

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS
RENOVÁVEIS**

Roberto Paulo Dias Alcântara Filho

**RIPETO: UMA FERRAMENTA PARA PROJETO E ANÁLISE DE
SISTEMAS EMBARCADOS ALIMENTADOS POR FONTES DE
ENERGIAS RENOVÁVEIS**

Maracanaú, Ceará

2019

Roberto Paulo Dias Alcântara Filho

RIPETO: UMA FERRAMENTA PARA PROJETO E ANÁLISE DE SISTEMAS
EMBARCADOS ALIMENTADOS POR FONTES DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em energias renováveis. Área de concentração: Controle e Processamento de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Otávio Alcântara de Lima Júnior

Coorientador: Prof. Dr. Corneli Gomes Furtado Júnior

Maracanaú, Ceará

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário
Luiz Carlos Silveira de Sousa - CRB-3/942

A347 Alcântara Filho, Roberto Paulo Dias.
Ripeto: uma ferramenta para projeto e análise
de sistemas embarcados alimentados por fontes de
energias renováveis / Roberto Paulo Dias Alcântara
Filho -- 2019.
76 f.

Dissertação (Programa de Pós-Graduação em
Energias Renováveis) -- Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, *Campus*
Maracanaú, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Otávio Alcântara de Lima
Júnior.

1. SISTEMA EMBARCADO. 2. ENERGIA RENOVÁVEL. 3.
ENERGIA - CAPTURA. I. Título.

CDD 005.1

ROBERTO PAULO DIAS ALCÂNTARA FILHO

RIPETO: UMA FERRAMENTA PARA PROJETO E ANÁLISE DE SISTEMAS
EMBARCADOS ALIMENTADOS POR FONTES DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis, área de concentração Energias Renováveis.

Aprovada em ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Otávio Alcântara (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

Prof. Dr. Corneli Gomes Furtado Júnior
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

Prof. Dr. Auzuir Ripardo de Alexandria
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

Prof. Dr. Jarbas Aryel Nunes da Silveira
Universidade Federal do Ceará- UFC

Para o Luca.

Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos a:

- Minha família, pelo apoio incondicional em todos os momentos;
- Minha esposa Catarina, pelo amor, carinho e dedicação diários;
- Ao meu orientador, prof. Dr. Otávio Alcântara, pelo incentivo e valorosas contribuições durante toda essa jornada;
- Ao meu coorientador, prof. Dr. Corneli Júnior, pelo suporte e cooperação;
- Aos demais professores, servidores e colegas do PPGER, pelos ensinamentos, apoio, suporte e amizade;

“O maior bem do homem é a sua mente inquieta.”
(*Isaac Asimov, 1972, em “The Greatest Asset”*)

Resumo

Sistemas embarcados de baixíssimo consumo são parte essencial do conceito de cidades inteligentes e internet das coisas (*IoT*) quando, de forma ubíqua, se ocupam de coletar, tratar e transmitir informações dos ambientes em que estão inseridos. Alguns destes sistemas possuem exigências de funcionamento por muito longo prazo, meses ou anos, apresentando um conjunto específico de restrições de projeto. A captura de energia do ambiente surge como alternativa para suprir estes dispositivos quando a substituição de bateria torna-se inviável, permitindo reabastecer seus recursos através de fontes renováveis já disponíveis em campo, sejam elas luminosas, cinéticas, térmicas, etc. No entanto, sistemas embarcados que utilizam essas fontes de energia apresentam características que dificultam a simulação em computador, sendo a emulação destas fontes de energia uma alternativa para suplantar estes desafios e reproduzir, em laboratório, as condições de campo. O presente trabalho propõe uma plataforma de *hardware* para a emulação de transdutores de energias renováveis de baixa potência integrado à um analisador lógico que permite a depuração integrada do conjunto *hardware/firmware* de sistemas embarcados com captura de energia. A ferramenta entrega ao desenvolvedor um ambiente controlado para validação do comportamento do sistema em diversas fases do seu ciclo energético.

Palavras-chaves: Sistemas embarcados, energia renovável, *energy harvesting*, captura de energia, emulação de transdutores

Abstract

Extreme low-power embedded systems are essential in Smart Cities and the Internet of Things (IoT), once these systems are responsible for acquiring, processing, and transmitting valuable environmental data. Some of these systems should run for a very long time without any human intervention, even for batteries replacement. Energy harvesting technologies allow embedded systems to be powered up from the environment by converting surrounding energy sources into electrical energy. However, energy-harvesting embedded systems (EHES) heavily depends on the nature of the energy sources, which are mostly uncontrollable and unpredictable. To improve the evaluation of energy management techniques in EHES, we propose the emulation of I-V curves of low-power energy harvesting transducers with an integrated logic analyzer. This approach allows developers to debug hardware and software on the same platform, exploring SECE power behavior on multiple scenarios and project phases.

Keywords: Embedded systems, renewable energy, energy harvesting, energy harvesting transducer emulation

Lista de ilustrações

Figura 1 – Potencial de geração elétrica. Fonte: Autor.	22
Figura 2 – Célula Solar IXYS KXOB22-04X3F. Fonte: Autor.	23
Figura 3 – Elementos de Piezoelétricos. Sensor de vibrações LDT0-028K (esquerda) e transdutor de som (direita). Fonte: Autor.	24
Figura 4 – Microturbina hidraulica. Retirado de Hoffmann et al. (2013). . .	24
Figura 5 – Gerador Termoelétrico. Retirado de Industries Marlow (2019). .	25
Figura 6 – Típico Sistema Embarcado com Captura de Energia. Fonte: Autor.	27
Figura 7 – Sensor instalado na ponte Forth Road. Adaptado de (JIA et al., 2015).	28
Figura 8 – Gerador Pavegen. Fonte: Pavegen.	29
Figura 9 – Gerador Powerwalk. Adaptado de Power (2017).	30
Figura 10 – Caixa de luz utilizada para emular fonte solar. Fonte: Adaptada de (HESTER; SCOTT; SORBER, 2014).	31
Figura 11 – Mesa de vibração (a) e seu desenho conceitual (b). Fonte: Adaptado de Jiang et al. (2014).	32
Figura 12 – Exemplo de Curva I-V Solar. Fonte: Autor.	33
Figura 13 – Exemplo de Superfície I-V.	34
Figura 14 – Exemplo de Curva I-V extraída com a "carga inteligente" comparada com um sistema real. Adaptado de (HESTER; SCOTT; SORBER, 2014).	35
Figura 15 – Arquitetura da Plataforma. Fonte: Autor.	38
Figura 16 – Fluxograma Operacional. Fonte: Autor.	40
Figura 17 – Caracterização da Fonte de Energia. Fonte: Autor.	41
Figura 18 – Emulação da Fonte de Energia. Fonte: Autor.	42
Figura 19 – Endereçamento da Memória na Emulação. Fonte: Autor. . . .	43
Figura 20 – Caixa de luz utilizada nos ensaios. Fonte: Autor.	44
Figura 21 – Plataforma de vibração utilizada nos ensaios. Fonte: Autor. . .	45
Figura 22 – Amostragens do painel solar KXOB22-04X3F exposto ao sol. . .	47
Figura 23 – Curva I-V criada a partir das amostras da Figura 22.	47

Figura 24 – Amostras do painel solar KXOB22-04X3F na caixa de luz. . .	48
Figura 25 – Curva I-V elaborada com as amostras da Figura 24.	48
Figura 26 – Códigos para o DAC da Curva I-V.	48
Figura 27 – Traço de Potência do Transdutor.	49
Figura 28 – Traço de Potência Emulado pelo Ripeto.	49
Figura 29 – Tensão da cápsula de piezo sob carga constante.	50
Figura 30 – Tensão da cápsula de piezo em detalhe.	50
Figura 31 – Recorte da tensão gerada pela cápsula de piezo sob carga variável com 30 pontos.	51
Figura 32 – Recorte da tensão gerada pela cápsula de piezo sob carga variável com 11 pontos	52
Figura 33 – Módulo comercial para transdutores de captura de energia . . .	52
Figura 34 – Recorte da tensão gerada pela cápsula de piezo sob carga variável com 168 pontos e capacitor na saída	53
Figura 35 – Tensão da cápsula de piezo alimentando a carga sintética. . . .	54
Figura 36 – Potência da cápsula de piezo alimentando a carga sintética. . .	54
Figura 37 – Tensão da emulação alimentando a carga sintética.	54
Figura 38 – Potência da emulação alimentando a carga sintética.	54
Figura 39 – Detalhe da reprodução de tensão no Ripeto emulando transdutor piezoelétrico.	55
Figura 40 – Amostras de uma única curva da superfície	56
Figura 41 – Curva perseguida das amostras da Figura 40	56
Figura 42 – Kit de Desenvolvimento EZ430 Chronos conectado à plataforma. .	58
Figura 43 – Traço de Potência Ez430 Chronos.	58
Figura 44 – Traço de Potência da Iluminação.	59
Figura 45 – Traço de Potência de Transmissão RF.	59
Figura 46 – Traço de Potência Sensor Barométrico.	60
Figura 47 – Traço de Potência Detalhado do Sensor Barométrico.	60
Figura 48 – Traço de Potência com Analisador Lógico.	61
Figura 49 – Traço de Potência Detalhado com Analisador Lógico.	62
Figura 50 – Amostras de Tensão.	74
Figura 51 – Distribuição das Amostras (V.)	74
Figura 52 – Amostras de Corrente.	74

Figura 53 – Distribuição das Amostras (I).	74
Figura 54 – Tempo de resposta típico do ADC.	75
Figura 55 – Tempo de Resposta da Plataforma.	75
Figura 56 – Primeira versão da plataforma.	76
Figura 57 – Versão Atual da Plataforma com placa de aquisições e módulo FPGA.	76

Lista de quadros

3.1	Resumo das Ferramentas de Avaliação	37
-----	---	----

Lista de abreviaturas e siglas

ADC	Conversor Analógico-Digital
CI	Circuito Integrado
DAC	Conversor Digital-Analógico
DIGIPOT	Potenciômetro Digital
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Memory
I/O	Entrada/Saída
I2C	Inter-Integrated Circuit
FIFO	First In, First Out
FFT	Fast Fourier Transform
FPGA	Field Programmable Gate Array
RAM	Random Access Memory
RTOS	Sistema Operacional de Tempo Real
SECE	Sistema Embarcado com Captura de Energia
SPI	Serial Peripheral Interface
SO	Sistema Operacional
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa	19
1.2	Objetivo Geral	19
1.2.1	Objetivos Específicos	19
1.3	Produção	20
1.4	Organização do texto	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Captura de energia do ambiente	21
2.1.1	Fotoelétricos	22
2.1.2	Piezoelétricos	23
2.1.3	Microturbinas	23
2.1.4	Termoelétricos	25
2.1.5	Radio Frequência	25
2.2	Sistemas embarcados com captura de energia	26
2.2.1	Casos de uso	27
2.2.1.1	Nó sensor de monitoramento de ponte	27
2.2.1.2	Marca-passo alimentado com captura de energia	27
2.2.1.3	Piso comercial com captura de energia	28
2.2.1.4	Exoesqueleto comercial com captura de energia	28
2.3	Técnicas de avaliação de sistemas embarcados com cap- tura de energia	29
2.3.1	Caixa de Luz (<i>Light Box</i>)	29
2.3.2	Mesa de Vibração (<i>Shake Table</i>)	30
2.3.3	Emulação de Curvas I-V	31
3	METODOLOGIA	37
3.1	Visão Geral	37
3.2	Arquitetura	37

3.3	Modos de Operação	41
3.3.1	Caracterização da Fonte de Energia	41
3.3.2	Emulação de Fonte de Energia	42
3.3.2.1	Depuração de <i>Software</i> incorporada	43
3.4	Ferramentas utilizada nos experimentos	44
3.4.1	Caixa de Luz	44
3.4.1.1	Plataforma Vibratória	44
3.4.1.2	Carga Controlável	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	Experimentos	46
4.1.1	Caracterização do transdutor KXOB22-04X3F exposto ao sol	46
4.1.2	Caracterização do transdutor KXOB22-04X3F exposto à caixa de luz	46
4.1.3	Emulação de transdutor solar com carga sintética	48
4.1.4	Caracterização de transdutor piezoelétrico	50
4.1.5	Emulação de transdutor piezoelétrico com carga sintética	53
4.1.6	Avaliação de traços de consumo de energia	57
4.1.7	Avaliação de Desempenho do Analisador Lógico Integrado	61
4.1.8	Discussões	63
5	CONCLUSÃO	65
5.1	Trabalhos Futuros	65
	REFERÊNCIAS	67
	APÊNDICES	72
.1	Validação Operacional	73

1 Introdução

Sistemas embarcados com restrições energéticas vêm se proliferando ao longo dos anos e tendem a continuar em permanente crescimento. Apenas os dispositivos conectados à Internet devem representar entre 20 e 30 bilhões de equipamentos em 2020 (DIECHMANN et al., 2018). Estes equipamentos se tornarão ubíquos na sociedade, em aplicações como o monitoramento de fundações prediais, da qualidade do solo agrícola, sensoriamento de rodovias, controle de estacionamentos urbanos e *health care*, com sensores integrados ao corpo humano.

Uma característica de destaque nesses dispositivos é a sua operação por períodos muito longos, meses ou anos, e restrições de tamanho e acessibilidade, o que leva a necessidade de projetos de baixíssimo consumo de energia e operação com mínima intervenção humana. Quando a substituição de bateria nestes equipamentos torna-se inviável, técnica ou economicamente, a captura de energia disponível no próprio ambiente de operação emerge como opção que permite prolongar significativamente a autonomia destes dispositivos (ABBAS et al., 2016; MOSER et al., 2007) e, conseqüentemente, sua vida útil. Esta energia pode ser capturada de diversas fontes naturais ou artificiais como a luz do sol, a vibração de uma máquina, o diferencial térmico entre corpos, sinais de rádio frequência, etc. No entanto, essas fontes de energia possuem características que acrescentam desafios ao projeto, especialmente os seus perfis bastante distintos de geração de energia dependendo da condição ambiental (ARREOLA et al., 2018). Mesmo as fontes mais previsíveis, como a solar, ainda estão suscetíveis a grandes variações na capacidade de produção (PIORNO et al., 2010), especialmente quando incorporada a dispositivos móveis. Além disso, os níveis de energia produzidos são bastante reduzidos, tipicamente na faixa entre micro e mili Watts, com transdutores que respondem de maneira muito particular frente ao consumo e necessitam de um controle do ponto de potência ideal de operação para máxima eficiência.

Além da geração de energia, o próprio consumo nos dispositivos com captura de energia é bastante variável em função das características inerentes à aplicação,

modos de operações e quantidade de periféricos. Também contribuem para a variação do consumo as técnicas de *hardware* e *software* utilizados para aumentar a eficiência energética como DPM (*Dynamic Power Management*), DVFS (*Dynamic Voltage and Frequency Scaling*), escalonadores de tarefas específicos (GHOR; CHETTO; CHEHADE, 2011; MAHMOOD et al., 2017) e técnicas de operações transientes (BALSAMO et al., 2016; MERRETT; AL-HASHIMI, 2017).

Diante deste panorama a própria simulação em computador dos sistemas embarcados com captura de energia é dificultosa. Os simuladores frequentemente ignoram aspectos importantes e limitações impostas em projetos de sistemas embarcados de tempo real, como o custo da troca de contexto entre as tarefas (BORIN; CASTRO; PLENTZ, 2017). Além disso, os baixos níveis de energia utilizados nestes sistemas tornam as pequenas variações de consumo dos periféricos bastante relevantes. Outros complicadores advêm do comportamento não linear de alguns componentes, como o próprio transdutor de energia ou o conversor DC-DC (GUMMESON et al., 2010).

Para uma simulação fidedigna precisamos fornecer ao *software* simulador curvas específicas de geração de energia para o transdutor utilizado, nas diversas condições ambientais possíveis. Também é necessário informar, de forma detalhada, as características de consumo de energia do processador e todos os periféricos, em seus diversos modos de operação, além do comportamento do *software* utilizado para orquestrar a execução das tarefas e ativar cada modo de baixo consumo particular. Durante a realização desta pesquisa não foram encontrados simuladores genéricos que abordassem todos esses itens como parâmetros para sua operação. Gummeson et al. (2010) reporta o desenvolvimento de um simulador para captura de energia baseado em traços, mas focado em CRFID (*Emerging Computing RFID*). Tinsley et al. (2015) disponibilizaram um simulador para prever a geração de energia de um gerador termoeletrico e células solares, com erro médio de 1,5% para este último. No entanto, a forma de elaborar a função de consumo energético para dispositivos reais não foi tema do trabalho. O Truetime (CERVIN, 2003) é um simulador genérico baseado no Simulink que, em princípio, poderia suportar a incorporação de curvas de geração e consumo energético como parâmetros operacionais, mas não foram encontrados outros trabalhos que abordassem o tema.

Verificar o comportamento operacional do equipamento em si, depois de construído, tampouco é simples. Além de coletar curvas de geração de energia nas diversas situações ambientais é necessário um aparato que permita reproduzir em laboratório estas condições, de forma controlada, a fim de avaliar o comportamento do *hardware* e *software* do dispositivo em projeto. Essa reprodução tipicamente consome um significativo esforço, com a construção de um *hardware* específico para cada tipo de transdutor, como as *light box* descritas em Masoudinejad et al. (2016) e Hanschke et al. (2017). De forma simplificada, o que temos são caixas fechadas (sem interferência de luz externa) que possuem lâmpadas com brilho controlado por computador e que são utilizadas para reproduzir condições previamente coletadas em campo ou produzidas artificialmente. Neste sentido, uma abordagem interessante foi utilizada em Zhang et al. (2011) e outros trabalhos correlatos (HESTER; SCOTT; SORBER, 2014; HESTER et al., 2017). Ao caracterizar as fontes de energia utilizando curvas "I-V", curvas que descrevem a tensão gerada para uma dada corrente, é possível reproduzi-las de forma mais determinística, permitindo a análise detalhada da potência consumida por um dispositivo em diversas condições de geração. Esta abordagem é especialmente interessante por ser indiferente ao tipo de transdutor ou carga utilizadas, tornando-se uma valiosa ferramenta de projeto.

Enquanto os simuladores provêm versatilidade na análise do comportamento do *software* embarcado, as plataformas de emulação de curvas I-V permitem reproduzir o comportamento de fontes de energia de forma determinísticas, independente do transdutor utilizado. Este trabalho apresenta uma nova plataforma de *hardware* que alia qualidades de ambos recursos de projeto, permitindo a depuração de rotinas de *firmware* sincronizados com o monitoramento do consumo de energia emulado de fontes renováveis. Com o uso deste mecanismo os projetistas podem acompanhar o impacto de rotinas específicas do software em situações distintas de fornecimento de energia.

A plataforma opera em dois modos característicos, o de captura e o de reprodução. No modo de captura é possível capturar as curvas I-V e caracterizar o comportamento do transdutor de energia de baixa potência. No modo de reprodução o comportamento de geração do transdutor é reproduzido e, ao mesmo tempo, um analisador lógico de 10MHz captura informações de depuração através dos 8 canais

lógicos disponíveis, sincronizados com o monitoramento do consumo.

1.1 Justificativa

Diante dos desafios existentes nas fases de projeto e validação de sistemas embarcados com captura de energia e a eminente proliferação destes dispositivos na sociedade, tornam-se necessárias novas ferramentas de apoio aos projetistas que permitam o monitoramento, controle e reprodução em laboratório das condições encontradas em campo, oferecendo uma metodologia que simplifique o ciclo de desenvolvimento e favoreça a análise integrada dos componentes de *hardware* e *software*. Com esta nova ferramenta a validação operacional dos dispositivos embarcados com captura de energia (SECE) pode ser realizada de forma muito mais ampla, maximizando o número de análises de comportamento em condições reais de operação e, conseqüentemente, suportando o desenvolvimento de equipamentos mais eficientes.

1.2 Objetivo Geral

Desenvolver um equipamento capaz de capturar os perfis de fornecimento de energia de fontes renováveis de baixa potência e reproduzi-los de forma consistente, permitindo a depuração integrada dos estados lógicos do *firmware* e o consumo energético do sistema embarcado.

1.2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Desenvolver o *hardware* e *software* para operação da plataforma;
- Criar perfis de captura e consumo de diversos tipos de transdutores em diferentes condições, para uso com a plataforma e como fonte de dados para simulações;

- Comparar a qualidade das respostas dos sistemas sob influência de transdutores reais e traços emulados pela plataforma;

1.3 Produção

No decorrer do desenvolvimento dessa pesquisa foi produzido o seguinte trabalho científico: "*An FPGA-based evaluation platform for energy harvesting embedded systems*", artigo, *Symposium on Integrated Circuits and Systems Design* (SBCCI), 2019.

1.4 Organização do texto

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira: após a introdução apresentada neste capítulo, o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica que embasa esta pesquisa. O Capítulo 3 descreve a arquitetura da plataforma e a metodologia proposta. Os resultados e discussões são apresentados no Capítulo 4. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo são apresentados alguns transdutores de energia e suas principais características, seguidos de uma explicação sobre os componentes fundamentais de um sistema embarcado com captura de energia, com exemplos de casos de usos. Por fim, são abordadas as técnicas disponíveis para a emulação destes sistemas em particular, detalhando suas especificidades.

2.1 Captura de energia do ambiente

A captura de energia do ambiente (*energy harvesting*), também traduzida para o português como colheita de energia, consiste na técnica de utilizar a energia disponível no ambiente, tipicamente renovável, para alimentar um dispositivo eletrônico. O termo e a técnica não são novos, existindo diversos trabalhos e patentes datando de meados do século XX (NOREN, 1978; C Cheng; CHENG, 1976; BOURKE; WILSON, 1975). Com os avanços na área de microeletrônica das últimas décadas, pode-se observar um significativo avanço no uso da captura de energia do ambiente para alimentar sistemas embarcados. Apesar dos desafios envolvidos, a principal contribuição desta técnica é minimizar ou até eliminar a necessidade de utilização de baterias. Isso é de fundamental importância quando estamos tratando de equipamentos que precisam de pouca ou nenhuma intervenção humana, possibilitando o projeto de equipamentos com vida útil prolongada. Pode-se observar também um grande potencial de uso no projeto de equipamentos pequenos, leves e móveis, como os acoplados ao corpo humano (*weareables*).

Na Figura 1 estão representados graficamente os dados levantados em Nechibvute, Chawanda e Luhanga (2012) com os tipos de energia e seus níveis potenciais de geração elétrica. Pode-se claramente visualizar os baixos níveis de potência disponíveis e, especialmente, a diferença existente entre as diversas alternativas de energias a serem exploradas na captura.

A seguir destacamos uma lista não exaustiva de fontes de energia e trans-

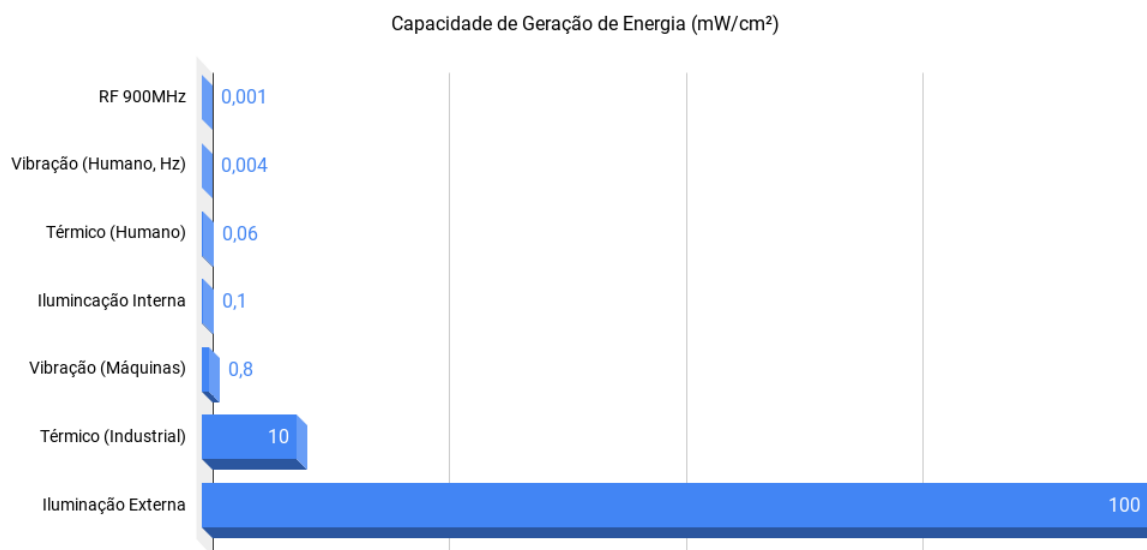


Figura 1 – Potencial de geração elétrica. Fonte: Autor.

dutores comerciais de baixa potência, voltados para as aplicações de captura de energia utilizando energia luminosa, térmica e cinética.

2.1.1 Fotoelétricos

As células fotoelétricas consistem de elementos capazes de converter a energia luminosa em energia elétrica, através do efeito fotoelétrico. Estes painéis possuem diversas apresentações disponíveis no mercado, desde células individuais, flexíveis ou impressas em finos filmes. Dependendo da sua forma e tecnologia de fabricação possui eficiência bastante variável. Apesar do estado da arte reportar em laboratório eficiências da ordem de 46% para alguns tipos de células multi-junção ([GREEN et al., 2018](#)), as opções disponíveis no mercado apontam para uma eficiência em torno de 20% nos melhores painéis monocristalinos de silício comerciais.

Neste trabalho são apresentados experimentos realizados com micro painéis especificamente projetados para dispositivos com captura de energia, com potência máxima de 20,07mW e eficiência de 20,07% ([IXYS Corporation, 2016](#)) mostrado

na Figura 2.

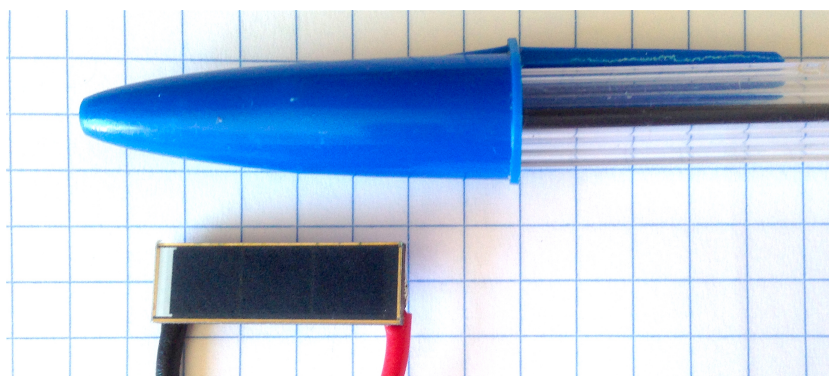


Figura 2 – Célula Solar IXYS KXOB22-04X3F. Fonte: Autor.

2.1.2 Piezoelétricos

São classificados como materiais piezoelétricos aqueles que possuem a capacidade de converter tensão mecânica (*stress*) em cargas elétricas (LIU; REN, 2009). Importante destacar que esse efeito é reversível: estes materiais possuem a capacidade de se deformar mecanicamente quando submetidos a uma tensão elétrica (efeito piezoelétrico indireto) (NECHIBVUTE; CHAWANDA; LUHANGA, 2012). A partir desta características uma série de aplicações foram sendo criadas com estes materiais, como nano e micro motores (KOC; UCHINO, 1997), sensores e atuadores (TADIGADAPA; MATETI, 2009). Trabalhos como Rodriguez et al. (2017) exploram estes materiais em aplicações com captura de energia com resultados satisfatórios.

Neste trabalho são apresentados experimentos com dois tipos de transdutores piezoelétricos, exibidos na Figura 3, originalmente desenvolvidos para detecção de vibrações (SPECIALTIES, 2008) e emissão de sons.

2.1.3 Microturbinas

As microturbinas funcionam por meio do movimento mecânico de um fluido através de seus elementos de captação, tal como as turbinas tradicionais hidroelétricas ou eólicas. No entanto, os seus projetos tipicamente procuram extrair

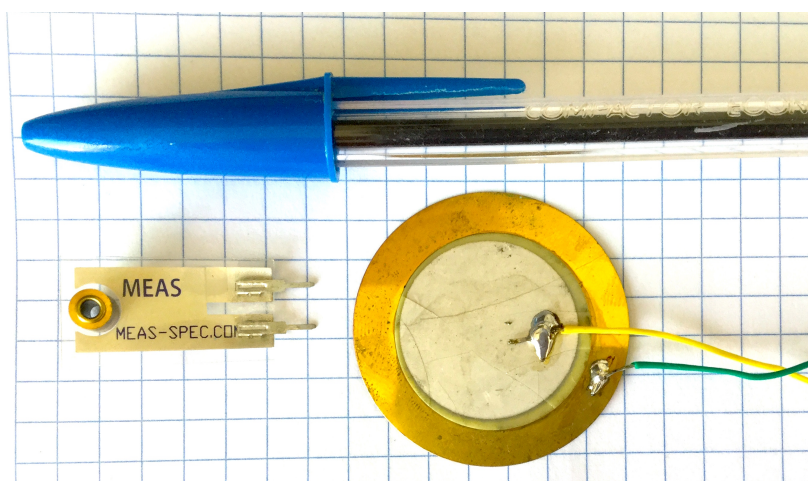


Figura 3 – Elementos de Piezoelétricos. Sensor de vibrações LDT0-028K (esquerda) e transdutor de som (direita). Fonte: Autor.

o máximo de energia possível mantendo-se pequenas. Existem microturbinas de diversos tipos como eólicas ([CARLI et al., 2010](#)) ou hidroelétricas ([HOFFMANN et al., 2013](#)). Neste último trabalho foi construída a microturbina exibida na Figura 4 que é voltada à instalação em tubulações de água para alimentação de medidores hidráulicos inteligentes, capaz de gerar até 720 mW com um fluxo de água de 20 litros/minuto (equivalente a uma torneira totalmente aberta), tendo sua geração iniciada a partir de 3 litros/minuto quando é capaz de gerar 2 mW de potência.



Figura 4 – Microturbina hidraulica. Retirado de [Hoffmann et al. \(2013\)](#).

2.1.4 Termoelétricos

Os geradores termoelétricos (TEG) exploram o efeito *Seebeck* para gerar energia quando um diferencial térmico é aplicado à sua junção ([HERWAARDEN; SARRO, 1986](#)). Este efeito é o oposto do efeito Peltier, que cria um gradiente de temperatura quando uma tensão é aplicada ao elemento e está amplamente disponível no mercado através de mini geladeiras sem compressor. Apesar dos dois efeitos serem reversíveis, existem módulos especificamente projetados para atuar na geração de energia como o exibido na Figura 5.



Figura 5 – Gerador Termoelétrico. Retirado de [Industries Marlow \(2019\)](#).

2.1.5 Radio Frequência

O uso de Radio Frequência para alimentar dispositivos embarcados já é amplamente utilizado nos dispositivos como RFID (*Radio Frequency Identification*)/NFC(*Near Field Communication*). Nestes dispositivos a alimentação é fornecida através de indução eletromagnética ao ser aproximado de uma antena, que também é utilizada para o trânsito de dados. Alguns outros trabalhos, no entanto, buscam recuperar energia do ambiente em condições mais adversas e menos controladas, como a utilização dos sinais de rádio frequência comuns no ambiente urbano ([ARRAWATIA; BAGHINI; KUMAR, 2011](#)). Dentre as técnicas apresentadas nesta seção esta é a que fornece menor densidade de energia e, consequentemente, apresenta maiores desafios para o uso com captura de energia. Vários trabalhos nesta área buscam a criação de novos circuitos e topologias que permitam aumentar a eficiência do processo ([THONET; VESIN, 2010](#)) ([PALANDOKEN et al., 2018](#)).

2.2 Sistemas embarcados com captura de energia

Na Figura 6 é apresentado o diagrama de blocos de um sistema embarcado com captura de energia típico. Ele contém um transdutor de energia, que é o elemento capaz de converter a energia (cinética, solar, térmica, etc.) em elétrica seguido por um conversor DC-DC, dispositivo de armazenamento de energia¹, CPU e periféricos.

Como a potência fornecida pelo transdutor é variável de acordo com o consumo do circuito (JIANG et al., 2014), o conversor DC-DC é responsável por aumentar a eficiência da conversão, casando a impedância entre os circuitos e procurando manter a região de operação no máximo ponto de potência do transdutor (MPPT) (KIM et al., 2010). O projeto deste componente é de fundamental importância, uma vez que boa parte da energia pode ser perdida nesta etapa. Com efeito, alguns trabalhos buscam dotar este elemento de informações sobre as condições de energia do sistema geral, incluindo as características de DVS (*Dynamic Voltage Scaling*) do processador, a fim otimizar a conversão para sistemas embarcados com captura de energia (CHOI; CHANG; KIM, 2007).

A saída do conversor DC-DC pode ser diretamente conectada ao sistema ou armazenada em elementos para uso futuro. Tipicamente observa-se baterias recarregáveis ou super-capacitores executando esta função. Enquanto estes oferecem grande número de ciclos de carga/descarga, aquelas oferecem muito mais densidade de energia armazenada.

No estágio referente à carga observa-se os dois principais componentes representados: a CPU e os periféricos. A CPU executa a computação de acordo com as instruções carregadas em sua memória, à uma velocidade fixa ou dinâmica, com capacidade de modificar os modos de consumo de energia próprios e dos periféricos a ela conectados. Estes periféricos são altamente dependentes das aplicações em si, mas são fundamentais no projeto de sistemas com restrições de energia pois podem representar os elementos de maior consumo (AUDET et al., 2011).

¹ Opcional em alguns tipos de dispositivos e aplicações.

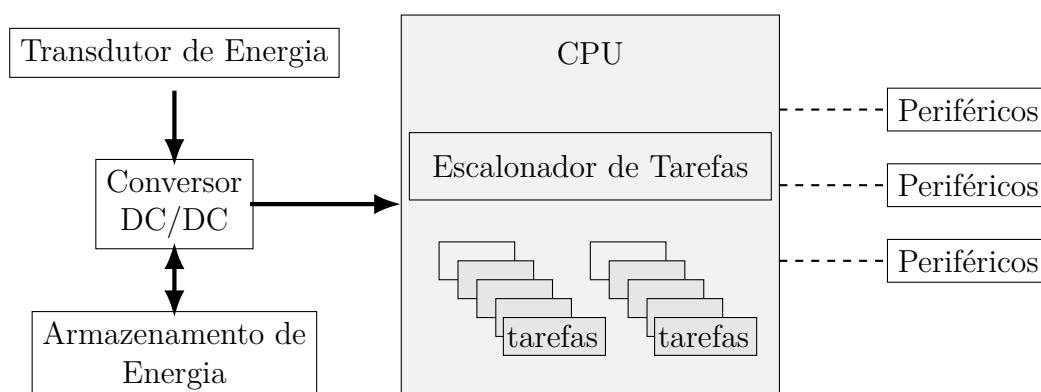


Figura 6 – Típico Sistema Embarcado com Captura de Energia. Fonte: Autor.

2.2.1 Casos de uso

2.2.1.1 Nó sensor de monitoramento de ponte

Em [Jia et al. \(2015\)](#) foi desenvolvido um transdutor de energia cinética com banda de operação estendida, que foi utilizado com sucesso para alimentar um nó de sensor sem fio de monitoramento de vibrações estruturais. O transdutor foi capaz de produzir 0,3mW de potência DC condicionada, recuperando a energia das vibrações induzidas pelo tráfego através dos suportes estruturais da ponte (Ponte Forth Road, Escócia) e suportando com sucesso as transmissões de dados do nó sensor. Na Figura 7 pode-se observar o dispositivo em sua instalação, composto do *data logger* para armazenamento e transmissão dos dados e o transdutor de energia cinética.

2.2.1.2 Marca-passos alimentado com captura de energia

[Hwang et al. \(2014\)](#) demonstraram o potencial prático do uso de transdutores piezoelétricos para alimentar um marcapasso cardíaco em um ser vivo. Os experimentos foram conduzidos no coração de um rato e foi verificado, com sucesso, que a energia gerada pelo transdutor é suficiente para produzir estímulos cardíacos. Apesar da necessidade de aprimoramento das técnicas apresentadas no trabalho para uso real, o trabalho demonstra o potencial do uso de captura de energia em bio implantes.



Figura 7 – Sensor instalado na ponte Forth Road. Adaptado de (JIA et al., 2015).

2.2.1.3 Piso comercial com captura de energia

Pavegen (2019) é um piso comercial capaz de gerar até 5 W de energia com pessoas andando sobre um pavimento revestido, segundo o fabricante. Ele recupera energia cinética através de geradores eletromagnéticos que são acionados por pressão, como pode ser visto na Figura 8. Com instalações em alguns locais de grande circulação, como o aeroporto de Dubai, este tipo de equipamento é promissor ao incorporar a geração de energia em níveis elevados, quando comparados com alternativas piezoelétricas.

2.2.1.4 Exoesqueleto comercial com captura de energia

Bionic Power's Powerwalk (POWER, 2017) é um exoesqueleto capaz de gerar de 10 a 30 W de energia em movimentos típicos de caminhada e corrida, segundo o fabricante. Ilustrado na Figura 9, ele é idealizado para uso de forças militares e está em testes operacionais nos exércitos americanos e canadenses. O seu objetivo primordial é alimentar os dispositivos eletrônicos, como rádios e equipamentos de localização, em ambientes adversos.

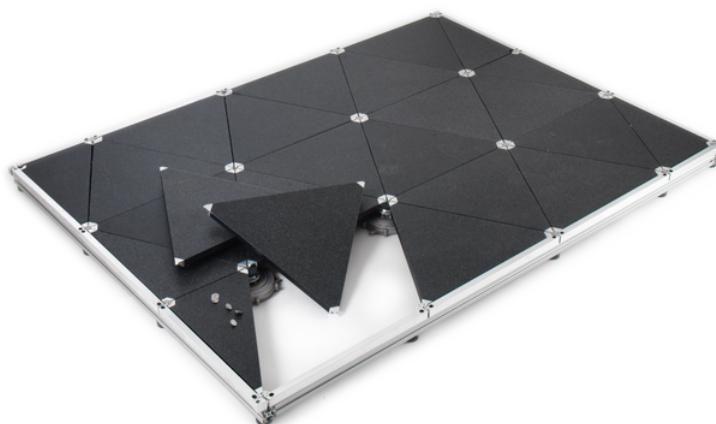


Figura 8 – Gerador Pavegen. Fonte: Pavegen.

2.3 Técnicas de avaliação de sistemas embarcados com captura de energia

Uma vez que as simulações de sistemas embarcados com captura de energia oferece vários desafios e simplificações (GUMMESON et al., 2010), surgiram algumas alternativas para auxiliar no desenvolvimento e avaliação dos sistemas embarcados com captura de energia através da emulação das fontes de energia. Esta técnica é de extrema valia para o projeto, pois ao produzir de forma determinística o comportamento de campo em diversas condições ambientais é possível avaliar com eficácia os diversos outros parâmetros que afetam o desempenho do sistema como, por exemplo, os modos de economia de energia dos periféricos ou o impacto de rotinas de *software*, como o escalonador de tarefas ou DVFS.

2.3.1 Caixa de Luz (*Light Box*)

A Caixa de Luz é uma ferramenta utilizada para emular fontes de luz e avaliar o comportamento da geração de energia dos transdutores deste tipo. Os trabalhos revisados sugerem variações nos software de controle, tipo e temperatura



Figura 9 – Gerador Powerwalk. Adaptado de [Power \(2017\)](#).

das fontes de luzes, filtros, ângulo de incidência, tamanho do equipamento, etc. ([HANSCHKE et al., 2017](#); [JOE; SHIN, 2016](#); [MASOUDINEJAD et al., 2016](#)). Este último possui uma extensa variedade de parâmetros que permitem, combinados, emular padrões bastante complexos de geração de luz para avaliação.

A despeito da complexidade de alguns projetos, essencialmente todos operam a partir do mesmo princípio em que o dispositivo sob avaliação é colocado em uma caixa fechada, similar a da Figura 10, isolada do ambiente externo, e padrões de irradiância diversos são reproduzidos, a partir de traços reais previamente capturados ou sinteticamente criados.

2.3.2 Mesa de Vibração (*Shake Table*)

Para o teste de transdutores de vibração utiliza-se um dispositivo mecânico que atua sobre uma determinada superfície móvel, em frequência e intensidade controladas por computador, para reproduzir padrões sintéticos ou comportamento em situações reais previamente armazenados ([SNELLER et al., 2011](#)) ([JIANG et al., 2014](#)). Atuadores diferentes podem ser utilizados para fornecer a força necessária ao sistema, como motores ou solenoides, sendo os últimos os mais comuns. Tipicamente

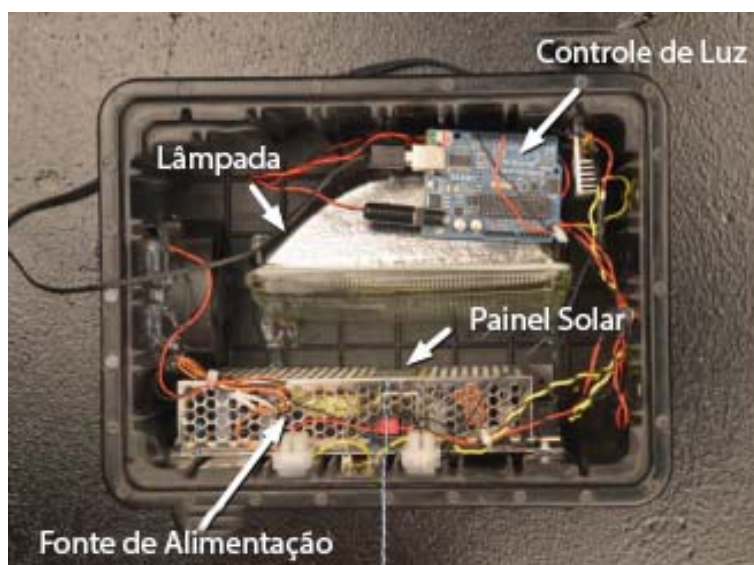


Figura 10 – Caixa de luz utilizada para emular fonte solar. Fonte: Adaptada de (HESTER; SCOTT; SORBER, 2014).

existem acelerômetros acoplados às mesas como sensores para registrar os níveis de vibração. A depender da frequência máxima, força e resolução necessárias estes equipamentos podem requerer relevante esforço na construção eletromecânica, a fim de garantir a reprodutibilidade dos ensaios.

Na Figura 11 observa-se o esquema conceitual e fotos da mesa de vibração utilizada em Jiang et al. (2014), em que um atuador eletromecânico é acoplado à uma mesa horizontalmente móvel que movimenta a plataforma de acordo com os valores determinados no computador. Um solenoide é utilizado para comprimir a mola e impulsionar a mesa. Os experimentos reportados nos trabalhos apontam para uma boa capacidade de reprodução.

2.3.3 Emulação de Curvas I-V

A abstração de curvas de corrente/tensão (I-V) de um transdutor foram utilizadas com sucesso na tarefa de caracterizar e reproduzir o perfil de geração elétrica em (ZHANG et al., 2011). Em Hanschke et al. (2017) ficou demonstrado que emular apenas a potência não é suficiente para dispositivos que possuem tensões

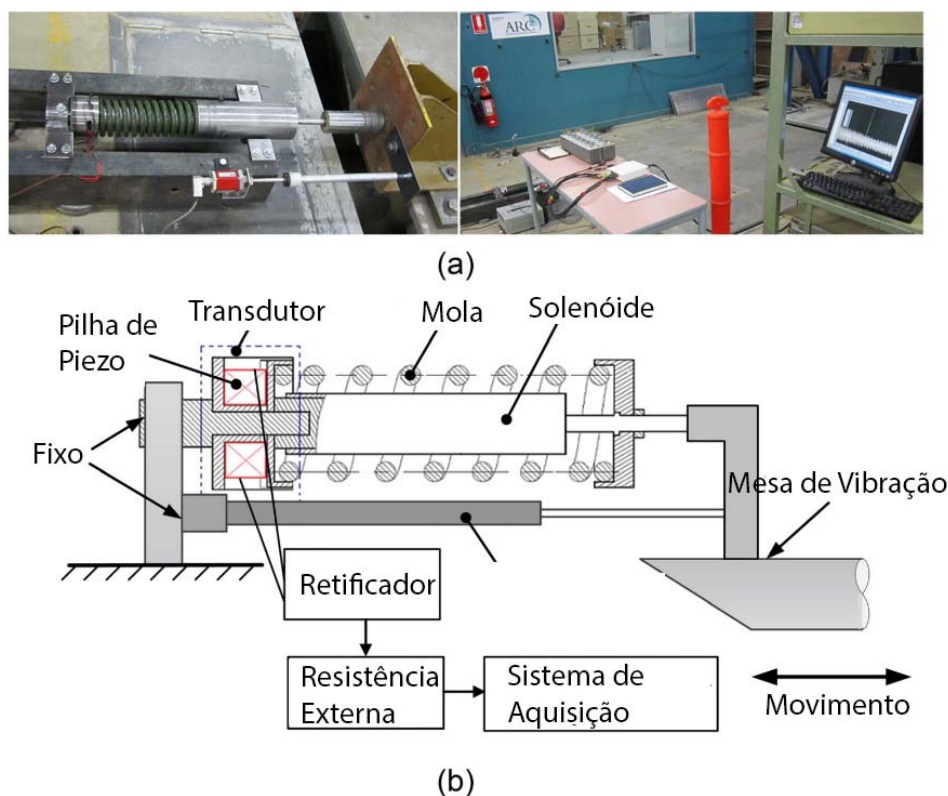


Figura 11 – Mesa de vibração (a) e seu desenho conceitual (b). Fonte: Adaptado de Jiang et al. (2014).

voláteis, sendo a reprodução de curvas I-V uma abordagem mais efetiva para a tarefa. Ao contrário dos dispositivos específicos como os citados anteriormente, com esta técnica pode-se vislumbrar a emulação de diversas fontes de energia com um mesmo equipamento.

Uma curva I-V consiste de um traço de tensão e corrente capturados simultaneamente, enquanto o transdutor em análise é submetido à uma carga de consumo variável. Este traço determina a potência extraída do componente em uma dada condição, requisitos essencial para permitir uma futura emulação. Na Figura 12 vê-se um exemplo de curva I-V extraída de um micro painel solar, onde o traço azul demonstra a variação da tensão do painel em função da corrente extraída. A curva em vermelho demonstra que a tensão máxima obtida não guarda relação com a potência máxima, comportamento esperado em dispositivos desta natureza

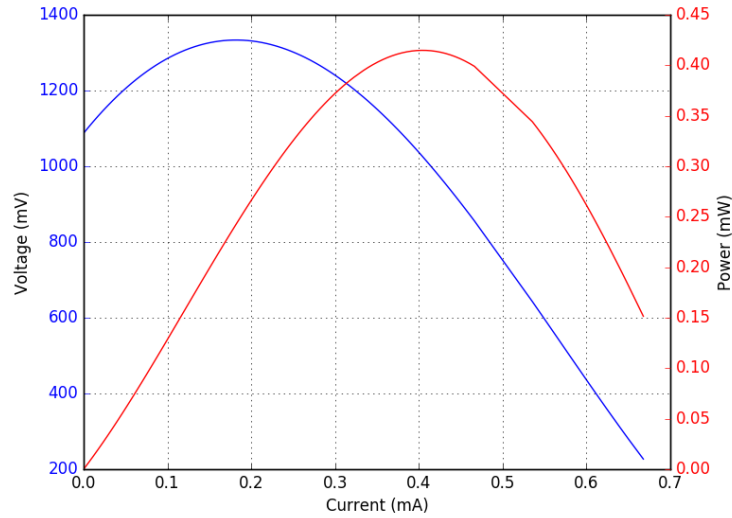


Figura 12 – Exemplo de Curva I-V Solar. Fonte: Autor.

que, tipicamente, requerem a busca do ponto máximo de potência (MPPT) para serem mais eficientes.

Apesar de uma curva I-V permitir a emulação de uma condição específica do ambiente no qual o transdutor está inserido, emular as condições reais enfrenta desafios adicionais. Como o ambiente é dinâmico não basta capturar e emular uma curva estaticamente, é necessário combiná-las de forma temporal criando uma superfície I-V como ilustrada na Figura 13. Neste exemplo observa-se o comportamento de um micro painel solar variando em um período de 60s. Existem pequenas oscilações desde o início da captura, que se acentuam drasticamente quando há um sombreamento parcial, em torno dos 35s. No caso do painel fotoelétrico as variações são lentas em função da própria natureza do ambiente no qual eles tipicamente estão inseridos. Para outros transdutores a variação temporal das curvas I-V são ainda mais importantes. Transdutores piezoelétricos ou de rádio-frequência variam a sua potência em milissegundos, de forma que para emulá-los de forma satisfatória a ferramenta deve ser capaz de percorrer a superfície I-V em alta velocidade. (HESTER; SCOTT; SORBER, 2014) reporta que para emular as características de uma fonte RFID é necessário percorrer a superfície I-V à uma taxa de pelo menos 1 kHz.

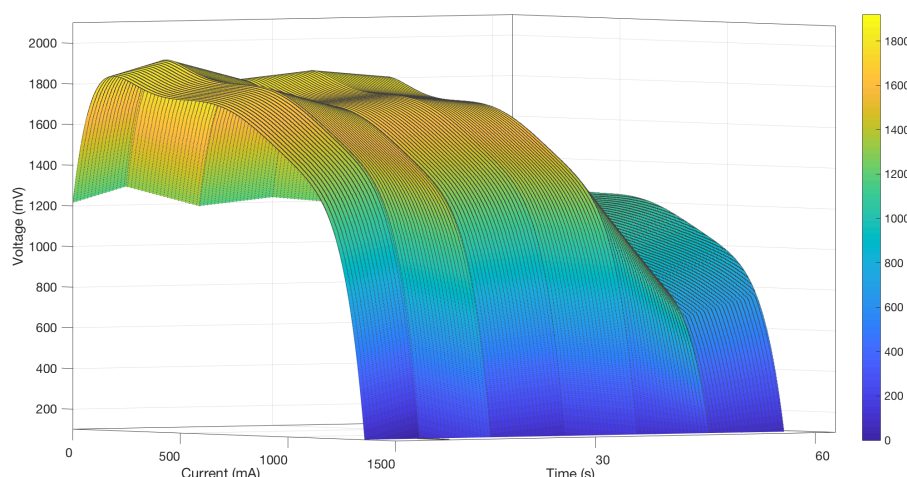


Figura 13 – Exemplo de Superfície I-V.

O estado da arte da emulação de curvas I-V para análise de sistemas embarcados com captura de energia reporta-se aos trabalhos iniciados em [Zhang et al. \(2011\)](#) e posteriormente desenvolvidos em [Archer et al. \(2013\)](#), [Hester, Scott e Sorber \(2014\)](#) e [Hester et al. \(2017\)](#). Neste último duas versões para o modo de aquisição são reportados. Na versão *desktop* a coleta de amostras é realizada através de um DAQ da National Instruments (NI USB-6536), com capacidade para amostragens de 16 bit a uma taxa de 1 MHz. É relatado que nos experimentos conduzidos foram utilizadas taxas entre 200 e 500 kHz. Na versão "mini" um microcontrolador ARM foi utilizado para a tarefa, limitando a taxa de aquisição a próximo de 1000 curvas por segundo. A resolução da amostragem de corrente na aquisição é de 10 μA para a versão *desktop* e 0.05 μA para a versão "mini".

No modo de reprodução (*replay*), no qual a partir de uma superfície I-V reproduz-se o comportamento de um transdutor, é utilizado um microcontrolador XMEGA. Em virtude de uma limitação do *hardware* referente à velocidade de comunicação com o *desktop* responsável pela seleção das curvas, a capacidade máxima de troca entre curvas é de 135 Hz com tempo de resposta à flutuações de corrente de 4 μs . Quando a fonte de energia varia em alta frequência é necessário que as curvas estejam na memória do dispositivo para responder em tempo. Por

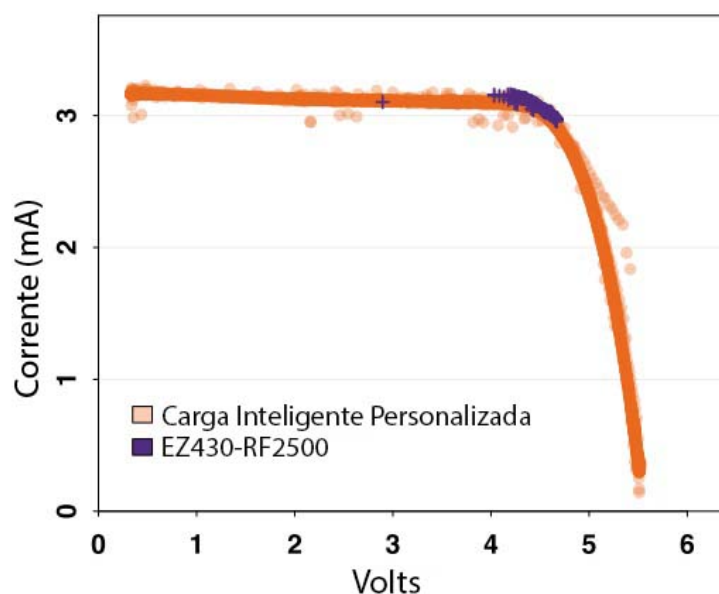


Figura 14 – Exemplo de Curva I-V extraída com a "carga inteligente" comparada com um sistema real. Adaptado de (HESTER; SCOTT; SORBER, 2014).

limitação de capacidade de memória, utilizando curvas de 65 pontos, a emulação à 1 kHz fica limitada a períodos inferiores a 1 s. Com a mudança para microcontrolador ARM Cortex M4 sugere-se que seria possível variações de curvas à taxa de 1 kHz e tempo de emulação entre 1 e 2 segundos (HESTER et al., 2017).

As curvas I-V nestes trabalhos tipicamente possuem 65 pontos, de forma que o cálculo do valor do ADC é realizado com base na interpolação linear entre o valor medido e dois pontos adjacentes neste conjunto.

Uma dificuldade apontada em Hester, Scott e Sorber (2014) é a criação das curvas I-V, uma vez que os dispositivos reais tendem a não percorrer toda a faixa de operação possível do transdutor em análise. Para sanar esta dificuldade foi elaborada uma "carga inteligente" que consiste basicamente de um microcontrolador e um potenciômetro digital. Com este aparato foi possível explorar uma superfície maior de cobertura de potência do transdutor, como ilustrado na Figura 14. Enquanto a operação de um dispositivo embarcado real permitiu extrair apenas uma pequena fração da curva de operação (pontos em roxo), a "carga inteligente" permitiu a

extração de pontos bem mais abrangentes (pontos em laranja). Também ficou demonstrado neste trabalho que a frequência de operação da "carga inteligente" tem significativo impacto na extração da curva. Em fontes de geração de alta frequência é importante que a carga seja modificada também em alta frequência, de forma a captar os detalhes da variação da potência no tempo.

3 Metodologia

Neste capítulo é apresentada a plataforma de *hardware* proposta para emulação de fontes de energia de baixa potência e depuração de sistemas embarcados com captura de energia, nomeada Ripeto. São detalhadas a sua implementação e características técnicas dos modos de funcionamento que foram utilizados nos ensaios.

3.1 Visão Geral

Ferramenta	Tipo de Transdutor	Depuração de Software	Condições Reais	Simplificações
Simuladores	Diversos	Sim	Não	Sim
Caixa de Luz	Fotoelétrico	Não	Sim	Não
Mesa de Vibração	Piezo	Não	Sim	Não
Emulação Curvas I-V	Diversos	Não	Sim	Não
Ripeto	Diversos	Sim	Sim	Não

Quadro 3.1: Resumo das Ferramentas de Avaliação

Com a solução proposta neste trabalho é possível preencher a lacuna existente entre os simuladores em *software* e os equipamentos de emulação de transdutores, permitindo a reprodução das condições reais de captura de energia de diversos transdutores aliados à capacidade de depuração do software embarcado, como indicado no Quadro 3.1.

3.2 Arquitetura

A plataforma proposta é baseada um FPGA Spartan6, da Xilinx, com 32 Mb de memória de DRAM acoplada, operando à frequência de 100 MHz. A este

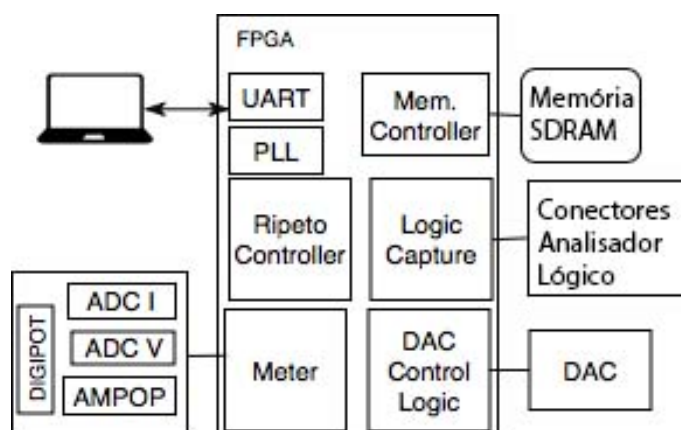


Figura 15 – Arquitetura da Plataforma. Fonte: Autor.

conjunto integram-se aos componentes de aquisição de tensão e corrente, sendo capaz de amostrar correntes da ordem de $1\ \mu\text{A}$ a uma taxa de 40 ksps. Um analisador lógico síncrono com as amostragens de tensão e corrente foi incorporado ao sistema, permitindo a captura de eventos à taxa de 11 MHz. Também estão presentes na plataforma um DAC e um regulador de tensão, com tempo de resposta de $6\ \mu\text{s}$.

A operação da plataforma é realizada em dois modos: captura de dados e reprodução de curvas. Quando operando no modo de captura as operações realizadas são voltadas exclusivamente para a coleta de dados da produção e consumo de energia dos dispositivos acoplados em suas entradas e saídas, além do analisador lógico que permite sincronizar os dados de energia com informações de estado (*debug*) do microprocessador em estudo. Quando operando no modo de reprodução de curvas, ainda que a função de coleta de dados de consumo e analisador lógico estejam ativos, a função de destaque da plataforma passa a ser a capacidade de reproduzir um perfil de produção de energia de um transdutor pré-caracterizado através das superfícies I-V.

Na Figura 15 observa-se o diagrama conceitual da plataforma proposta. O elemento central, o FPGA é onde os componentes lógicos são implementados. Dentre os módulos internos tem-se o controlador de memória DRAM, responsável pelo controle de acesso e *refresh* da memória DRAM, a UART, responsável pela comunicação com o PC para *download* e *upload* de dados, o controlador de I/O,

responsável pelos periféricos de sinalização e entrada de dados, o *meter* e o *logic capture*, responsáveis pela aquisição de dados e o ADC, responsável pelo controle do conversor utilizado no modo *replay*.

O módulo *meter* possui dois canais de comunicações SPI (*Serial Peripheral Interface*) para interface com os conversores analógicos digitais de 12 bit (DAC) e um canal serial para controle do potenciômetro digital de 8 bit, que controla a escala de corrente ¹. Os canais de DAC são sincronizados de forma que as amostras de corrente e tensão são capturadas ao mesmo tempo, fornecendo a potência instantânea das medições. Quando no modo de captura, os dados são recebidos dos ADCs a uma taxa de 40 ksp/s. Concomitantemente com as amostragens de tensão e corrente também são gravadas na memória os registros de mudança nos estados lógicos do *logic capture*, a fim de operacionalizar o analisador lógico sincronizado com a aquisição de potência. O analisador lógico é capaz de registrar eventos em 90 μ s.

O módulo *DAC* está ativo apenas durante o modo *replay* e comunica-se via I2C com o conversor digital/analógico presente na placa à taxa de 1,5 Mbps. Este conversor de 12 bit controla a tensão de saída da plataforma seguindo as curvas pré-carregadas na memória DRAM que variam de acordo com as condições de operação. No modo *replay* as amostragens de tensão e corrente são executadas da mesma forma que no modo *meter*, podendo sua frequência ser alterada para ajustar-se à necessidade de cada fonte de energia.

¹ A escala dinâmica de corrente ainda não está implementada.

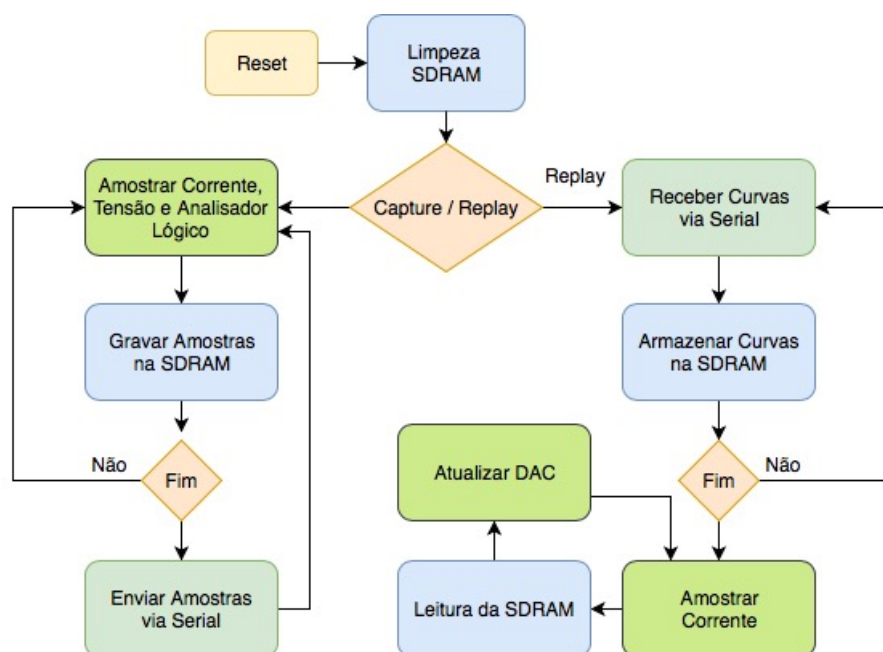


Figura 16 – Fluxograma Operacional. Fonte: Autor.

Na Figura 16 temos o fluxo operacional da plataforma em detalhes. No modo de captura as amostras de tensão e corrente do transdutor são armazenada na memória DRAM durante o ensaio. A uma taxa de 5 ksps é possível armazenar 1491 segundos de dados, podendo ser aumentado significativamente para fontes de energia com ciclos maiores de variação. Quando a captura é encerrada os dados são enviados a um PC via serial para tratamento. No modo de reprodução as curvas I-V são inicialmente enviadas pelo PC e armazenadas em memória. Após esta configuração inicial a plataforma passa a responder em sua saída com a tensão e corrente emuladas do transdutor registrando, de forma síncrona, as variações das entradas do analisador lógico.

Em Hester, Scott e Sorber (2014) foram utilizadas curvas I-V de 65 pontos e a velocidade necessária para atualizar os dados e refletir no DAC foi uma dos problemas reportados quando do uso de transdutores de alta frequência. Para superar estes problemas a solução proposta armazena as curvas I-V com 4096 pontos e utiliza uma *lookup table* na DRAM para indexá-la. O mesmo método é utilizado para a navegação entre as curvas da superfície, modificando o endereço

base do índice em função do tempo transcorrido de emulação.

Com esta abordagem é possível variar entre qualquer ponto da superfície com baixíssima latência. A capacidade máxima de armazenamento é de 2047 curvas de 4096 pontos, suficiente para todos os perfis de geração que verificamos até o momento. No entanto, caso necessário, é possível expandir significativamente a superfície armazenadas reduzindo o número de pontos individuais das curvas.

3.3 Modos de Operação

3.3.1 Caracterização da Fonte de Energia

Quando no modo de caracterização da fonte de energia, o objetivo é submeter o transdutor de energia a uma carga controlada, a fim de mensurar a curva de resposta de potência para diversos níveis de tensão e corrente.

Para este objetivo foi utilizado como carga um potenciômetro digital de $100\text{k}\Omega$, conectado à plataforma conforme ilustrado na Figura 17. O potenciômetro é varrido em toda a sua faixa de operação, através de um microcontrolador, enquanto seus terminais resistivos são conectados ao transdutor sob ensaio. As tensões e correntes são continuamente lidas pelos conversores analógico/digital e armazenados na memória RAM da plataforma.

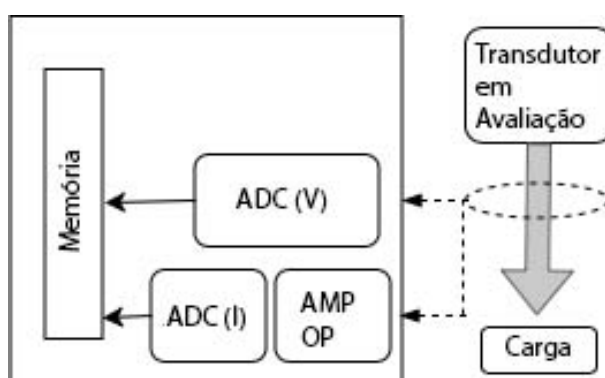


Figura 17 – Caracterização da Fonte de Energia. Fonte: Autor.

A duração deste processo está intrinsecamente relacionada ao tipo de trans-

dutor e objetivo da caracterização. Um painel solar, por exemplo, pode ser caracterizado como uma curva única que descreva o seu comportamento sob ação da iluminação de uma lâmpada. Este mesmo painel também pode ser caracterizado como uma superfície de longa duração, que descreva a sua resposta durante as 24h do dia. Portanto, um mesmo transdutor pode possuir diversas curvas e/ou superfícies que caracterizem a sua operação em distintos ambientes ao qual é submetido.

Ao final da captura os dados são enviados a um PC via serial para serem processados, a fim de criar a curva e/ou superfície de emulação deste transdutor nesta condição ambiental específica.

3.3.2 Emulação de Fonte de Energia

No modo de emulação do transdutor o objetivo é reproduzir uma curva ou superfície pré-caracterizada, alimentando uma carga (tipicamente um sistema embarcado) e monitorar o consumo durante o ciclo de operação deste dispositivo. A Figura 18 ilustra as interações dos componentes do sistema quando deste modo de funcionamento.

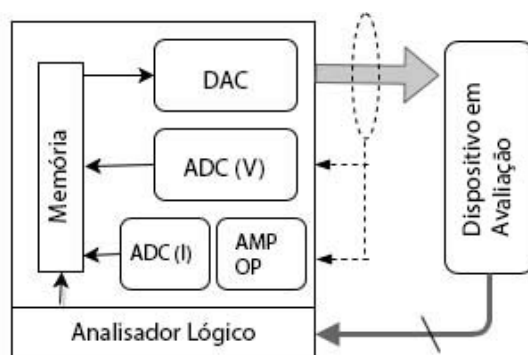


Figura 18 – Emulação da Fonte de Energia. Fonte: Autor.

O conversor digital/analógico (DAC) é continuamente configurado com os valores instantâneos de tensão lidos da memória RAM. O ponteiro de endereçamento do DAC é indexado em função da corrente medida pelo conversor analógico/digital que monitora a corrente. Quando a emulação se estende além de uma curva,

caracterizando uma superfície de emulação, o ponteiro de endereçamento do DAC sofre um deslocamento baseado no tempo de emulação, como exemplificado na Figura 19. Com esta abordagem encontra-se, com apenas uma operação de acesso à memória, o valor adequado para realimentar o DAC. Sendo assim, na prática tem-se que a capacidade de percorrer uma superfície de emulação no Ripeto limita-se ao tempo de resposta do conversor DAC utilizado, de $6\text{ }\mu\text{s}$ (166,7 kHz).

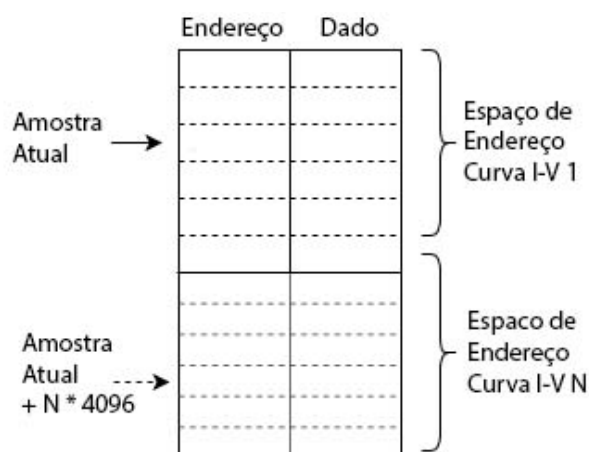


Figura 19 – Endereçamento da Memória na Emulação. Fonte: Autor.

3.3.2.1 Depuração de *Software* incorporada

Ripeto adiciona ao processo de emulação de transdutores de energia um analisador lógico que permite depurar as rotinas do *software* embarcado de forma síncrona aos registros em memória do consumo energético do sistema. O uso desta ferramenta requer pequenas modificações do *software*, de forma a adicionar pontos de controle que acionem pinos de saída que possam ser monitorados.

Como é demonstrado nos experimentos, esta ferramenta permite ao projetista de sistemas embarcados uma análise bastante detalhada do consumo de energia de rotinas específicas de *software* e periféricos do sistema.

3.4 Ferramentas utilizada nos experimentos

3.4.1 Caixa de Luz

Para reproduzir os ensaios com transdutores fotoelétricos em condições de luminosidade constante, foi desenvolvida uma caixa de luz simples, que consiste de uma caixa fechada para evitar a incidência de luz externa e uma lâmpada halógena. O micro painel solar foi anexado a 4 cm do bulbo e a intensidade da luz pode ser controlada através de um *dimmer* comercial. O aparato é ilustrado na Figura 20. Como essa disposição e tipo de lâmpada altera consideravelmente a temperatura do painel durante os ensaios, todos os experimentos foram realizados com intervalo suficiente para que o dispositivo retornasse à temperatura ambiente.



Figura 20 – Caixa de luz utilizada nos ensaios. Fonte: Autor.

3.4.1.1 Plataforma Vibratória

Para ensaios com o transdutor piezoelétrico foi necessária a criação de uma plataforma de vibração que permitisse repetir os ensaios de forma consistente, a

fim de caracterizar os transdutores e aferir o desempenho da emulação.

Utilizando impressão 3D foi criado o mecanismo exibido na Figura 21, contendo um motor DC com eixo desbalanceado através de um peso, para provocar vibração. A sua intensidade é ajustada através do controle de tensão em um conversor DC-DC. Na imagem pode-se observar acoplado na parte superior um transdutor de som piezoelétrico, com pequenos ímãs utilizados para adicionar massa e controlar a deformação da pastilha em velocidades mais baixas.

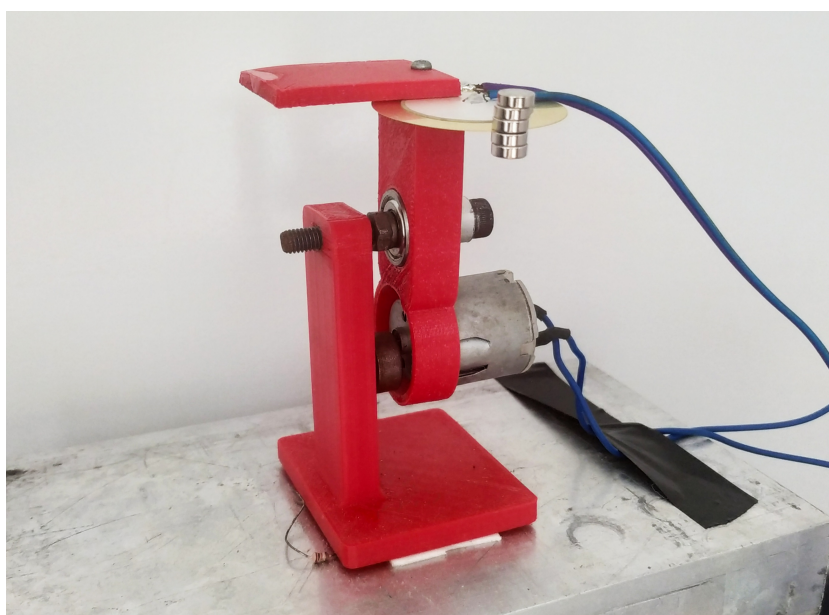


Figura 21 – Plataforma de vibração utilizada nos ensaios. Fonte: Autor.

3.4.1.2 Carga Controlável

Para consumir energia de forma determinística, variando em níveis conhecidos e reprodutíveis, foi utilizado um microcontrolador ATmega conectado via SPI à um potenciômetro digital MCP3201 de 100 k ohm. O potenciômetro possui 256 posições e tempo de configuração de 2 μ s.

Essa carga foi utilizada na caracterização dos transdutores, quando foi programada para percorrer total ou parcialmente uma sequência do seu intervalo de operação, e também nos ensaios com carga sintética, quando foi programada para ajustes fixos de resistência em tempos controlados.

4 Resultados e Discussões

Neste capítulo são detalhados os experimentos conduzidos para avaliar a caracterização e a emulação de alguns transdutores de captura de energia. Também serão demonstrado os resultados do uso da ferramenta depurando o consumo e comportamento de um sistema embarcado. Por fim, é apresentada uma discussão sobre os resultados encontrados e trabalhos futuros.

4.1 Experimentos

4.1.1 Caracterização do transdutor KXOB22-04X3F exposto ao sol

Na Figura 22 pode-se observar um conjunto de amostras capturadas com um painel KXOB22-04X3F exposto ao sol. Utilizou-se como carga um potenciômetro de $1k\Omega$ manualmente ajustado entre os valores mínimo e máximo. O uso de dispositivo manual é lento e ruidoso, o que gera algumas amostras dissonantes. Os traços contínuos neste gráfico representam a curva de ajuste polinomial de grau 6 com parâmetro de entrada os valores das amostras de corrente. O erro médio foi de 1,12 mV, $\sigma = 107,61mV$.

Na Figura 23 observa-se a curva I-V criada para reprodução na plataforma, através do ajuste polinomial de grau 6 das amostras exibidas na Figura 22. Esta curva é a que efetivamente é perseguida pela emulação.

4.1.2 Caracterização do transdutor KXOB22-04X3F exposto à caixa de luz

Na Figura 24 pode-se observar um conjunto de amostras capturadas com um painel KXOB22-04X3F exposto à caixa de luz. Utilizamos como carga um potenciômetro de $1k\Omega$ manualmente ajustado entre os valores mínimo e máximo. Os traços contínuos neste gráfico representam a curva de ajuste polinomial de grau

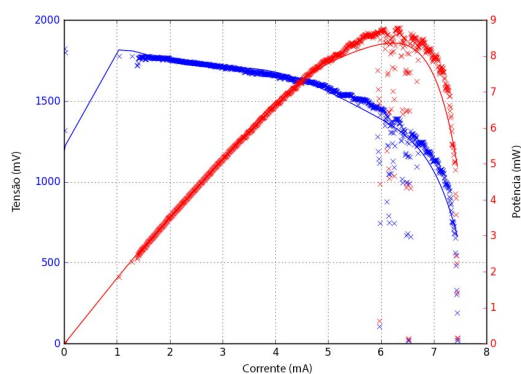


Figura 22 – Amostragens do painel solar KXOB22-04X3F exposto ao sol.

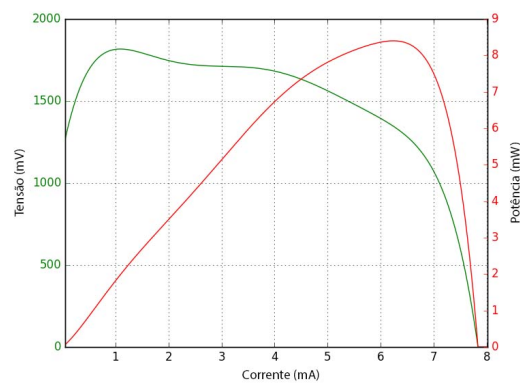


Figura 23 – Curva I-V criada a partir das amostras da Figura 22.

6 com parâmetro de entrada os valores das amostras de corrente. O erro médio foi de $-6,42e-12$ mV, $\sigma = 52,46$ mV.

Na Figura 24 observa-se a curva I-V criada para reprodução na plataforma, através do ajuste polinomial de grau 6 das amostras exibidas na Figura 25. Esta curva é a que efetivamente é perseguida pela emulação, através dos códigos ilustrados na Figura 26, que exibem o valor do código enviado ao conversor D/A em função do código de corrente lido no conversor D/A de corrente.

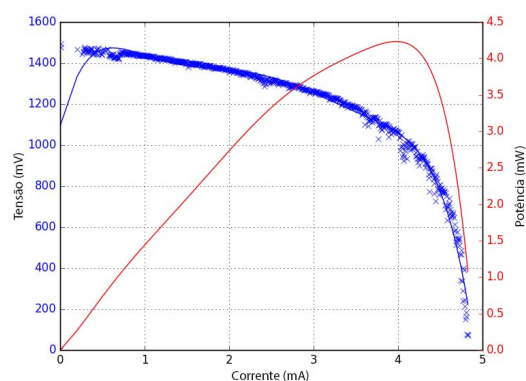


Figura 24 – Amostragens do painel solar KXOB22-04X3F na caixa de luz.

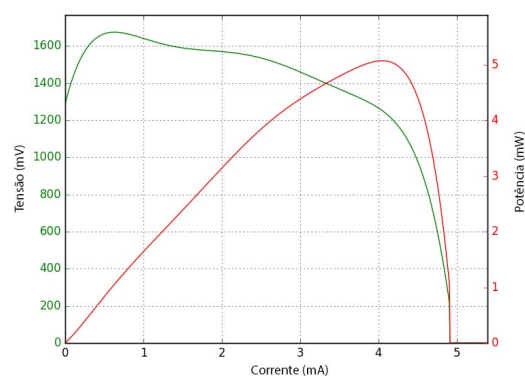


Figura 25 – Curva I-V elaborada com as amostras da Figura 24.

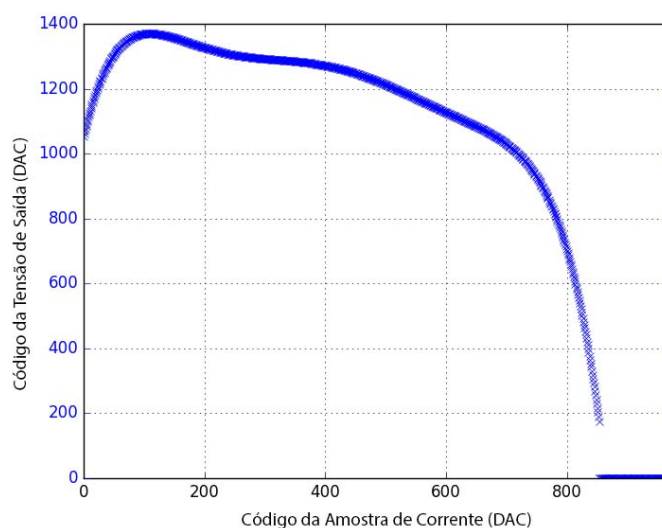


Figura 26 – Códigos para o DAC da Curva I-V.

4.1.3 Emulação de transdutor solar com carga sintética

Neste experimento foi avaliada a capacidade do Ripeto em reproduzir o perfil de geração de energia de um micro painel solar. O mesmo painel solar KXOB22-04X3F foi utilizado, mas para permitir a avaliação em ambiente controlado uma

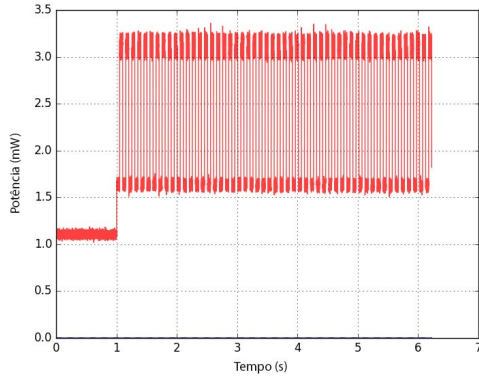


Figura 27 – Traço de Potência do Transdutor.

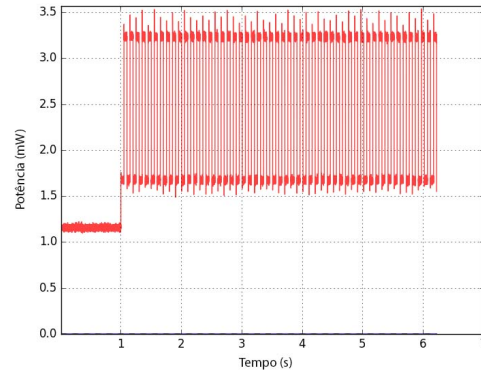


Figura 28 – Traço de Potência Emulado pelo Ripeto.

caixa de luz simples foi construída para este experimento.

O painel solar foi conectado a uma carga sintética composta de um potenciômetro digital, controlado através de um microcontrolador. A resistência foi ajustada para ser mantida em 610 Ohm por um segundo inicialmente. Após este intervalo inicial a resistência foi modificada entre 222 Ohm e 416 Ohm por 120 ciclos de 50 ms cada. Este experimento foi repetido cinco vezes, mantendo a temperatura do painel solar estável entre os experimentos. Na Figura 27 observa-se a curva de potência obtida em um desses experimentos.

Ao final dos cinco experimentos a corrente média obtida foi de 1,40152 mA ($\sigma=18,606 \mu\text{V}$) e a potência média de 2,23295 mW ($\sigma=67,277 \mu\text{W}$). Este experimento foi repetido novamente, mas com o Ripeto emulando o micro painel solar. Na Figura 28 observa-se o resultado de um desses experimentos. A corrente média foi de 1,39378 mA ($\sigma=16,068 \mu\text{V}$) e a potência média foi de 2,22218 mW ($\sigma=23,816 \mu\text{W}$).

Os resultados mostram uma boa capacidade de caracterização e emulação do Ripeto em ambas medições de potência e corrente. O erro médio entre a caixa de luz e a corrente reproduzida pelo Ripeto foi de apenas $7,739 \mu\text{A}$ (0,56%). Em relação à potência medida, o erro médio entre os dois cenários foi de $10,766 \mu\text{W}$ (0,48%).

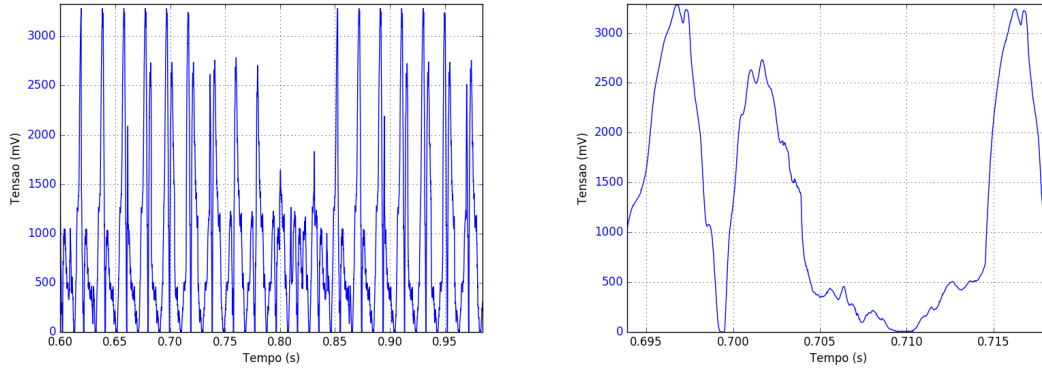


Figura 29 – Tensão da cápsula de piezo sob carga constante. Figura 30 – Tensão da cápsula de piezo em detalhe.

Portanto, baseado neste experimentos pode-se afirmar que o Ripeto é capaz de imitar com sucesso o comportamento de um transdutor de energia como descrito neste cenário.

4.1.4 Caracterização de transdutor piezoelétrico

Como pode-se observar nas Figura 29 e 30, criadas a partir da amostragem de tensão de um transdutor piezoelétrico de som na plataforma de vibração, o padrão de geração é bastante variável no tempo mesmo sob carga constante. Sendo assim, uma superfície I-V é essencial para a sua reprodução.

Para compatibilizar a saída AC dos transdutores de piezo à amostragem DC do Ripeto utilizou-se uma ponte retificadora *schottky* MB6S-TP. Nenhum capacitor foi adicionado à saída. Ripeto foi configurado para a taxa de amostragem dos conversores AD em 40 ksp/s, amostragem de corrente mínima de 1 μ A e amostragem de tensão mínima de 1 mV.

Na Figura 30 observa-se que os níveis de tensão não variam em uma frequência fixa, mas há padrão de variação em ciclos de aproximadamente 5 ms.

Esta frequência de variação se mostrou um problema em virtude da taxa de aquisição da plataforma. A 40 ksp/s amostrar os 256 pontos de corrente possíveis

da carga variável demora 6,4ms. Como esse tempo é superior a um ciclo completo do padrão de geração observado, intuitivamente vê-se que a superfície gerada com estes parâmetros não é capaz de emular a fonte original.

Para tentar mitigar esta dificuldade alguns experimentos foram conduzidos, sacrificando o número de amostras de cada curva individual com o objetivo de criar superfícies com curvas de menor duração.

Na primeira caracterização o número de *taps* da carga foi reduzido para 30 pontos, o que permitiu criar curvas de 747 μ s. Com esta configuração cada "ciclo" de 5 ms foi representado por uma superfície I-V contendo 6 curvas, como apresentado na Figura 31. Nesta figura, as transições do traço amarelo, capturado com o analisador lógico do Ripeto, mostram o momento em que a carga controlada reinicia o ciclo de 30 posições no potenciômetro.

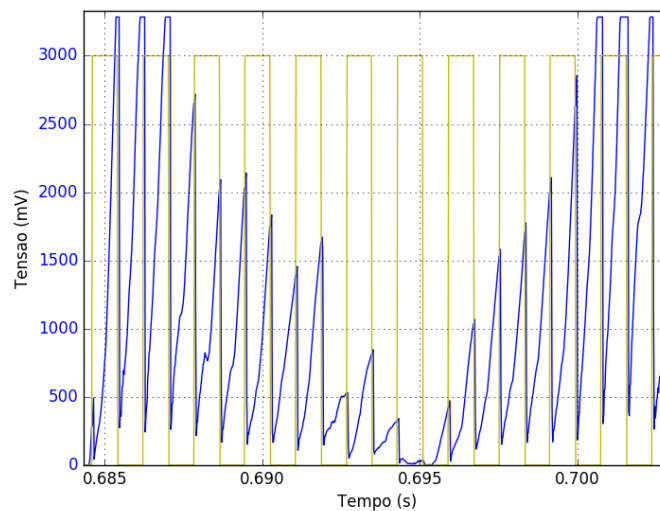


Figura 31 – Recorte da tensão gerada pela cápsula de piezo sob carga variável com 30 pontos.

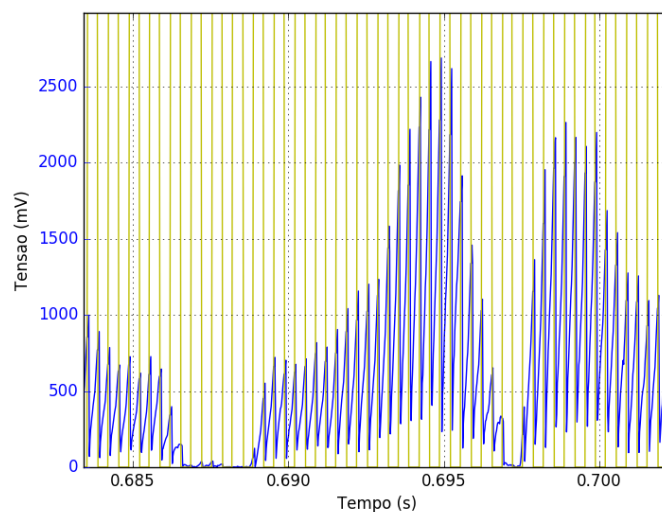


Figura 32 – Recorte da tensão gerada pela cápsula de piezo sob carga variável com 11 pontos

Na segunda caracterização, o número de *taps* da carga foi de 11 pontos, com curvas individuais de 296 μ s (Figura 32).

Por fim, foi realizada uma terceira caracterização, substituindo a ponte retificadora *schottky* por um módulo comercial específico para captura de energia baseado no CI LTC3588 da Analog Devices (Figura 33). Como este módulo possui em sua saída um capacitor de 10 μ F, a sua saída varia muito menos. Desta forma, foi possível utilizar 168 pontos na carga variável, resultando em uma superfície onde cada curva possui duração de 4,2 ms, como observado na Figura 34.

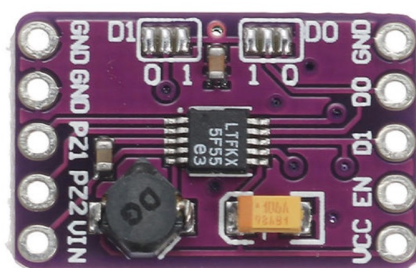


Figura 33 – Módulo comercial para transdutores de captura de energia

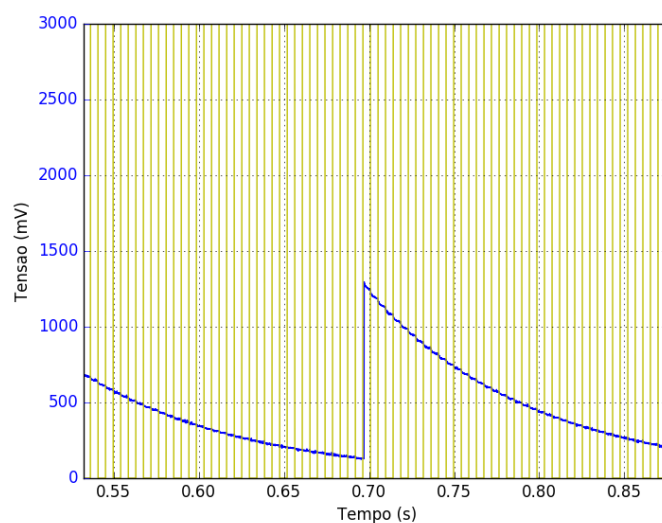


Figura 34 – Recorte da tensão gerada pela cápsula de piezo sob carga variável com 168 pontos e capacitor na saída

As três superfícies criadas nesses experimentos serão utilizados para a emulação do transdutor.

4.1.5 Emulação de transdutor piezoelétrico com carga sintética

Para a emulação do transdutor piezoelétrico a carga variável foi configurada para alternar entre os valores de 5,9k Ohm e 11,8k Ohm, com intervalo de 10 ms. Estes valores foram escolhidos para produzir correntes entre 0,1 mA e 0,5 mA, valores possíveis de operação de microcontroladores de baixo consumo e compatíveis com a capacidade dos transdutores. A captura foi realizada por 6,1 segundos.

Os resultados de uma rodada de avaliação da captura do transdutor de piezo e sua emulação estão ilustradas nas Figuras 35, 36, 37 e 38. Na Figura 39 vê-se um recorte detalhado da tensão emulada.

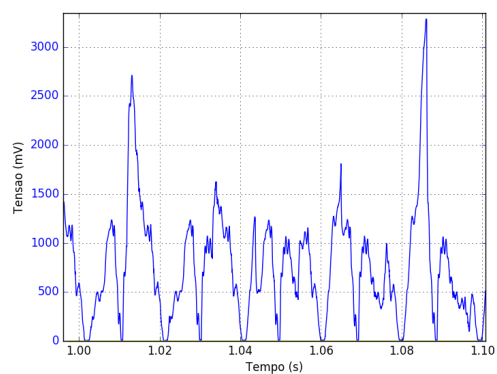


Figura 35 – Tensão da cápsula de piezo alimentando a carga sintética.

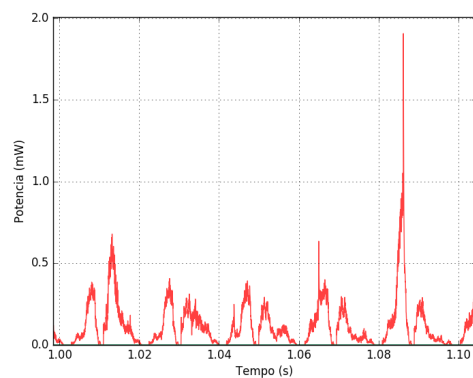


Figura 36 – Potência da cápsula de piezo alimentando a carga sintética.

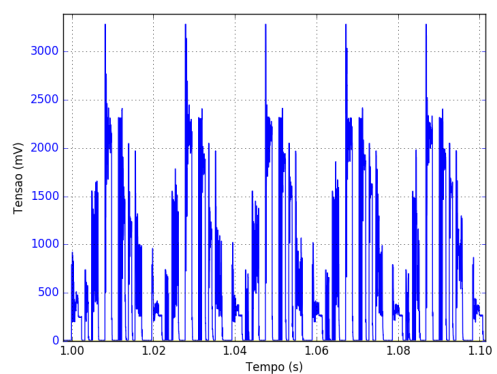


Figura 37 – Tensão da emulação alimentando a carga sintética.

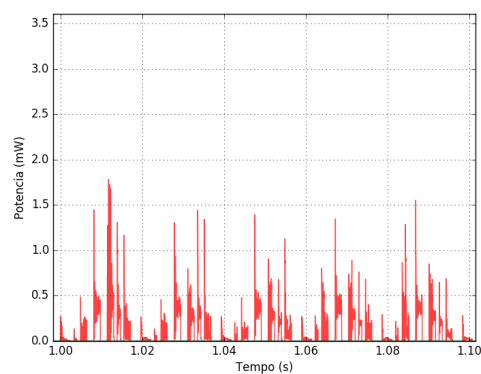


Figura 38 – Potência da emulação alimentando a carga sintética.

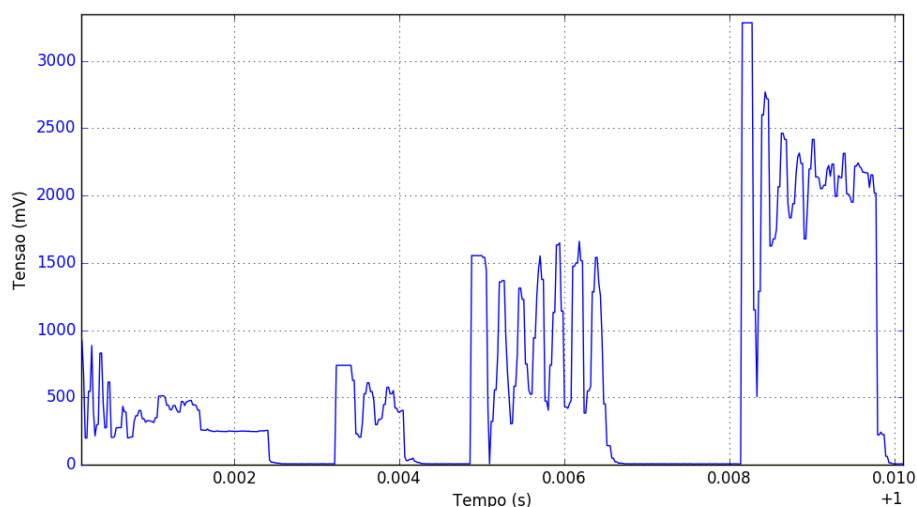


Figura 39 – Detalhe da reprodução de tensão no Ripeto emulando transdutor piezoelétrico.

Nestas figuras observa-se que há uma divergência nítida entre as tensões e potência medidas com o transdutor e emuladas com o Ripeto. Estes resultados se reproduziram nos experimentos subsequentes. Utilizando a primeira superfície caracterizada (30 pontos por curva, superfície com 25 curvas de 747 μ s), em cinco rodadas de ensaios, a corrente média do transdutor foi de 0,1244 mA ($\sigma=0,0135 \mu$ A) e a potência média foi de 0,1828 mW ($\sigma=0,0342$ W). Já a corrente e potência média da emulação foram de 0,0852 mA ($\sigma=0,0001 \mu$ A) e 0,1410 mW ($\sigma=0,0002 \mu$ W), respectivamente. Comparando ambos resultados verifica-se que o erro entre o transdutor e a emulação foram de 45,90% na corrente e 29.62% na potência.

Utilizando a segunda superfície caracterizada (11 pontos por curva, superfície com 75 curvas de 296 μ s) o erro médio da corrente foi de 135,07% e 327,39% na potência.

Um terceiro conjunto de ensaios foi realizado, utilizando a terceira superfície criada a partir da saída do módulo com o CI LTC3588 e capacitor de 10 μ F. Neste cenário os erros de corrente e potência média foram de 0,0565 mA (74,17%) e 0,0589 (82,71%).

A despeito do desvio padrão inferior a 0,001 mA e 0,001mW em todos os experimentos de reprodução de superfícies I-V, os ensaios mostraram que Ripeto não foi capaz de emular a fonte de energia piezoelétrica em níveis de erro aceitáveis, nos cenários explorados.

Na Figura 39 observa-se um gráfico detalhado de um trecho da emulação e pode-se observar que em determinadas sessões tem-se rápidas variações, evidenciando que o tempo de navegação na superfície I-V transcorreu como esperado. No entanto, em vários trechos da superfície podemos ver curvas majoritariamente com o valor 0V, como nos intervalos 1.00247 s - 1.00322 s e 1,004133 s - 1,00488 s. Também observamos variações bruscas entre os valores em curto intervalo de tempo, comportamento não verificado no transdutor (Figura 35). Ambos comportamentos, aliados ao fato que em todos os ensaios a potência emulada foi inferior à percebida pelo transdutor, nos leva a concluir que a caracterização da superfície I-V foi decisiva para os resultados insatisfatórios. A inexistência de pontos de corrente em quantidade suficiente para traçar a curva polinomial de caracterização da potência foi tratada no algoritmos como uma curva com valor 0. Além disso, em virtude do número reduzidos de amostras para caracterizar as curvas a qualidade da curva cai significativamente e pequenos ruídos de amostragem passam a influenciar de forma determinante a curva I-V.

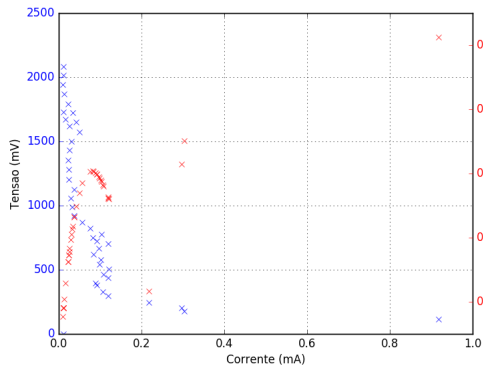


Figura 40 – Amostras de uma única curva da superfície

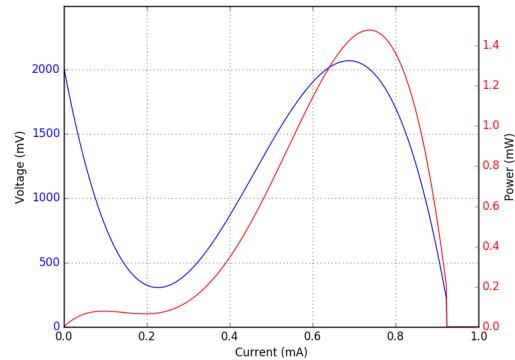


Figura 41 – Curva perseguida das amostras da Figura 40

De fato, quando verifica-se individualmente as curvas das superfície I-

V criadas com os ensaios observa-se ambos os problemas. As curvas nulas são geradas sempre que não existe diversidade suficiente de amostras para criar a curva polinomial, o que é reportado diversas vezes no *script* de geração. Nas Figuras 40 e 4.1.5 observa-se uma das curvas não nulas que divergem significativamente do perfil das amostras extraídas na caracterização do transdutor.

Baseado nas evidências encontradas, podemos afirmar que os erros de emulação do Ripeto para os transdutores de piezo deve-se a incapacidade de caracterizar de forma adequada o transdutor.

4.1.6 Avaliação de traços de consumo de energia

As avaliações da captura de traços de consumo foram realizadas utilizando a plataforma da Texas Instruments Ez430 Chronos, que é uma plataforma de desenvolvimento para dispositivos vestíveis, alimentando-os por bateria. Ela é encapsulada em um relógio de pulso e conta com sensores de altitude, temperatura e aceleração, além de transceptor RF de 415 MHz para interagir com o PC, através de um módulo de recepção USB, ou outros dispositivos como cintas para leitura de biométricas. Na Figura 42 vê-se o relógio conectado à plataforma de avaliação para a criação de um traço de consumo energético, utilizando o *firmware* original do produto. Observa-se na Figura 43 o resultado de uma captura ¹.

¹ O analisador lógico não foi utilizado em virtude de limitação física para a conexão nos pinos do microcontrolador

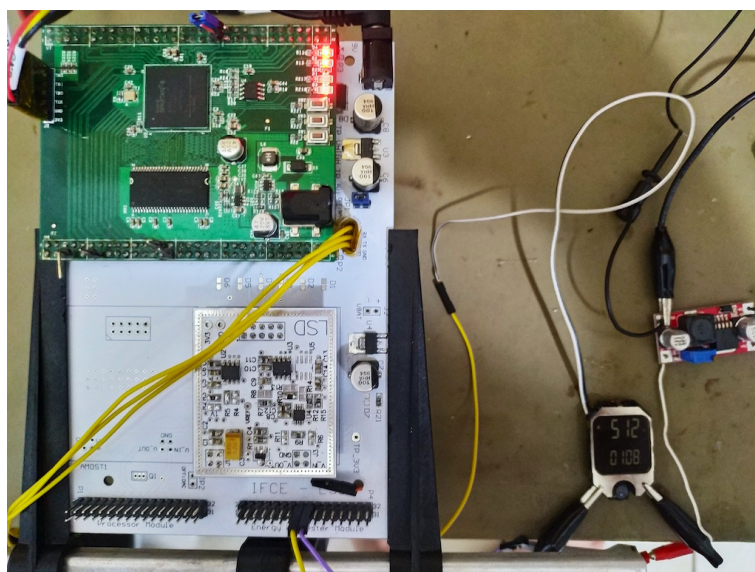


Figura 42 – Kit de Desenvolvimento EZ430 Chronos conectado à plataforma.

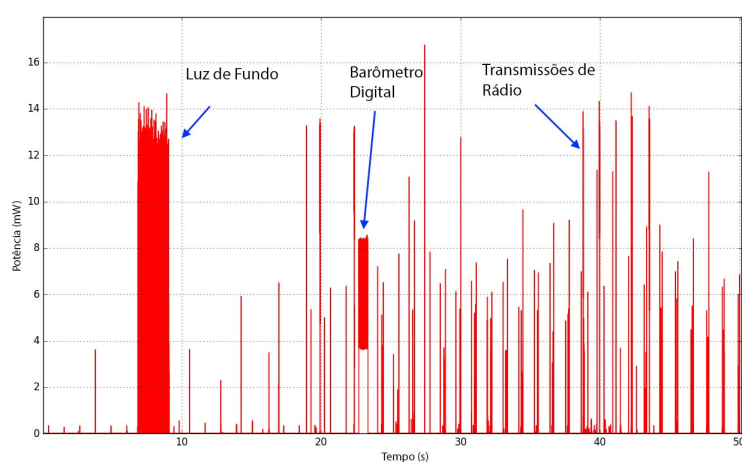


Figura 43 – Traço de Potência Ez430 Chronos.

Detalhando a visão de sessões específicas do traço capturado é possível verificar variações de consumo instantâneo do dispositivo como, por exemplo, a ação do PWM na iluminação do *display* (Figura 44) ou das transmissões de rádio (Figura 45).

Na Figura 46 podemos observar a comunicação com o sensor de pressão da plataforma, SCP1000-D11. A Figura 47 sugere o efeito da comunicação I2C no consumo de energia na comunicação com este componente, pois é possível verificar as rajadas de 8 bit típicas deste barramento de comunicação.

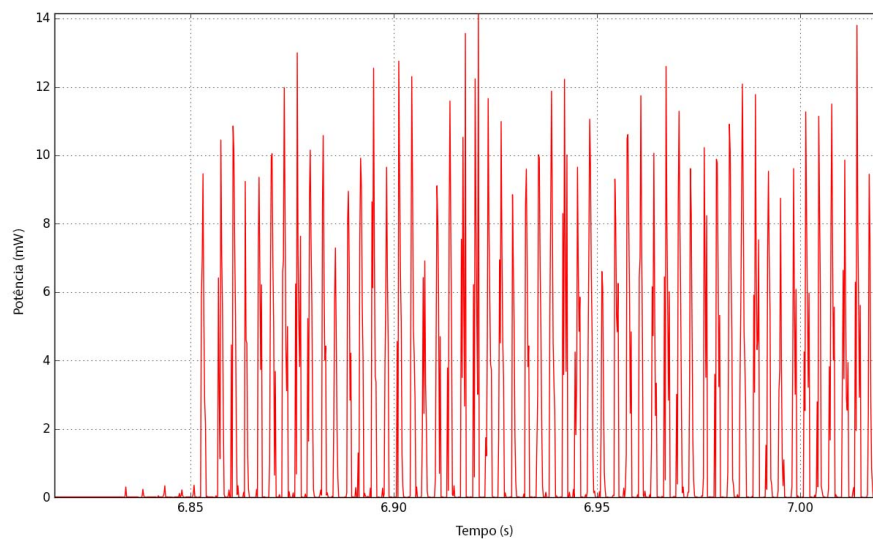


Figura 44 – Traço de Potência da Iluminação.

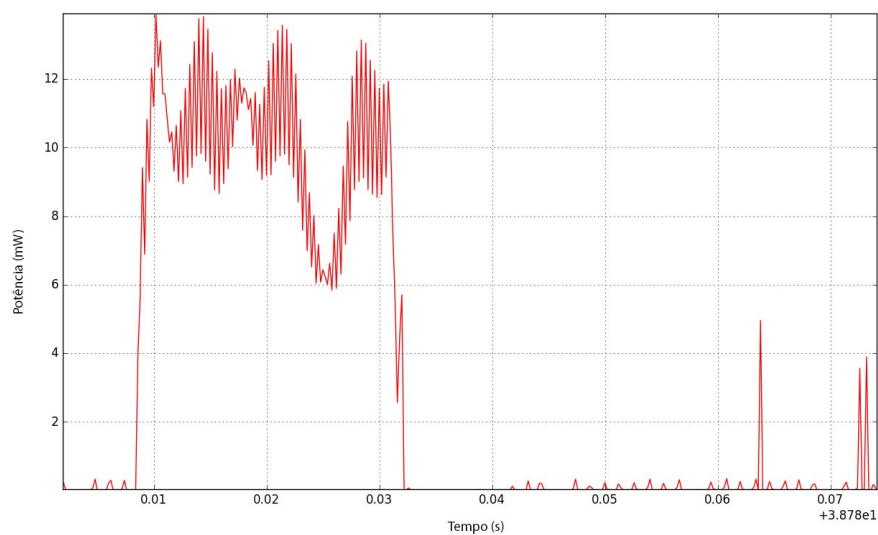


Figura 45 – Traço de Potência de Transmissão RF.

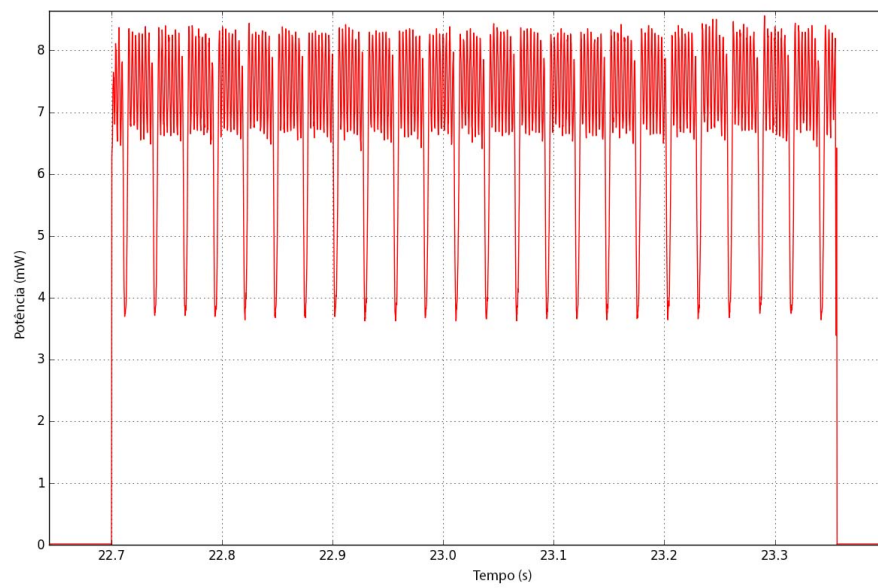


Figura 46 – Traço de Potência Sensor Barométrico.

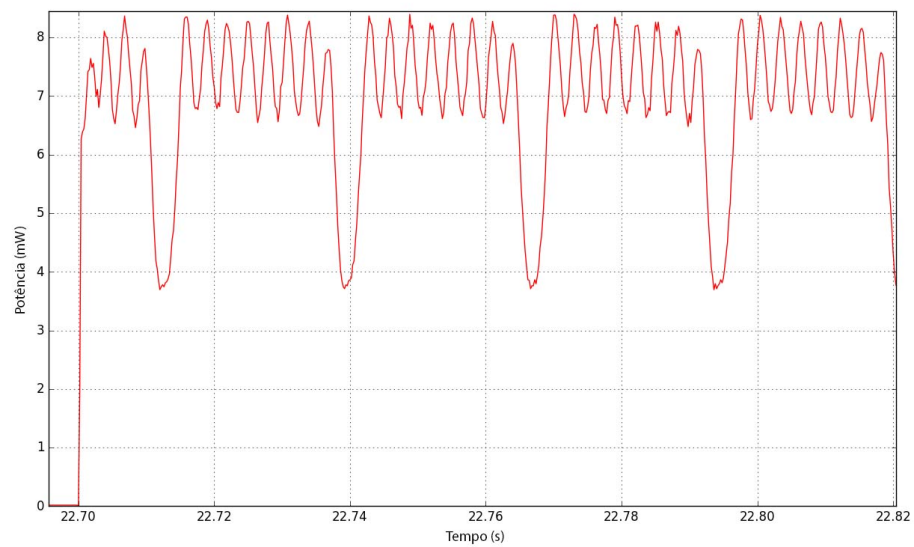


Figura 47 – Traço de Potência Detalhado do Sensor Barométrico.

4.1.7 Avaliação de Desempenho do Analisador Lógico Integrado

Para avaliar o analisador lógico foi utilizado um Arduino Uno com dois de seus pinos digitais configurados como saída e conectados à plataforma, em dois dos canais lógicos disponíveis. O traço de potência desta captura pode ser visto na Figura 48. O *firmware* utilizado neste experimento executa, após a rotina de configuração inicial, uma transformada rápida de fourrier (FFT) com 128 pontos utilizando a biblioteca pública ArduinoFFT. Após a computação da FFT segue-se a escrita de 64 bytes na EEPROM do microcontrolador ATmega328.

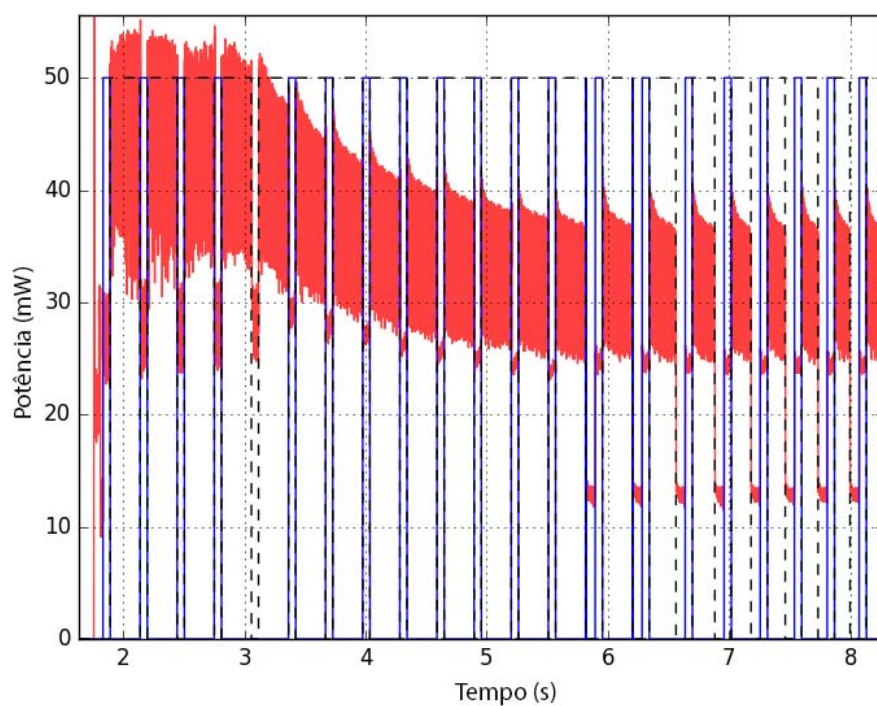


Figura 48 – Traço de Potência com Analisador Lógico.

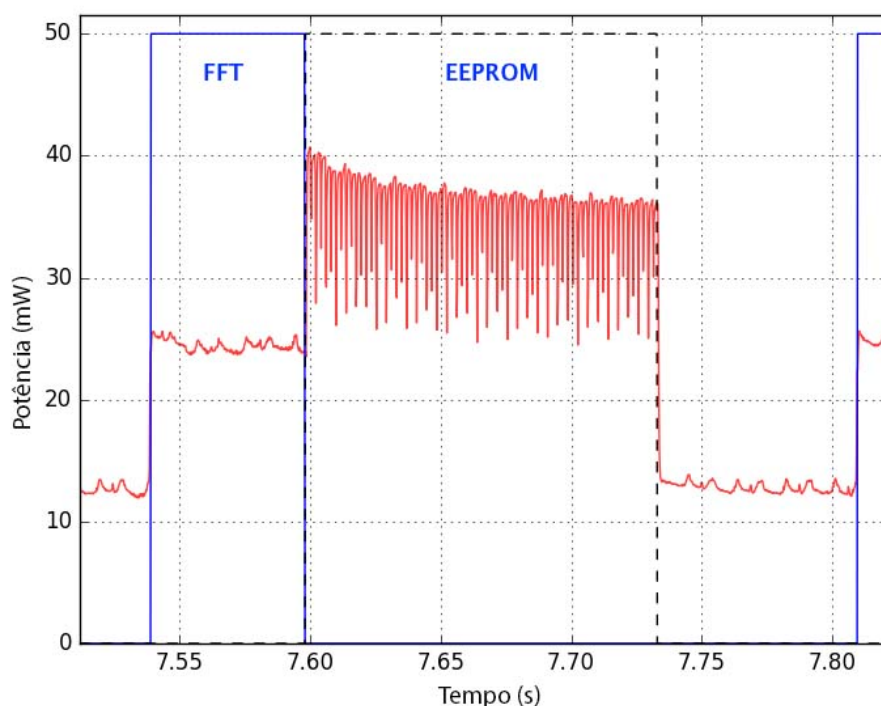


Figura 49 – Traço de Potência Detalhado com Analisador Lógico.

Podemos ver no detalhe exibido na Figura 49 ² que, com o auxílio das entradas do analisador lógico (azul e verde no gráfico), é possível identificar facilmente o impacto no consumo de energia em função das rotinas executadas. Ao executar a FFT o microcontrolador passa a consumir em torno de 25 mW e aumenta para aproximadamente 35 mW durante a gravação na EEPROM, reduzindo para cerca de 11 mW antes de reiniciar o ciclo. O *datasheet* do componente reporta, para as condições de testes em 16 MHz, consumo típico ativo de 28mW e de 7mW no estado *idle*. Não localizamos na documentação informações sobre o consumo da EEPROM.

As entradas do FPGA são de alta impedância, de forma que o impacto do uso dos pinos de I/O no consumo é pequeno.

² Os rótulos FFT e EEPROM foram editados manualmente para facilitar a exibição.

4.1.8 Discussões

Durante os ensaios de validação foi possível observar alguns resultados que demonstram a capacidade da plataforma de oferecer ao projetista de sistema embarcado com captura de energia elementos que o auxiliem a otimizar os seus sistemas. Dados que não estão previsto no datasheet dos componentes e, especialmente, o impacto energético quando componentes diferentes estão interagindo entre si podem ser obtidos. Por exemplo, o traço de potência ilustrado na Figura 43 mostra que o *backlight* e o sensor de pressão são os elementos de maior consumo. Ainda que aquele seja esperado, este último demonstrou um consumo muito maior que o previsto. O *datasheet* do componente aponta um consumo máximo de 82.5 μ W enquanto as medições apontam um consumo médio em torno de 7 mW para todo o sistema neste instante. Desta forma, sugere-se que há algum outro elemento contribuindo significativamente para o consumo durante a operação do sensor, que mereceria uma análise mais detalhada em busca de otimização.

O uso do analisador lógico na avaliação da segunda plataforma demonstrou o potencial de informações que é possível agregar com este recurso. Com o traço exibido na Figura 49 é possível detalhar com grande precisão as rotinas do software e o seu impacto no consumo do dispositivo. Assim é possível que o programador obtenha indicadores claros do consumo de energia de forma que possa otimizar os pontos críticos do código e avaliá-los de forma objetiva. O *datasheet* dos componentes eletrônicos, especialmente microcontroladores, descrevem o consumo típico em modos específicos de operação. No entanto, a medição durante a depuração fornece indicadores muito mais objetivos, inclusive de situações não previstas na documentação. No caso específico do teste realizado não foi possível encontrar no datasheet do microcontrolador o consumo instantâneo do uso da memória EEPROM interna, mas o traço de potência integrado com o analisador lógico entrega esta informação de forma muito simples. O resultado de potência com o microcontrolador *idle* também divergiu significativamente do valor especificado no *datasheet*, 65% maior, o que indica algum outro elemento influenciando neste cenário.

Outro exemplo de informação descoberta apenas através dos ensaios e que pode auxiliar na otimização energética foi observado no traço de potência da Figura 48, em vermelho. Após a alimentação do sistema, ainda que as rotinas

imediatamente passem a executar (verificadas pelos indicadores do analisador lógico) observa-se um nível mais alto de consumo que paulatinamente decresce até a estabilidade em torno dos 5,5 segundos. A diferença é significativa, sendo a condição inicial em média 13 mW maior que a condição estável, o que representa uma variação de cerca de 40%. O aspecto da curva sugere efeitos das capacitâncias da placa como possível causa do efeito mas, sem dúvidas, este seria outro ponto importante para um estudo de otimização energética.

Em relação à capacidade de caracterização e emulação de transdutores os ensaios divergiram de acordo com o tipo de transdutor em uso. Ripeto mostrou-se adequado para caracterizar e emular transdutores fotoelétrico, enquanto falhou na emulação dos transdutores de piezo.

A análise dos gráficos e ensaios de desempenho revelaram que a plataforma é capaz de responder às mudanças de corrente e responder em 25 μ s, incluindo a navegação na curva através da lookup table implementada. No entanto, a velocidade de amostragem de 40 ksps mostrou-se inadequada para caracterizar a fonte de energia piezoelétrica.

5 Conclusão

Os resultados deste trabalho indicam que a plataforma proposta pode efetivamente contribuir durante as fases de projeto e avaliação de sistemas embarcados com captura de energia, capturando traços de consumo dos transdutores e reproduzindo-os, de forma controlada, em laboratório.

Dados de consumo de energia que não estão presente nos *datasheets* e os impactos resultantes do uso combinado de componentes podem ser extraídos de forma simples e objetiva. O desenvolvimento do *firmware* ganha uma valiosa ferramenta para depuração das rotinas, indicando com precisão o gasto energético decorrente das estratégias utilizadas e que, combinada com a geração de energia emulada, permitem o aprimoramento de rotinas sensíveis ao consumo. Algoritmos específicos para sistemas embarcados com captura de energia, como os escalonadores de tarefas especializados ou preditores de energia, podem ser avaliados em diversos estados de geração e armazenamento, em um ambiente controlado e determinístico.

A capacidade de caracterizar transdutores de energia permite o uso destes dados em simulações iniciais nas fases de projeto e, posteriormente, o seu uso no modo de emulação do Ripeto para otimizar o consumo de energia e verificar o desempenho em diversas situações ambientais. Novos trabalhos deverão ser conduzidos objetivando superar algumas das limitações encontradas durante os experimentos e ampliar a sua capacidade de auxiliar projetos de sistemas embarcados com captura de energia.

5.1 Trabalhos Futuros

Trabalhos futuros deverão ser realizados para avaliar a capacidade de caracterização e emulação de novos tipos de transdutores de captura de energia com Ripeto. Para suprir a deficiência encontrada na caracterização dos transdutores piezoelétricos um conversor A/D mas rápido deve ser utilizado.

Ripeto também pode ser melhorado incorporando uma etapa de potência

na saída dos conversores DAC que estendam a potência máxima de emulação, bem como circuito de proteção nas entradas do analisador lógico. A implementação da escala dinâmica de corrente também melhora a praticidade do uso plataforma, ao mesmo tempo que o aumento da velocidade de comunicação com o PC para *upload* de superfícies de emulação e *download* de dados coletados aumenta a produtividade. Também visualiza-se espaço para melhorar a forma de organização da memória, através de *softcores* implementados no FPGA que podem compactar os dados na memória e ampliar significativamente a capacidade de armazenamento de dados.

Além dessas atualizações tecnológicas, Ripeto também pode ser ampliado para incorporar na emulação dos transdutores o modelo digital dos capacitores e/ou baterias do sistema alvo. Esta ferramenta forneceria aos projetistas a possibilidade de criar, via configuração do Ripeto, diversos cenários de teste para otimizar a escolha destes componentes sem a necessidade de modificar o *hardware* para cada ensaio.

Referências

ABBAS, A. et al. A real-time feedback scheduler for environmental energy with discrete voltage/frequency modes. **Computer Standards and Interfaces**, v. 44, p. 264–273, 2016. ISSN 09205489.

ARCHER, R. et al. **Ekho: A Tool for Recording and Emulating Energy Harvesting Conditions**. [S.l.], 2013.

ARRAWATIA, M.; BAGHINI, M. S.; KUMAR, G. RF energy harvesting system from cell towers in 900MHz band. **2011 National Conference on Communications, NCC 2011**, 2011.

ARREOLA, A. R. et al. RESTOP: Retaining External Peripheral State in Intermittently-Powered Sensor Systems. **Sensors**, v. 18, n. 1, p. 172, 2018. ISSN 1424-8220. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1424-8220/18/1/172>.

AUDET, D. et al. Scheduling recurring tasks in energy harvesting sensors. **2011 IEEE Conference on Computer Communications Workshops, INFOCOM WKSHPs 2011**, p. 277–282, 2011.

BALSAMO, D. et al. Graceful Performance Modulation for Power-Neutral Transient Computing Systems. **IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems**, v. 35, n. 5, p. 738–749, 2016. ISSN 02780070.

BORIN, L.; CASTRO, M.; PLENTZ, P. D. M. Towards the Use of LITMUS RT as a Testbed for Multiprocessor Scheduling in Energy Harvesting Real-Time Systems. **Brazilian Symposium on Computing System Engineering, SBESC**, v. 2017-Novem, p. 109–116, 2017. ISSN 23247894.

BOURKE, R. F.; WILSON, W. **Charger Circuit for Accessory Battery**. 1975.

C Cheng; CHENG, S. **Method and apparatus for concentrating, harvesting and storing of solar energy**. 1976.

CARLI, D. et al. A high-efficiency wind-flow energy harvester using micro turbine. **SPEEDAM 2010 - International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion**, p. 778–783, 2010. ISSN 00129658.

CERVIN, A. Integrated Control and Real-Time Scheduling. p. 179, 2003. ISSN 0280-5316.

CHOI, Y.; CHANG, N.; KIM, T. DC-DC converter-aware power management for low-power embedded systems. **IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems**, v. 26, n. 8, p. 1367–1381, 2007. ISSN 02780070.

DIECHMANN, J. et al. **The Internet of Things: How to capture the value of IoT**. [S.l.], 2018. 1–124 p. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/~/media/McKinsey/BusinessFunctions/McKinseyDigital/OurInsights/TheInternetofThingsHowtocapturethevalueofIoT/How-to-capture-the-value-of-IoT.ashx>.

GHOR, H. E.; CHETTO, M.; CHEHADE, R. H. A real-time scheduling framework for embedded systems with environmental energy harvesting. **Computers & Electrical Engineering**, v. 37, n. 4, p. 498–510, 2011. ISSN 00457906. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045790611000723>.

GREEN, M. A. et al. Solar cell efficiency tables (version 52). **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 26, n. 7, p. 427–436, 2018. ISSN 1099159X.

GUMMESON, J. et al. On the limits of effective hybrid micro-energy harvesting on mobile CRFID sensors. **Proceedings of the 8th international conference on Mobile systems, applications, and services - MobiSys '10**, p. 195, 2010. Disponível em: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1814433.1814454>.

HANSCHKE, L. et al. Light Insight - Emulation of Radiation Traces for Analysis and Evaluation of Solar-Harvesting Algorithms. **Proceedings of the Fifth ACM International Workshop on Energy Harvesting and Energy-Neutral Sensing Systems - ENSys'17**, n. November, p. 8–13, 2017. Disponível em: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=3142992.3142994>.

HERWAARDEN, A. v.; SARRO, P. Sensors based on the seebeck effect. **Sensors (Peterborough, NH)**, v. 10, p. 321–346, 1986.

HESTER, J.; SCOTT, T.; SORBER, J. Ekho: Realistic and Repeatable Experimentation for Tiny Energy-harvesting Sensors. **Sensys'14**, p. 1–15, 2014. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/2668332.2668336>.

HESTER, J. et al. Realistic and Repeatable Emulation of Energy Harvesting Environments. **ACM Transactions on Sensor Networks**, 2017. ISSN 15504859.

- HOFFMANN, D. et al. Energy harvesting from fluid flow in water pipelines for smart metering applications. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 476, n. 1, 2013. ISSN 17426596.
- HWANG, G. T. et al. Self-powered cardiac pacemaker enabled by flexible single crystalline PMN-PT piezoelectric energy harvester. **Advanced Materials**, v. 26, n. 28, p. 4880–4887, 2014. ISSN 15214095.
- Industries Marlow. **Technical Data Sheet for TG12-8 Thermoelectric Generator**. 2019. 1–2 p. Disponível em: <https://cdn2.hubspot.net/hubfs/547732/Data_Sheets/TG12-8.pdf>.
- IXYS Corporation. **High Efficiency SolarBIT**. 2016. 1–6 p.
- JIA, Y. et al. A vibration powered wireless mote on the Forth Road Bridge. In: **Journal of Physics: Conference Series**. [S.l.: s.n.], 2015. v. 660, n. 1. ISSN 17426596.
- JIANG, X. et al. Piezoelectric energy harvesting from traffic-induced pavement vibrations. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 6, n. 4, p. 1–16, 2014. ISSN 19417012.
- JOE, I.; SHIN, M. Energy management algorithm for solar-powered energy harvesting wireless sensor node for Internet of Things. **IET Communications**, v. 10, n. 12, p. 1508–1521, 2016. ISSN 1751-8628. Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-com.2015.0223>>.
- KIM, Y. et al. Maximum power transfer tracking for a photovoltaic-supercapacitor energy system. **Low-Power Electronics and Design (ISLPED), 2010 ACM/IEEE International Symposium on**, p. 307–312, 2010. ISSN 15334678.
- KOC, B.; UCHINO, K. Piezoelectric Ultrasonic Motors. **Reference Module in Materials Science and Materials Engineering**, v. 273, 1997. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128035818039795>>.
- LIU, W.; REN, X. Large piezoelectric effect in Pb-free ceramics. **Physical Review Letters**, v. 103, n. 25, p. 1–4, 2009. ISSN 00319007.
- MAHMOOD, A. et al. Energy-Aware Real-Time Task Scheduling in Multiprocessor Systems Using a Hybrid Genetic Algorithm. **Electronics**, v. 6, n. 2, p. 40, 2017. ISSN 2079-9292. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2079-9292/6/2/40>>.
- MASOUDINEJAD, M. et al. A measurement platform for photovoltaic performance analysis in environments with ultra-low energy harvesting potential.

Sustainable Cities and Society, Elsevier B.V., v. 25, p. 74–81, 2016. ISSN 22106707. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2015.09.006>>.

MERRETT, G. V.; AL-HASHIMI, B. B. M. Energy-Driven Computing: Rethinking the Design of Energy Harvesting Systems. **Design, Automation Test in Europe Conference Exhibition (DATE), 2017**, 2017. Disponível em: <<http://eprints.soton.ac.uk/404363/>>.

MOSER, C. et al. Real-time scheduling for energy harvesting sensor nodes. **Real-Time Systems**, v. 37, n. 3, 2007.

NECHIBVUTE, A.; CHAWANDA, A.; LUHANGA, P. Piezoelectric Energy Harvesting Devices: An Alternative Energy Source for Wireless Sensors. **Smart Materials Research**, v. 2012, p. 1–13, 2012. ISSN 2090-3561. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/archive/2012/853481/>>.

NOREN, S. A. **Plant for utilizing kinetic energy**. 1978.

PALANDOKEN, M. et al. A novel split-ring resonator and voltage multiplier based rectenna design for 900 MHz energy harvesting applications. **Radioengineering**, v. 27, n. 3, p. 711–717, 2018. ISSN 12102512.

Pavegen. **Pavegen**. 2019.

PIORNO, J. R. et al. HOLLOWS: A Power-aware Task Scheduler for Energy Harvesting Sensor Nodes. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 21, n. 13, p. 1317–1335, 2010. ISSN 1045-389X. Disponível em: <<http://jim.sagepub.com/content/21/13/1317.abstract>>.

POWER, B. The PowerWalk™ Kinetic Energy Harvester Wearable technology for charging batteries. p. 11–12, 2017. Disponível em: <www.bionic-power.com>.

RODRIGUEZ, A. et al. Intermittently-powered energy harvesting step counter for fitness tracking. **SAS 2017 - 2017 IEEE Sensors Applications Symposium, Proceedings**, p. 1–6, 2017. ISSN 00345466.

SNELLER, A. J. et al. Structural Dynamics and Renewable Energy, Volume 1. v. 1, p. 211–217, 2011. ISSN 21915644. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-1-4419-9716-6>>.

SPECIALTIES, M. **LDT0-028K**. 2008.

TADIGADAPA, S.; MATETI, K. Piezoelectric MEMS sensors: State-of-the-art and perspectives. **Measurement Science and Technology**, v. 20, n. 9, 2009. ISSN 13616501.

THONET, G.; VESIN, J.-M. Stationarity assessment with time-varying autoregressive modeling. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v. 56, n. 1, 2010. ISSN 07367791. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/604677/>>.

TINSLEY, N. F. et al. Enspect: A Complete Tool Using Modeling and Real Data to Assist the Design of Energy Harvesting Systems. **Proceedings of the 3rd International Workshop on Energy Harvesting & Energy Neutral Sensing Systems**, p. 27–32, 2015. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2820645.2820648>>.

ZHANG, H. et al. Ekho: Bridging the Gap Between Simulation and Reality in Tiny Energy-Harvesting Sensors. In: **HotPower '11 Proceedings of the 4th Workshop on Power-Aware Computing and Systems table of contents**. [S.l.: s.n.], 2011.

Apêndices

.1 Validação Operacional

Com o intuito de avaliar a implementação do *hardware* foram realizados ensaios para validar a qualidade das amostragens obtidas no DAC e o tempo de resposta do ADC, a fim de verificar se os parâmetros de projeto se refletem no equipamento produzido. Também foram realizados ensaios de monitoramento de dois sistema embarcado de baixa potência, para avaliação da resposta às variações de potência e do comportamento do analisador lógico. A reprodução das superfícies I-V não foi validada nestes ensaios.

As leituras de resistências, tensões e correntes realizadas fora da plataforma utilizaram um multímetro de bancada de 5 1/2 dígitos Advantest R6552. As formas de onda capturadas fora da plataforma utilizaram um osciloscópio Tektroniks TDS2012B de 100 MHz. Os dados das amostragens foram tratados com o Matlab e *scripts* escritos em Python, utilizando a biblioteca Numpy e Matplotlib.

Para avaliar a qualidade das amostragens de tensão e corrente foi acoplada à plataforma um circuito com base no CI 584JH, referência de tensão de precisão. Selecionado com a saída de 2501 mV, um resistor de 30.019 Ohm foi adicionado em série e o conjunto alimentado por baterias. Foram realizadas 80526 amostras de tensão e corrente.

O circuito de amostragem opera a 40ksps e uma média aritmética é realizada a cada 8 amostras, resultando em uma taxa de gravação na memória DRAM de 5 ksp. Apesar da memória DRAM necessitar de ciclos de refresh de 66 ns a cada 15.24 μ s, com o período de gravação de 200 μ s não há problema de contenção.

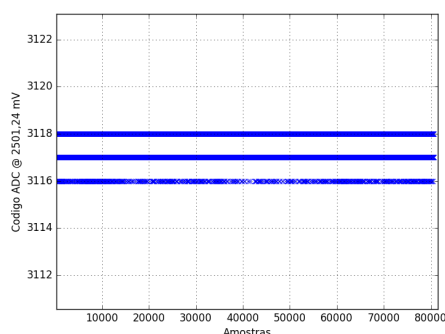


Figura 50 – Amostras de Tensão.

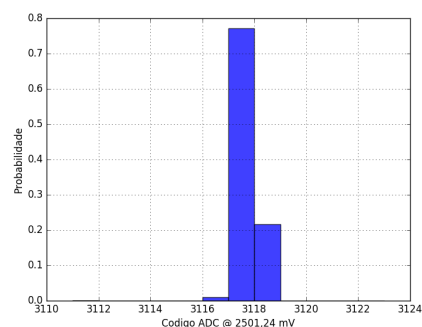


Figura 51 – Distribuição das Amostras (V.)

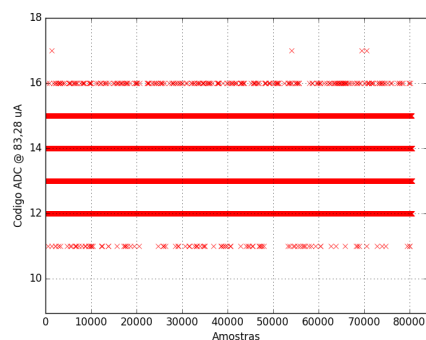


Figura 52 – Amostras de Corrente.

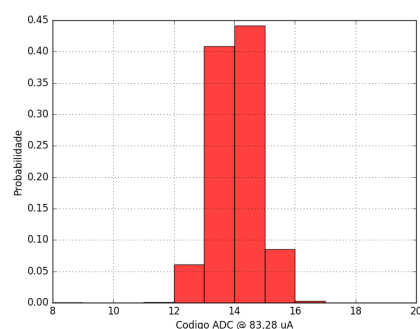


Figura 53 – Distribuição das Amostras (I).

Os códigos obtidos para as amostragens de corrente podem ser vistos na Figura 52, com um histograma das probabilidades de ocorrência na Figura 53. Vê-se que um número superior a 99% das amostras obtiveram erro de ± 2 LSB (*Least Significant Bit*), com a corrente de $83.28 \mu\text{A}$. Para as amostragens de tensão estão os códigos e o histograma representados nas Figuras 50 e 51, respectivamente, demonstrando erro de ± 1 LSB para a tensão de $2501,24 \text{ mV}$. Considerando que o limite técnico do ADC em uso é ± 1 LSB, ainda que seja possível aprimorar a amostragem de corrente, consideramos os resultados satisfatórios por estarem próximos aos valores de projeto.

Para avaliar o tempo de resposta dos conversores DAC foram gerados sinais periódicos e medidos com osciloscópio. Na Figura 54 verificamos que o tempo de resposta de $6\mu\text{s}$ especificado na folha de dados do DAC foi validado. A Figura 55 mostra que, na velocidade atualmente configurada, o tempo de resposta do DAC da plataforma é de $11\mu\text{s}$. Este valor pode ser reduzido caso necessário, mas considerando a velocidade máxima do ADC de $25\mu\text{s}$, o resultado é satisfatório.

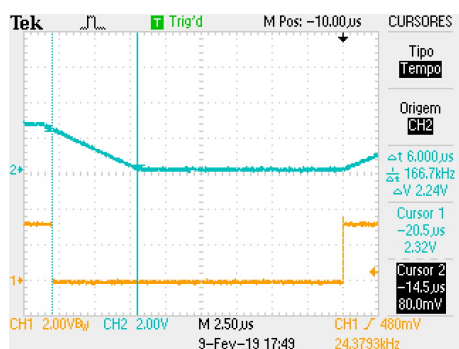


Figura 54 – Tempo de resposta típico do ADC.



Figura 55 – Tempo de Resposta da Plataforma.

Nas Figuras 56 e 57 podemos observar a foto das duas versões desenvolvidas da plataforma, sendo a última a versão mais recente e montada com o módulo do FPGA. O circuito do DAC não está visível, montado na parte inferior da placa.

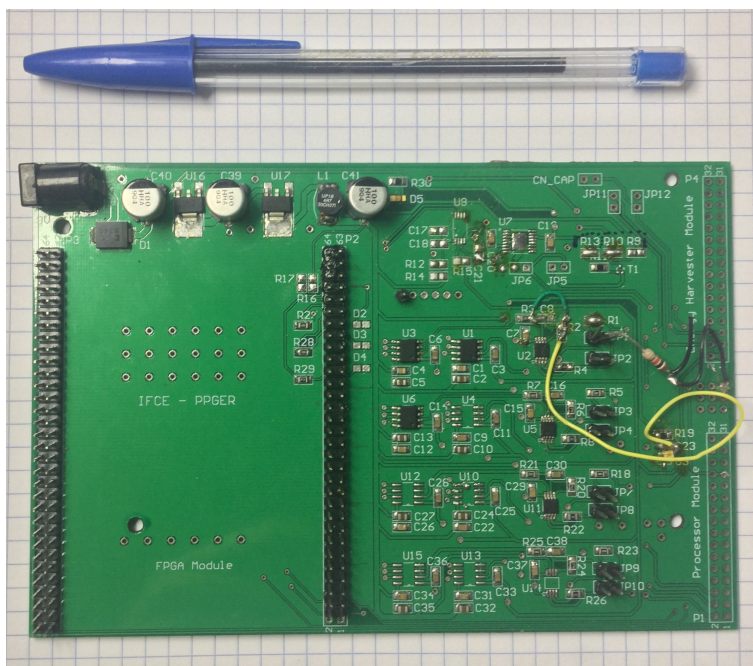


Figura 56 – Primeira versão da plataforma.

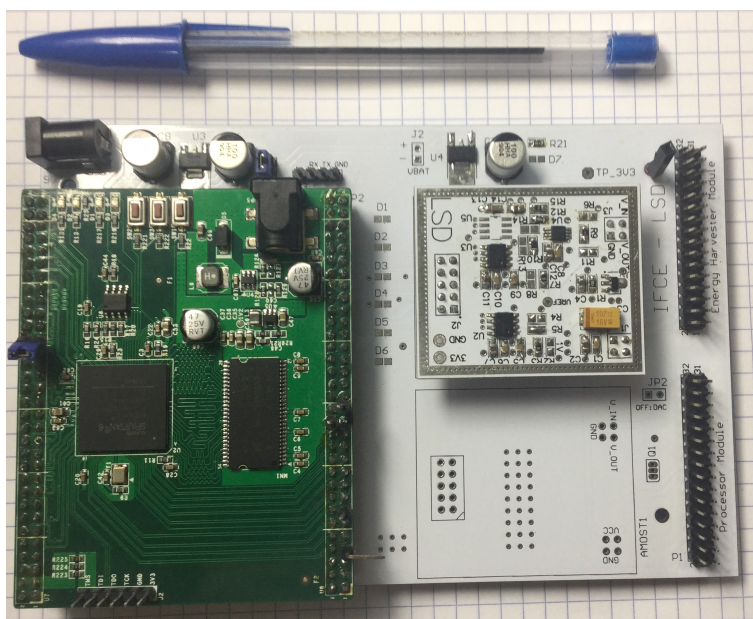


Figura 57 – Versão Atual da Plataforma com placa de aquisições e módulo FPGA.