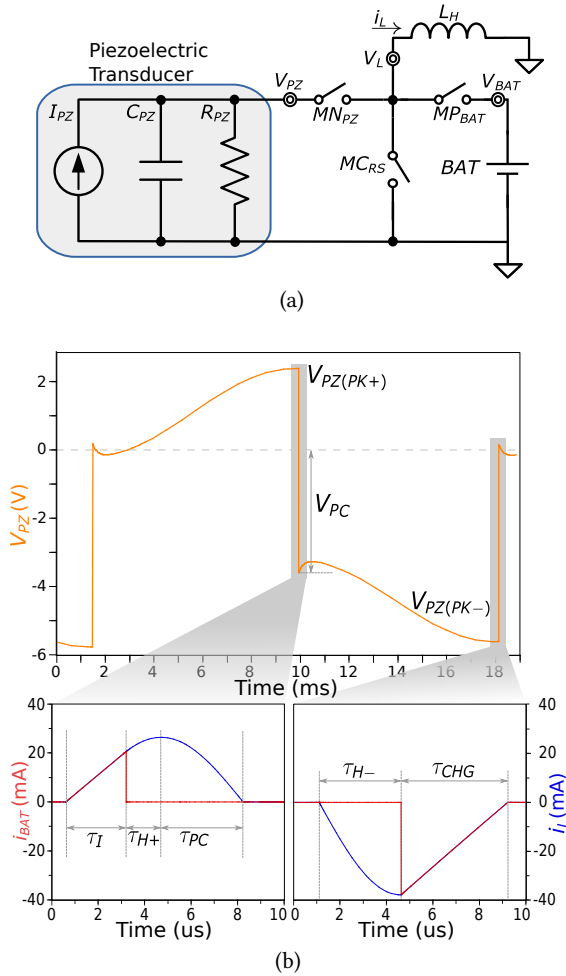


Figure 2: (a) Energy-investing piezoelectric harvester equivalent circuit, adapted from [8], and (b) voltage in the piezoelectric transducer V_{PZ} and currents in the inductor i_L and in the battery i_{BAT} .

piezoelectric element V_{PZ} and the currents in the inductor i_L and in the battery i_{BAT} for the aid of the description).

The harvesting starts with both switches MN_{PZ} and MP_{BAT} open during the positive half-cycle of V_{PZ} , during which period the capacitor C_{PZ} is charged by current I_{PZ} to a voltage $V_{PZ(PK+)}$. Thereafter, the switch MP_{BAT} is closed, which allows the energy investment from the battery to the inductor L_H during a period of time τ_I . Then the switch MP_{BAT} opens and the switch MN_{PZ} closes, which allows the transfer of the harvested energy during the positive cycle from C_{PZ} to the inductor, during a period τ_{H+} . The switch MN_{PZ} remains closed so that the energy stored in L_H is transferred back to C_{PZ} until L_H has all its energy drained, when current i_L is zero, charging C_{PZ} negatively, and taking V_{PZ} to a voltage $-V_{PC}$.

During the negative half-cycle of V_{PZ} , the switches MP_{BAT} and MN_{PZ} are opened, allowing I_{PZ} to negatively charge the capacitor

C_{PZ} , taking the voltage V_{PZ} below $-V_{PC}$, to $-V_{PZ(PK-)}$, when the switch MN_{PZ} is closed, which allows the energy transfer from C_{PZ} to L_H during τ_{H-} . After, the switch MN_{PZ} is opened and the switch MP_{BAT} is closed, so that all the energy of L_H is transferred to the battery (when the current in the inductor approaches zero after τ_{CHG}). The invested energy from battery is then recovered, and the energy harvested from the transducer stored.

The auxiliary switch MC_{RS} helps suppressing the voltages spikes that appear during the switching of MN_{PZ} and MP_{BAT} .

3 ENERGY HARVESTING SYSTEM MODEL

Based on the described energy harvester, a piezoelectric harvester model, as shown in Fig. 3, was proposed. Required modules were defined. Among them three are voltage and current sensors, one is the investment control and one is the control logic itself, in addition to the switches MN_{PZ} , MP_{BAT} , and MC_{RS} . The inductor L_H , the piezoelectric transducer, the battery BAT and the inductor-current sensor V_{AUX} were assumed off-chip in the model, as this agrees with a future implementation.

The required sensor modules are described below:

- **VpzPeakDetector**: module responsible for detecting the positive and negative peaks of the signal from the piezoelectric transducer V_{PZ} . The positive peak is signaled by a positive transition at the output V_{PK} while the negative peak is signaled by a negative transition. This module senses indeed when most of the harvested energy is available in C_{PZ} ;
- **ILCrossZero**: module responsible for detecting when the inductor current i_{LH} crosses zero, generating a positive transition when the inductor current, which is positive, decreases to zero, or a negative transition, when the inductor current, which is negative, increases to zero. This module uses indeed the voltage provided by a current-controlled (by i_{LH}) voltage source V_{aux} as input to estimate the value of i_{LH} . It senses when the energy available in the inductor goes to zero;
- **VpzCrossZero**: module that detects when the voltage V_{PZ} crosses zero, serving as a detector of the inductor current i_L peak, generating a positive transition when the voltage goes down and crosses zero and a negative transition when it goes up and crosses zero. This module senses when harvesting during the negative cycle is completed.

The other components are:

- **InvestControl**: module that sets the investment time τ_I , i.e., the amount of invested energy from the battery to the system. It signals the end of the investment time by setting high its output;
- **Switches MN_{PZ} , MP_{BAT} and MC_{RS}** : the first two switches enable (disable) the energy transfer from the piezo/inductor to the inductor/piezo and from the inductor/battery to the battery/inductor, respectively. The MC_{RS} switch helps to eliminate voltage glitches and/or spikes that might occur during the switching;
- **Inductor L_H** : element whose magnetization is either due to the investment of energy from the battery or from the piezoelectric capacitor C_{PZ} during a harvesting cycle;

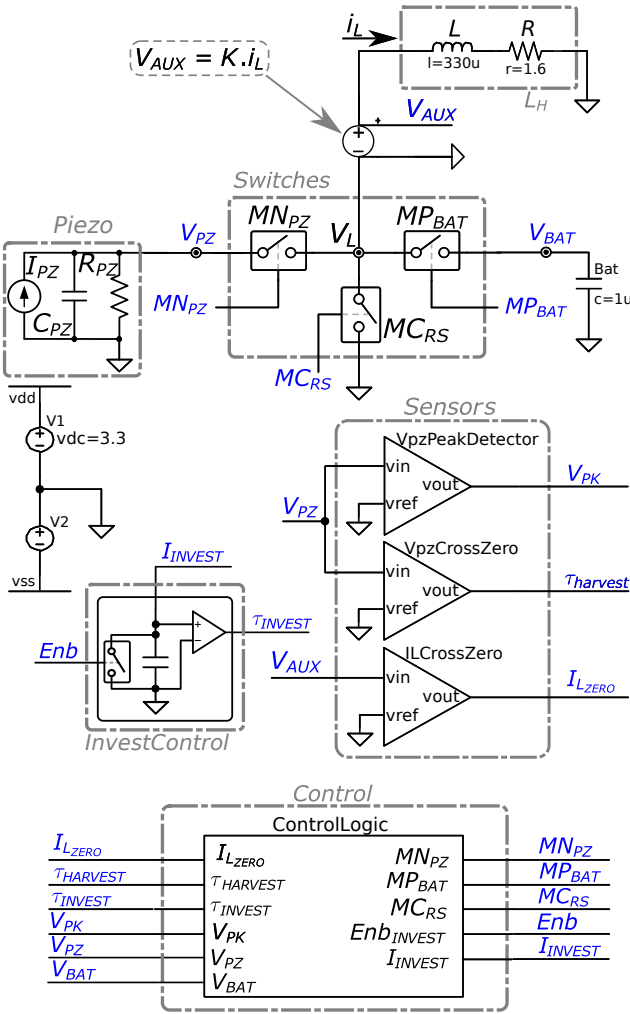


Figure 3: The proposed piezoelectric harvester model showing its main modules.

- Piezoelectric transducer: responsible for converting the mechanical energy into electrical one. In this work, the piezoelectric transducer was modeled as a current source I_{PZ} , in parallel with a capacitor C_{PZ} , as non-resonance is assumed;
- Battery or super-capacitor: energy source from which the energy is invested into the system. After a harvesting cycle, it is used to store back the invested energy and the harvested energy.

The control logic module that supervises the energy harvester operation, is presented and discussed as follows.

3.1 Proposed Control Logic Module

The energy harvester Control Logic module, as shown in Fig. 3, implements a Finite State Machine (FSM). The control has six inputs tracking the harvester operation and five outputs to control the

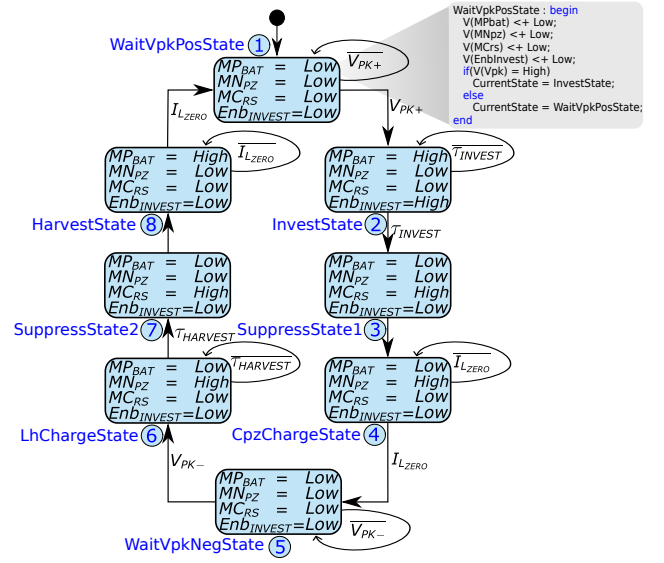


Figure 4: Energy harvester control module FSM diagram.

switches and the investment module. Fig. 4 shows the Control Logic module FSM diagram, detailed in Table 1..

3.2 Operation of the Modeled Energy Harvester

The operation of the modeled energy harvester is described following its control logic FSM and analyzing the control logic signals as given in Fig. 5.

The harvesting process starts in the state 1, where the system waits for the positive peak of V_{PZ} , detected by the $V_{pzPeakDetector}$ module (whose output is V_{PK+}), and also for the charge of the capacitor C_{PZ} to voltage $V_{PZ(PK+)}$.

When V_{PK} goes high, the system changes to state 2, where the energy investment occurs. The investment time is defined by the $InvestControl$ module: when the control enables this block by setting Enb high, the energy investment from the battery begins, magnetizing the inductor L_H over a period τ_I . The end of the investment period is signaled by the $InvestControl$ module (output signal τ_{invest}), when the system goes to the state 3, used to suppress voltage spikes in the node V_L due to switching off of MP_{BAT} (while MN_{PZ} is still off).

In the state 4, the switch MN_{PZ} is closed, allowing the energy transfer from the capacitor C_{PZ} to the inductor L_H . Also in state 4, upon completion of energy transfer from the transducer, all the energy of the inductor L_H is transferred back to C_{PZ} . The end of this transfer occurs when the inductor current L_H decreases to and crosses by zero, which is signaled by I_{Lzero} , output of the $ILCrossZero$ module.

In the state 5, the system waits for the charge of the capacitor C_{PZ} during the negative cycle of V_{PZ} , from $-V_{PC}$ to $-V_{PZ(PK-)}$. At the end of the negative cycle of the voltage V_{PZ} , the $V_{pzPeakDetector}$ module detects the negative peak of V_{PZ} ($V_{PZ(PK-)}$), when the system changes to the state 6.

Table 1: State Machine Description Table.

State	Name of State	Description	Operation	Output Condition
1	WaitVpkPosState	loading of C_{PZ} to $V_{PZ(PK+)}$	all switches are off	V_{PZ} peaks to $V_{PZ(PK+)}$
2	InvestState	investment during τ_I	enable investment, MP_{BAT} is on	end of investment (τ_I)
3	SuppressState1	spikes suppression in V_L	MC_{RS} is on	-
4	CpzChargeState	loading of C_{PZ} to $-V_{PC}$	MN_{PZ} is on	i_L decreases to zero
5	WaitVpkNegState	loading of C_{PZ} to $-V_{PZ(PK-)}$	all switches are off	V_{PZ} peaks to $-V_{PZ(PK-)}$
6	LhChargeState	energy transfer from C_{PZ} to L_H	MN_{PZ} is on	V_{PZ} equals zero
7	SuppressState2	spikes suppression in V_L	MC_{RS} is on	-
8	HarvestState	energy transfer from L_H to battery	MP_{BAT} is on	i_L increases to zero

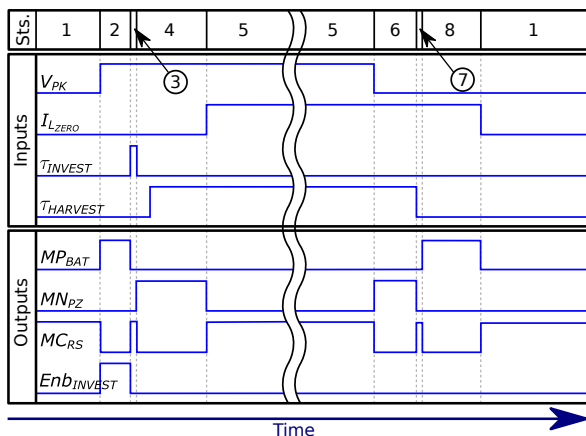


Figure 5: Control module input and output signals during a harvesting cycle (eight states)

In state 6, the system closes the switch MN_{PZ} to allow the transfer of all the energy harvested by the transducer to the inductor L_H during the period τ_{H-} until the voltage at V_{PZ} is zero.

Right after, the system goes to state 7, again a suppressing spikes state, followed by state 8, when the system closes MP_{BAT} to allow the energy transfer from the inductor L_H to the battery until the inductor current becomes zero. This transferred energy corresponds to the energy initially invested plus the energy that was harvested, but the system losses.

4 BEHAVIORAL SIMULATIONS AND SIMULATION RESULTS

Behavioral simulations were performed with two main purposes. The first one was to validate the behavioral model written in Verilog-A. For this, simulation results were plot and evaluated against the literature [8]. The second one was to validate the design approach itself based on a behavioral model. As circuit level simulations are far more persuasive than behavioral ones, we looked for advantages of the latter. Two ones were identified: design modification easiness and simulation speed. Regarding design modification, most of the system operation, which is a mixed-signal system, depends on its control. Modifying such code in Verilog-A is straightforward, and thus much simpler than dealing with digital circuits. Additionally,

the system has analog sensors, which are easily implemented using built-in Verilog-A libraries. Regarding the speed of simulations, in the particular case of the modeled harvester, the behavioral simulations were much faster when compared with the electrical ones. For the record, as the harvester analyzed in this work has two different time constants, i.e. ms and μ s, this might have contributed for slow electrical simulations.

4.1 Simulation Results

The simulations results of the energy harvester are shown in Fig. 6 and 7. In Fig. 6(a), it is visible that the proposed control logic module is fully functional, correctly controlling the switches MN_{PZ} and MP_{BAT} . For a voltage V_{PZ} as shown, the current in the inductor i_L and the voltage in the battery V_{BAT} are in full agreement to that reported in [8]. Within a single harvesting cycle, V_{BAT} (initially at 2.7000V) decreases to 2.6994V due to the investment, and after increases to 2.7012V, showing a harvesting gain in spite of the energy invested. Indeed, the invested energy is recovered back together with the harvested energy if no losses are accounted for. It is worth mentioning the time scale, of μ s, to detail the harvester switching activity and the main signals during this transient.

Figure 6(b) shows the same results presented in Fig. 6(a), however for several (six cycles or about about 100ms) harvesting cycles. A different time scale, of ms, is used in this case instead, to highlight the harvesting operation and the battery charging profile. Again, for the voltage V_{PZ} as shown, the current in the inductor i_L and the voltage in the battery V_{BAT} are in full agreement to that reported in the literature.

Finally, Fig. 7 shows the persistent charging process of the battery V_{BAT} , again, after six harvesting cycles, and the investment level effect on the harvesting process. For instance, for an investment time $\tau_I = 5.5\mu$ s, an improved charging profile (roughly 21% greater) is observed, when about 20.5nJ of energy is harvested against 16.9nJ for $\tau_I = 3.6\mu$ s, over the cycles shown. This is a particular characteristic of energy-investing harvesters since the amount of harvested energy depends on the energy investment level.

5 CONCLUSIONS

This paper analyzed the operation of a piezoelectric energy harvester circuit that uses an inductor and the concept of energy investment for the sake of building a behavioral model of the harvester. The control system was specified and its state machine described in Verilog-A to fully model the energy harvester operation.

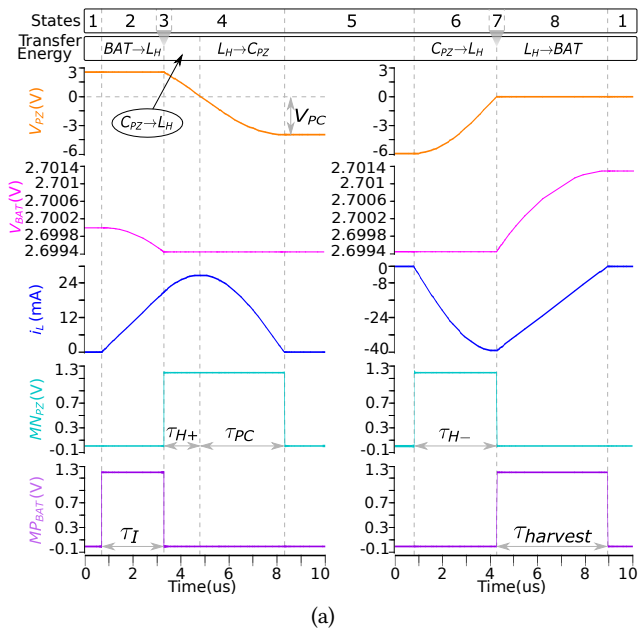


Figure 6: Main harvester signals (a) within a harvesting cycle, and (b) after several harvesting cycles, showing the battery charging profile.

The harvester simulation results have shown the proper behavioral modeling of the piezoelectric energy harvester system and proposed control, highlighting the harvesting mechanism based on the concept of energy-investment and the effect of the energy invested on the characteristics of the battery charging profile.

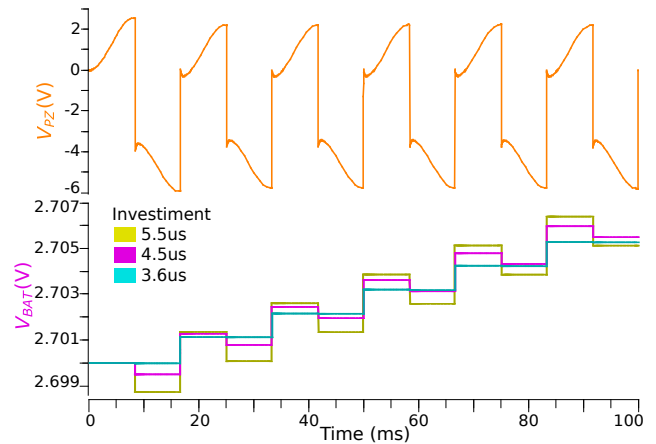


Figure 7: Voltage V_{PZ} (six harvesting cycles), and the battery charging profile, V_{BAT} , for different investment times τ_I .

The observed speed of the behavioral simulations when compared to electrical ones and the obtained model accuracy, checked with the literature, have shown a reliable and prospective higher-level design approach. Modifications to the harvester can be easily made as well new designs rapidly proposed and simulated.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was partially supported by CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Brazil), under the grant 1701988/2017-3.

REFERENCES

- [1] J. Iannacci, G. Sordo, E. Serra, and U. Schmid, "A novel mems-based piezoelectric multi-modal vibration energy harvester concept to power autonomous remote sensing nodes for internet of things (iot) applications," in *2015 IEEE SENSORS*, Nov 2015, pp. 1–4.
- [2] S. Naikwad, M. K. Rajendran, P. Sunil, and A. Dutta, "A single inductor, single input dual output (sido) piezoelectric energy harvesting system," in *2017 30th International Conference on VLSI Design and 2017 16th International Conference on Embedded Systems (VLSID)*, Jan 2017, pp. 95–100.
- [3] Z. Chen, M. K. Law, P. I. Mak, W. H. Ki, and R. P. Martins, "A 1.7mm² inductorless fully integrated flipping-capacitor rectifier (fcr) for piezoelectric energy harvesting with 483% power-extraction enhancement," in *2017 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*, Feb 2017, pp. 372–373.
- [4] D. Kwon and G. A. Rincón-Mora, "A 2- μ m bimos rectifier-free ac/dc piezoelectric energy harvester-charger ic," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 4, no. 6, pp. 400–409, Dec 2010.
- [5] —, "Energy-investment schemes for increasing output power in piezoelectric harvesters," in *2012 IEEE 55th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, Aug 2012, pp. 1084–1087.
- [6] A. Shareef, W. L. Goh, Y. Gao, and S. Narasimalu, "Synchronous electric charge extraction for low voltage piezoelectric energy harvester array," in *2016 International Symposium on Integrated Circuits (ISIC)*, Dec 2016, pp. 1–4.
- [7] G. A. Rincón-Mora and S. Yang, "Tiny piezoelectric harvesters: Principles, constraints, and power conversion," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 63, no. 5, pp. 639–649, May 2016.
- [8] D. Kwon and G. A. Rincón-Mora, "A single-inductor 0.35 μ m cmos energy-investing piezoelectric harvester," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 49, no. 10, pp. 2277–2291, Oct 2014.
- [9] M. Lallart and D. Guyomar, "Piezoelectric conversion and energy harvesting enhancement by initial energy injection," *Applied Physics Letters*, vol. 97, no. 1, p. 014104, 2010.
- [10] R. D. Prabha, D. Kwon, O. Lazaro, K. D. Peterson, and G. A. Rincon-Mora, "Increasing electrical damping in energy-harnessing transducers," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 58, no. 12, pp. 787–791, Dec 2011.

ANEXO B – ALGORITMO VERILOG-A MODELADO NO SISTEMA COLETOR

```
1 // VerilogA for PiezoEnergy
2 'include "constants.vams"
3 'include "disciplines.vams"
4 module LogicControl(Vpk, ILzero, Tharvest, Tinvest, MPbat, MNpz, MCrS, EnbInvest, Vpz, CurrInv,
   Vbat);
5   input Vpk, ILzero, Tharvest, Tinvest, Vpz, Vbat;
6
7   output MPbat, MNpz, MCrS, EnbInvest, CurrInv;
8
9   electrical Vpk, ILzero, Tharvest, Tinvest, MPbat, MNpz, MCrS, EnbInvest, Vpz, CurrInv, Vbat;
10
11   integer WaitPosVpkState, InvestState, SuppressState1, CpzChargeState, WaitNegVpkState,
   LhChargeState, SuppressState2, HarvestState, CurrentState;
12
13   parameter real High = 1, Low = 0;
14
15   real AmplitudeMinInv, AmplitudeMinReinv, AmplitudeOld1, AmplitudeOld, AmplitudeNew, TauMin,
   TauMax, Iinv, TauI, VbatMax, VbatNew, VbatOld, VbatOld1, DifVbatMaior, DifVbatMed,
   DifVbatNew, DifVbatOld, DifVbatOld1, DifVbatOld2, DifVbatOld3, DifVbatOld4, DifVbatOld5,
   DifVbatOld6, DifVbatOld7, DifVbatOld8, DifVbatOld9;
16
17 analog begin
18 @ (initial_step) begin //parametros inicializados apenas 1 vez no inicio da simulacao
19   WaitPosVpkState = 0;
20   InvestState = 1;
21   SuppressState1 = 2;
22   CpzChargeState = 3;
23   WaitNegVpkState = 4;
24   LhChargeState = 5;
25   SuppressState2 = 6;
26   HarvestState = 7;
27   AmplitudeMinInv = 230m; //amplitude minima para aplicacao do investimento
28   AmplitudeMinReinv = 30m; //amplitude minima para aplicacao do reinvestimento
29   TauMin = 400n; //menor tempo de investimento
30   TauMax = 12u; //maior tempo de investimento
31   VbatMax = 3.3; //tensao maxima da bateria
32   TauI = TauMin;
33 end
34
35 case(CurrentState)
36 //===== ESTADO 1 =====
37 //estado responsavel por aguardar o pico positivo de VPZ, ou seja, aguarda neste estado ate que a
   entrada Vpk seja 1
38 WaitPosVpkState : begin
39   V(EnbInvest) <+ Low; //atribui sinal baixo para o bloco de investimento
40   V(MPbat) <+ Low; //atribui sinal baixo para manter a chave desligada
41   V(MNpz) <+ Low; //atribui sinal baixo para manter a chave desligada
42   V(MCrS) <+ High; //enquanto aguarda os picos positivos a chave de supressao permanece acionada
43   if (V(Vpk) == High) begin // compara a saida do sensor de pico Vpk
44     AmplitudeOld1 = AmplitudeOld;
45     AmplitudeOld = AmplitudeNew;
46     AmplitudeNew = V(Vpz); //efetua a leitura da tensao Vpz e salva nas variaveis
47     VbatOld1 = VbatOld;
48     VbatOld = VbatNew;
49     VbatNew = V(Vbat); //efetua a leitura da tensao da bateria e salva nas variaveis
```

```

50     if ( VbatNew >= VbatMax ) || ( AmplitudeNew < AmplitudeMinReinv ) )begin //verifica se a
        bateria esta com tensao acima da maxima ou se a amplitude de Vpz esta abaixo da minima
        permitida para funcionamento
51         CurrentState = WaitPosVpkState; //permanece no mesmo estado
52         Taul = TaulMin; //define o tempo de investimento minimo
53     end
54     else if ( (AmplitudeNew < AmplitudeMinInv) && (VbatNew < 3.3) ) || (VbatNew < 2.7) )begin //
        verifica se a amplitude de Vpz esta abaixo da minima permitida para aplicacao do
        investimento , caso sim apenas reinveste energia
55         CurrentState = SuppressState1; // Pula o estado de Investimento
56         Taul = TaulMin; //define o tempo de investimento minimo
57     end
58     else
59         Taul = Taul + 20n; //perturba
60         CurrentState = InvestState; //passa para o proximo estado
61     end
62
63     if(Taul < TaulMin) //limita a variavel ao tempo de investimento minimo
64         Taul = TaulMin;
65     else if(Taul > TaulMax)//limita a variavel ao tempo de investimento maximo, caso alcance
66         Taul = TaulMax;
67
68     linv = (1p * 1.2) / Taul; //converte o tempo de investimento em corrente para ser
        transferido para o bloco de investimento
69     end
70     else
71         CurrentState = WaitPosVpkState; //permanece no mesmo estado
72 end
73
74 //===== ESTADO 2 =====
75 //estado responsavel pelo investimento de energia
76 InvestState : begin
77     I(CurrInv) <+ -linv; //converte o valor real de corrente em corrente de fato na saida
78     V(EnbInvest) <+ High;
79     V(MPbat) <+ High;
80     V(MNpz) <+ Low;
81     V(MCrs) <+ Low;
82     if(V(Tinvest) == High) //compara o sinal de saida do bloco de investimento
83         CurrentState = SuppressState1; //passa para o proximo estado
84     else
85         CurrentState = InvestState; //permanece no mesmo estado
86 end
87
88 //===== ESTADO 3 =====
89 //estado responsavel pela supressao de altas tensoes
90 SuppressState1 : begin
91     V(EnbInvest) <+ Low;
92     V(MPbat) <+ Low;
93     V(MNpz) <+ Low;
94     V(MCrs) <+ High;
95     if(High == 1) //a comparacao foi inserida para manter os tempos iguais em cada comparacao de
        cada estado.
96         CurrentState = CpzChargeState; //passa para o proximo estado
97     else
98         CurrentState = CpzChargeState; //permanece no mesmo estado
99 end
100
101 //===== ESTADO 4 =====

```

```

102 //estado responsavel pela transferencia da energia coletada em Cpz para o indutor e em seguida
    transferi-la de volta para Cpz
103 CpzChargeState : begin
104     V(EnbInvest) <+ Low;
105     V(MPbat) <+ Low;
106     V(MNpz) <+ High;
107     V(MCrS) <+ Low;
108     if (V(ILzero) == High) //compara o sinal de saida do sensor de passagem por zero da corrente
109         CurrentState = WaitNegVpkState; //passa para o proximo estado
110     else
111         CurrentState = CpzChargeState; //permanece no mesmo estado
112 end
113
114 //===== ESTADO 5 =====
115 //estado responsavel por aguardar o pico negativo de Vpz
116 WaitNegVpkState : begin
117     V(EnbInvest) <+ Low;
118     V(MPbat) <+ Low;
119     V(MNpz) <+ Low;
120     V(MCrS) <+ High; //enquanto aguarda os picos negativos a chave de supressao permanece acionada
121     if (V(Vpk) == Low) //compara a saida do sensor detector de pico
122         CurrentState = LhChargeState; //passa para o proximo estado
123     else
124         CurrentState = WaitNegVpkState; //permanece no mesmo estado
125 end
126
127 //===== ESTADO 6 =====
128 //estado responsavel por transferir a energia de Cpz para Lh
129 LhChargeState : begin
130     V(EnbInvest) <+ Low;
131     V(MPbat) <+ Low;
132     V(MNpz) <+ High;
133     V(MCrS) <+ Low;
134     if (V(Tharvest) == Low) //compara a saida do sensor de passagem por zero da tensao Vpz
135         CurrentState = SuppressState2; //passa para o proximo estado
136     else
137         CurrentState = LhChargeState; //permanece no mesmo estado
138 end
139
140 //===== ESTADO 7 =====
141 //estado responsavel por suprimir altas tensoes, idem ao estado 3
142 SuppressState2 : begin
143     V(EnbInvest) <+ Low;
144     V(MPbat) <+ Low;
145     V(MNpz) <+ Low;
146     V(MCrS) <+ High;
147     if (High == 1)
148         CurrentState = HarvestState;
149     else
150         CurrentState = HarvestState;
151 end
152
153 //===== ESTADO 8 =====
154 //estado responsavel por transferir toda energia colhida para o bateria
155 HarvestState : begin
156     V(EnbInvest) <+ Low;
157     V(MPbat) <+ High;
158     V(MNpz) <+ Low;
159     V(MCrS) <+ Low;

```

```

160   if (V(ILzero) == Low) begin //compara a saida do sensor de passagem por zero da corrente
161       DifVbatNew = VbatNew - VbatOld; //calcula a diferenca de Vbat
162       //calcula a diferenca de Vbat media
163       DifVbatMed = ((DifVbatNew + DifVbatOld + DifVbatOld1 + DifVbatOld2 + DifVbatOld3 +
           DifVbatOld4 + DifVbatOld5 + DifVbatOld6 + DifVbatOld7 + DifVbatOld8) / 10);
164
165       ////// MPPT ////
166       if (DifVbatNew >= DifVbatMaior)begin //compara a diferenca atual lida com a diferenca maxima
167           DifVbatMaior = DifVbatNew; //salva o valor maximo da diferenca
168           $strobe("DifNew >= DifMaior");
169       end
170       else if (DifVbatNew >= DifVbatMed) //compara a diferenca atual com a diferenca media
           calculada
171           $strobe("DifNew >= DifMed");
172       else if (DifVbatNew >= DifVbatOld) //compara a diferenca atual com a diferenca lida no
           ciclo anterior
173           $strobe("DifNew >= DifOld");
174       else //caso nao satisfaca nenhuma das condicoes anteriores o sistema recua um passo
           de investimento
175           Taul = Taul - 40n; //recua a perturbacao
176
177       //salva as leituras da diferenca de Vbat
178       DifVbatOld9 = DifVbatOld8;
179       DifVbatOld8 = DifVbatOld7;
180       DifVbatOld7 = DifVbatOld6;
181       DifVbatOld6 = DifVbatOld5;
182       DifVbatOld5 = DifVbatOld4;
183       DifVbatOld4 = DifVbatOld3;
184       DifVbatOld3 = DifVbatOld2;
185       DifVbatOld2 = DifVbatOld1;
186       DifVbatOld1 = DifVbatOld;
187       DifVbatOld = DifVbatNew;
188
189       CurrentState = WaitPosVpkState; //passa para o proximo estado
190       end
191       else
192           CurrentState = HarvestState; //permanece no mesmo estado
193   end
194
195   default:
196       CurrentState = WaitPosVpkState; //caso ocorra algum erro na maquina de estados o sistema
           retorna para o estado 1 como default
197   endcase
198   end
199   endmodule

```