

ANDRÉA WILLA RODRIGUES VILLARIM

**DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA PARA
SISTEMAS DE COLHEITA HÍBRIDA DE ENERGIA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE da Universidade Federal da Paraíba - UFPB como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Dr. Cleonilson Protásio de Souza
Dr. Waslon Terllizzie Araújo
Lopes

JOÃO PESSOA

2018

ANDRÉA WILLA RODRIGUES VILLARIM

**DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA PARA
SISTEMAS DE COLHEITA HÍBRIDA DE ENERGIA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE da Universidade Federal da Paraíba - UFPB como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Orientadores: Dr. Cleonilson Protásio de Souza
Dr. Waslon Terllizzie Araújo
Lopes**

**JOÃO PESSOA
2018**

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

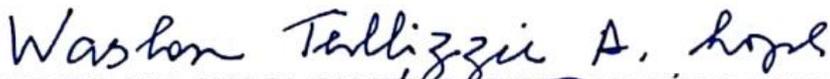
**DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA PARA
SISTEMAS DE COLHEITA HÍBRIDA DE ENERGIA**

Elaborado por

ANDRÉA WILLA RODRIGUES VILLARIM

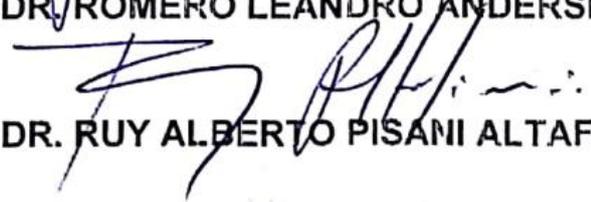
como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA


PROF. DR. WASLON TERLLIZZI ARAÚJO LOPES (Presidente)


PROF. DR. CLEOMILSON PROTÁSIO DE SOUZA


PROF. DR. ROMERO LEANDRO ANDERSEN


PROF. DR. RUY ALBERTO PISANI ALTAFIM

João Pessoa/PB, 30 de julho de 2018.

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

V722d Villarim, Andréa Willa Rodrigues.

DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA PARA SISTEMAS DE COLHEITA HÍBRIDA DE ENERGIA / Andréa Willa Rodrigues Villarim. - João Pessoa, 2018.

92 f. : il.

Orientação: Cleonilson Protásio de Souza.

Coorientação: Waslon Terllizzie Araújo Lopes.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Colheita de Energia. 2. Sistemas de Colheita Híbrida de Energia. 3. Circuitos Somadores de Energia. I. de Souza, Cleonilson Protásio. II. Título.

UFPB/BC

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, meu tudo, e a Maria, minha Mãe, que cuidam de mim em todos os momentos. Agradeço também a todos que me ajudaram a concluir essa importante etapa da minha vida profissional.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	VI
LISTA DE TABELAS	IX
RESUMO	X
ABSTRACT	XI
RESUMEN	XII
1 INTRODUÇÃO	14
2 COLHEITA DE ENERGIA	20
2.1 FONTES PARA COLHEITA DE ENERGIA	22
2.2 ARQUITETURA GERAL DE UM SISTEMA DE COLHEITA DE ENERGIA.....	23
2.3 CARGA.....	25
3 COLHEITA HÍBRIDA DE ENERGIA	28
4 SOMADOR DE ENERGIA	33
5 CONVERSOR CC-CC	39
5.1 CONVERSOR <i>BOOST</i>	42
5.1.1 Obtenção do Ganho Estático	44
5.1.2 Operação em Condução Contínua.....	45
6 CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA HÍBRIDO: PROPOSTA E DESENVOLVIMENTO	49
6.1 CIRCUITO SOMADOR PROPOSTO	52
6.2 MODELAMENTO MATEMÁTICO	57
6.3 CIRCUITOS DE COLHEITA INDIVIDUAL DE ENERGIA.....	59
6.4 COLHEITA DE ENERGIA SOLAR	60
6.5 COLHEITA POR INDUÇÃO MAGNÉTICA	62
6.6 COLHEITA DE ENERGIA UTILIZANDO COLHEITA DE ENERGIA TÉRMICA	65
6.7 USO CONJUNTO DE CIS DA LT COM O CIRCUITO SOMADOR.....	65
6.7.1 Integração individual CI/boost	66
6.7.1.1 <i>Integração individual - Energia Solar</i>	66
6.7.1.2 <i>Integração Individual - Energia Magnética</i>	67
6.7.1.3 <i>Integração Individual - Energia Térmica</i>	68
6.7.2 Integração Cis/Somador.....	70
6.7.3 Estudo comparativo dos resultados obtidos	72
6.8 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	75

7 CONCLUSÕES	84
REFERÊNCIAS.....	85
ANEXO	9089

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - DIAGRAMA BÁSICO DE UM SISTEMA DE COLHEITA DE ENERGIA HÍBRIDO.....	17
FIGURA 2 - SISTEMA TÍPICO DE COLHEITA DE ENERGIA.	21
FIGURA 3 - PROPOSTA DE UMA REDE DE SENSORES SEM FIO EM CABOS DA REDE ELÉTRICA.	23
FIGURA 4 - ARQUITETURAS DE UM SISTEMA DE COLHEITA DE ENERGIA.	24
FIGURA 5 - (A) ARQUITETURA COLHEITA-USO (B) ARQUITETURA COLHEITA-ARMAZENAMENTO-USO.....	24
FIGURA 6 - SISTEMA DE COLHEITA HÍBRIDA DE ENERGIA.....	28
FIGURA 7 - SISTEMA DE COLHEITA HÍBRIDA COM ALIMENTAÇÃO EXCLUSIVA POR UMA FONTE A CADA MOMENTO.	33
FIGURA 8 - SISTEMA DE COLHEITA HÍBRIDA COM SOMA DE ENERGIA.	34
FIGURA 9 - CONVERSOR BOOST INTERCALADO.	36
FIGURA 10 - CIRCUITO BÁSICO PROPOSTO POR TAN E PANDA (2011) PARA COLHEITA HÍBRIDA DE ENERGIA.	36
FIGURA 11 - ESQUEMA DO CIRCUITO DESCRITO.....	37
FIGURA 12 - ESTRUTURA SIMPLIFICADA DO CONVERSOR CC-CC.....	39
FIGURA 13 - FORMA DE ONDA PARA CONTROLE DO CONVERSOR CC-CC.....	40
FIGURA 14 - ESTRUTURA DO CONVERSOR CC-CC - TIPO BOOST.....	43
FIGURA 15 - COMPORTAMENTO DO CONVERSOR BOOST NO MOMENTO EM QUE A CHAVE ESTÁ FECHADA.	43
FIGURA 16 - FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR BOOST NO MOMENTO EM QUE A CHAVE ESTÁ ABERTA.	44
FIGURA 17- FORMAS DE ONDA CARACTERÍSTICAS DO CONVERSOR BOOST.	47
FIGURA 18 - CONVERSOR BOOST DESENVOLVIDO.....	50
FIGURA 19 - CORRENTE NO INDUTOR DO CONVERSOR.....	51
FIGURA 20 - COMPORTAMENTO DA TENSÃO DE SAÍDA DO CONVERSOR.....	51
FIGURA 21 - DETALHE DA ONDULAÇÃO DA TENSÃO DE SAÍDA DO CONVERSOR.	52
FIGURA 22 - CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA COM PARÂMETROS IGUAIS.....	52
FIGURA 23 - REDUÇÃO DA ONDULAÇÃO DO SINAL DE SAÍDA EM FUNÇÃO DA DEFASAGEM ENTRE OS SINAIS DE CONTROLE	53
FIGURA 24 - CORRENTES NOS INDUTORES DO CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA COM PARÂMETROS IGUAIS.	54
FIGURA 25 - COMPORTAMENTO DA TENSÃO DE SAÍDA DO CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA COM PARÂMETROS IGUAIS.....	54
FIGURA 26 - DETALHE DA ONDULAÇÃO DA TENSÃO DE SAÍDA DO CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA COM PARÂMETROS IGUAIS COMPARADA COM A DO CIRCUITO INDIVIDUAL.....	55
FIGURA 27 - CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA COM PARÂMETROS DIFERENTES.	56
FIGURA 28 - CORRENTES NOS INDUTORES DO CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA COM PARÂMETROS DIFERENTES.....	57
FIGURA 29 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO DE SAÍDA DO SISTEMA ÚNICO COM O SISTEMA SOMADOR DE ENERGIA.....	57
FIGURA 30 - SINAIS DE SAÍDA DO CIRCUITO SOMADOR PARA DIFERENTES QUANTIDADES DE FONTES DE ENTRADA.....	58
FIGURA 31 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS POR SIMULAÇÃO E ATRAVÉS DA EQUAÇÃO PARA UM DC DE 24%.....	59
FIGURA 32 - COMPORTAMENTO DO CI QUANTO À SAÍDA E FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR.....	61
FIGURA 33 - ESQUEMÁTICO PARA UTILIZAÇÃO DO CI LTC3459.....	61

FIGURA 34 - ESQUEMÁTICO PARA UTILIZAÇÃO DOS CIS LTC2935 E LTC3459.....	62
FIGURA 35 - COLHEITA POR INDUÇÃO MAGNÉTICA AO REDOR DE CABOS DA REDE ELÉTRICA.	63
FIGURA 36 - DIAGRAMA DE BLOCOS INTERNO DO CI LTC3588-1.....	64
FIGURA 37 - ESQUEMÁTICO PARA UTILIZAÇÃO DO CI LTC3588-1.....	65
FIGURA 38 - PROPOSTA DE INTEGRAÇÃO CI/SOMADOR.	66
FIGURA 39 - CONVERSOR BOOST DESENVOLVIDO COM CIS PARA COLHEITA DE ENERGIA SOLAR COMO ENTRADA	67
FIGURA 40 - SINAIS DE ENTRADA, SAÍDA E SINAL DE COMANDO DO CONVERSOR BOOST COM OS CIS PARA COLHEITA DE ENERGIA SOLAR DE ENTRADA.	67
FIGURA 41 - CONVERSOR BOOST DESENVOLVIDO COM CI PARA COLHEITA DE ENERGIA POR INDUÇÃO MAGNÉTICA COMO ENTRADA	68
FIGURA 42 - SINAIS DE ENTRADA, SAÍDA E SINAL DE COMANDO DO CONVERSOR BOOST COM OS CIS PARA COLHEITA DE ENERGIA POR INDUÇÃO MAGNÉTICA DE ENTRADA.....	68
FIGURA 43 - CONVERSOR BOOST DESENVOLVIDO COM CI PARA COLHEITA DE ENERGIA TÉRMICA COMO ENTRADA	69
FIGURA 44 - SINAIS DE ENTRADA, SAÍDA E SINA DE COMANDO DO CONVERSOR BOOST COM OS CIS PARA COLHEITA DE ENERGIA TÉRMICA DE ENTRADA.	70
FIGURA 45 - CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA DESENVOLVIDO COM CIS PARA ENERGIA TÉRMICA UTILIZADOS COMO ENTRADA.....	70
FIGURA 46 - SINAIS DE SAÍDA E SINAIS DE COMANDO DO CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA.....	71
FIGURA 47 - CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA DESENVOLVIDO COM CIS PARA ENERGIA SOLAR UTILIZADOS COMO ENTRADA.....	72
FIGURA 48 - SINAIS DE SAÍDA E SINAIS DE COMANDO DO CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA.....	72
FIGURA 49 - COMPARAÇÃO DA ONDULAÇÃO DE SAÍDA DO CIRCUITO PARA COLHEITA DE ENERGIA ÚNICO E DO CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA COM O CI COMO ENTRADA.....	73
FIGURA 50 - COMPARAÇÃO DA ONDULAÇÃO DE SAÍDA DO CIRCUITO PARA COLHEITA DE ENERGIA ÚNICO E DO CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA COM O CI COMO ENTRADA.....	74
FIGURA 51 - CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA DESENVOLVIDO COM OS CIS ESTUDADOS UTILIZADOS COMO ENTRADA.	74
FIGURA 52 - COMPARAÇÃO DA ONDULAÇÃO DE SAÍDA DO CIRCUITO PARA COLHEITA DE ENERGIA ÚNICO E DO CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA ALIMENTADO PELAS TRÊS FONTES DE ENTRADA APRESENTADAS.	75
FIGURA 53 - CIRCUITO SOMADOR SIMULADO CONFORME PARÂMETROS DO EXPERIMENTO PRÁTICO.....	76
FIGURA 54 - CORRENTE QUE PERCORRE O INDUTOR E SINAL DE COMANDO DA CHAVE DE UM DOS CONVERSORES DO CIRCUITO SOMADOR.....	77
FIGURA 55 - CORRENTE QUE PERCORRE O INDUTOR E SINAL DE COMANDO DA CHAVE DE UM DOS CONVERSORES DO CIRCUITO SOMADOR.....	77
FIGURA 56 - SINAIS DE COMANDO DAS CHAVES E DE SAÍDA DO CIRCUITO SOMADOR E SINAL DE CORRENTE QUE PERCORRE O INDUTOR CUJA TENSÃO É CONTROLADA PELA CHAVE COM SINAL DE COMANDO DE COR AZUL.....	78
FIGURA 57 - SINAIS DE COMANDO DAS CHAVES E DE SAÍDA DO CIRCUITO SOMADOR E SINAL DE CORRENTE QUE PERCORRE O INDUTOR CUJA TENSÃO É CONTROLADA PELA CHAVE COM SINAL DE COMANDO DE COR LARANJA.....	79

FIGURA 58 - SINAIS DE COMANDO DAS CHAVES E SINAL DE CORRENTE QUE PERCORRE O INDUTOR CUJA TENSÃO É CONTROLADA PELA CHAVE COM SINAL DE COMANDO DE COR VERDE.....	80
FIGURA 59 - SINAIS DE COMANDO DAS CHAVES E SINAL DE CORRENTE QUE PERCORRE O INDUTOR CUJA TENSÃO É CONTROLADA PELA CHAVE COM SINAL DE COMANDO DE COR AZUL.....	80
FIGURA 60 - SINAIS DE COMANDO DAS CHAVES E SINAL DE CORRENTE QUE PERCORRE O INDUTOR CUJA TENSÃO É CONTROLADA PELA CHAVE COM SINAL DE COMANDO DE COR LARANJA.....	81
FIGURA 61 - SINAIS DE TENSÃO DE CONTROLE DAS CHAVES E DE SAÍDA DO CIRCUITO SOMADOR E SINAL DE CORRENTE QUE PERCORRE O INDUTOR CUJA TENSÃO É CONTROLADA PELA CHAVE COM SINAL DE CONTROLE DE COR AZUL.....	82
FIGURA 62 - SINAIS DE TENSÃO DE CONTROLE DAS CHAVES E DE SAÍDA DO CIRCUITO SOMADOR E SINAL DE CORRENTE QUE PERCORRE O INDUTOR CUJA TENSÃO É CONTROLADA PELA CHAVE COM SINAL DE CONTROLE DE COR LARANJA.....	82

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TIPOS DE CONVERSORES CC-CC.....	41
TABELA 2 - PARÂMETROS PARA DESENVOLVIMENTO DO CONVERSOR.	49
TABELA 3 - RELAÇÃO PERCENTUAL DA REDUÇÃO DA ONDULAÇÃO DE SAÍDA COM O NÚMERO DE FONTES DE ENTRADA.....	58

RESUMO

DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA PARA SISTEMAS DE COLHEITA HÍBRIDA DE ENERGIA

Nos últimos anos, o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos de baixo ou ultra-baixo consumo possibilitou a utilização de baterias de pequena capacidade e o aproveitamento de fontes de energia disponíveis no ambiente, como: solar, térmica, RF, entre outras, para alimentá-los, o que tornou possível, até mesmo, a independência do uso de baterias. Este aproveitamento de energia e o devido condicionamento para alimentar dispositivos eletrônicos são denominados de Colheita de Energia. Atualmente, para otimizar o desempenho dos sistemas de Colheita de Energia, estão sendo estudados e desenvolvidos sistemas híbridos, ou seja, que utilizam mais de uma fonte de energia, aumentando assim a quantidade e a disponibilidade de energia fornecida. Um elemento fundamental no desenvolvimento de sistemas de colheita híbrida de energia é aquele que recebe energia de diferentes fontes e realiza a devida combinação para uma só saída. Em geral, os circuitos de combinação de energia são de tempo compartilhado, ou seja, somente uma fonte é ligada à carga enquanto as outras ficam em estado de espera ou acumulando energia. Atualmente, alguns estudos visam o desenvolvimento de circuitos de combinação que aproveitem as energias disponíveis pelas fontes de forma simultânea, denominados neste trabalho, de circuitos somadores de energia. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo o estudo e desenvolvimento de um circuito somador de energia para sistemas de colheita híbrida de energia capaz de colher, condicionar e somar energia de diferentes fontes do ambiente. Para isso, foram utilizados circuitos integrados de ultra-baixo consumo da *Linear Technology* para o condicionamento e é proposto um circuito somador de energia. Os resultados experimentais preliminares mostram o desempenho obtido com o sistema projetado e desenvolvido. Adicionalmente, é mostrado que o circuito desenvolvido é capaz de ser adaptado para diferentes fontes de energia de acordo com a disponibilidade do ambiente em questão.

Palavras-chave: Colheita de Energia; Sistemas de Colheita Híbrida de Energia; Circuitos Somadores de Energia.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF AN ENERGY ADDER CIRCUIT FOR HYBRID ENERGY HARVESTING SYSTEMS

In recent years, the development of electronic devices with low or ultra-low power consumption made it possible to use low-capacity batteries and the use of energy sources available in the environment, such as solar, thermal, RF, among others, to feed them, which made possible even the independence of the use of batteries. This energy exploitation and the conditioning to feed electronic devices are termed Energy Harvesting. Nowadays, in order to optimize the performance of energy harvesting systems, hybrid systems are being studied and developed, that is, they use more than one energy source, thus increasing the quantity and availability of energy supplied. A fundamental element in the development of hybrid energy harvesting systems is the one that receives energy from different sources and performs the right combination for a single output. In general, the power combination circuits are time-shared, i.e., only one source is connected to the load while the others are in the standby state or accumulating energy. At present, some studies are aimed at the development of combination circuits that take advantage of the available energy sources simultaneously, called in this work, energy adder circuits. In this context, the objective of this work is the study and development of an energy adder circuit for hybrid energy harvesting systems capable of harvesting, conditioning and adding energy from different sources of the environment. For this, Linear Technology's ultra-low consumption integrated circuits were used for the conditioning and an energy adder circuit is proposed. The preliminary experimental results show the performance obtained with the designed and developed system. Additionally, it is shown that the developed circuit is capable of being adapted for different energy sources according to the availability of the environment in question.

Keywords: Energy Harvesting; Hybrid Energy Harvesting Systems; Energy Adder Circuits.

RESUMEN

DESARROLLO DE UN CIRCUITO SOMADOR DE ENERGÍA PARA SISTEMAS DE COSECHA HÍBRIDA DE ENERGÍA

En los últimos años, el desarrollo de dispositivos electrónicos de bajo o ultra-bajo consumo ha posibilitado el uso de baterías de pequeña capacidad y el aprovechamiento de fuentes de energía disponibles en el ambiente, como energía solar, térmica, radiofrecuencia, entre otras, para alimentarlos, lo que hizo posible incluso la independencia del uso de las baterías. Este aprovechamiento de energía y el debido acondicionamiento para alimentar dispositivos electrónicos son denominados de Cosecha de Energía. Actualmente, para optimizar el desempeño de los sistemas de Cosecha de Energía, se están estudiando y desarrollando sistemas híbridos, es decir, que utilizan más de una fuente de energía, aumentando así la cantidad y la disponibilidad de energía suministrada. Un elemento fundamental en el desarrollo de sistemas de cosecha híbrida de energía es aquel que recibe energía de distintas fuentes y realiza la debida combinación para una sola salida. En general, los circuitos de combinación de energía son de tiempo compartido, es decir, sólo una fuente está ligada a la carga mientras las otras quedan en estado de espera o acumulando energía. Actualmente, algunos estudios apuntan al desarrollo de circuitos de combinación que aprovechen las energías disponibles por las fuentes de forma simultánea, denominadas en este trabajo, de circuitos sumadores de energía. En este contexto, este trabajo tiene como objetivo el estudio y desarrollo de un circuito sumador de energía para sistemas de cosecha híbrida de energía capaz de cosechar, condicionar y sumar energía de distintas fuentes del ambiente. Para ello, se utilizaron circuitos integrados de ultra-bajo consumo de Linear Technology para el acondicionamiento y se propone un circuito sumador de energía. Los resultados experimentales preliminares muestran el desempeño obtenido con el sistema proyectado y desarrollado. Adicionalmente, se muestra que el circuito desarrollado es capaz de adaptarse a diferentes fuentes de energía de acuerdo con la disponibilidad del ambiente en cuestión.

Palabras clave: Cosecha de energía; Sistemas de Cosecha Híbrida de Energía; Circuitos de Energía.

1 INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento acelerado de tecnologias de informação e comunicação e da eletrônica contribuiu para a crescente inclusão de diversos e inúmeros dispositivos eletrônicos no cotidiano da população. Esses dispositivos estão em constante evolução, implantando novas tecnologias para aperfeiçoamento dos mesmos, principalmente, em termos de miniaturização e redução do consumo energético dos circuitos integrados empregados. Essas evoluções possibilitaram o desenvolvimento do conceito de Sistemas Eletrônicos Energeticamente Autônomos (SEEs), que são capazes de coletar dados do ambiente sem a necessidade de estarem conectados a uma rede de energia elétrica (TARTAGNI, 2009).

Entretanto, um dos principais problemas enfrentados no desenvolvimento dos dispositivos eletrônicos para obtenção de um Sistema Energeticamente Autônomo é a limitação das fontes de alimentação. A utilização de baterias limita a capacidade do sistema, além de exigir recargas ou trocas em períodos regulares (CHOU, *et al.*, 2014). Esses procedimentos acarretam um custo para a manutenção do sistema em questão, além de serem inviáveis em alguns casos, nos quais o sistema apresenta difícil acesso ou é composto por uma grande quantidade de dispositivos.

Uma forma de solucionar essa questão energética dos dispositivos de baixa potência e possibilitar um melhor desempenho é utilizar técnicas de Colheita de Energia (CE). Também bastante conhecida pelo termo em inglês *Energy Harvesting*, Colheita de Energia é o processo utilizado para converter as formas de energia presentes no ambiente, como solar, térmica ou vibracional, por exemplo, em energia elétrica (KANG, *et al.*, 2015) sendo capaz de coletar, converter e armazenar a energia para alimentar dispositivos de baixo consumo (SOUZA, *et al.*, 2016; SANTOS, *et al.*, 2014).

Estudos e desenvolvimentos na área de colheita de energia não visam apenas fontes renováveis ou alternativas já bastante conhecidas, mas outras fontes que possam existir no ambiente, mesmo fornecendo pouca energia, sendo esse o motivo de não terem sido muito exploradas anteriormente (HULEIHEL, CERVERA e BEN-YAAKOV, 2012), mas que podem fornecer energia suficiente para alimentar dispositivos de baixo consumo.

Em geral, no contexto de colheita de energia, ao utilizar fontes de energia disponíveis no ambiente em que a carga ou o dispositivo eletrônico é instalado, é possível prever, baseado em estudos experimentais prévios, os períodos de tempo em que o fornecimento de energia é possível, e assim adaptar o dispositivo e definir suas funções de acordo com a disponibilidade da fonte, para que essa não se esgote e para que a aplicação não seja completamente interrompida. Assim, é possível obter um melhor desempenho do dispositivo durante esses períodos (SUDEVALAYAM e KULKARNI, 2011).

O processo de colheita de energia se inicia com a captação da energia do ambiente, seguido da conversão em energia elétrica, a regulação de tensão e o armazenamento (VIEIRA, *et. al.*, 2015). O circuito de condicionamento de energia depende do tipo de Colheita de Energia escolhida, logo, depende do ambiente no qual está inserido e da aplicação que será mantida pelo sistema.

Aplicações de colheita de energia podem ser encontradas nas mais diversas áreas. Por exemplo, pode ser colhida energia do calor humano ou do movimento do corpo para alimentar dispositivos médicos que podem ser usados para monitorar as condições do paciente ou até mesmo para auxiliar um órgão a cumprir sua função fisiológica (KOUL, AHMED e KAKKAR, 2015). Também podem auxiliar no monitoramento ambiental de grandes áreas, através de Redes de Sensores Sem Fio cujos nós sensores sejam alimentados por colheita de energia, como na detecção de queimadas dentro de uma floresta ou no monitoramento de variáveis de interesse para a população de grandes cidades (SOUZA, *et al.*, 2016; TAN e JARVIS, 2013).

O consumo de energia do sistema, foco desse trabalho, muitas vezes pode ser maior que a energia fornecida pela fonte utilizada para colheita, já que muitas fontes não fornecem energia de forma constante ou a fornecem em pouca quantidade. Uma das técnicas desenvolvidas para auxiliar a alimentação dos dispositivos de baixo consumo foi a técnica de colheita híbrida de energia. Essa técnica utiliza-se de duas ou mais fontes de energia para alimentar o sistema, aumentando a sua confiabilidade e melhorando o seu desempenho quando comparado a utilizar uma única fonte para a CE (KANG, *et al.*, 2015).

A colheita híbrida auxilia no desenvolvimento de sistemas de baixo consumo, pois pode aproveitar as diversas fontes que o ambiente disponibiliza e combinar fontes que individualmente não seriam suficientes para manter

determinada aplicação, mas que juntas poderiam suprir a demanda. Diversos trabalhos estudam as vantagens da colheita híbrida de forma que as fontes de energia intercalam o momento de fornecimento para o sistema e cada fonte o mantém em momentos distintos ou são utilizadas para alimentar dispositivos diferentes de uma rede.

Em Guilar, *et al.* (2009) e Lhermet, *et al.* (2008), foram desenvolvidos sistemas que combinam duas diferentes fontes de colheita de energia usando uma chave eletrônica, que determina qual das fontes vai ser utilizada em cada momento. Se as duas fontes estiverem disponíveis no mesmo instante, apenas uma será utilizada, devido ao circuito de gerenciamento que determina a prioridade entre as fontes. Logo, elas não podem ser aproveitadas do ambiente simultaneamente, o que pode limitar os tipos de fontes apropriados para utilização no projeto.

O desenvolvimento deste trabalho foca em uma solução para esta limitação da colheita híbrida: o aproveitamento simultâneo de energia de diferentes fontes. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de colheita híbrida de energia que aproveite a energia disponibilizada por todas as fontes escolhidas, para alimentação de um determinado circuito, de forma que a energia fornecida pelas fontes seja efetivamente aproveitada e usada de forma simultânea.

Um circuito fundamental no desenvolvimento de sistemas de colheita híbrida de energia é aquele que realiza a combinação de energia (VIEHWEGER, BALDAUF e KANOUN, 2012; KANG, *et al.*, 2015). Os circuitos de combinação de energia que aproveitam as energias disponíveis pelas fontes de forma simultânea foram denominados neste trabalho de **circuitos somadores de energia**.

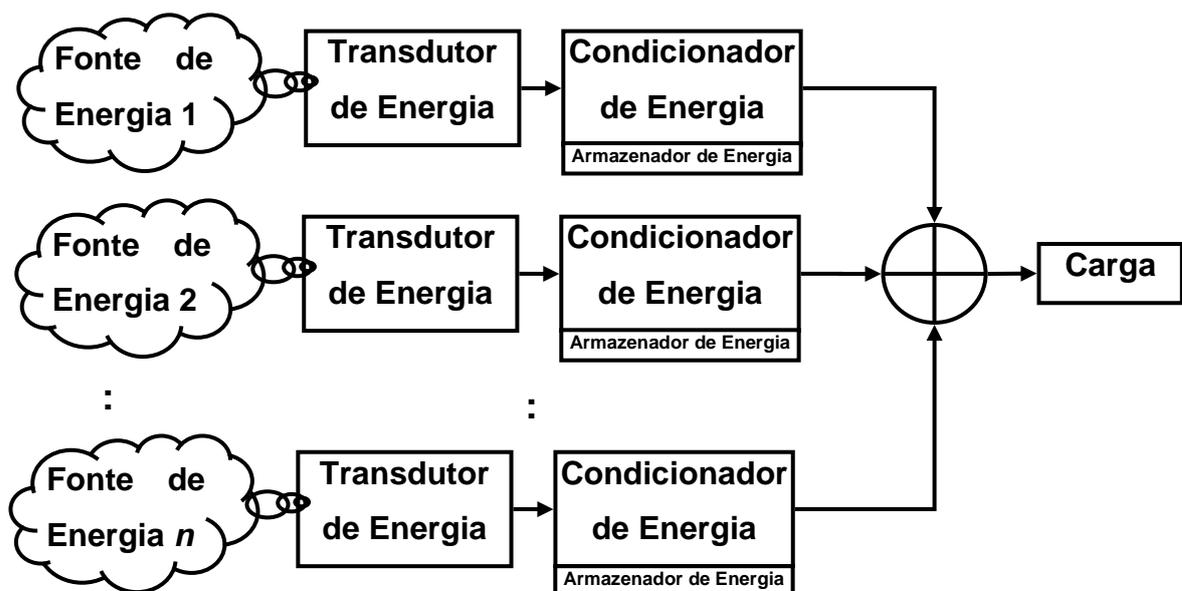
A soma efetiva de energia, por meio de circuitos somadores de energia, permite a utilização de fontes que forneçam qualquer quantidade de energia, por menor que seja, pois somada a outras pode contribuir para o funcionamento do circuito. Permite também o desenvolvimento de aplicações em uma variedade maior de locais, como ambientes fechados, que possuem uma limitação maior no fornecimento de energia que ambientes abertos (TAN e PANDA, 2011).

Para o desenvolvimento do circuito somador é importante avaliar o circuito condicionador de energia, já que as fontes de energia, após a conversão para energia elétrica, fornecem, geralmente, níveis distintos de tensão e/ou corrente

elétrica para alimentação de um dado circuito. Em geral, os sistemas que utilizam colheita de energia como forma de alimentação requerem baixos níveis de tensão, pouca perda de potência e alta eficiência. Os conversores CC-CC de baixa potência suprem essa necessidade e garante estabilidade na saída.

Na Figura 1 é mostrado um diagrama geral de um sistema de colheita híbrida de energia no qual pode ser visto o uso de transdutores de energia, específicos para cada tipo de fonte (por exemplo, célula fotovoltaica para energia solar), o condicionador de energia, um possível armazenador de energia (baterias ou supercapacitores, por exemplo) e o circuito de combinação de energia, representado por um círculo.

FIGURA 1 - DIAGRAMA BÁSICO DE UM SISTEMA DE COLHEITA DE ENERGIA HÍBRIDO.



Fonte: Elaborada pela autora.

O propósito desse trabalho é o estudo e desenvolvimento de um circuito somador de energia para sistemas de colheita híbrida de energia capaz de colher, condicionar e somar efetivamente e simultaneamente energia de diferentes fontes do ambiente. Dessa forma, foram utilizados circuitos integrados de ultra-baixo consumo da *Linear Technology* para o condicionamento de energia específico para diferentes tipos de fontes de energia e, principalmente, é proposto um circuito somador de energia. Os resultados alcançados mostram o desempenho obtido com

o sistema projetado e desenvolvido. Adicionalmente, será mostrado que o circuito desenvolvido é capaz de ser adaptado para diferentes fontes de energia de acordo com a disponibilidade do ambiente em questão.

Nesse trabalho, serão discutidas, no Capítulo 2, as características do sistema para Colheita de Energia e alguns dos trabalhos desenvolvidos na área, no capítulo seguinte, é explicado sobre a Colheita Híbrida de energia e no Capítulo 4 é explanado sobre a Soma de Energia. No Capítulo 5, é discutido sobre o funcionamento de conversores CC-CC, que serão utilizados para desenvolvimento do circuito somador de energia. Por fim, é explicada a proposta do circuito desenvolvido e são apresentados os resultados obtidos. Nas conclusões, são feitas as considerações finais do trabalho.

2 COLHEITA DE ENERGIA

2 COLHEITA DE ENERGIA

De acordo com Tartagni (2009), não é simples desenvolver um sistema totalmente independente energeticamente. Diversos sistemas sem fio, como, por exemplo, as Redes de Sensores sem Fio (RSSF), têm seu funcionamento limitado pelas restrições de tamanho e peso dos dispositivos de armazenamento de energia que a compõem, como as baterias, o que compromete a vida útil da rede (GUNGOR e HANCKE, 2009).

A utilização de dispositivos de armazenamento de energia com capacidade finita para alimentar uma rede torna a operação do sistema também finita, ou seja, com duração limitada pelo tempo de vida útil da bateria. A duração finita dos dispositivos eletrônicos implica ou em um possível encerramento precoce da aplicação à qual se destinava ou na necessidade de troca regular das baterias, acarretando custo e complexidade maiores para manutenção da rede (SUDEVALAYAM e KULKARNI, 2011).

Diversos parâmetros da rede podem ser alterados para aumentar o tempo de vida da aplicação. Os dispositivos podem utilizar baterias maiores para aumentar o tempo de funcionamento da aplicação, mas isso também aumentaria o tamanho e peso do dispositivo, além do seu custo de fabricação. Outra possível forma de resolver essa questão é optar pela utilização de *hardwares* de baixo consumo, como processador e rádio que consumam pouca energia, porém isso compromete a capacidade de processamento e a transmissão do sistema. Além disso, estratégias envolvendo protocolos de roteamento, taxa de sensoriamento variável ou controle do *duty-cycle* também são utilizadas para prolongar o funcionamento da rede, porém esse continua limitado e finito (SUDEVALAYAM e KULKARNI, 2011).

Como visto anteriormente, há diversos fatores a se considerar ao escolher um método de melhorar o desempenho da RSSF, por exemplo, e depende do objetivo de cada projeto, pois com a utilização de fontes finitas de energia é difícil otimizar todos os parâmetros do projeto simultaneamente.

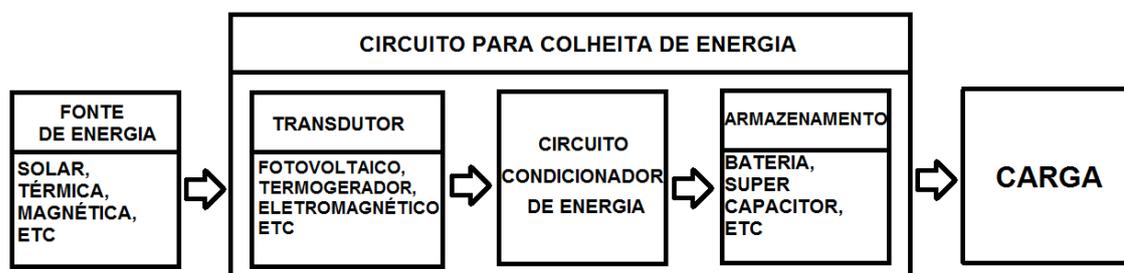
Nesse contexto, surgiu o conceito de alimentar dispositivos eletrônicos de baixo consumo a partir de fontes de energia disponíveis no meio em que estão inseridos, como solar, térmica ou vibracional (TAN e PANDA, 2011). Essa técnica é conhecida como Colheita de Energia, que são meios para captar energia de fontes

do ambiente ou outras fontes, como calor do corpo humano ou pressão sanguínea, por exemplo, e convertê-las em energia elétrica para alimentar de forma total ou parcial dispositivos de baixo consumo. Se a fonte utilizada fornecer energia continuamente ou periodicamente, de modo que seja possível conhecer o intervalo de fornecimento, é possível utilizá-la para manter o funcionamento adequado do sistema por toda a vida útil do *hardware* (SUDEVALAYAM e KULKARNI, 2011).

Ainda de acordo com Sudevalayam e Kulkarni (2011), um dispositivo alimentado por uma fonte de energia periódica possui energia limitada apenas até o próximo ciclo de recarga. Em uma RSSF, por exemplo, isso pode ser utilizado para aprimorar o desempenho do nó sensor, pois este pode ser projetado de modo que utilize de forma otimizada a energia disponível em cada intervalo para executar as funções necessárias no momento. Assim, as técnicas de colheita de energia conseguem obter um equilíbrio entre um melhor desempenho da rede e o aumento do tempo de vida da aplicação.

Os sistemas de colheita de energia são constituídos, em geral, por três estágios distintos, são eles: a fonte de energia a ser utilizada para manter a aplicação; o circuito utilizado para colheita de energia, constituído por um transdutor para captar a energia da fonte e convertê-la em energia elétrica, cujo projeto depende do tipo de fonte utilizada, um circuito para condicionamento da energia de saída do transdutor, para que atenda aos critérios necessários para alimentar a carga em questão e uma possível etapa de armazenamento de energia; e, por fim, a carga que consumirá a energia fornecida. Esse sistema típico está ilustrado na Figura 2.

FIGURA 2 - SISTEMA TÍPICO DE COLHEITA DE ENERGIA.



Fonte: Adaptado de Santos (2015).

2.1 FONTES PARA COLHEITA DE ENERGIA

De acordo com Kansal, *et al.* (2007), as fontes de energia apresentam características típicas e diferentes entre si quanto ao controle, previsibilidade e densidade de energia fornecida. Assim, com respeito ao controle, as fontes podem ser controláveis ou não. Neste último caso, o sistema só pode utilizar a energia quando disponível pela fonte. Fontes previsíveis permitem o desenvolvimento de sistemas que se baseiam no tempo de fornecimento de energia para determinar as funções a serem utilizadas. Além disso, cada fonte fornece uma densidade específica de energia, que depende de fatores como o tipo de fonte e as condições do meio no qual o sistema de colheita está inserido.

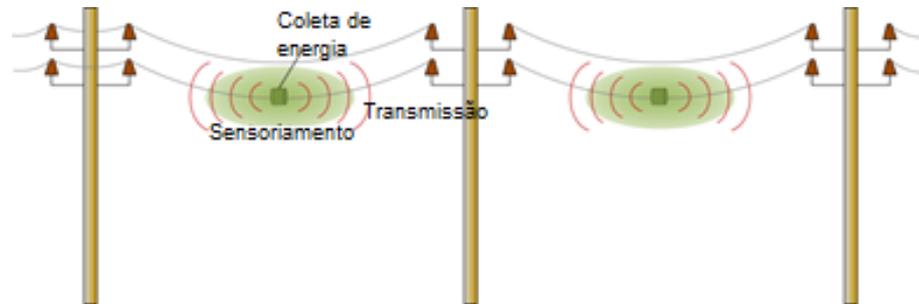
Há diversas fontes utilizadas para colheita de energia, alguns dos principais exemplos são solar (BIBBO, *et al.*, 2017), térmica (WAN, TEH e MOK, 2016), magnética (ROSCOE e JUDD, 2013), dentre outras. Cada uma com características específicas que devem ser analisadas para atender aos requisitos do projeto.

De acordo com estudos comparativos realizados por Santos (2014), foi observado que o tipo de fonte, dentre as analisadas em suas respectivas condições, que apresentou uma maior densidade de energia fornecida foi a energia solar em ambientes externos (densidade de energia que variou entre 10 mW/cm² e 15 mW/cm²). Em seguida, estava a energia magnética obtida ao redor de linhas de potência (densidade de 2,6 mW/cm³) e a próxima a fornecer mais energia foi a magnética colhida em subestações elétricas (700 μW/cm³). Foram analisadas nesse estudo comparativo, além dessas fontes, a solar em ambiente interno, vibração obtida de diferentes formas e energia térmica.

Os resultados desse estudo foram usados para definir as fontes de energia principais para uma possível aplicação dos resultados deste trabalho de mestrado, a saber: energia solar em ambientes externos e a energia magnética ao redor das linhas de potência da rede elétrica.

Essa possível aplicação é vista na Figura 3 em que é objetivado o desenvolvimento de uma RSSF, cujos nós sensores sejam alimentados pela indução magnética ao redor do cabo de energia e por radiação solar, para monitoramento da poluição urbana.

FIGURA 3 - PROPOSTA DE UMA REDE DE SENSORES SEM FIO EM CABOS DA REDE ELÉTRICA.



Fonte: BAIOCCHI (2014).

2.2 ARQUITETURA GERAL DE UM SISTEMA DE COLHEITA DE ENERGIA

A arquitetura do sistema de Colheita de Energia refere-se ao modo pelo qual a energia disponível do meio é convertida em energia elétrica. O desenvolvimento específico da arquitetura de cada sistema serve para permitir que uma carga qualquer possa ser alimentada por uma fonte de energia que não fornece exatamente a energia instantânea necessária para atingir os requisitos da carga (KANSAL, *et al.*, 2007).

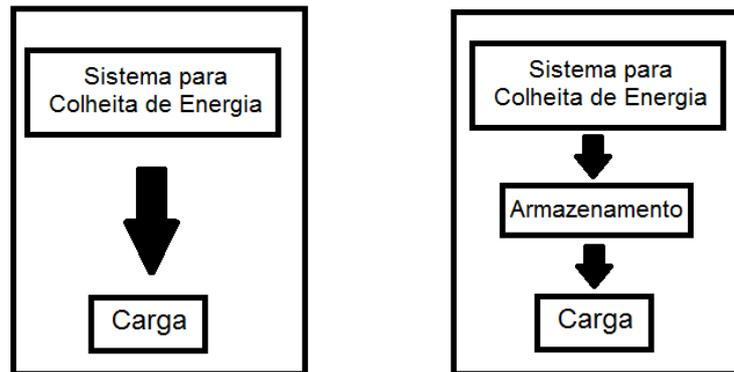
A arquitetura do sistema é constituída de um circuito de condicionamento, que permite a captação da energia da fonte e conversão em energia elétrica, atendendo aos critérios necessários para alimentar a carga, e um possível circuito de armazenamento, formado por baterias ou supercapacitores, por exemplo.

Ainda de acordo com Kansal, *et al.*, (2007), existem dois possíveis modos de desenvolver um sistema para colheita de energia. Um que colhe a energia que a fonte consegue fornecer e, após os devidos mecanismos de conversão, utiliza para alimentar a aplicação diretamente, podendo ser chamado de **Arquitetura Colheita-Uso**. Nesse caso, a fonte deve fornecer continuamente o mínimo necessário para suprir a aplicação, pois, caso contrário, se a fonte interromper o fornecimento em qualquer momento, o dispositivo será desligado e a aplicação interrompida.

O outro tipo de arquitetura que pode ser implementado utiliza um estágio de armazenamento. Em casos onde a energia fornecida pela fonte é maior que a utilizada instantaneamente pela carga ou em situações onde a energia fornecida é inferior e não tem capacidade suficiente para manter a carga continuamente. Nesses

casos, o uso do circuito de armazenamento é fundamental, pois no primeiro caso, evitaria desperdício de energia fornecida pela fonte e, no segundo, o armazenamento permite acumular energia até que seja suficiente para alimentar o sistema. Esse modelo de desenvolvimento do condicionamento do sistema pode ser chamado de **Arquitetura Colheita-Armazenamento-Uso**. Essas arquiteturas podem ser observadas na Figura 4.

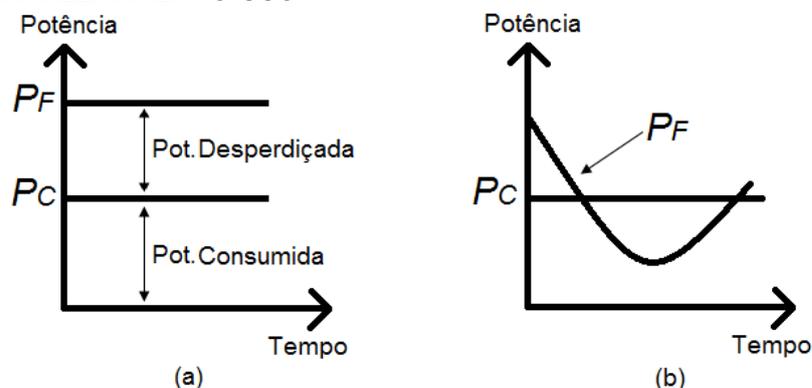
FIGURA 4 - ARQUITETURAS DE UM SISTEMA DE COLHEITA DE ENERGIA.



Fonte: Adaptado de Sudevalayam e Kulkarni (2011)

No contexto de Colheita de Energia, há o conceito de Operação Neutra de Energia (do inglês, *energy neutral operation*). O dispositivo atinge esse nível de operação quando a energia fornecida por determinada fonte consegue manter a aplicação de forma perpétua, sem levar em consideração possíveis problemas de *hardware*. Tendo em vista esse conceito, é possível observar a relação entre as duas arquiteturas do sistema para que esse conceito possa ser alcançado (SUDEVALAYAM e KULKARNI, 2011).

FIGURA 5 - (A) ARQUITETURA COLHEITA-USO (B) ARQUITETURA COLHEITA-ARMAZENAMENTO-USO



Fonte: Adaptado de Sudevalayam e Kulkarni (2011)

Para operação neutra de energia, observa-se na Figura 5, que a potência fornecida pela fonte (P_F) no primeiro sistema deve ser continuamente igual ou superior a potência consumida pela carga (P_C). Caso seja superior, qualquer quantia excedente de potência, ou seja, além da necessária para manter o circuito, será desperdiçada.

Na segunda arquitetura, o nível de potência fornecido pela fonte pode ser inferior ao nível requisitado pela carga para se manter funcionando corretamente, desde que, haja energia armazenada para suprir essa diferença. Considerando E_0 como uma energia residual inicial acumulada, a Equação (1) a seguir define esse comportamento analisado em um período T .

$$E_0 + \int_0^T [P_F(t) - P_C(t)]dt \geq 0 \quad (1)$$

Essa equação considera uma unidade de armazenamento ideal, caso não seja essa a situação a ser analisada, deve-se considerar a perda de potência (P_P) do circuito, obtendo então a Equação (2).

$$E_0 + \int_0^T [P_F(t) - P_C(t) - P_P(t)]dt \geq 0 \quad (2)$$

Como visto, a arquitetura a ser utilizada depende da fonte e da carga que farão parte do projeto.

2.3 CARGA

A carga é o que irá consumir a energia fornecida pela colheita de energia. Pode ser um dispositivo, como um nó-sensor, que pode executar diferentes tarefas que consomem energias também distintas e específicas.

O uso de Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) permite prover monitoramento em grande escala e com alta resolução temporal e espacial por meio da distribuição de um grande número de nós sensores sem fio, geralmente de baixo custo e de baixo consumo, comunicando-se entre si via RF e operando colaborativamente (CORKE, 2010). Dessa forma, os dados coletados pelos nós sensores são encaminhados para um nó concentrador (que pode conter função de *gateway* para a Internet).

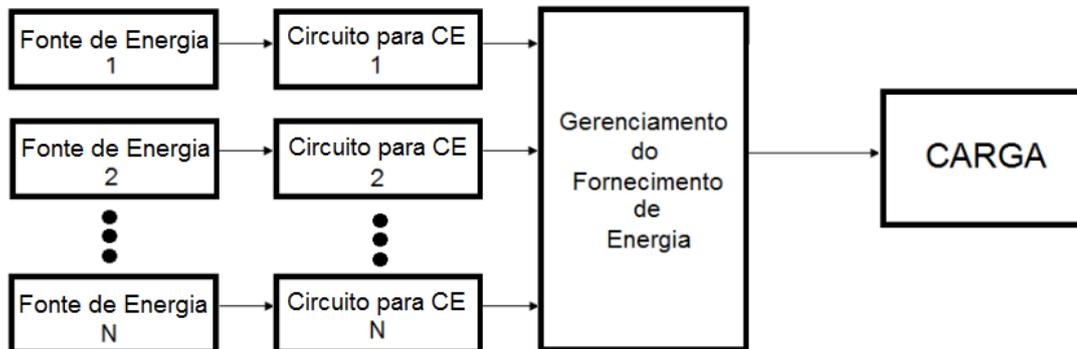
De acordo com o objetivo do trabalho, a carga a ser alimentada consiste de nós sensores de uma RSSF para monitorar o nível de poluição de uma avenida de uma cidade. Tendo em vista essa realidade, é necessário adaptar as funções exercidas pelo dispositivo de acordo com a energia disponível pelo sistema de colheita.

3 COLHEITA HÍBRIDA DE ENERGIA

3 COLHEITA HÍBRIDA DE ENERGIA

A colheita de energia híbrida é desenvolvida como uma alternativa para que as limitações de determinada fonte de energia não comprometam o sistema e, conseqüentemente, a aplicação. Os sistemas tradicionais de colheita de energia são alimentados por uma única fonte, como a solar, por exemplo. Entretanto, esses sistemas indesejavelmente são desligados caso não haja radiação luminosa, ou energia armazenada, suficiente para mantê-los funcionando. Logo, um sistema híbrido que utilize dois tipos distintos de fontes, como energia solar e piezoelétrica, por exemplo, em conjunto com uma interface de gerenciamento adequada, pode ser capaz de coletar de forma mais eficiente a energia e diminuir - ou até abolir - os efeitos causados pelas limitações do ambiente no sistema (CHOU, 2014). Ou seja, a colheita híbrida torna o sistema capaz de coletar a energia de mais de uma fonte disponível no ambiente e utilizá-la para alimentar a carga, como pode ser observado na Figura 6.

FIGURA 6 - SISTEMA DE COLHEITA HÍBRIDA DE ENERGIA.



Fonte: Elaborada pela autora.

Em muitos sistemas que utilizam tecnologias sem fio, como Redes de Sensores Sem Fio, o desempenho dos dispositivos de sensoriamento e dos circuitos de comunicação é de importância vital para alcançar o objetivo do sistema. A colheita híbrida de energia, utilizando múltiplas fontes de entrada, é considerada uma forma eficiente de melhorar a confiabilidade, disponibilidade e funcionalidade dos sistemas que se utilizam de colheita de energia para seu funcionamento (KANG, et al., 2015).

Além disso, o sistema pode ser desenvolvido para atuar em ambientes fechados, ou seja, onde as fontes de colheita de energia são ainda mais limitadas e a colheita híbrida mais necessária. De acordo com Randal e Jacot (2003), a intensidade da luz artificial obtida em ambientes fechados é apenas uma pequena fração da medida em ambientes externos expostos à luz solar, ou seja, dependendo da aplicação, a energia solar pode ser suficiente para alimentar o circuito, mas, em ambientes fechados, a luz artificial pode não fornecer o necessário de forma isolada (TAN e PANDA, 2011). Tendo em vista esses fatores, em ambientes fechados, a colheita de energia híbrida se torna ainda mais necessária, já que as poucas fontes disponíveis fornecem, muitas vezes, energia de forma mais limitada, logo a combinação de duas ou mais fontes ajuda a suprir a necessidade do sistema de se manter funcionando corretamente.

Diversos trabalhos estão sendo desenvolvidos com colheita híbrida utilizando duas fontes distintas de energia. Um sistema desenvolvido por Singh, *et al.* (2016) apresenta um circuito de colheita híbrida alimentado por energia captada através de células fotovoltaicas e TEGs (*Thermo-Electric Generators*, ou em português, geradores termoelétricos). O sistema utiliza uma antena refletora que reflete o máximo de radiação solar que sua estrutura possibilita para o painel solar. Essa capacidade do sistema é devido a possibilidade da parabólica se movimentar no sentido horário e anti-horário. Esse movimento é controlado por um Arduino UNO, que é uma plataforma aberta de *hardware*, usada pra controlar o tempo de movimentação da parabólica a partir do período de movimentação do sol. As células solares são utilizadas para alimentar a carga e o gerador termoelétrico para alimentar o Arduino UNO. Foi observado que esse sistema híbrido com uma parabólica móvel apresentou uma eficiência 152,02% maior que o sistema estático com colheita de energia por painel solar e uma eficiência de 38,65% maior que o sistema dinâmico com colheita exclusiva por painel solar.

Em Chou, *et al.* (2014), é apresentado um circuito que permite captar energia do ambiente por meio de células solares e transdutores piezoelétricos de forma híbrida. Ou seja, os sinais de saída dos transdutores de energia podem ser CC ou CA, respectivamente, e com uma variação de 0,2V a 1,7V quando combinados. Para alimentar o sistema, foi necessário retificar o sinal CA e transformar a saída fornecida pelo elemento piezoelétrico em CC. Para combinar as

duas potências contínuas geradas foi desenvolvido um circuito de capacitores chaveados. Por fim, para manter a tensão de saída entre 3V e 3,7V - faixa escolhida para alimentar outros circuitos - foi desenvolvido um conversor boost controlado por um circuito com *feedback* devido a faixa de variação das tensões de entrada. O método escolhido para controle foi a modulação por frequência de pulso (PFM, *Pulse Frequency Modulation*), que apresentou uma maior eficiência na transferência de energia para a carga em questão.

Uma solução para alimentar aplicações portáteis e aplicações em Internet das Coisas (do inglês *Internet of Things* - IoT) foi o chip desenvolvido em HSIEH, *et al.*, (2016). O circuito integrado é capaz de colher do ambiente energia solar e energia vibracional mecânica, e converter o sinal CA de saída em um sinal contínuo para alimentar a carga. É utilizado um diodo para evitar corrente reversa nos transdutores e evitar uma consequente perda de energia. Após isso, um conversor *Boost* é utilizado para a saída atingir um nível esperado e alimentar a carga. O trabalho faz um estudo das características de tensão e corrente de diferentes células fotovoltaicas. Com esses resultados, foi possível determinar um limite de tensão de referência que permita controlar o funcionamento do conversor *Boost* através de comparadores e assim equilibrar o armazenamento de energia e o seu consumo pela carga.

Há estudos que desenvolveram a colheita híbrida de energia a partir de uma única fonte de fornecimento. Em Khaligh, *et al.* (2010) e Tadesse, *et al.* (2010), foram desenvolvidas plataformas com estruturas mecânicas capazes de coletar energia de sistemas piezoelétrico e eletromagnético através da mesma fonte de fornecimento de energia vibracional. Nesse caso, a fonte de energia é a mesma, mas foram utilizados transdutores diferentes.

Um dos principais objetivos do estudo de colheita de energia híbrida é melhorar o desempenho dos circuitos nos quais estão inseridos, já que aumentará o nível de energia que lhes será fornecido para possibilitar a execução de suas tarefas. Para atingir tal objetivo, os tipos de fontes que serão utilizados para fornecer a energia necessária para o funcionamento da aplicação a ser desenvolvida são, muitas vezes, estudados individualmente. Daí então, são desenvolvidas técnicas com a intenção de extrair o máximo de energia que as fontes podem fornecer sob as determinadas condições de cada projeto.

Uma técnica utilizada por diversos estudos é a do MPPT (*Maximum Power Point Tracking*, que traduzindo significa Rastreador do Ponto de Máxima Potência), que analisa o comportamento de determinada fonte sob diferentes condições e determina os pontos onde a geração de energia apresenta melhor desempenho para entregar uma maior quantidade de energia ao sistema. O desenvolvimento desse estudo, permite a utilização de outros métodos para aprimorar o desempenho, como o método da tensão constante, utilizado em Hsieh, *et al.* (2016), que utiliza uma determinada tensão, obtida através dos estudos do MPPT, para comparação com a tensão que é fornecida em cada momento e o resultado dessa comparação controla a chave do conversor CC-CC do circuito.

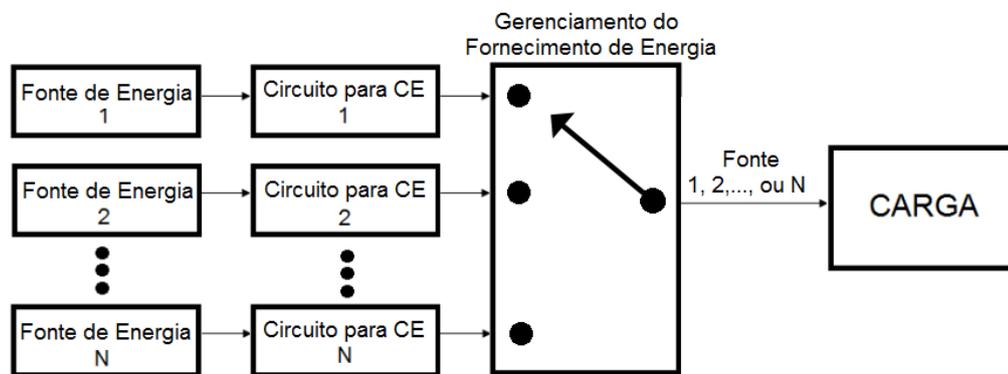
Os diversos estudos das fontes de energia, dos circuitos de conversão, de condicionamento e de armazenamento são de fundamental importância para o desenvolvimento das tecnologias de dispositivos eletrônicos de baixo consumo. O avanço dos estudos das técnicas de colheita de energia introduziu o conceito e desenvolvimento da colheita híbrida, e a evolução das pesquisas sobre colheita híbrida está possibilitando um crescente conhecimento dos conceitos sobre Somador de Energia, técnica que permite a colheita com maior eficiência das fontes do sistema de forma simultânea.

4 SOMADOR DE ENERGIA

A Colheita de Energia está se desenvolvendo cada vez mais e busca novas técnicas que aumentem a quantidade de energia entregue à carga. Existem diversos sistemas, vistos nos capítulos anteriores, que são projetados para colher de uma única fonte do ambiente ou, utilizando uma prática mais recente, colher energia de mais de uma fonte para alimentar a carga, ou seja, realizar a colheita híbrida de energia. A alta demanda de energia suprida por uma única fonte pode apresentar diversas desvantagens, por esse motivo, a utilização da colheita híbrida está ocupando um espaço cada vez maior no cenário atual (SINGH e PATTNAIK, 2016).

A colheita híbrida pode funcionar de duas formas distintas. Uma delas é fornecendo a energia colhida de uma fonte por vez à carga, ou seja, o sistema que controla o fluxo de energia para sustentar a carga funciona de forma análoga a um multiplexador, em que é possível ter diversas entradas e apenas uma é conectada a saída a cada instante, como ilustrado na Figura 7.

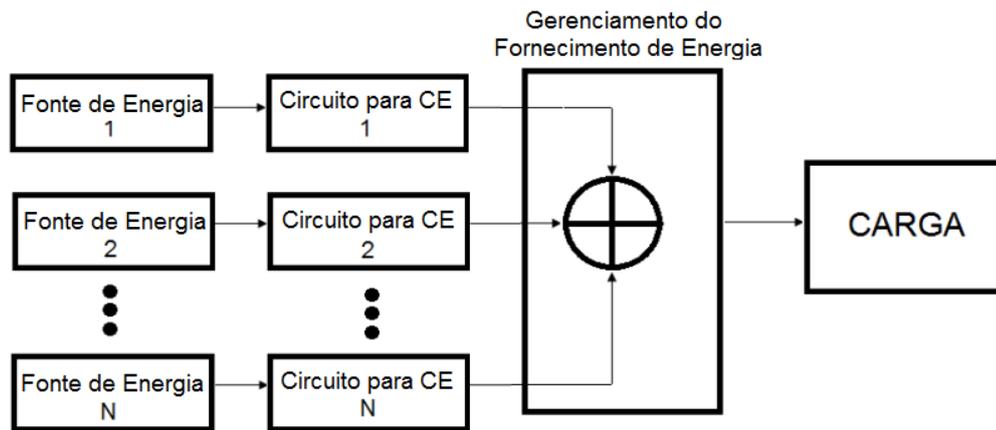
FIGURA 7 - SISTEMA DE COLHEITA HÍBRIDA COM ALIMENTAÇÃO EXCLUSIVA POR UMA FONTE A CADA MOMENTO.



Fonte: Elaborada pela autora.

A outra forma de colheita híbrida é permitindo que as fontes de energia forneçam corrente para a carga de forma simultânea, como ilustrado na Figura 8, e de modo que as fontes forneçam juntas mais energia que cada fonte individualmente ao longo do tempo.

FIGURA 8 - SISTEMA DE COLHEITA HÍBRIDA COM SOMA DE ENERGIA.



Fonte: Elaborada pela autora.

O objetivo do desenvolvimento de circuitos Somadores de Energia é utilizar a energia disponível pelas fontes que alimentam o sistema, sem desperdiçar energia que poderia ser aproveitada para manter o mesmo. Essa é uma vantagem em sistemas que trabalham com Colheita de Energia, já que muitas vezes, as fontes fornecem pouca energia e que, isoladamente, haveria a possibilidade dessa fonte não servir como fonte de sustentação do sistema por não prover a energia necessária, porém somada a outra fonte essa realidade poderia tornar-se possível. Logo, essa técnica amplia as possibilidades de fontes de energia do ambiente, abrangendo fontes que antes poderiam ser desconsideradas.

Para a hibridização de um sistema de colheita, o circuito de combinação da energia das fontes para a carga é de fundamental importância (SINGH e PATTNAIK, 2016), pois ele determinará como a colheita de energia será realizada e possibilitará ou a multiplexação ou a soma de energia. Algumas técnicas para somar a energia de diferentes fontes estão sendo desenvolvidas (ABDELHEDI, *et al.*, 2016; SINGH e PATTNAIK, 2016; TAN e PANDA, 2011).

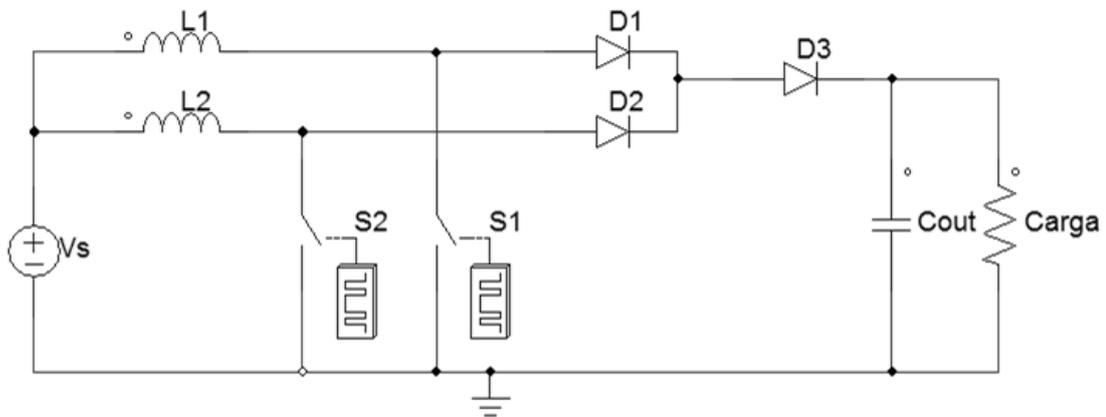
O estudo realizado por Abdelhedi, *et al.* (2016) busca uma forma eficiente e híbrida de alimentar um carro elétrico. O objetivo é encontrar um modelo eficaz de compartilhamento de energia entre dispositivos de armazenamento, como bateria e supercapacitores, com a carga em questão. O estudo visa explorar as principais vantagens que cada um desses componentes tem a oferecer, pois a bateria apresenta alta densidade de energia, mas baixa densidade de potência, além de uma vida útil limitada, ao contrário dos supercapacitores, que apresentam alta

densidade de potência, mas baixa densidade de energia e uma vida útil maior. Ou seja, as baterias são mais apropriadas para fornecer potência quando o sistema encontra-se estável e os supercapacitores para sustentar os picos de potência.

O sistema então utiliza conversores CC-CC para controlar o fluxo de potência entre os elementos do sistema e definir o nível de tensão na carga. O sistema de controle implementado para estabelecer o melhor compartilhamento de potência é realizado tanto para controle de tensão, do lado da bateria, para manter regulada a tensão de saída, quanto para controle de corrente no lado do supercapacitor, definindo uma corrente de referência, baseada na saída de um filtro passa-alta, que sai da carga. Logo, nesse instante, o supercapacitor fornece corrente e a bateria apenas fornece o restante necessário. Esse estudo é voltado para a soma de energia, não na área de colheita de energia, mas para um melhor desempenho dos componentes de armazenamento a partir do compartilhamento de energia baseado na análise da frequência de operação.

Outro estudo, realizado por Singh e Pattnaik (2016), também visou otimizar o compartilhamento de energia por dispositivos de armazenamento, como baterias e ultracapacitores. Esse estudo se desenvolveu de forma semelhante, porém com algumas distinções, como o filtro utilizado, que nesse caso foi um filtro passa-baixa, que define a operação da bateria e o restante da potência necessária, em momentos de picos e transientes, tem a corrente fornecida pelo capacitor. Outra diferença desse trabalho é a utilização de uma técnica de conversor CC-CC elevador do tipo intercalado do lado da bateria. Esse tipo de conversor pode ser observado na Figura 9. As chaves S1 e S2 são operadas com uma defasagem de 180° entre si. Esse tipo de conversor divide a corrente em dois indutores e serve para diminuir a ondulação das correntes de entrada e saída, o que possibilita diminuir o filtro de saída e aumentar a densidade de potência do circuito. Assim como o estudo anterior, esse trabalho visa aumentar o desempenho dos componentes de armazenamento do sistema, desenvolvendo, para isso, técnicas para combinação da energia fornecida entre eles.

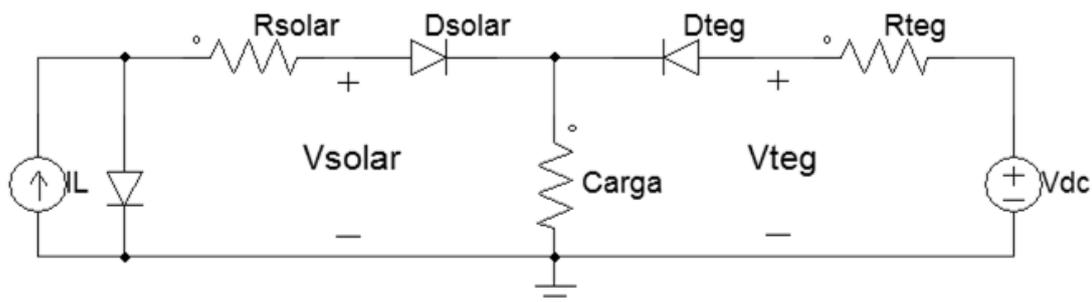
FIGURA 9 - CONVERSOR BOOST INTERCALADO.



Fonte: Adaptado de Singh e Pattnaik (2016).

Como pode ser observado, os dois estudos anteriores trabalham com conversores individuais para cada fonte de energia. Em oposição a isso, o sistema desenvolvido por Tan e Panda (2011) propõe uma forma de conectar mais de uma fonte para colheita de energia utilizando apenas um circuito de gerenciamento de potência que independe da quantidade de fontes de energia em questão. Para isso, as fontes de energia são conectadas à carga através de diodos para impedir a corrente reversa nas fontes, como pode ser observado na Figura 10.

FIGURA 10 - CIRCUITO BÁSICO PROPOSTO POR TAN E PANDA (2011) PARA COLHEITA HÍBRIDA DE ENERGIA.

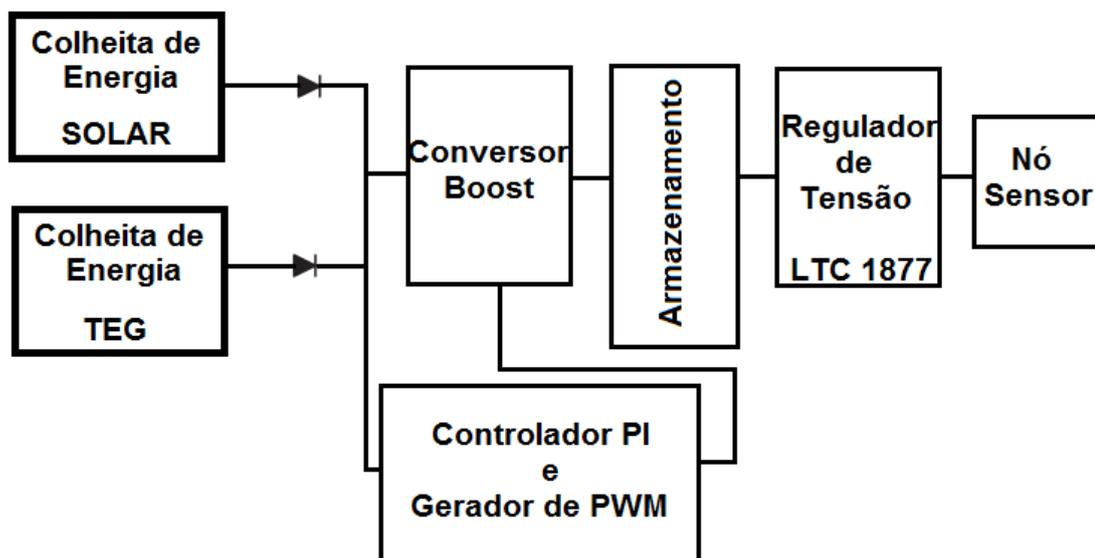


Fonte: Adaptado de Tan e Panda (2011).

Porém, antes de conectar as fontes à carga, deve haver o estágio de controle para manter os parâmetros da carga constantes mesmo com a variação da energia colhida na entrada. Para isso, a tensão de *feedback* da saída do circuito híbrido de colheita de energia é comparada com uma tensão fixa de 3,6V, que após estudos, foi a tensão onde ocorreu o melhor desempenho do sistema. A diferença da tensão resultante, que representa o erro da tensão de saída, é usada como entrada

de um controlador proporcional-integral (PI), que é embarcado em um microcontrolador de baixo consumo que gera um sinal PWM. Para manter o tamanho reduzido do sistema, o sinal PWM de baixa frequência gerado é convertido para um PWM de frequência elevada usado para controlar o conversor *Boost*. Na saída do *boost*, há um estágio com supercapacitor para armazenamento de energia. Por fim, após o supercapacitor, há um regulador de tensão, a partir de um CI da *Linear Technology*, que fornece uma tensão constante de 2,8V para operar um nó-sensor. Esse funcionamento é ilustrado na Figura 11.

FIGURA 11 - ESQUEMA DO CIRCUITO DESCRITO



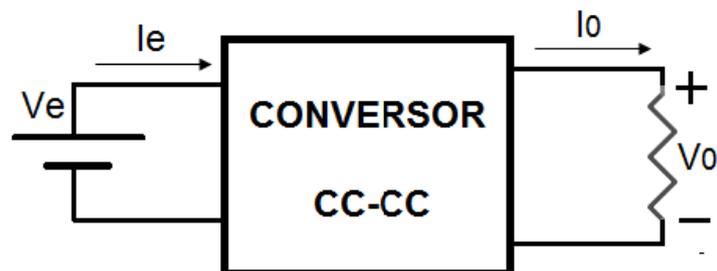
Fonte: Elaborada pela autora.

5 CONVERSOR CC-CC

Os sistemas eletrônicos modernos buscam cada vez mais fontes de alimentação que apresentem alta qualidade e eficiência, além de tamanho e peso reduzidos. Como forma de suprir essa necessidade, são implementados nos circuitos os conversores de tensão, capazes de manter os parâmetros de saída esperados, tendo disponíveis determinadas condições na entrada. Esses conversores apresentam perdas de potência pequenas ao longo do circuito, pois são constituídos de semicondutores de potência que operam em regime chaveado e alcançam uma alta eficiência. Os dispositivos de potência usados para chavear o circuito operam em alta frequência, o que possibilita redução de tamanho dos indutores e capacitores (RASHID, 2001).

Esses dispositivos de alta frequência são utilizados para projetos de sistema de conversão CC-CC. Conversores CC-CC podem ser definidos como circuitos capazes de controlar o fluxo de energia entre sua fonte de entrada, uma fonte de corrente contínua, e a carga conectada a sua saída, que é alimentada com esse mesmo tipo de corrente. Conversores CC-CC são constituídos por semicondutores de potência, operando ou completamente conduzindo ou completamente aberto, e por elementos passivos, como capacitores e indutores. Na Figura 12 é ilustrado o funcionamento básico de um conversor CC/CC, em que a fonte de entrada é representada por V_E e a tensão na carga à qual o conversor fornece energia é representada por V_0 (MARTINS e BARBI, 2006).

FIGURA 12 - ESTRUTURA SIMPLIFICADA DO CONVERSOR CC-CC.



Fonte: Adaptado de Martins e Barbi (2006).

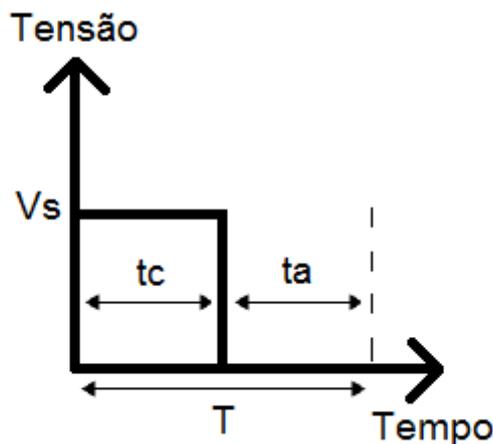
Além da conversão de uma tensão de entrada V_E em uma saída V_0 , o conversor CC-CC pode apresentar algumas vantagens como não depender do

comportamento da carga a ser alimentada, isolar a carga da fonte de entrada, além de manter a ondulação na tensão de saída dentro de um nível esperado (RASHID, 2001).

Os conversores CC-CC podem ter seu chaveamento controlado por um sinal modulado por largura de pulso (do inglês, *Pulse-Width Modulation* - PWM). Um conversor controlado por PWM apresenta alta eficiência, opera em frequência constante e possui fácil controle (RASHID, 2001).

O sistema de conversão CC-CC controlado por PWM possui uma variável de controle como entrada que tem sua razão conhecida como razão-cíclica (MARTINS e BARBI, 2006). Essa variável representa a relação entre o período de condução da chave, que pode ser dada por um transistor, e o seu tempo de comutação, ou seja, é o tempo percentual em que a chave se mantém fechada por período. A Figura 13 ilustra a forma de onda de controle do conversor em que V_s representa o sinal de comando que controla a chave, t_c é o tempo que a chave se mantém fechada, t_a o tempo que se mantém aberta e T o período total.

FIGURA 13 - FORMA DE ONDA PARA CONTROLE DO CONVERSOR CC-CC.



Fonte: Elaborada pela autora.

A razão cíclica (D), ou do inglês *duty-cycle*, do conversor é dada pela Equação (3).

$$D = \frac{t_c}{T} \quad (3)$$

Ainda de acordo com Martins e Barbi (2006), o rendimento de um conversor CC-CC é um fator importante a ser observado e é influenciado por diversos fatores, como as potências de trabalho, frequências de chaveamento e tecnologia de

fabricação, por exemplo. Em um conversor ideal, não existem perdas internas durante o processo de conversão e o rendimento teórico atinge 100% de eficiência. Entretanto, na prática, o rendimento de conversores CC-CC não-isolado varia entre 70% e 98%.

O ganho estático G de um conversor CC-CC é dado pela Equação (4) (MARTINS e BARBI, 2006).

$$G = \frac{V_0}{V_E} \quad (4)$$

Há diversos conversores estáticos CC-CC não isolados, mas alguns dos mais populares estão citados na TABELA 1 abaixo que relaciona o tipo do conversor com o seu ganho estático quando estão operando em modo de condução contínua.

TABELA 1 - TIPOS DE CONVERSORES CC-CC

Conversor	Ganho-estático
Buck	D
Boost	1/(1-D)
Buck-Boost	D/(1-D)
Cúk	D/(1-D)
Sepic	D/(1-D)

Fonte: Adaptado de Martins e Barbi (2006).

Dentre esses conversores, há os mais popularmente estudados, são eles os conversores *Buck*, *Boost* e o *Buck-Boost*. O conversor *Buck*, também conhecido como abaixador de tensão, é projetado para que forneça uma tensão de saída menor que a tensão de entrada, ou seja, que possa variar de zero ao valor da fonte de alimentação (HART, 1997).

Em casos onde a tensão de entrada é menor do que a necessária para suprir a carga, é necessário um conversor elevador, também chamado conversor *Boost*, para realizar o aumento do nível de tensão de saída. Em Colheita de Energia, esse tipo de conversor é muito utilizado, devido à pequena quantidade de energia que geralmente é colhida do ambiente e que gera tensões bastante baixas, logo, é necessário que seja utilizado o conversor Boost para tornar possível o aproveitamento de determinada fonte para alimentar uma carga.

Por fim, o conversor *Buck-Boost* serve para converter um nível de tensão contínua de entrada em uma saída de valor maior, menor ou igual e de polaridade oposta. Esse conversor une as características de entrada de um conversor do tipo *Buck* e de saída de um *Boost*. Logo, a sua principal característica é a possibilidade de um valor de saída maior ou menor que a tensão de alimentação, comportamento controlado pela razão cíclica (HART, 1997).

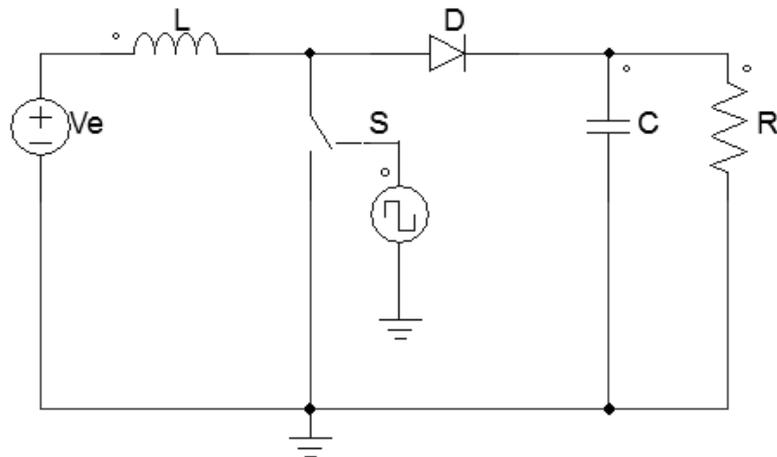
Como citado, será utilizado o conversor do tipo *Boost* no trabalho devido suas vantagens para a Colheita de Energia.

5.1 CONVERSOR BOOST

O conversor *Boost*, ou seja, o conversor elevador de tensão, faz com que a sua tensão de saída seja um valor maior que o valor da sua tensão de entrada. Esse tipo de conversor CC-CC é constituído de uma fonte de tensão de entrada V_E , um indutor L , uma chave S controlada por um sinal PWM, um diodo D , um capacitor C usado como filtro e uma carga, aqui representada por uma carga resistiva R (RASHID, 2001).

A utilização desses componentes não é exclusiva do conversor do tipo *Boost*. O conversor *Buck*, por exemplo, também utiliza os mesmos componentes, mas o que diferencia cada um é a forma como eles são dispostos no circuito. No *Boost*, a indutância está sempre em série com a fonte de alimentação de entrada e, assim, essa combinação em série se comportará como fonte de corrente. Já no conversor *Buck*, os componentes são dispostos de forma que a chave determina a ligação entre a fonte e o indutor, de forma que nem sempre estes estão conectados em série. (MARTINS e BARBI, 2006). A estrutura básica de um conversor Boost para uma carga resistiva pode ser observada na Figura 14.

FIGURA 14 - ESTRUTURA DO CONVERSOR CC-CC - TIPO BOOST.

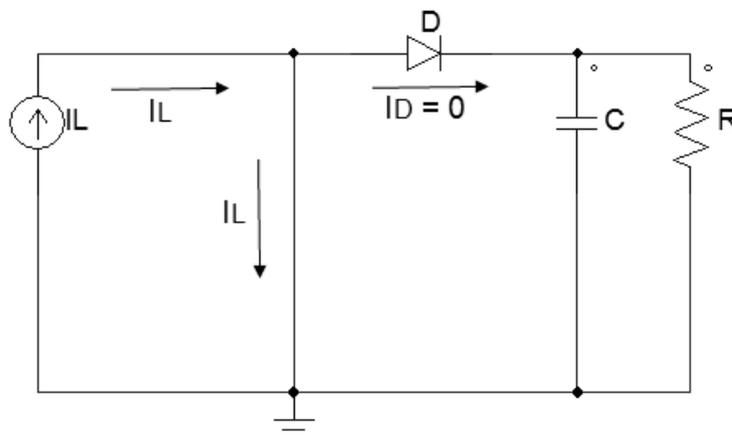


Fonte: Elaborada pela autora.

O funcionamento do conversor elevador de tensão pode ser dividido em duas etapas: a primeira quando a chave se encontra fechada e a segunda, o período em que a chave está aberta.

Considerando componentes ideais e que a fonte de alimentação e o indutor são equivalentes a uma fonte de corrente I_L na entrada, quando a chave está fechada, em um intervalo de tempo t_c , como pode ser observado na Figura 13, a corrente fornecida pela fonte magnetiza o indutor. O diodo D , polarizado reversamente nessa etapa, faz com que a fonte de alimentação se desconecte da carga. Nessa etapa, não circula corrente pelo diodo e a corrente que passa pela chave S é a mesma que atravessa o indutor. Esse comportamento pode ser observado na Figura 15.

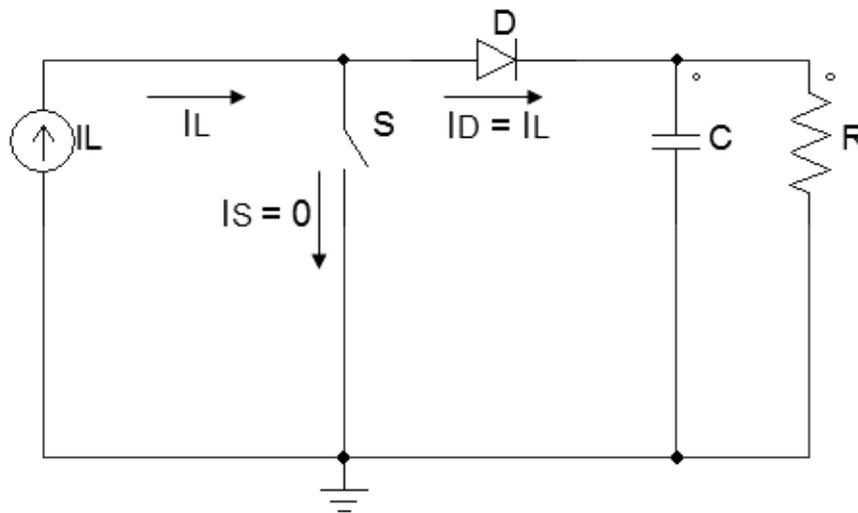
FIGURA 15 - COMPORTAMENTO DO CONVERSOR BOOST NO MOMENTO EM QUE A CHAVE ESTÁ FECHADA.



Fonte: Adaptado de Martins e Barbi (2006).

Na segunda etapa, a chave é aberta por um intervalo de tempo t_a e o diodo é polarizado diretamente permitindo a circulação de corrente por ele e fornecendo energia à carga. Nesse momento, a corrente que circula pelo diodo é a mesma do indutor. A carga recebe a energia proveniente do descarregamento do indutor e da fonte de entrada. O indutor desmagnetiza até que a chave feche novamente reiniciando o ciclo de funcionamento do conversor. O comportamento do conversor com a chave aberta está representado na Figura 16.

FIGURA 16 - FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR BOOST NO MOMENTO EM QUE A CHAVE ESTÁ ABERTA.



Fonte: Adaptado de Martins e Barbi (2006).

Ainda de Martins e Barbi (2006), foi retirado o desenvolvimento das equações do conversor analisadas na Seção 5.1.1.

5.1.1 Obtenção do Ganho Estático

Analisando o conversor Boost e considerando o sistema ideal, ou seja, sem perdas, a energia gerada pela fonte V_E é inteiramente recebida pela carga. A energia gerada pela fonte V_E (W_E) é obtida a partir da Equação (5) a seguir.

$$W_E = V_E \cdot I_L \cdot T \quad (5)$$

em que I_L é a corrente do indutor e T o período completo de operação da chave.

Considerando que a carga se comporta como uma fonte de tensão (V_o), a energia recebida pela fonte V_o (W_o) é calculada pela Equação (6).

$$W_o = V_o \cdot I_L \cdot t_a \quad (6)$$

em que t_a representa o tempo em que a chave permanece aberta, podendo ser substituída pela subtração do tempo em que a mesma esteve fechada (t_c) do período total T , resultando na Equação (7).

$$W_o = V_o \cdot I_L \cdot (T - t_c) \quad (7)$$

Portanto, igualando as Equações (5) e (7), tem-se que

$$\frac{V_o}{V_E} = \frac{T}{(T - t_c)}$$

e dividindo o numerador e denominador por T , é possível encontrar o ganho do conversor Boost sem perdas de acordo com a Equação (8).

$$\frac{V_o}{V_E} = \frac{1}{(1 - D)} \quad (8)$$

5.1.2 Operação em Condução Contínua

Na primeira etapa de funcionamento, quando a chave S está fechada, a corrente da fonte de entrada (i_E) é a mesma que percorre o indutor (L) e pode ser calculada pela Equação (9). Toda a tensão de entrada é aplicada sobre L e a corrente no diodo será nula.

$$i_E = i_L = I_m + \frac{V_E}{L} \cdot t \quad (9)$$

Sabendo que, no instante em que a chave fecha, a corrente possui seu valor mínimo I_m e cresce linearmente enquanto a chave está fechada até atingir seu valor máximo I_M , a corrente será máxima ao fim do tempo em que a chave estiver fechada. Logo substituindo t por t_c na expressão acima:

$$I_M = I_m + \frac{V_E}{L} \cdot t_c$$

Isolando a tensão de entrada V_E na equação anterior e sendo $t_c = D \cdot T$, tem-se que:

$$V_E = \frac{(I_M - I_m) \cdot L}{D \cdot T} \quad (10)$$

Logo, a variação da corrente de entrada pode ser dada pela Equação

$$\Delta I_E = I_M - I_m = \frac{V_E \cdot D}{L \cdot f} \quad (11)$$

em que $f=1/T$ é a frequência de operação da chave.

Na segunda etapa, ao abrir a chave, a corrente que percorre o diodo será a mesma da fonte e indutor. A tensão sobre este último, considerando o diodo ideal, é a diferença entre a tensão na carga (V_o) e a tensão de alimentação (V_E). A corrente no diodo pode ser calculada pela Equação (12).

$$i_D = i_E = i_L = I_M - \frac{(V_o - V_E)}{L} \cdot t \quad (12)$$

No momento em que a chave abre, a corrente está com seu valor máximo e decresce linearmente até atingir o mínimo. Com a chave aberta, substitui-se o t por t_a e obtém-se a Equação (13).

$$I_m = I_M - \frac{(V_o - V_E)}{L} \cdot t_a \quad (13)$$

A corrente média de saída I_o pode ser calculada a partir da corrente média no diodo, que é dada pela Equação (14).

$$I_o = \frac{1}{T} \int_0^T i_{D(t)} dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_a} \left[I_M - \frac{(V_o - V_E)}{L} t \right] dt \quad (14)$$

Ao resolver a equação acima, obtém-se a Equação (15)

$$I_o = \frac{(I_M + I_m) \cdot (1 - D)}{2} \quad (15)$$

e a partir dessa equação, pode ser encontrada a corrente média de entrada, que é também a corrente média no diodo, em função da corrente média de saída, como pode ser visto na Equação (16).

$$I_{LMED} = \frac{(I_M + I_m)}{2} = \frac{I_o}{(1 - D)} \quad (16)$$

Por fim, o valor da ondulação de saída depende do capacitor de saída selecionado, pela Equação (17).

$$i_C(t) = \frac{C \cdot dv_C(t)}{dt} \quad (17)$$

Durante o intervalo de tempo t_c , no qual a chave está fechada, o capacitor deve alimentar a carga com uma corrente I_o , logo pode ser obtida a Equação (18).

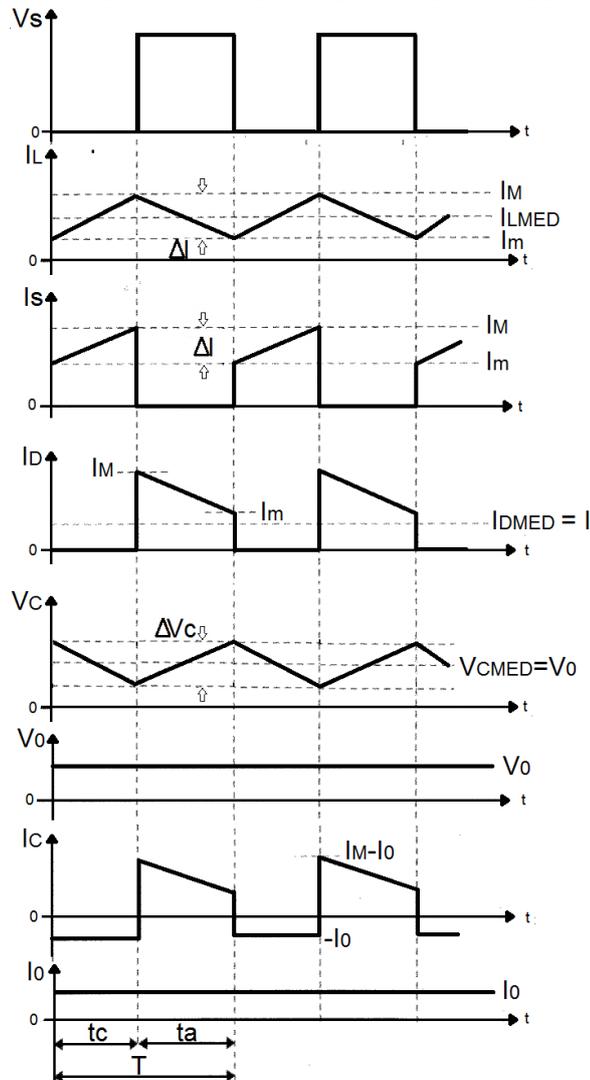
$$I_o = \frac{C \cdot \Delta V_C}{t_c} \tag{18}$$

Desenvolvendo a Equação 18 e substituindo t_c por $T \cdot D$, é, por fim, obtida a Equação (19) que determina a ondulação de tensão na carga.

$$\Delta V_C = \frac{D \cdot I_o}{C \cdot f} \tag{19}$$

As principais formas de onda do conversor Boost podem ser observadas na Figura 17.

FIGURA 17- FORMAS DE ONDA CARACTERÍSTICAS DO CONVERSOR BOOST.



Fonte: Adaptado de Martins e Barbi (2006).

6 CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA HÍBRIDO: PROPOSTA E DESENVOLVIMENTO

Este trabalho tem como objetivo principal a realização de estudos e o desenvolvimento de um sistema de colheita híbrida de energia capaz de somar a energia oriunda de duas ou mais fontes disponíveis para uso. O projeto visa desenvolver um esquema genérico de sistema híbrido, que possa ser adaptado para o tipo e quantidade desejados de fontes de energia de entrada, ou seja, que possa ser adaptado para cada fonte em específico.

O elemento base para o sistema de colheita híbrida de energia proposto é o circuito somador de energia que foi desenvolvido utilizando conversores CC-CC para adaptar/regular a entrada de cada fonte de energia aos parâmetros requeridos pela carga do sistema, pois para definir os componentes do conversor a ser utilizado, é necessário o conhecimento de tais parâmetros de saída.

Inicialmente, foi desenvolvido um conversor CC-CC do tipo *Boost*, conforme parâmetros definidos na Tabela 1, para cada fonte de energia individualmente para ser possível, em seguida, comparar o funcionamento do sistema de colheita de uma única fonte com o sistema de colheita híbrida para soma das fontes de energia.

TABELA 2 - PARÂMETROS PARA DESENVOLVIMENTO DO CONVERTOR.

Parâmetros	Valores
Tensão de saída (Vo)	3,3 V
Frequência	5 kHz
Ondulação da corrente do indutor	1 mA
Ondulação da tensão de saída	2% * Vo
Carga	1 kΩ

Fonte: Elaborado pela autora.

Dessa forma, foi definido para o conversor *Boost* para cada fonte individual os seguintes parâmetros: tensão de saída de 3,3 V na carga operando em condução contínua para alimentar um possível microcontrolador e uma fonte de energia de entrada de 2,5 V. Com essas condições é possível definir a razão cíclica do conversor a partir da Equação (8).

$$\frac{V_0}{V_E} = \frac{1}{1 - D}$$

em que V_0 é a tensão de saída, V_E é a tensão de entrada e D é a razão cíclica do conversor. Logo, tem-se que a razão cíclica deve ser:

$$D = 0,24$$

Para uma carga $R = 1k\Omega$, a corrente média no indutor, dada pela Equação (16), resulta em:

$$I_{LMED} = 4,3 \text{ mA}$$

Definido esse parâmetro, deve-se definir os valores do indutor e capacitor, tendo em vista que a frequência de chaveamento escolhida é $f = 5 \text{ kHz}$ e o ondulação de corrente no indutor $\Delta I = 1 \text{ mA}$. Logo, o valor da indutância pode ser calculado a partir da Equação (11), obtendo-se a Equação (20) a seguir.

$$L = \frac{V_E \cdot D}{\Delta I \cdot f} \quad (20)$$

$$L = 120 \text{ mH}$$

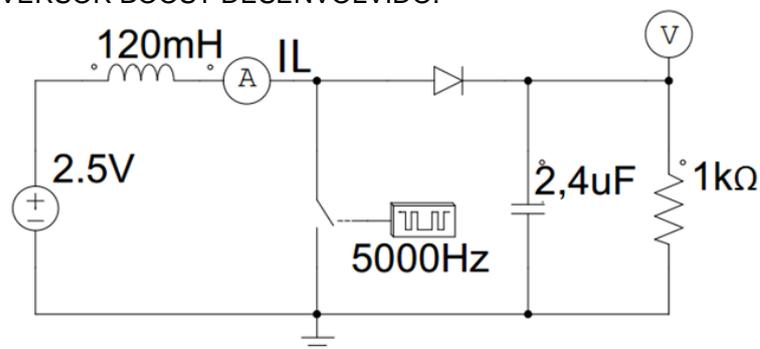
Por fim, para definir o valor do capacitor, é necessário saber a ondulação de tensão desejada na carga. Logo, para uma ondulação de 2% de V_0 , ou seja, 66 mV, tem-se, de acordo com a Equação (19), que:

$$C = \frac{I_0 \cdot D}{\Delta v_C \cdot f}$$

$$C = 2,4 \text{ } \mu\text{F}$$

Os parâmetros do conversor definidos acima foram simulados no ambiente simulacional PSIM, que é um software de simulação eletrônica que permite a análise desse tipo de circuito. O conversor pode ser observado na Figura 18.

FIGURA 18 - CONVERSOR BOOST DESENVOLVIDO.

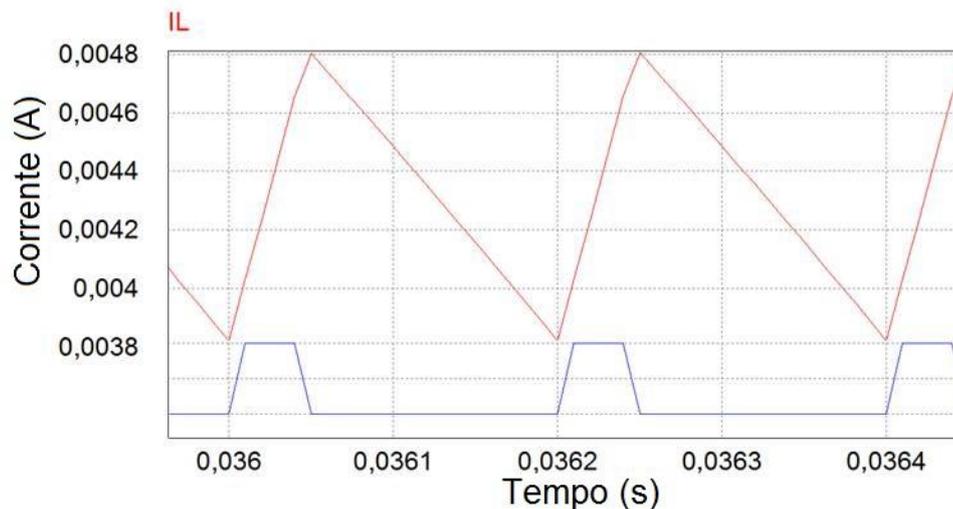


Fonte: Elaborada pela autora.

Os resultados alcançados na simulação podem ser observados nas Figuras 19, 20 e 21, em que na Figura 19 é apresentada a corrente no indutor de acordo

com a razão cíclica do circuito e pode-se observar sua ondulação dentro dos parâmetros calculados.

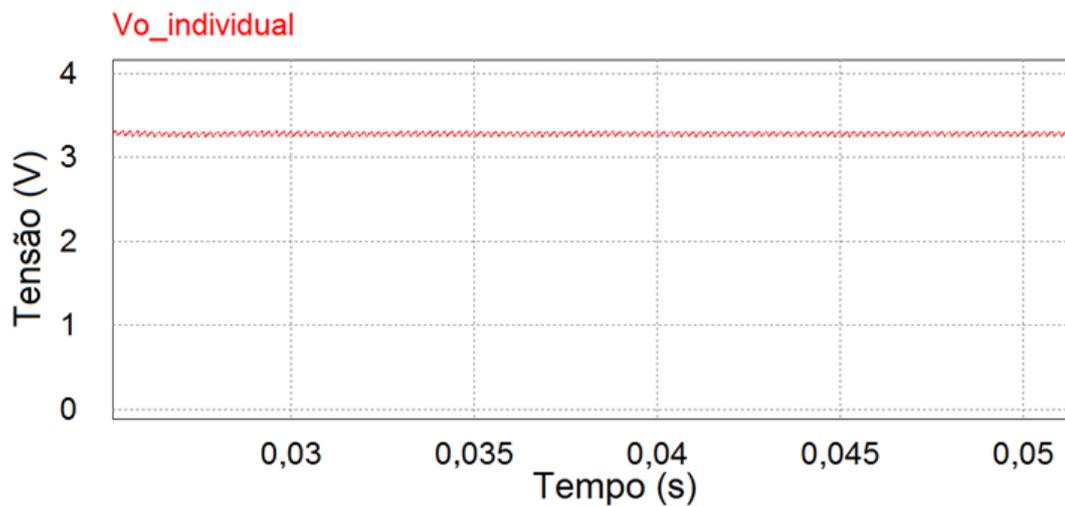
FIGURA 19 - CORRENTE NO INDUTOR DO CONVERSOR.



Fonte: Elaborada pela autora.

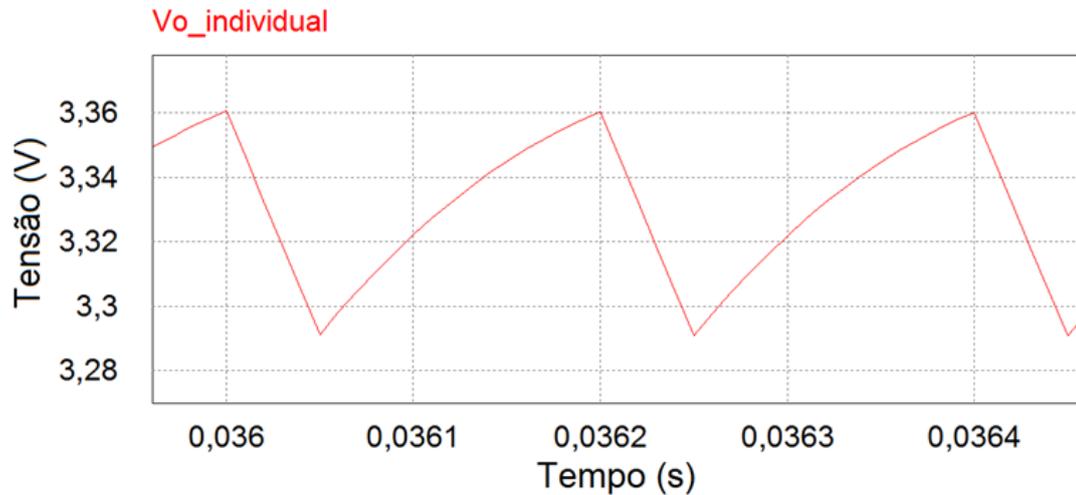
Na Figura 20 e na Figura 21 são apresentadas a tensão de saída do conversor e uma imagem mais detalhada para análise do valor da sua ondulação, respectivamente.

FIGURA 20 - COMPORTAMENTO DA TENSÃO DE SAÍDA DO CONVERSOR.



Fonte: Elaborada pela autora.

FIGURA 21 - DETALHE DA ONDULAÇÃO DA TENSÃO DE SAÍDA DO CONVERSOR.

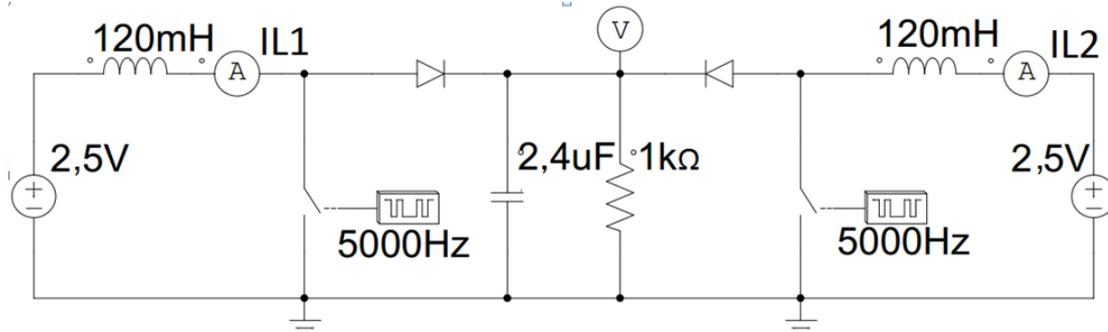


Fonte: Elaborada pela autora.

6.1 CIRCUITO SOMADOR PROPOSTO

Tendo definido os parâmetros do conversor para garantir as condições necessárias na carga, será analisado um circuito somador para a proposta de colheita híbrida de energia. Para o sistema híbrido genérico, serão unidos conversores CC-CC do tipo *Boost*, escolhido pelas condições especificadas na carga, em paralelo. Esses conversores foram utilizados devido as características de armazenamento de energia e condições de saída fixas e pré-determinadas. O sistema de colheita híbrida para as condições de carga descritas acima está ilustrado na Figura 22.

FIGURA 22 - CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA COM PARÂMETROS IGUAIS.

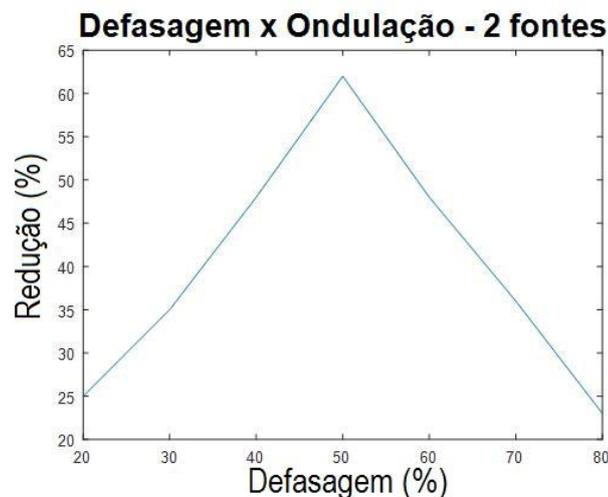


Fonte: Elaborada pela autora.

As razões cíclicas dos dois conversores são iguais, porém a defasagem entre eles foi definida de modo que fosse obtida a maior eficiência na redução da

ondulação de saída. Ao analisar o comportamento da redução da ondulação de saída em relação a defasagem entre os sinais de controle das chaves, foi possível observar o seguinte resultado, ilustrado na Figura 23, para um circuito com duas fontes e razão cíclica de 0,2. O eixo das ordenadas indica a redução da saída e o das abscissas, a defasagem de uma das fontes em relação a origem, com a outra mantida fixa com uma defasagem de 0°.

FIGURA 23 - REDUÇÃO DA ONDULAÇÃO DO SINAL DE SAÍDA EM FUNÇÃO DA DEFASAGEM ENTRE OS SINAIS DE CONTROLE



Fonte: Elaborada pela autora.

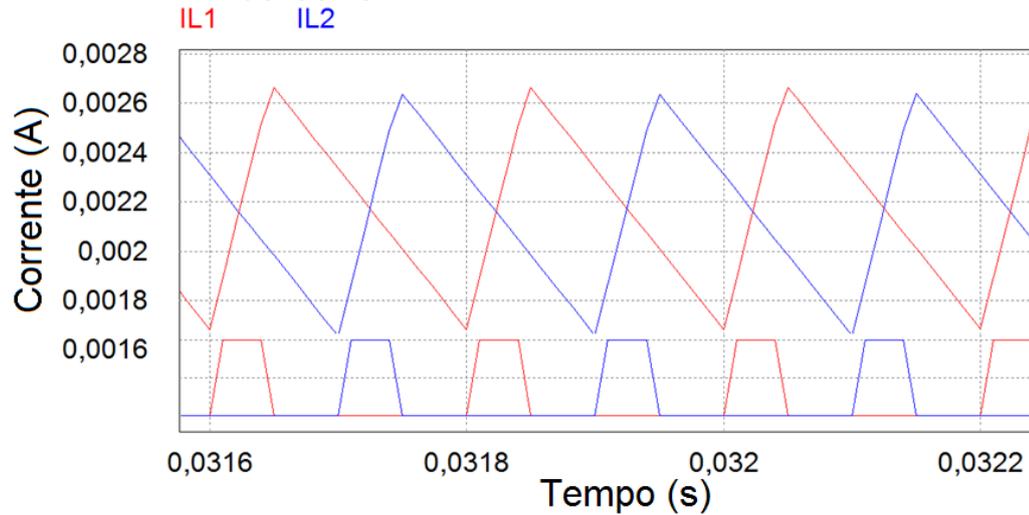
Com esse gráfico, é possível observar que para duas fontes, a maior redução ocorre em uma defasagem de 180°. O estudo para mais de duas fontes apresentou mesmo padrão, onde a maior redução da ondulação de saída ocorreu em uma defasagem percentual (def), de acordo com a Equação (21):

$$\text{def} = \frac{100}{M} \quad (21)$$

Sendo M o número de fontes de energia em questão.

Utilizando os sinais de controle das chaves com mesmo valor de razão cíclica e defasados entre si de 180°, o comportamento das correntes que percorrem os indutores pode ser observado na Figura 24.

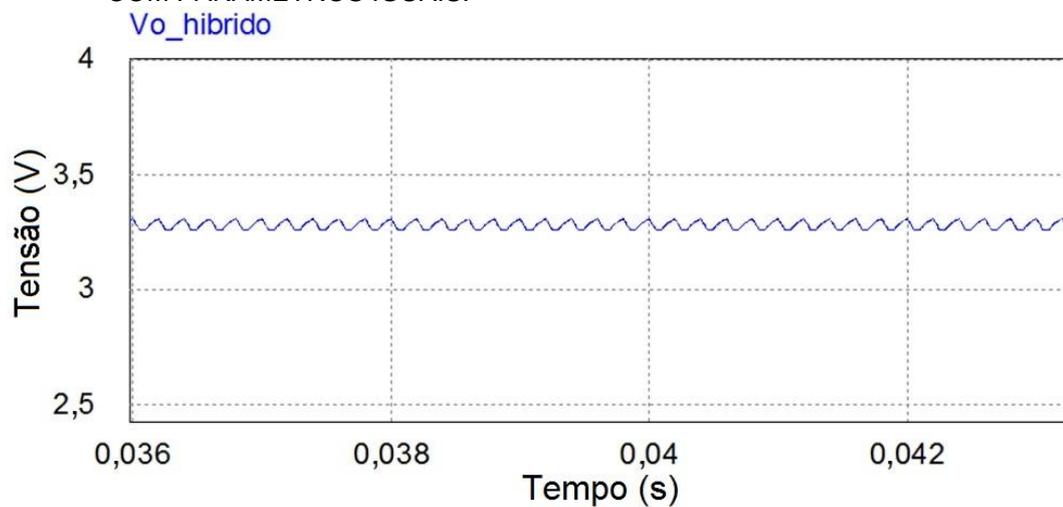
FIGURA 24 - CORRENTES NOS INDUTORES DO CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA COM PARÂMETROS IGUAIS.



Fonte: Elaborada pela autora.

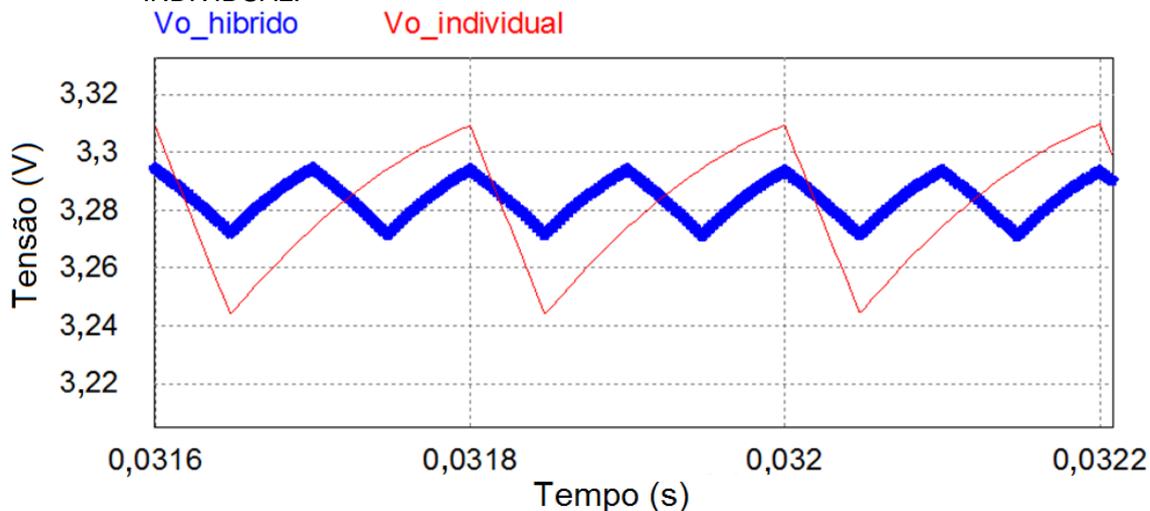
O resultado da tensão de saída obtida sobre a carga pode ser observado na Figura 25 e a comparação da ondulação de saída do circuito somador com a do circuito individual na Figura 26.

FIGURA 25 - COMPORTAMENTO DA TENSÃO DE SAÍDA DO CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA COM PARÂMETROS IGUAIS.



Fonte: Elaborada pela autora.

FIGURA 26 - DETALHE DA ONDULAÇÃO DA TENSÃO DE SAÍDA DO CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA COM PARÂMETROS IGUAIS COMPARADA COM A DO CIRCUITO INDIVIDUAL.



Fonte: Elaborada pela autora.

Dessa forma, o circuito híbrido para soma de energia permite que as duas fontes distintas alimentem a carga, permanecendo com as mesmas condições médias de saída de um conversor único, mas com uma menor ondulação da tensão, aproximadamente 23mV, e, conseqüentemente, da corrente de saída. Houve uma redução de aproximadamente 65% na ondulação de saída. Foram realizadas simulações com diferentes valores de carga e essa diminuição percentual se manteve. O circuito somador de energia mostrado foi analisado com os dois conversores iguais, mas essa condição nem sempre é verdadeira. Então foi analisado também o comportamento quando um conversor apresenta características diferentes do outro, considerando apenas duas fontes de energia de entrada. Nesse caso, considerando que as fontes de energia possuem mesmo valor, será considerado que um dos conversores possui seu *duty-cycle* reduzido, agora sendo $D=0,20$. A tensão de saída do conversor com *duty-cycle* de 20%, analisado individualmente será:

$$\frac{V_0}{V_E} = \frac{1}{1 - D}$$

$$V_0 = 3,1 \text{ V}$$

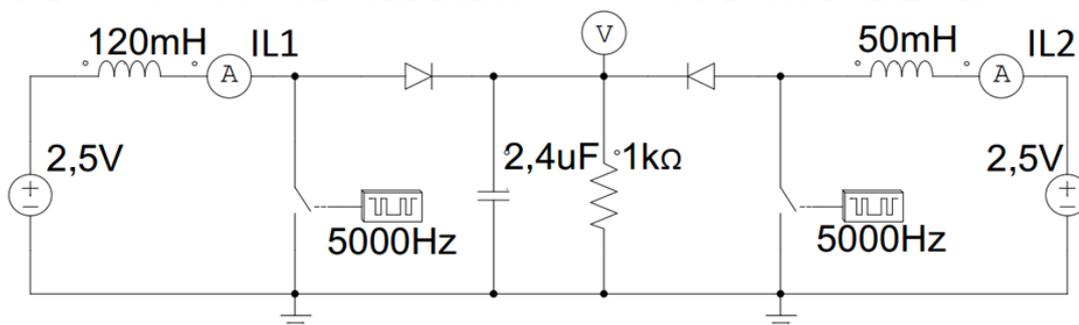
Nesse caso, a saída continuará com suas características requeridas, pois o conversor que apresenta maiores valores de saída irá prevalecer com suas

condições na carga. Logo, os valores de tensão e corrente de saída serão determinados pelo conversor controlado pelo sinal com $D = 0,24$.

O outro conversor, não atenderá às condições de operação em modo de condução contínua, logo, funcionará em condução descontínua e será necessário aumentar a ondulação de corrente no indutor aumentando o seu valor máximo, já que o valor mínimo de corrente no indutor será zero, e assim, aumentar a influência desse conversor sobre a carga.

Logo, considerando o conversor de razão cíclica com $D=0,20$, para um mesmo valor de frequência, o valor da indutância deverá diminuir para que o valor máximo da corrente no indutor aumente. Foi determinado então um valor máximo de 2mA para o outro circuito, logo um indutor de 50mH foi selecionado. O circuito híbrido para essas condições determinadas está ilustrado na Figura 27.

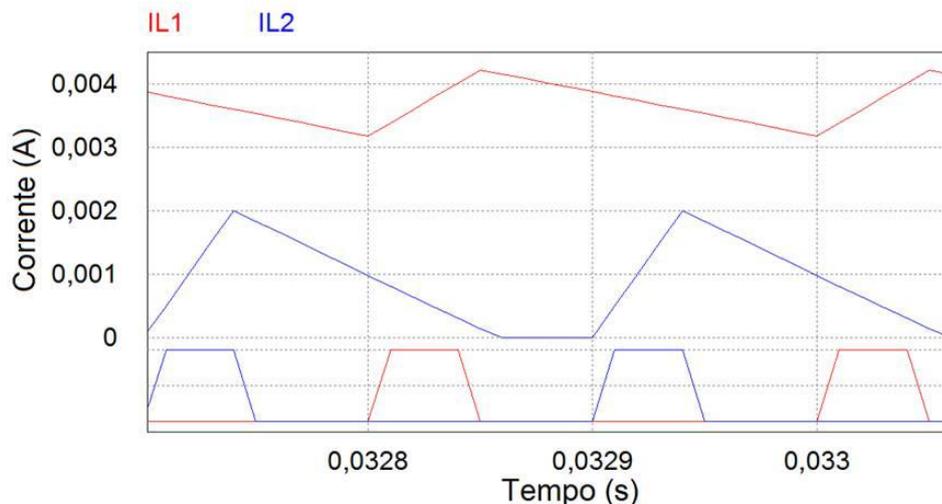
FIGURA 27 - CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA COM PARÂMETROS DIFERENTES.



Fonte: Elaborada pela autora.

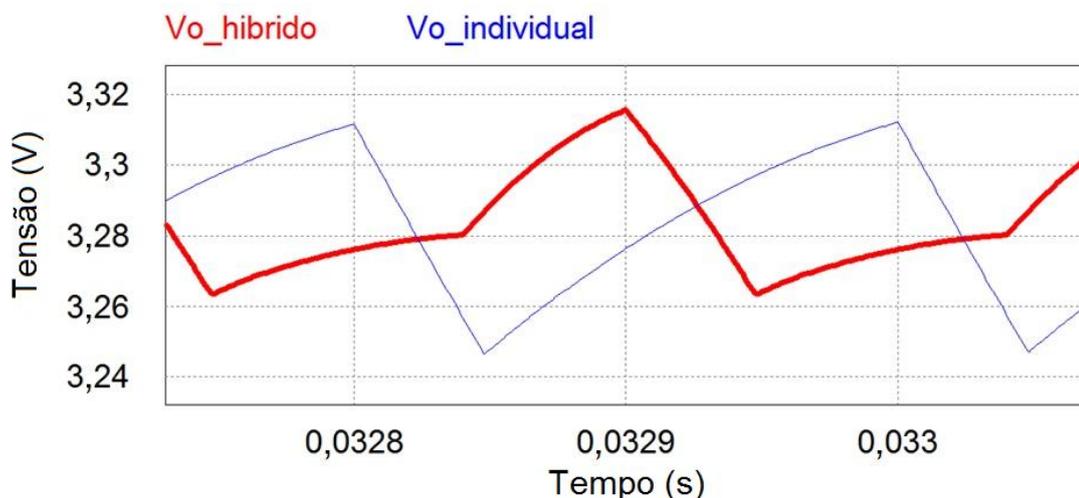
Os resultados da simulação do circuito somador com diferentes razões cíclicas podem ser observados nas figuras a seguir, sendo as correntes dos indutores apresentadas na Figura 28 e a comparação da saída do circuito único (sinal de cor azul - linha fina) com a saída do circuito híbrido (sinal de cor vermelha - linha grossa) pode ser observada na Figura 29.

FIGURA 28 - CORRENTES NOS INDUTORES DO CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA COM PARÂMETROS DIFERENTES.



Fonte: Elaborada pela autora.

FIGURA 29 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO DE SAÍDA DO SISTEMA ÚNICO COM O SISTEMA SOMADOR DE ENERGIA.



Fonte: Elaborada pela autora.

6.2 MODELAMENTO MATEMÁTICO

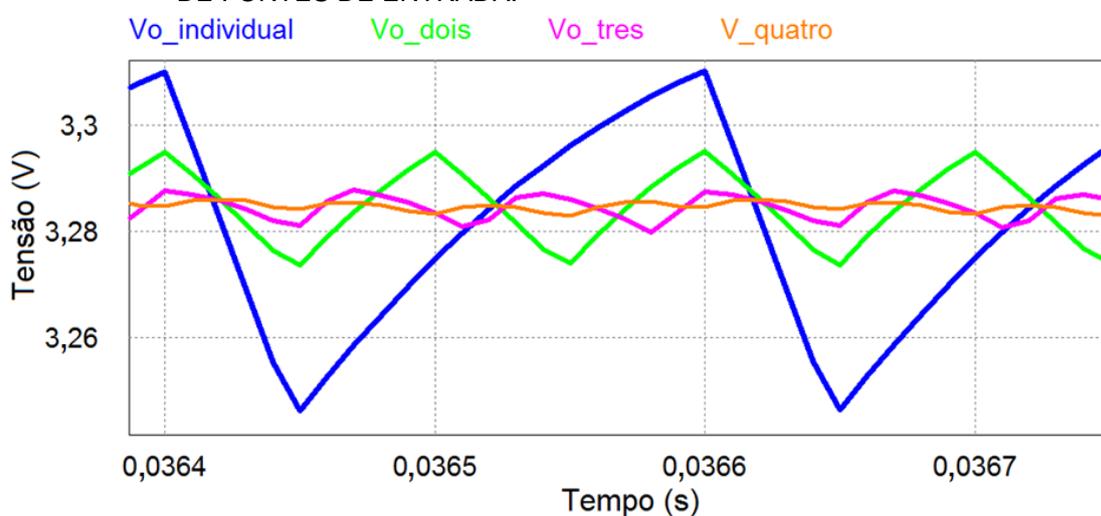
Foi realizado um estudo para desenvolver um modelo matemático que permitisse determinar o valor de redução da ondulação do sinal de saída do circuito somador, levando em consideração a quantidade de fontes e a razão cíclica com a qual os conversores estão atuando para o circuito com parâmetros iguais.

Inicialmente, foram analisados os valores da redução obtidos ao simular o circuito descrito na Figura 18. Em seguida, foi acrescentado um circuito semelhante a esse para constituir o circuito somador com duas fontes, de acordo com o exposto

na Figura 22. De modo análogo, foi simulado por fim o circuito somador para três e quatro fontes de energia. Foi simulado para essa quantidade de fontes, pois considerando o valor de defasagem para obter o ponto de maior redução, o valor máximo de fontes para um duty cycle de 24% é de 4 fontes.

O valor da redução de cada um dos circuitos simulados pode ser comparado na Figura 30, onde $V_{o_individual}$ representa a saída do conversor para uma única fonte de entrada, V_{o_dois} para duas fontes e assim sucessivamente.

FIGURA 30 - SINAIS DE SAÍDA DO CIRCUITO SOMADOR PARA DIFERENTES QUANTIDADES DE FONTES DE ENTRADA.



Fonte: Elaborada pela autora.

A redução percentual em função do número de fontes para o gráfico da Figura anterior pode ser observada na Tabela 3.

TABELA 3 - RELAÇÃO PERCENTUAL DA REDUÇÃO DA ONDULAÇÃO DE SAÍDA COM O NÚMERO DE FONTES DE ENTRADA

Nº de Fontes	Redução (%)
2	65
3	88
4	96

Fonte: Elaborada pela autora.

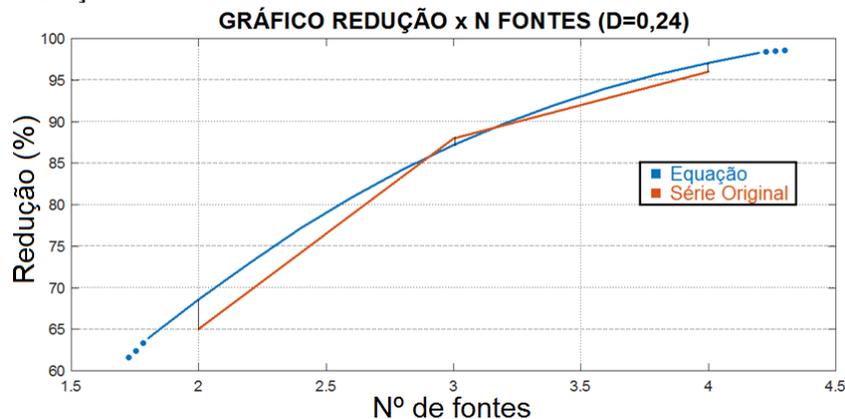
Esse estudo comparativo foi realizado para diferentes quantidades de fontes e de razões cíclicas e assim, realizada uma análise dos padrões dos resultados. Foi

observado um comportamento sigmoide para as curvas encontradas e então desenvolvida a Equação (22) a seguir para modelar esse comportamento:

$$f = \frac{1}{1 + \exp(-x + 1,4)} + (DC - 0,2) \quad (22)$$

em que x representa o número de fontes e DC a razão cíclica de controle do circuito. A equação é válida para $x \leq \frac{1}{DC}$, conforme delimita o ponto de maior eficiência pela Equação (21). O resultado obtido pela equação pode ser comparado com o esperado, encontrado pela simulação, e os valores referentes aos dois resultados podem ser observados na Figura 31, que representa a relação da redução com o número de fontes para um *duty cycle* (DC) de 24%.

FIGURA 31 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS POR SIMULAÇÃO E ATRAVÉS DA EQUAÇÃO PARA UM DC DE 24%



Fonte: Elaborada pela autora.

Ao testar a equação para diferentes parâmetros, foi concluído que o erro encontrado ao utilizar a equação se manteve abaixo de 10%.

6.3 CIRCUITOS DE COLHEITA INDIVIDUAL DE ENERGIA

O sistema de colheita híbrida de energia proposto utiliza circuitos integrados (CIs), desenvolvidos pela *Linear Technology* (LT), que são capazes de realizar a colheita de energia de diferentes fontes e o controle do valor da tensão de saída de forma bastante eficiente, e assim serem usados como fontes de entrada individuais do circuito somador de energia.

Para cada tipo de fonte de colheita de energia, há um CI específico a ser utilizado, compatível com os níveis de energia de entrada que cada fonte primária de

energia pode fornecer. O funcionamento dos CIs que farão parte do projeto, de acordo com os *datasheets* da LT, será detalhado nas Seções 6.4, 6.5 e 6.6.

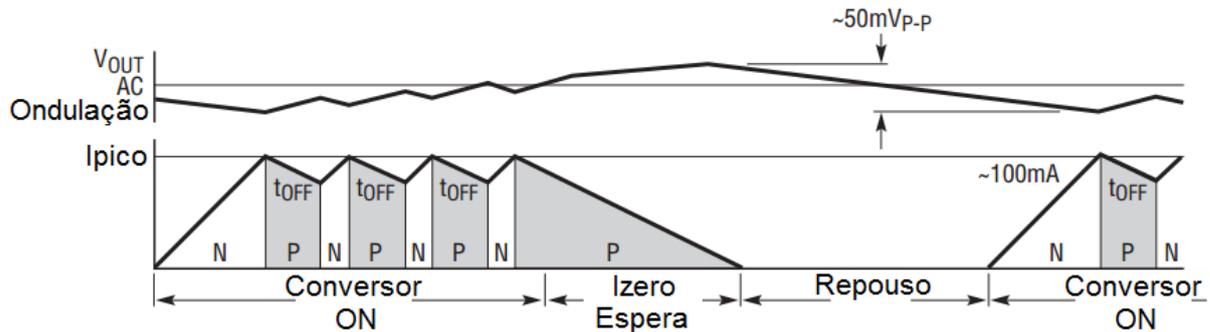
6.4 COLHEITA DE ENERGIA SOLAR

A LT desenvolveu um CI, denominado de LTC3459, que integra um conversor *Boost* síncrono de alta eficiência e funciona com baixas correntes de entrada. O LTC3459 opera com entradas de 1,5 V a 5,5 V e a tensão de saída pode ser definida externamente por resistores conectados ao CI e pode variar entre 2,5 e 10 V.

O LTC3459 utiliza uma técnica de controle para atingir uma alta eficiência, a saber. É utilizado um comparador com precisão de 2,5% para monitorar a tensão de saída. A tensão de saída é determinada a partir da relação de dois resistores (R_{b1} e R_{b2}) conectados a saída do CI e a entrada do comparador (FB). Se a tensão de saída (V_{out}) estiver estabelecida acima do limiar considerando a tensão de saída escolhida, não há chaveamento do conversor e apenas uma corrente baixa, de repouso, de $10\mu\text{A}$ é drenada da fonte. Se a tensão de saída atingir um nível abaixo do limiar de tensão de saída definido, o chaveamento começa e o conversor volta a recarregar o capacitor de saída.

Um indutor conectado ao CI define o valor da corrente de pico. A corrente do indutor cresce linearmente até o valor da corrente de pico definida, no tempo denominado t_{ON} , através de um MOSFET do tipo N conectado do indutor ao GND. Quando a corrente de pico é atingida, um MOSFET do tipo P conecta o indutor à saída, por um período de tempo t_{OFF} , no qual entrega energia à carga. Quando o nível esperado de saída é atingido, a corrente decresce até atingir o nível de repouso de $10\mu\text{A}$ e o CI entra nesse modo até o momento em que o nível da tensão de saída torna-se mais baixo que o limiar determinado pelos resistores externos, quando o chaveamento recomeça. Esse comportamento pode ser observado pelas formas de onda da Figura 32.

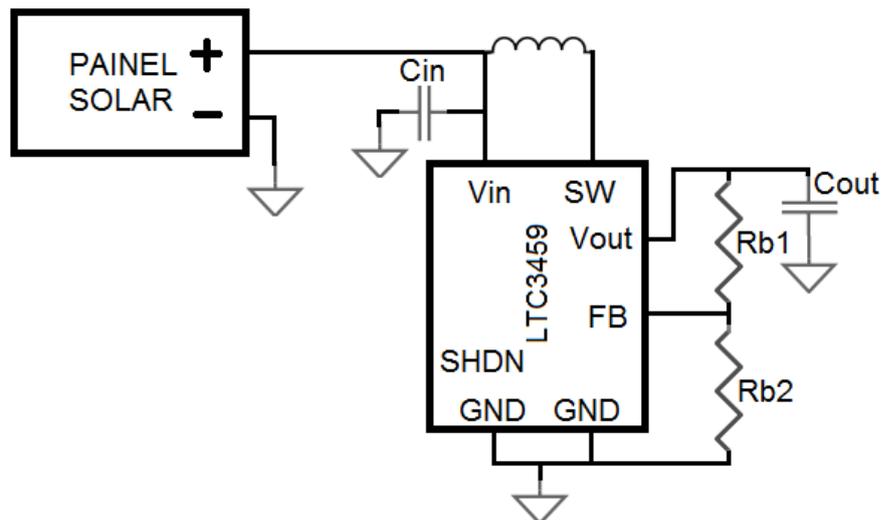
FIGURA 32 - COMPORTAMENTO DO CI QUANTO À SAÍDA E FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR



Fonte: Linear Technology (Datasheet LTC3459).

Dessa forma, o CI funciona com apenas dois resistores, dois capacitores, sendo um de entrada e um de saída, e um indutor, sendo esses os componentes externos necessários para finalizar o desenvolvimento do conversor *Boost*. Como pode ser visto na Figura 33.

FIGURA 33 - ESQUEMÁTICO PARA UTILIZAÇÃO DO CI LTC3459



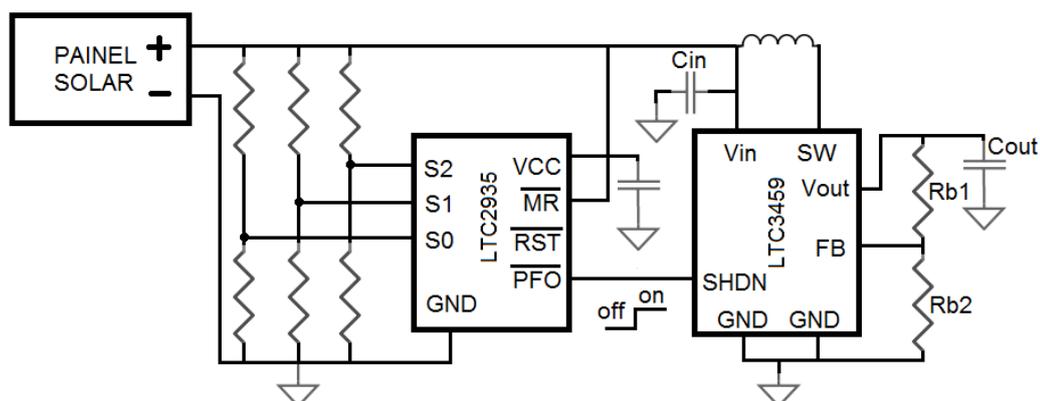
Fonte: Elaborada pela autora.

Além do estado de repouso, o CI também pode ser desabilitado quando não há energia suficiente para alimentá-lo. O CI é habilitado por um sinal de entrada em um pino SHDN (*Master Shutdown Input*) que se estiver em nível lógico baixo desabilita todas as funções do CI, drenando uma corrente menor que $1\mu\text{A}$.

Para o CI iniciar sua operação, é verificado se a fonte de entrada está fornecendo um nível suficiente de tensão de entrada. Essa verificação é realizada a partir de outro CI, o LTC2935, que funciona com uma baixa corrente de entrada, em

média de 500nA, e serve para monitoramento da tensão de entrada. Esse CI monitora se a tensão de entrada V_{cc} está acima de um determinado limiar selecionável a partir dos níveis lógicos definidos pelas entradas S0, S1 e S2 do LTC2935. Caso a tensão de entrada, que também irá alimentar o CI LTC3459, esteja acima de um determinado nível pré-selecionado, o sinal de saída PFO (do inglês, *Power-Fail Output*) é colocado em nível lógico alto e controla o outro CI a partir da entrada SHDN. Por fim, há um sinal de saída de reset do CI e uma entrada MR, usada para habilitar o reset manualmente. Caso não seja utilizada essa entrada deve ser conectada a V_{cc} . Ao analisar o funcionamento dos circuitos, pode ser observado que o funcionamento conjunto dos mesmos permite que a colheita de energia e sua conversão só sejam habilitadas se houver energia suficiente para manter o circuito. O esquemático para utilização dos CIs para aplicação em colheita de energia está ilustrado na Figura 34.

FIGURA 34 - ESQUEMÁTICO PARA UTILIZAÇÃO DOS CIs LTC2935 E LTC3459.



Fonte: Elaborada pela autora.

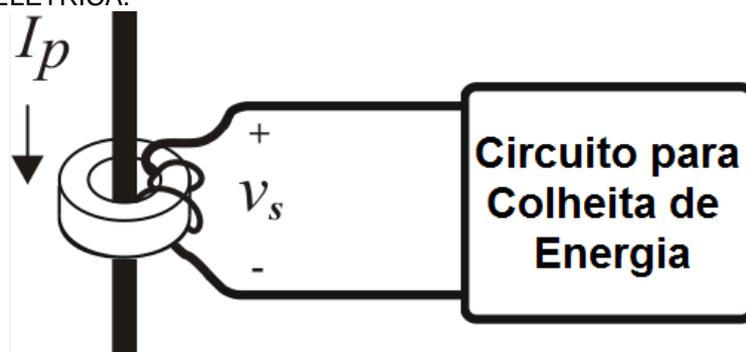
Os circuitos internos detalhados dos CIs LTC3459 e LTC2935 podem ser observados nos Anexos A e B, respectivamente.

6.5 COLHEITA POR INDUÇÃO MAGNÉTICA

A colheita de energia por indução magnética é utilizada, nesse projeto, para colher energia a partir da variação do campo magnético ao redor dos cabos de potência da rede elétrica de uma cidade. A variação do campo magnético ao longo do tempo, segundo a lei de Faraday, induz uma tensão que pode ser utilizada para alimentar dispositivos eletrônicos, como nós-sensores de uma RSSF.

O sistema para colheita desse tipo de energia consiste em um transformador elétrico, onde o primário é uma bobina de uma única volta, que é o próprio cabo da rede elétrica, e o secundário é uma bobina de n espiras e um núcleo magnético, como ilustrado na Figura 35. A tensão induzida V_s é proporcional à permeabilidade magnética do material do núcleo, à quantidade de espiras do secundário e à corrente I_p que percorre o primário do transformador.

FIGURA 35 - COLHEITA POR INDUÇÃO MAGNÉTICA AO REDOR DE CABOS DA REDE ELÉTRICA.



Fonte: Elaborada pela autora.

A tensão induzida, para alimentar dispositivos eletrônicos, deve passar por um estágio de retificação. Para isso, é possível utilizar um CI desenvolvido pela LT, o LTC3588-1, que integra um retificador em ponte completa com um conversor *Buck* de alta eficiência. Para realizar a colheita de energia, o CI utiliza seu retificador em ponte de onda completa para retificar a entrada CA (ou seja, a tensão induzida da bobina) conectada as entradas PZ1 e PZ2. A tensão retificada é utilizada para carregar um capacitor de entrada em V_{in} . O circuito utiliza um conversor CC-CC do tipo *Buck* para regular a tensão de saída na tensão escolhida. A escolha entre as 4 possíveis tensões de saída é realizada ao inserir nas entradas D0 e D1 um sinal de nível lógico alto ou baixo, para isso, essas entradas podem ser conectadas a V_{in2} ou a GND, respectivamente.

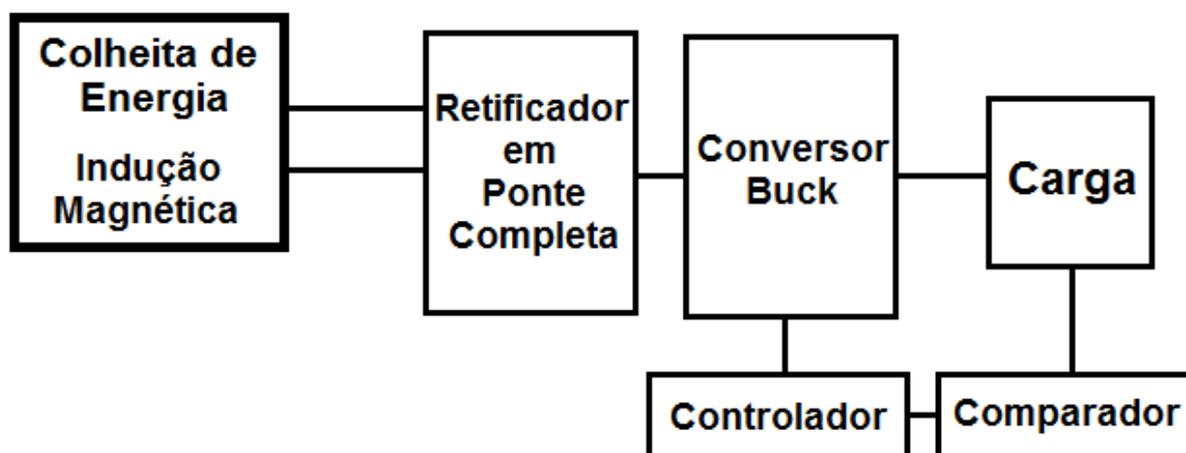
O LTC3588-1 possui um modo UVLO (*UnderVoltage LockOut*), que permite que o capacitor de entrada carregue até que a entrada possua energia suficiente para ser transferida à carga. Dessa forma, quando a tensão de entrada ultrapassa o limiar de UVLO (definido também por D0 e D1), o conversor *Buck* é habilitado e o capacitor de entrada transfere energia para o capacitor de saída. O conversor *Buck*

carrega o capacitor de saída a partir de um indutor até um valor ligeiramente maior que seu valor de saída regulado.

Se a tensão de entrada atingir um valor menor que o limiar de UVLO antes da saída atingir seu valor definido, o conversor buck irá desligar até que a entrada alcance o valor necessário. Durante esse período, apenas uma corrente de repouso de aproximadamente 450nA é drenada, permitindo que o capacitor de entrada acumule energia, em situações nas quais as fontes são de baixa potência.

Quando a entrada atingir um nível maior que o limiar de UVLO e a saída atingir o valor regulado, o conversor buck entrará em estado de repouso e um comparador monitora o valor da saída. O conversor só funcionará novamente quando a tensão de saída cair a um nível abaixo do valor determinado, nesse momento, o ciclo de conversão reinicia. A Figura 36 ilustra o diagrama de blocos referente ao funcionamento do CI.

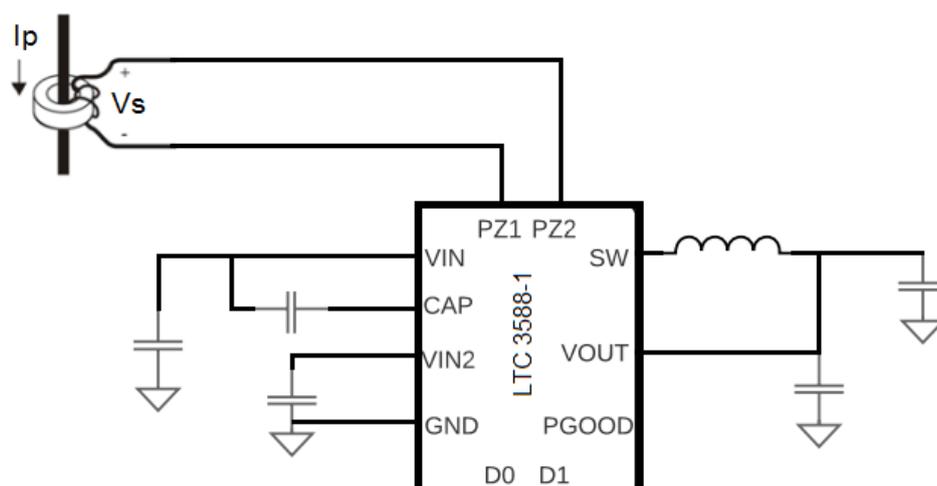
FIGURA 36 - DIAGRAMA DE BLOCOS INTERNO DO CI LTC3588-1.



Fonte: Elaborada pela autora.

Esse CI também possui um sinal de saída que indica quando a tensão de saída atingiu seu valor esperado, o sinal PGOOD. O sinal de saída PFO do CI anterior tem a mesma finalidade do sinal PGOOD, por isso será tratado com a mesma nomenclatura. Quando a saída alcançar o valor regulado, o sinal de PGOOD fornecerá nível lógico alto, quando o sinal de saída cair até 92% do valor esperado, PGOOD fornecerá nível lógico baixo na sua saída. O esquemático para utilização do CI para aplicação em colheita de energia está ilustrado na Figura 37.

FIGURA 37 - ESQUEMÁTICO PARA UTILIZAÇÃO DO CI LTC3588-1.



Fonte: Elaborada pela autora.

O diagrama de blocos interno do CI está detalhado no Anexo C.

6.6 COLHEITA DE ENERGIA UTILIZANDO COLHEITA DE ENERGIA TÉRMICA

Tendo em vista generalizar a proposta de colher energia de outras fontes (diferentes das já descritas), como por exemplo, fontes de energia térmica, também foram realizadas simulações com o CI LTC3108 da *LT* que é próprio para colheita de energia por meio de geradores termoelétricos.

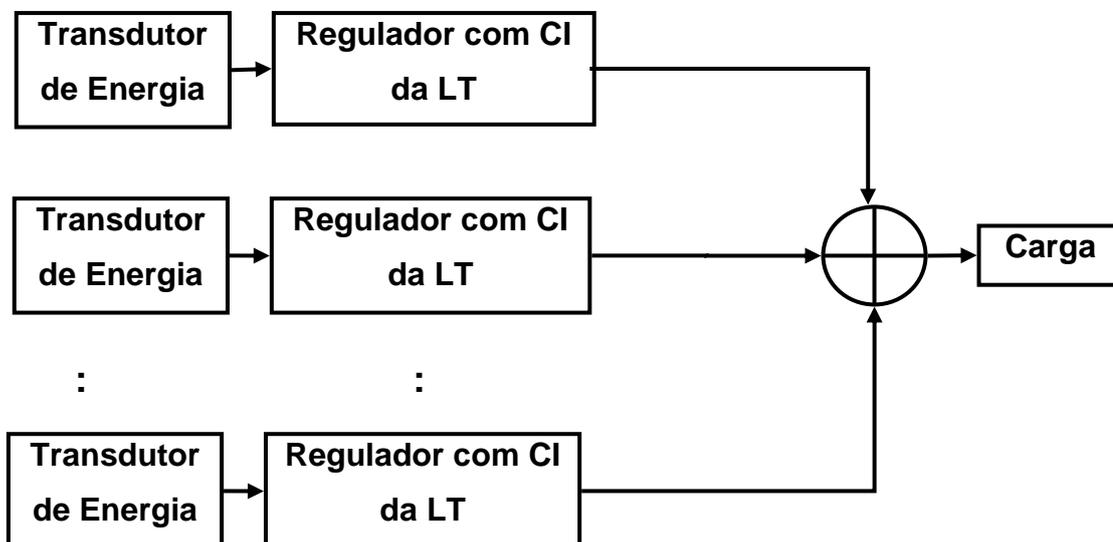
O LTC3108 possui o funcionamento interno similar aos CIs já descritos e o monitoramento da tensão de saída é dado pelo sinal PGOOD indicando que a saída está em um nível adequado. O CI opera com tensões de entradas a partir de 20mV, possui saída selecionável pelas entradas VS1 e VS2 e o sinal de PGOOD de saída, essas funcionalidades serão utilizadas na simulação. O diagrama interno pode ser observado com detalhes no Anexo D.

6.7 USO CONJUNTO DE CIS DA LT COM O CIRCUITO SOMADOR

Nesta seção, será descrita a proposta de integração entre CIs da *LT* com um conversor *Boost* externo objetivando a utilização no circuito somador, que é baseado nesse tipo de conversor. A ideia principal da proposta de integração CIs/Somador é que o somador tenha como entradas reguladores baseados em CIs da *LT* capazes de realizar o condicionamento da energia colhida, e as diferentes fontes de energia

tenham suas contribuições de energia efetivamente somadas, conforme mostrado na Figura 38.

FIGURA 38 - PROPOSTA DE INTEGRAÇÃO CI/SOMADOR.



Fonte: Elaborada pela autora.

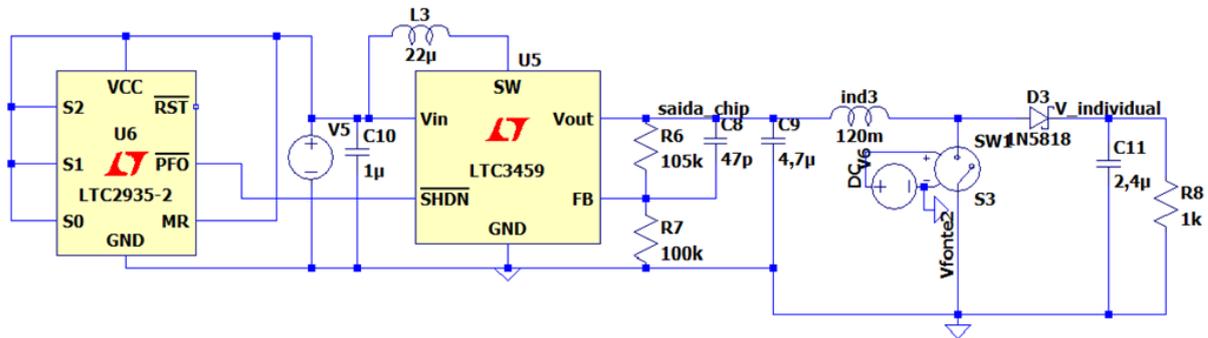
As simulações foram realizadas no *software* disponibilizado pela própria *LT*, o LTSpice, desenvolvido para simulações SPICE e que possui diversos componentes para a simulação, incluindo os CIs para colheita de energia que serão utilizados no projeto. Por se tratar de componentes que simulam comportamentos não-ideais dos CIs, na simulação é considerada a perda de energia nos componentes, o que difere da simulação no PSIM, que tratou de componentes ideais.

6.7.1 Integração individual CI/boost

6.7.1.1 Integração individual - Energia Solar

Inicialmente, foi analisado o circuito de colheita baseado nos CIs LTC2935 e LTC3459, operando como uma fonte CC, operando individualmente como entrada de um conversor Boost. O circuito montado seguiu os parâmetros do circuito da Figura 18 e pode ser observado na Figura 39.

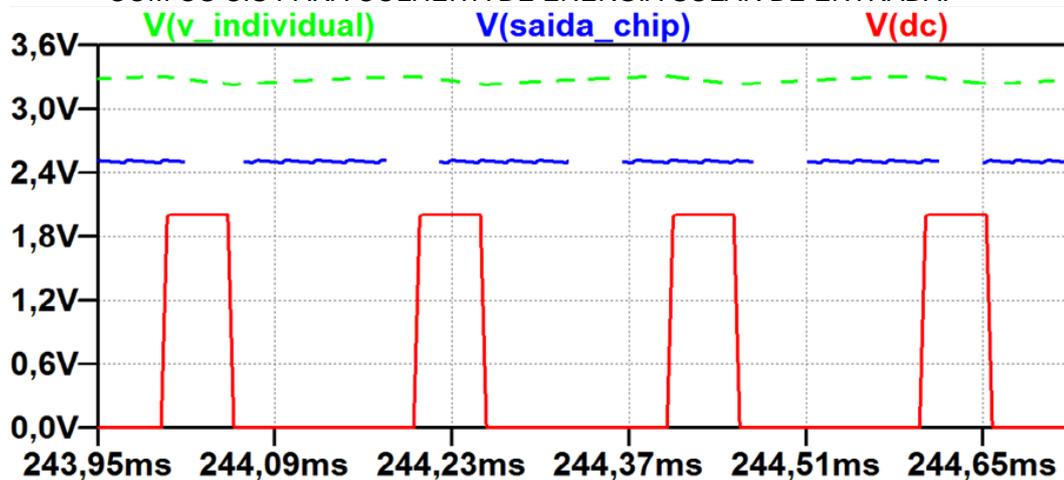
FIGURA 39 - CONVERSOR BOOST DESENVOLVIDO COM CIS PARA COLHEITA DE ENERGIA SOLAR COMO ENTRADA



Fonte: Elaborada pela autora.

É possível observar o resultado obtido na simulação na Figura 40, onde o sinal $V(\text{saida_chip})$ (sinal de cor azul escura - tracejado longo) representa a tensão de saída do CI e de entrada do conversor, a forma de onda $V(v_individual)$ (sinal de cor verde - tracejado curto) mostra a tensão de saída do conversor e $V(\text{dc})$ (sinal de cor vermelha) representa o sinal de controle, ou seja, o *duty cycle* utilizado para controlar a chave.

FIGURA 40 - SINAIS DE ENTRADA, SAÍDA E SINAL DE COMANDO DO CONVERSOR BOOST COM OS CIS PARA COLHEITA DE ENERGIA SOLAR DE ENTRADA.

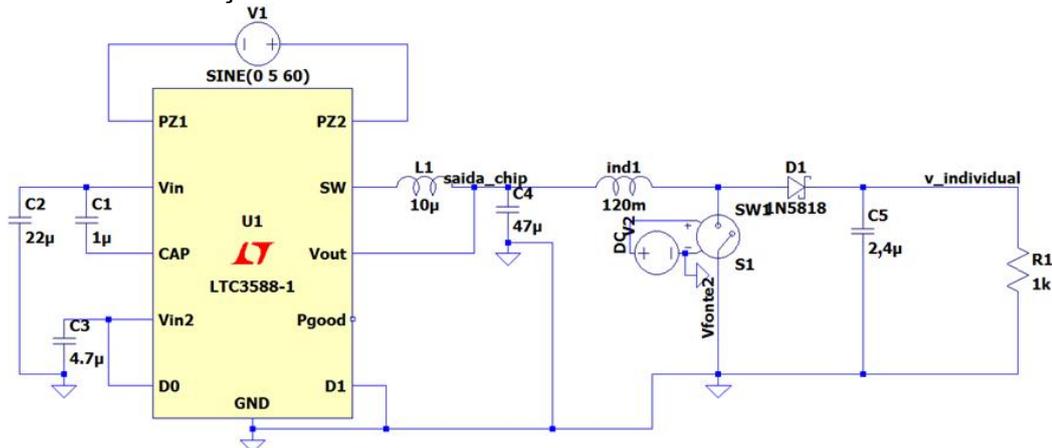


Fonte: Elaborada pela autora.

6.7.1.2 Integração Individual - Energia Magnética

Foi realizada a simulação para colheita de energia por indução magnética, que segue os parâmetros da Figura 18 por o CI ter os mesmos padrões de saída. O circuito simulado pode ser observado na Figura 41.

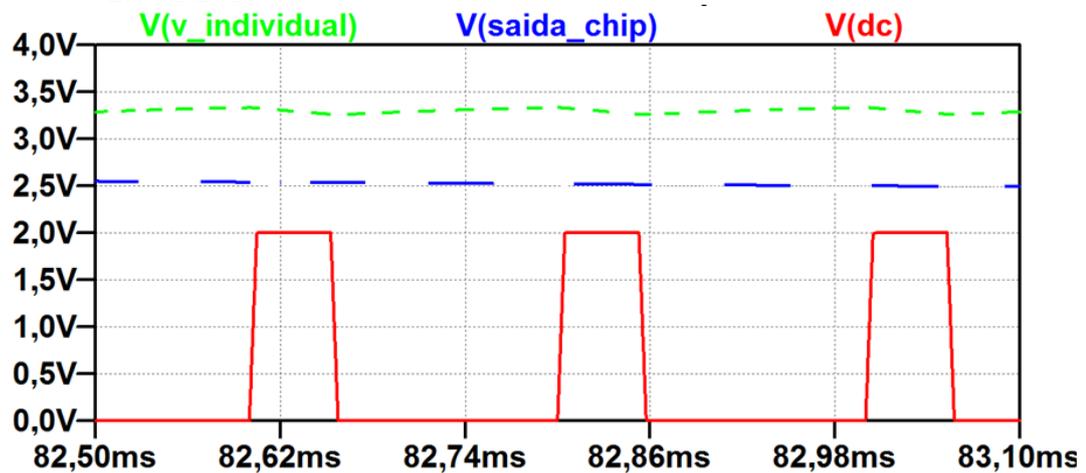
FIGURA 41 - CONVERSOR BOOST DESENVOLVIDO COM CI PARA COLHEITA DE ENERGIA POR INDUÇÃO MAGNÉTICA COMO ENTRADA



Fonte: Elaborada pela autora.

O resultado da simulação pode ser analisado na Figura 42, onde o sinal $V(\text{saida_chip})$ (sinal de cor azul escura - tracejado longo) representa a tensão de saída do CI, o sinal $V(\text{v_individual})$ (sinal de cor verde - tracejado curto) mostra a tensão de saída do conversor e $V(\text{dc})$ (sinal de cor vermelha) representa a razão cíclica de controle do conversor.

FIGURA 42 - SINAIS DE ENTRADA, SAÍDA E SINAL DE COMANDO DO CONVERSOR BOOST COM OS CIS PARA COLHEITA DE ENERGIA POR INDUÇÃO MAGNÉTICA DE ENTRADA.



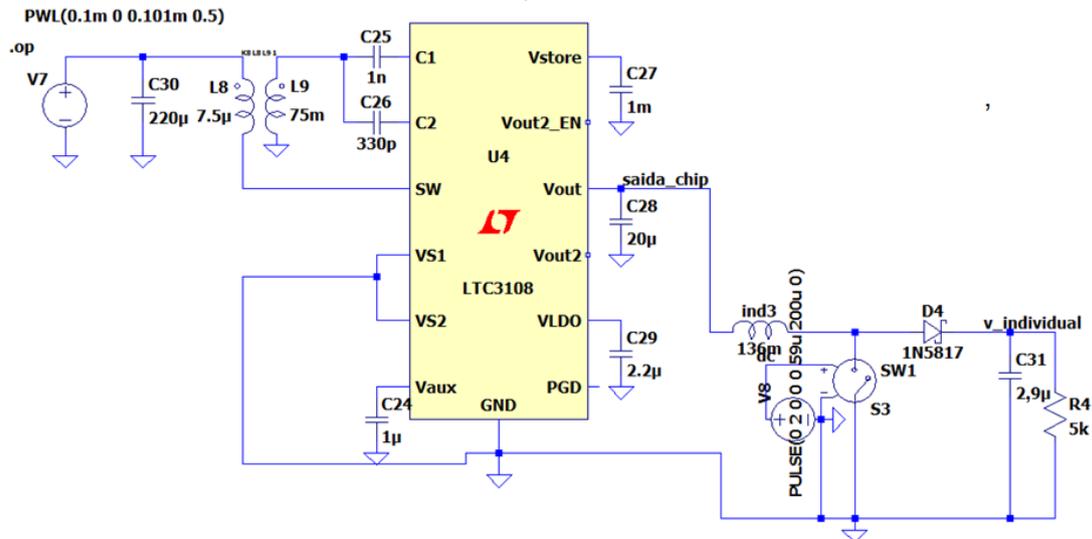
Fonte: Elaborada pela autora.

6.7.1.3 Integração Individual - Energia Térmica

Para finalizar as simulações individuais dos CI's descritos, foi analisado o circuito alimentado por colheita de energia térmica baseado no LTC3108 integrado

com o conversor boost, conforme ilustrado na Figura 43. O conversor desenvolvido seguiu os parâmetros desejados de saída descritos nos circuitos anteriores, mas com valores de componentes modificados, pois o CI para colheita térmica produz uma saída de 2,35V, logo a entrada do conversor é modificada.

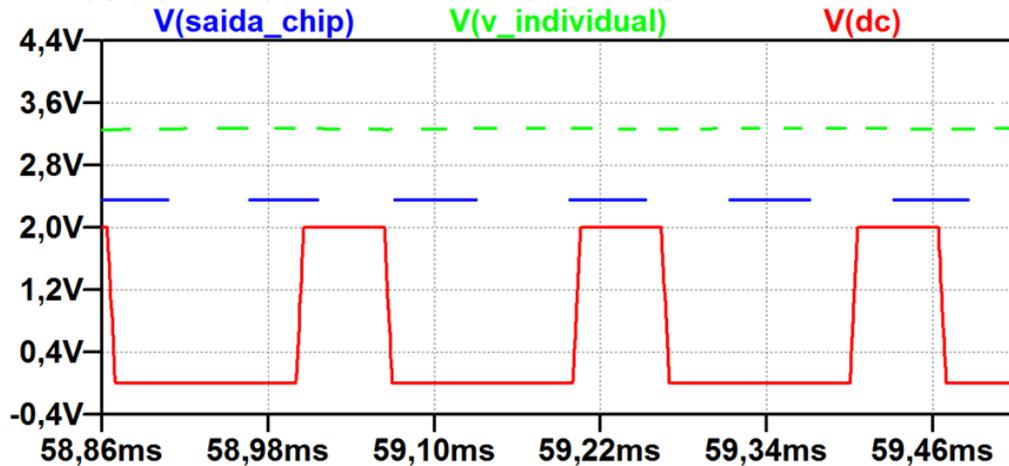
FIGURA 43 - CONVERSOR BOOST DESENVOLVIDO COM CI PARA COLHEITA DE ENERGIA TÉRMICA COMO ENTRADA.



Fonte: Elaborada pela autora.

O resultado da simulação pode ser observado na Figura 44, onde o sinal $V(\text{saida_chip})$ (sinal de cor azul escura - tracejado longo) representa a tensão de saída do CI e de entrada do conversor, a forma de onda $V(\text{dc})$ (sinal de cor vermelha) mostra a tensão de controle da chave, ou seja, a tensão que define a razão cíclica do conversor, e $V(\text{v_individual})$ (sinal de cor verde - tracejado curto) representa a saída do conversor.

FIGURA 44 - SINAIS DE ENTRADA, SAÍDA E SINA DE COMANDO DO CONVERSOR BOOST COM OS CIS PARA COLHEITA DE ENERGIA TÉRMICA DE ENTRADA.

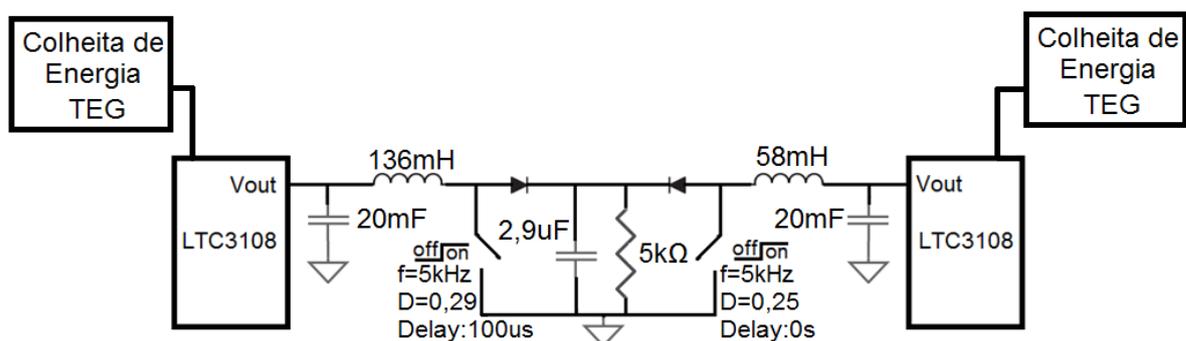


Fonte: Elaborada pela autora.

6.7.2 Integração Cis/Somador

Foi simulada a integração dos circuitos de colheita baseados no Cis descritos e suas saídas foram conectadas ao circuito somador proposto. Inicialmente, foi simulado o circuito somador integrado com os circuitos para colheita de energia térmica, baseados no LTC3108. As demais conexões dos Cis foram realizadas conforme apresentado na Figura 43, a única alteração é o circuito híbrido conectado à saída V_{out} , que está detalhado na Figura 45.

FIGURA 45 - CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA DESENVOLVIDO COM CIS PARA ENERGIA TÉRMICA UTILIZADOS COMO ENTRADA.



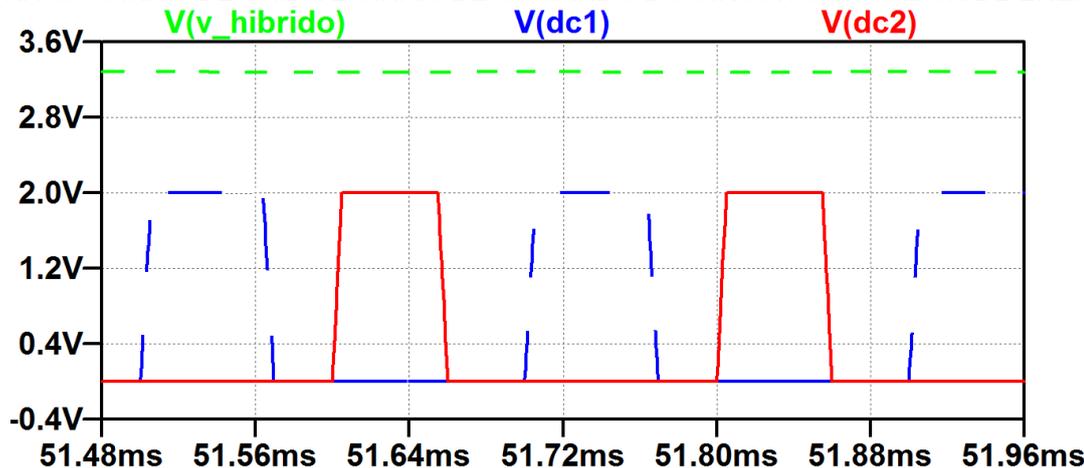
Fonte: Elaborada pela autora.

O circuito completo de colheita híbrida segue o modelo do circuito somador genérico descrito anteriormente, em que se une dois conversores *Boost* operando em paralelo, onde o de maior razão cíclica, considerando as fontes de entrada

iguais, irá definir as condições na carga e o outro conversor deve fornecer corrente para a carga de modo que a corrente média se mantenha a mesma e a ondulação de saída seja reduzida para aumentar a densidade de potência entregue à carga.

O resultado é possível observar na Figura 46 abaixo.

FIGURA 46 - SINAIS DE SAÍDA E SINAIS DE COMANDO DO CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA.

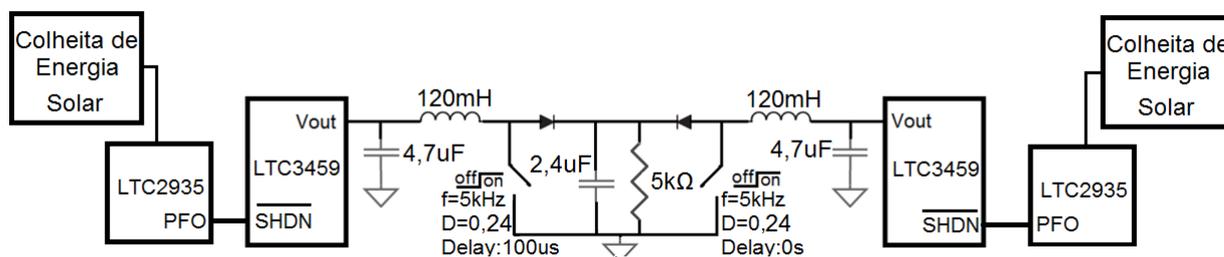


Fonte: Elaborada pela autora.

A saída do circuito somador de energia pode ser observada pela forma de onda $V(v_hibrido)$ (forma de onda de cor verde - tracejado curto), os sinais de controle das chaves de cada um dos dois conversores podem ser observados nas formas de onda $V(dc1)$ (de cor azul escura - tracejado longo) e $V(dc2)$ (de cor vermelha) e que correspondem as razões cíclicas de $D=0,29$ e $D=0,25$, respectivamente.

Em sequência, foi simulado o circuito somador baseado em outros CIs, os específicos para colheita de energia solar, para assim analisar o comportamento do circuito somador com CIs e características do conversor diferentes. Nesse caso, foi simulado o circuito somador com parâmetros iguais, onde os circuitos para colheita de energia devem fornecer energia de forma equivalente à carga. O circuito simulado está representado na Figura 47.

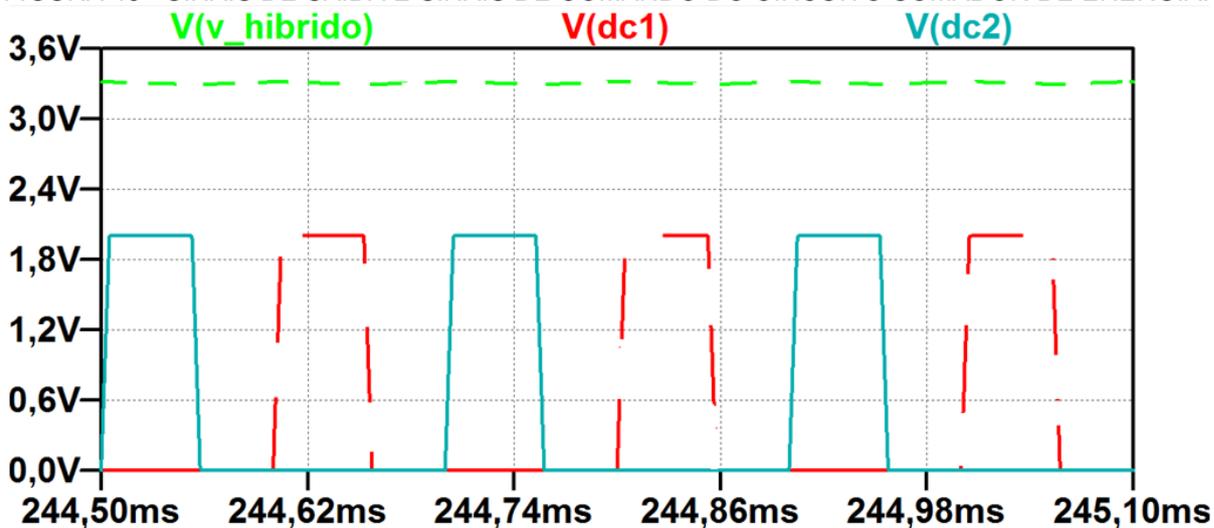
FIGURA 47 - CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA DESENVOLVIDO COM CIS PARA ENERGIA SOLAR UTILIZADOS COMO ENTRADA.



Fonte: Elaborada pela autora.

A saída do circuito somador de energia é representada, na Figura 48, pela forma de onda $V(v_hibrido)$ (forma de onda verde - tracejado curto), os sinais de controle das chaves de cada um dos dois conversores podem ser observados nas formas de onda $V(dc1)$ (de cor vermelha - tracejado longo) e $V(dc2)$ (de cor cinza) e que correspondem as razões cíclicas de $D=0,24$ e defasados de 180° entre si.

FIGURA 48 - SINAIS DE SAÍDA E SINAIS DE COMANDO DO CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA.



Fonte: Elaborada pela autora.

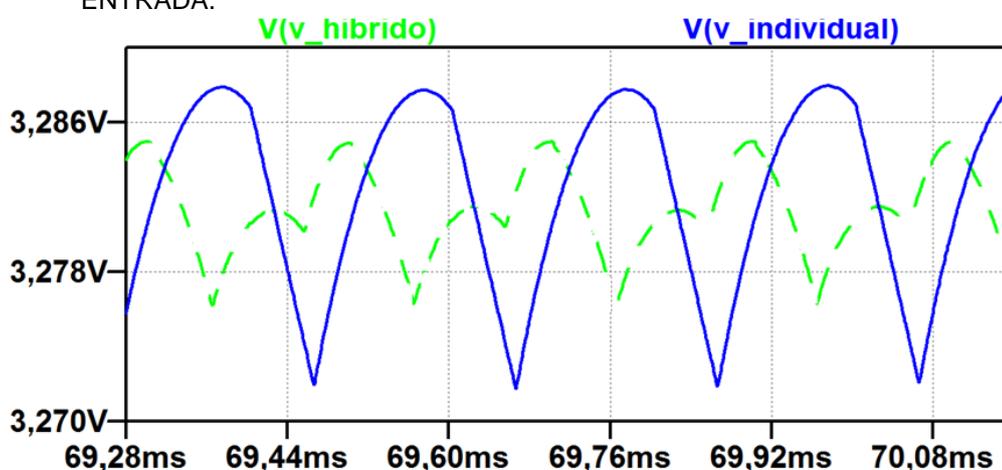
6.7.3 Estudo comparativo dos resultados obtidos

Considerando os resultados das Seções 6.7.1 e 6.7.2, os parâmetros de saída permanecem praticamente os mesmos. Porém, há uma pequena variação na tensão de saída do CI ao comparar o circuito individual com o circuito somador de energia, pois a saída do CI é influenciada pela carga utilizada, mas a variação, por ser relativamente pequena, não compromete os parâmetros de saída esperados.

Nas Figura 49 e Figura 50 são mostrados esses sinais, sendo $V(v_hibrido)$ (sinal de cor verde - tracejado), a saída do circuito híbrido, e $V(v_individual)$ (sinal de cor azul), a saída do circuito individual.

É possível comparar as saídas e observar a diminuição na sua ondulação na Figura 49, que representa a comparação do circuito da Figura 45 - utilizando o CI para colheita de energia térmica e circuito somador com parâmetros diferentes - com o circuito de uma única fonte representado na Figura 43.

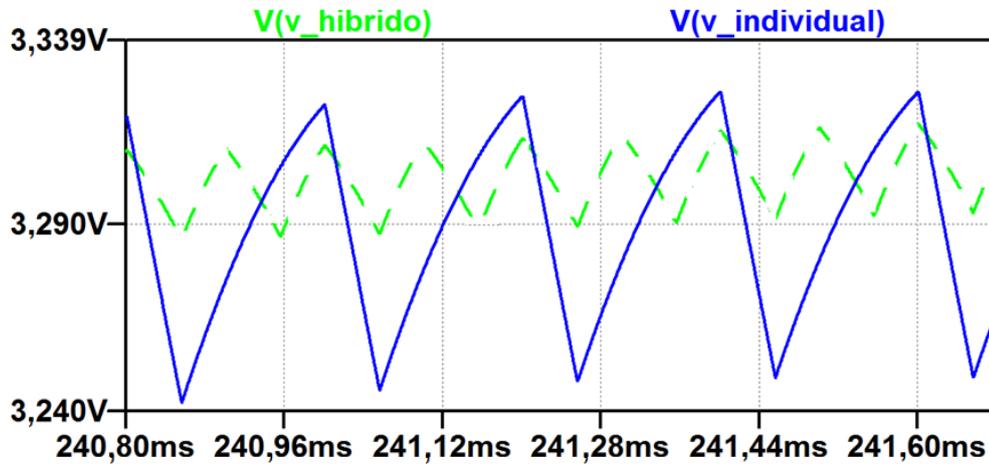
FIGURA 49 - COMPARAÇÃO DA ONDULAÇÃO DE SAÍDA DO CIRCUITO PARA COLHEITA DE ENERGIA ÚNICO E DO CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA COM O CI COMO ENTRADA.



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 50 é ilustrada a diminuição da ondulação de saída quando comparada a saída do circuito somador da Figura 47 - com CIs para colheita de energia solar e parâmetros iguais - com a do sistema de colheita de energia individual da Figura 39.

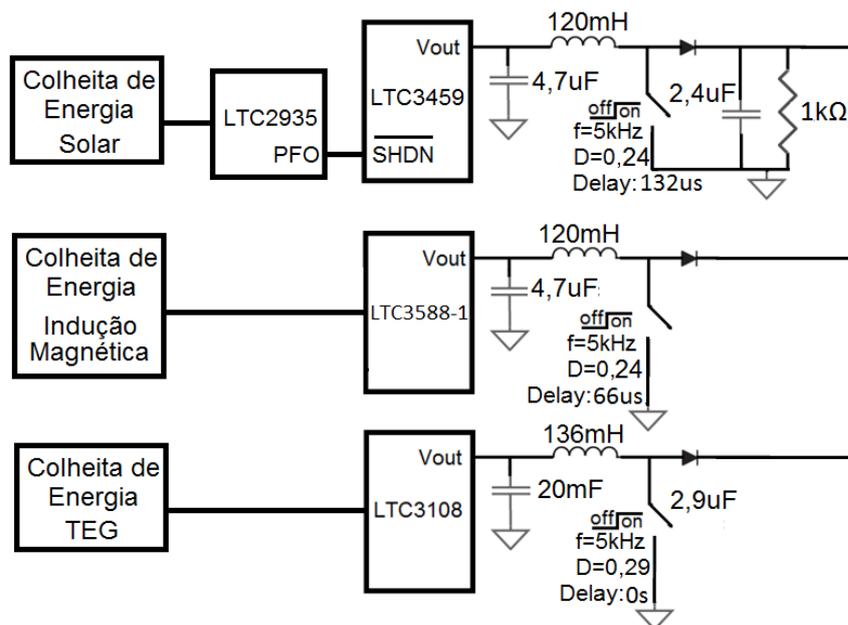
FIGURA 50 - COMPARAÇÃO DA ONDULAÇÃO DE SAÍDA DO CIRCUITO PARA COLHEITA DE ENERGIA ÚNICO E DO CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA COM O CI COMO ENTRADA.



Fonte: Elaborada pela autora.

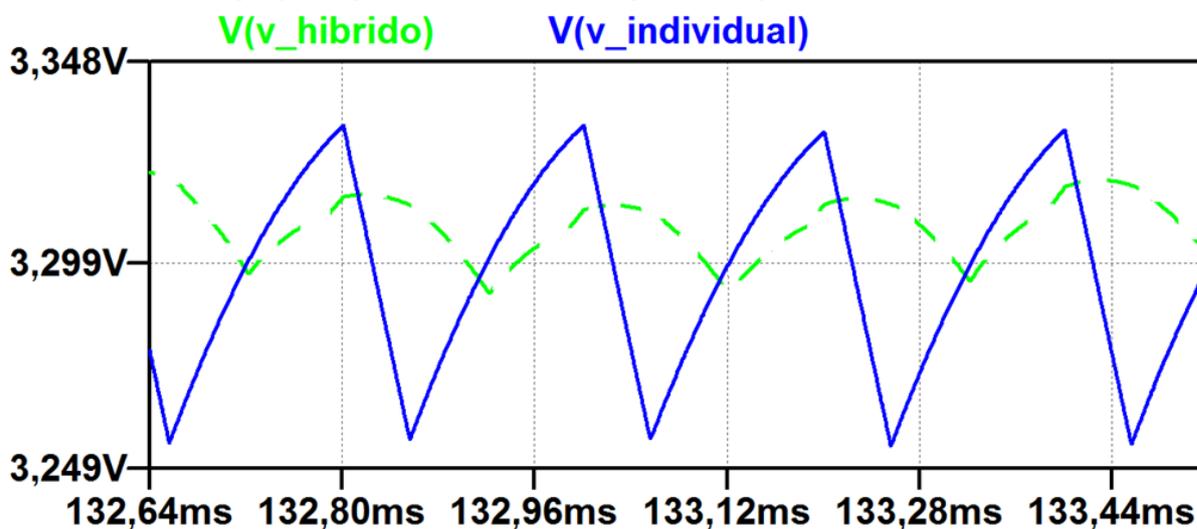
Por fim, foi realizada a comparação da ondulação de saída com o circuito somador utilizando os três tipos de fontes de entrada estudados, ou seja, realizando a colheita de energia térmica, solar e por indução magnética, como pode ser observado na Figura 51. A comparação da saída desse circuito somador com a ondulação de um circuito de uma fonte individual de entrada, nesse caso comparando-se com o circuito individual para colheita de energia solar, apresenta o resultado ilustrado na Figura 52.

FIGURA 51 - CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA DESENVOLVIDO COM OS CIS ESTUDADOS UTILIZADOS COMO ENTRADA.



Fonte: Elaborada pela autora.

FIGURA 52 - COMPARAÇÃO DA ONDULAÇÃO DE SAÍDA DO CIRCUITO PARA COLHEITA DE ENERGIA ÚNICO E DO CIRCUITO SOMADOR DE ENERGIA ALIMENTADO PELAS TRÊS FONTES DE ENTRADA APRESENTADAS.



Fonte: Elaborada pela autora.

6.8 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

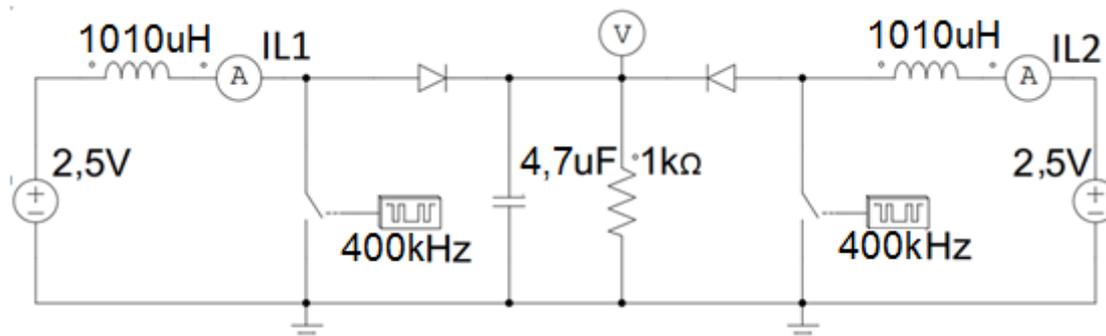
O experimento prático foi realizado para comprovar a atuação do circuito somador de energia. Devido à disponibilidade dos componentes, o circuito simulado foi adaptado para a realização do experimento prático. Foi então montado em protoboard o circuito somador, inicialmente, com duas fontes de entrada obtidas por fontes de tensão contínua, que simularam as fontes utilizadas para colheita de energia. Os indutores utilizados foram de 680uH e 330uH em série, resultando em uma indutância de 1010uH, sendo utilizada uma combinação em série para cada um dos dois conversores do circuito somador. Para obter uma ondulação de 3mA, para esse conversor continuar operando em condução contínua, foi necessário utilizar uma frequência de operação de 400kHz. Na saída, foi utilizado um capacitor de 4,7uF e uma carga resistiva de 1kΩ. Para controlar o conversor boost, foram utilizados os transistores 2N7000 como chaves do circuito.

Inicialmente, os sinais de comando das chaves foram gerados por um gerador de sinais, mas em trabalhos futuros, será gerado por um CI de baixo consumo. O gerador de sinais utilizado permite definir a frequência e a razão cíclica do sinal gerado, além de possuir mais de uma saída, possibilitando o controle de duas ou mais fontes. Para verificação dos resultados experimentais, foi utilizada uma ponta de prova de corrente para analisar a corrente que percorre o indutor. A ponta

de prova para medição de corrente utilizada foi a N2822A da *Keysight Technologies* que possui resistência de $20\text{m}\Omega$ e consegue medir correntes na faixa de $250\mu\text{A}$ até 5A . Os resultados foram analisados através do osciloscópio da Agilent de referência MSO-X-3024A, que tem 4 canais para leitura de sinais analógicos, que foram utilizados para obtenção dos dados, exibe sinais de até 200MHz , além de permitir determinar quais informações de medição deseja-se exibir na tela, dentre outras funções, como filtrar o ruído do sinal de entrada.

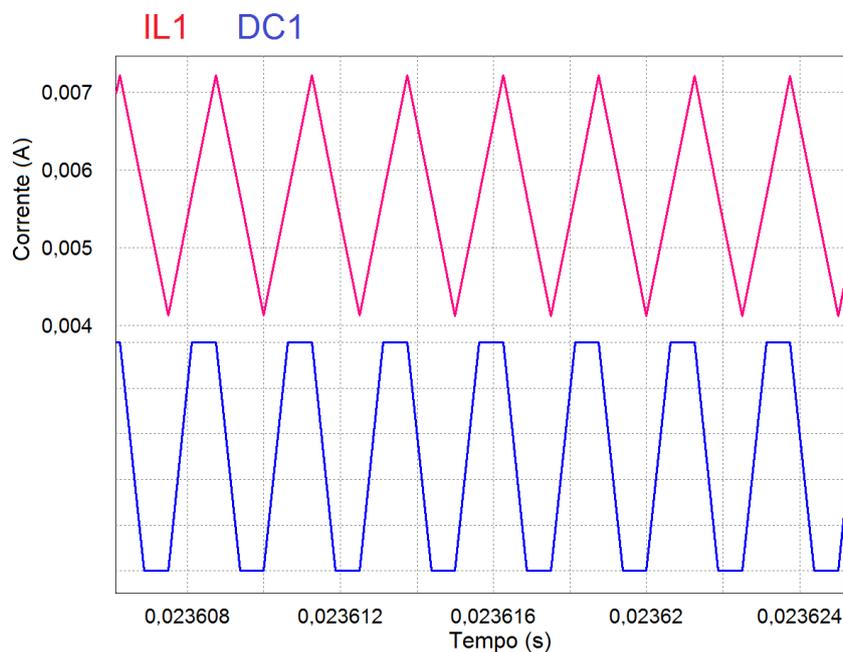
Foram realizadas as simulações adaptando o circuito conforme o experimento prático a ser realizado para comparar com o resultado obtido. Foi então simulado o circuito somador com duas fontes de entrada de $2,5\text{V}$ defasadas entre si em 180° . O circuito simulado está ilustrado na Figura 53 e o resultado simulacional pode ser observado nas Figura 54 e Figura 55, que representam as correntes que percorrem os indutores de cada um dos conversores em paralelo.

FIGURA 53 - CIRCUITO SOMADOR SIMULADO CONFORME PARÂMETROS DO EXPERIMENTO PRÁTICO.



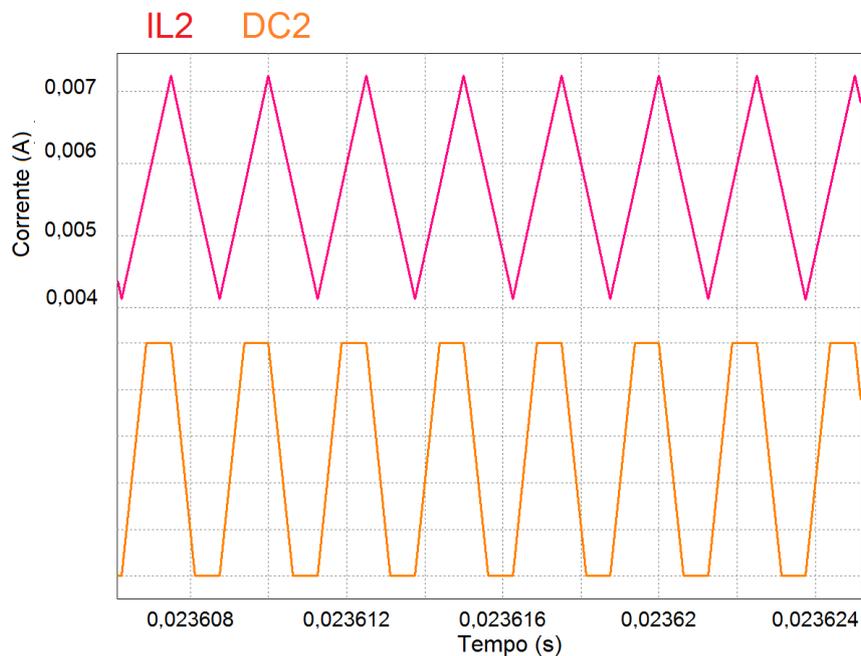
Fonte: Elaborada pela autora.

FIGURA 54 - CORRENTE QUE PERCORRE O INDUTOR E SINAL DE COMANDO DA CHAVE DE UM DOS CONVERSORES DO CIRCUITO SOMADOR.



Fonte: Elaborada pela autora.

FIGURA 55 - CORRENTE QUE PERCORRE O INDUTOR E SINAL DE COMANDO DA CHAVE DE UM DOS CONVERSORES DO CIRCUITO SOMADOR.

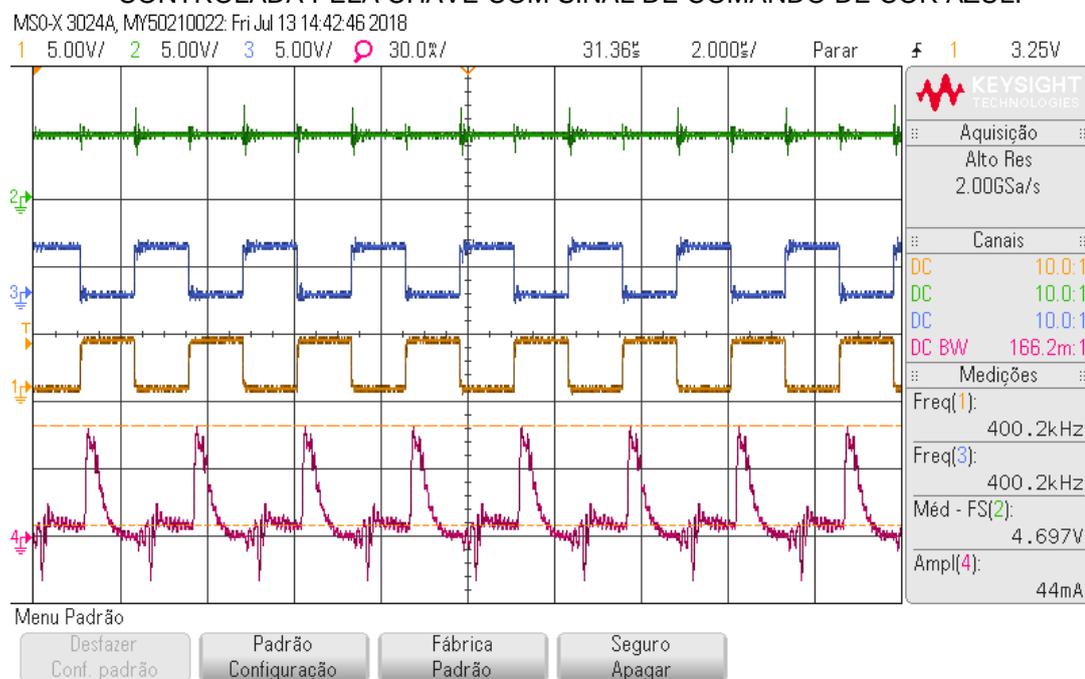


Fonte: Elaborada pela autora.

Por fim, foi então realizado o experimento para uma razão cíclica de 50% em cada uma das chaves e defasadas de 180° entre si. Para esses parâmetros e considerando fontes de entrada de 2,5V, é esperado obter uma tensão de saída

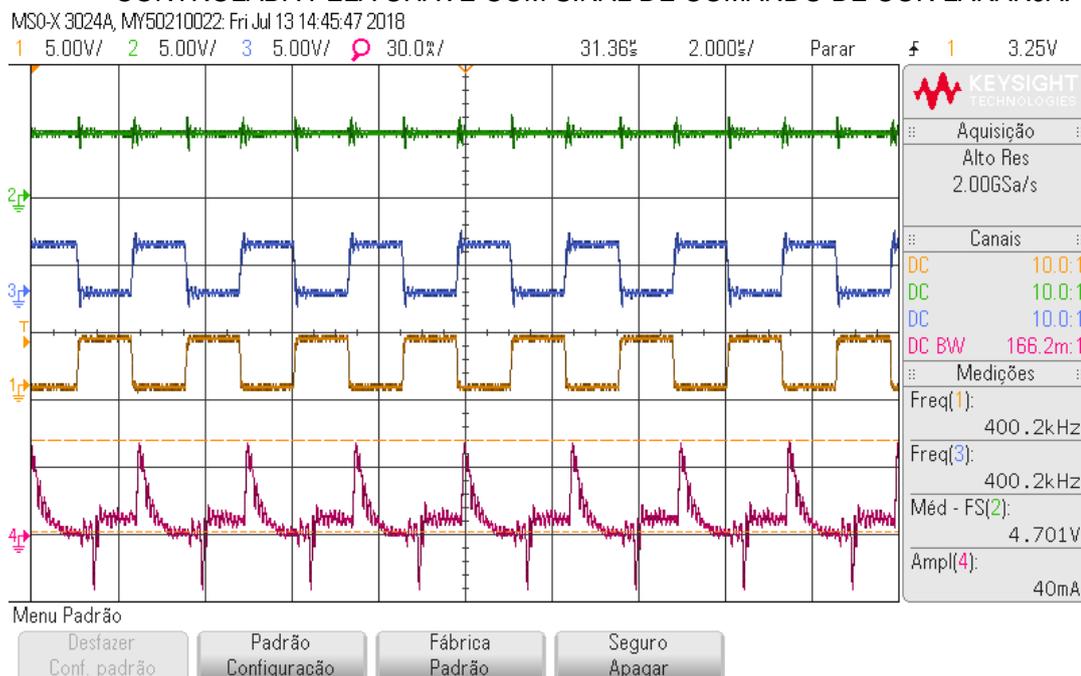
contínua de 5V, porém dadas as perdas nos componentes e queda de tensão do diodo, o valor de saída obtido é de 4,7V. Foi observado ao analisar as correntes que percorrem os indutores que os seus valores máximos ocorrem no momento em que a respectiva chave é abertada. Os sinais de comando (sinais de cor azul e de cor laranja), a saída do circuito (sinal de cor verde) e a corrente que percorre o indutor (sinal de cor rosa) podem ser observados na Figura 56 e na Figura 57, sendo a primeira a que percorre o indutor cuja tensão é controlada pela chave com sinal de comando de cor azul e a segunda a corrente que percorre o indutor cuja tensão é definida pela chave controlada pelo sinal de cor laranja.

FIGURA 56 - SINAIS DE COMANDO DAS CHAVES E DE SAÍDA DO CIRCUITO SOMADOR E SINAL DE CORRENTE QUE PERCORRE O INDUTOR CUJA TENSÃO É CONTROLADA PELA CHAVE COM SINAL DE COMANDO DE COR AZUL.



Fonte: Elaborada pela autora.

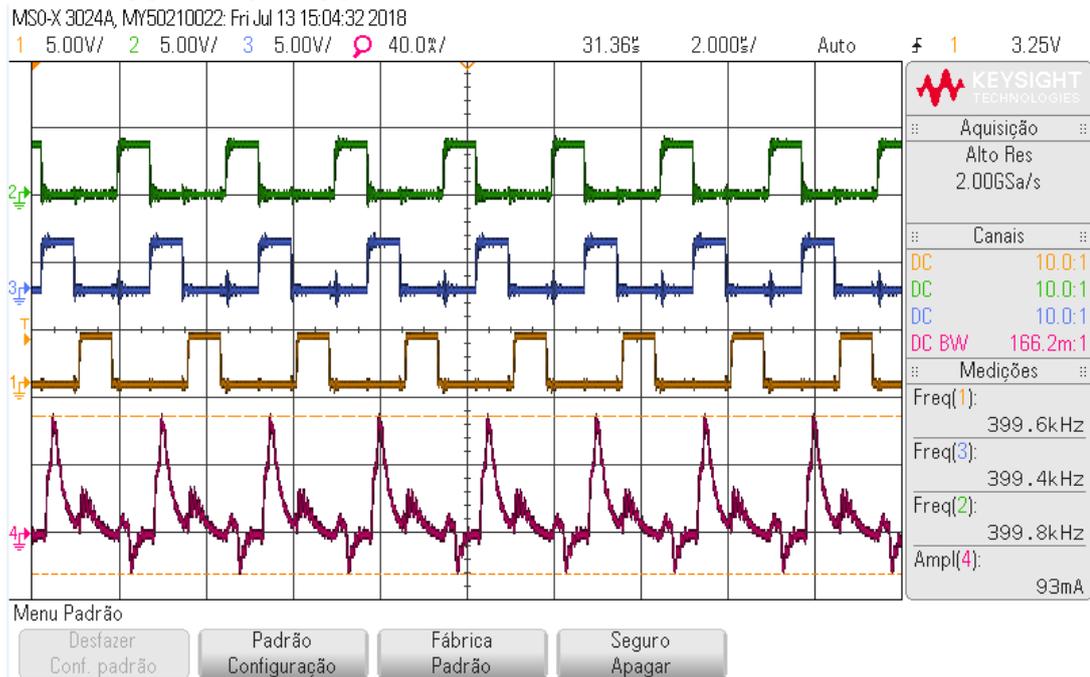
FIGURA 57 - SINAIS DE COMANDO DAS CHAVES E DE SAÍDA DO CIRCUITO SOMADOR E SINAL DE CORRENTE QUE PERCORRE O INDUTOR CUJA TENSÃO É CONTROLADA PELA CHAVE COM SINAL DE COMANDO DE COR LARANJA.



Fonte: Elaborada pela autora.

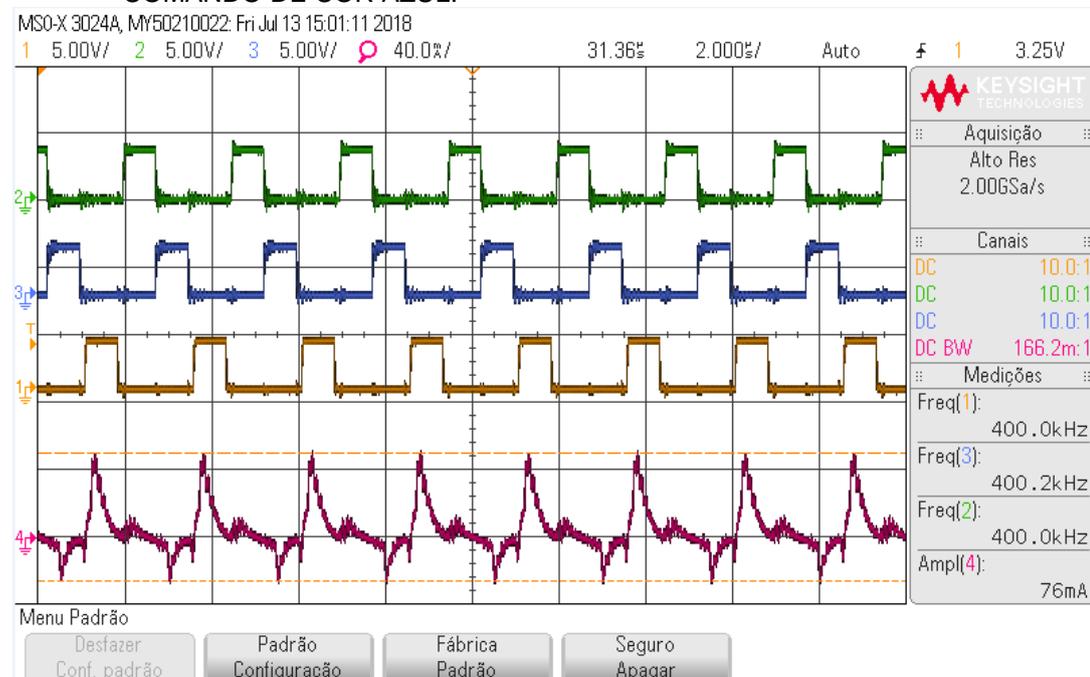
Em seguida, foi realizado o experimento para três fontes de entrada de 2,5V. As razões cíclicas de controle foram definidas como 30% para cada chave e a defasagem entre elas determinada de modo que fosse aproveitada a sua energia de forma otimizada, nesse caso, chaveando de forma complementar. Os sinais de comando das chaves e a corrente que percorre cada indutor podem ser observados nas Figuras a seguir, onde na Figura 58 é representada a corrente que percorre o indutor cuja tensão é definida pela chave controlada pelo sinal de cor verde, na Figura 59 pelo sinal de cor azul e, na Figura 60, pelo sinal de cor laranja.

FIGURA 58 - SINAIS DE COMANDO DAS CHAVES E SINAL DE CORRENTE QUE PERCORRE O INDUTOR CUJA TENSÃO É CONTROLADA PELA CHAVE COM SINAL DE COMANDO DE COR VERDE



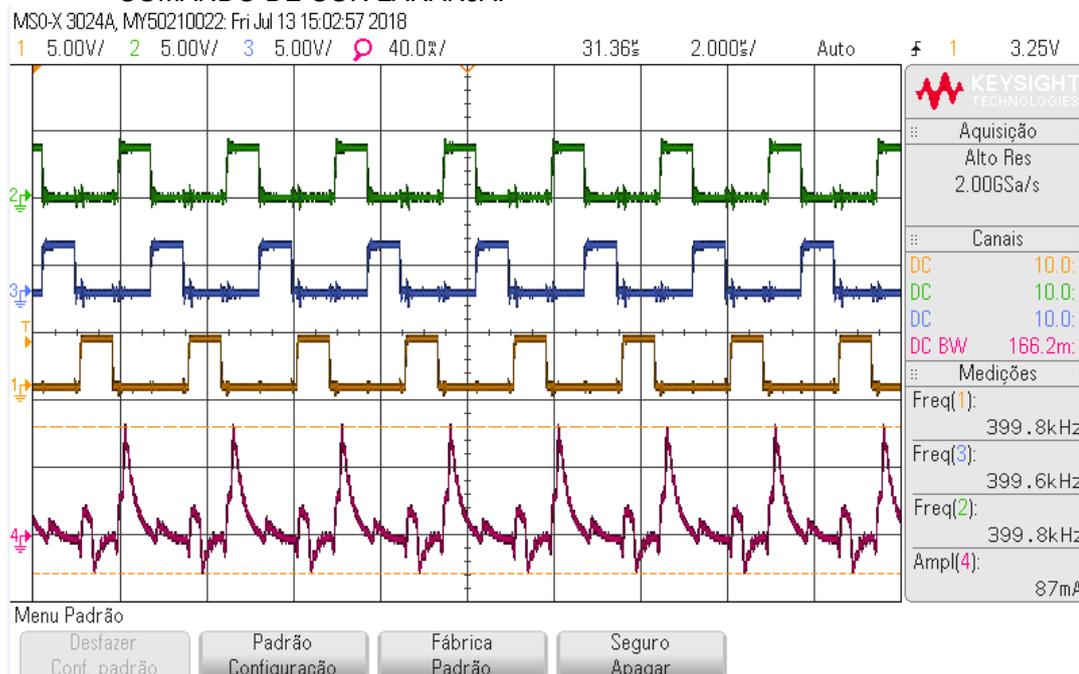
Fonte: Elaborada pela autora.

FIGURA 59 - SINAIS DE COMANDO DAS CHAVES E SINAL DE CORRENTE QUE PERCORRE O INDUTOR CUJA TENSÃO É CONTROLADA PELA CHAVE COM SINAL DE COMANDO DE COR AZUL.



Fonte: Elaborada pela autora.

FIGURA 60 - SINAIS DE COMANDO DAS CHAVES E SINAL DE CORRENTE QUE PERCORRE O INDUTOR CUJA TENSÃO É CONTROLADA PELA CHAVE COM SINAL DE COMANDO DE COR LARANJA.

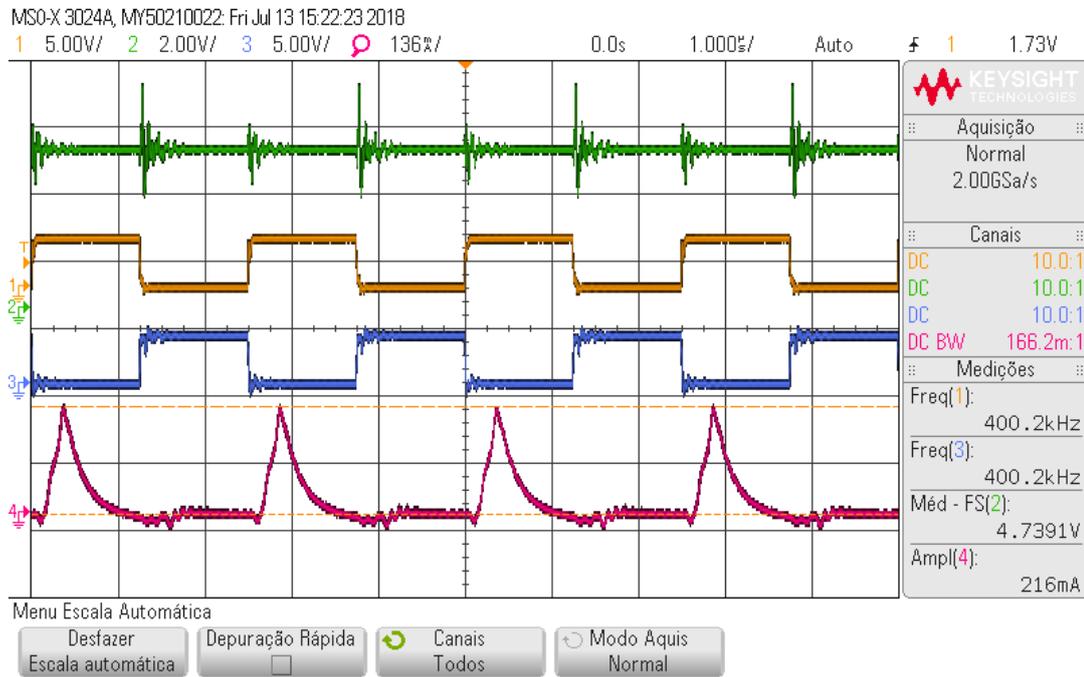


Fonte: Elaborada pela autora.

A análise dos resultados permitiu observar a contribuição de cada parte do circuito para a corrente entregue à carga. O circuito, nesse caso, não funciona em modo de condução contínua como esperado, pois os componentes utilizados e suas perdas e ruídos influenciaram nesse resultado, além dos elementos parasitas que interferem ao trabalhar com frequências elevadas, mas é possível analisar o comportamento da corrente e verificar o funcionamento do circuito somador de energia.

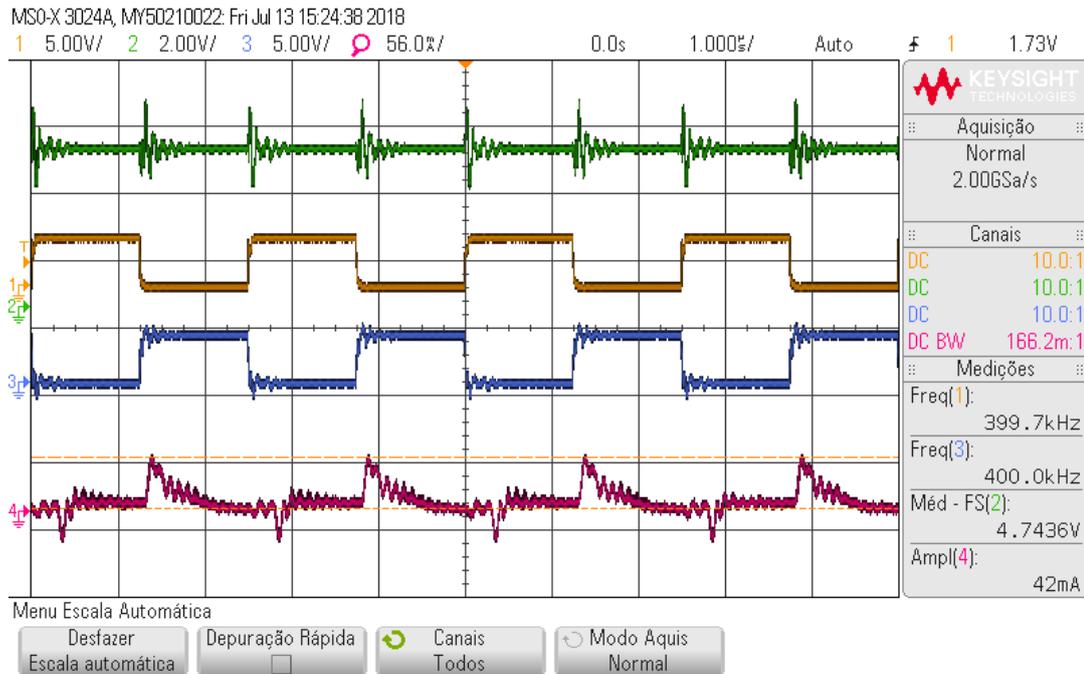
Outra atividade prática realizada foi a alteração de uma das fontes de entrada do circuito somador de energia com duas fontes. Nesse caso, foi simulado o circuito somador para diferentes fontes de entrada para comprovar que a saída se mantém constante e é determinada pela fonte de maior valor para circuitos com os demais parâmetros iguais. Uma das fontes de entrada foi mantida em 2,5V e a outra alterada para 2V. O resultado pode ser observado na Figura 61 e na Figura 62, que representam a tensão de saída do circuito (sinal de cor verde), os sinais de comando das chaves (sinais de cor azul e de cor laranja) e a corrente (sinal de cor rosa) que percorre o indutor cuja tensão é definida pela chave controlada pelo sinal de cor azul e pelo sinal de cor laranja, respectivamente.

FIGURA 61 - SINAIS DE TENSÃO DE CONTROLE DAS CHAVES E DE SAÍDA DO CIRCUITO SOMADOR E SINAL DE CORRENTE QUE PERCORRE O INDUTOR CUJA TENSÃO É CONTROLADA PELA CHAVE COM SINAL DE CONTROLE DE COR AZUL.



Fonte: Elaborada pela autora.

FIGURA 62 - SINAIS DE TENSÃO DE CONTROLE DAS CHAVES E DE SAÍDA DO CIRCUITO SOMADOR E SINAL DE CORRENTE QUE PERCORRE O INDUTOR CUJA TENSÃO É CONTROLADA PELA CHAVE COM SINAL DE CONTROLE DE COR LARANJA.



Fonte: Elaborada pela autora.

7 CONCLUSÕES

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um circuito somador de energia que pode ser adaptado para a quantidade e tipos de fonte de energia disponíveis no ambiente. O circuito somador de energia proposto foi utilizado para o desenvolvimento de uma fonte híbrida que incorporou circuitos integrados reguladores de tensão, apropriados para colheita de energia e de baixo consumo, como fontes de entrada do somador. Primeiramente, foi simulado o circuito somador e comprovou-se a sua funcionalidade. Em seguida, foram realizadas simulações utilizando alguns circuitos reguladores juntamente com o somador de energia. Foi trabalhado com colheita de energia solar, térmica e por indução magnética, mas o circuito somador proposto é adaptável para outros tipos de fontes de energia de entrada. Os parâmetros de saída na carga se comportaram de acordo com o esperado, apresentando como consequência uma redução na ondulação de saída e aumentando a densidade de potência entregue à carga.

A análise dos resultados permitiu determinar qual deve ser o comportamento do sinal de controle do circuito somador para uma maior eficiência na redução da ondulação de saída. Além disso, foi desenvolvido um modelo matemático que prevê o comportamento do circuito por número de fontes de entrada e determina qual a redução esperada para o mesmo.

Para finalizar, foram realizados experimentos práticos considerando duas e três fontes de entrada e obteve-se como resultado principal a observação do funcionamento do circuito somador conforme o esperado. Foi analisada a contribuição das fontes na energia entregue à carga através da análise das correntes que percorrem os indutores do circuito.

Como trabalho futuro, espera-se desenvolver uma placa de circuito impresso para colheita de energia de uma fonte híbrida para os seguintes tipos de energia: solar, térmica, por indução magnética e vibração mecânica. Além disso, pretende-se desenvolver um circuito integrado de uma fonte híbrida de energia.

REFERÊNCIAS

ABDELHEDI, R.; AMMARI, A. C.; SARI, A.; LAHYANI, A.; VENET, P. **Optimal power sharing between batteries and supercapacitors in electric vehicles.** In: Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT), 2016 7th International Conference on. IEEE, p. 97-103, 2016.

BAIOCCHI, O.; CARVALHO, F. B. S.; SOUZA, C. P.; SOARES, S. A. F.; LEAL, B. G.; BACURAU, R. M.; DUARTE, L. **Wireless Sensor Networks Research Cooperation Between University of Washington Tacoma and Brazilian Universities.** XIII International Conference on Engineering and Technology Education, Portugal, p. 29-33, 2014.

BIBBO, D; CONFORTO, S.; LAUDANI, A.; LOZITO, G. M. **Solar energy harvest on bicycle helmet for smart wearable sensors.** In: Research and Technologies for Society and Industry (RTSI), 2017 IEEE 3rd International Forum on. IEEE, p. 1-6, 2017.

CHOU, Y.Y.; WU, C.C.; CHEN, Y.H.; HUANG, Y.C.; CHIU, Y.C.; TSAI, L.J.; HSIEH, W.C.; LI, W.C.; HUANG, Y.J.; LU, S.S. **Multi-input energy harvesting interface for low power biomedical sensing system.** Proceedings of the International Symposium on Next-Generation Electronics, Maio 7-10, 2014, Kwei-Shan, Taiwan, pp: 1-2.

GUILAR, N. J.; KLEEBURG, T. J.; CHEN, A.; YANKELEVICH, D. R.; AMIRTHARAJAH, R. **Integrated solar energy harvesting and storage.** IEEE Trans. Very Large Scale Integr. (VLSI) Syst., vol. 17, no. 5, pp. 627–637, 2009.

GUNGOR, V. C.; HANCKE, G. P. **Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches.** IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 10, pp. 4258–4265, Oct. 2009.

HART, Daniel W. **Introduction to power electronics.** New Jersey: Prentice Hall, 1997. 500 p.

HSIEH, Y. T.; FANG, C. L.; SU, C. F.; TSAI, H. H.; JUANG, Y. Z. **A hybrid ambient energy harvesting integrated chip (IC) for the Internet of Things (IoT) and portable applications.** In: Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2016 19th International Conference on. IEEE, 2016. p. 1-4.

HULEIHEL, Y.; CERVERA, A.; BEN-YAAKOV, S. **A high gain DC-DC converter for energy harvesting of thermal waste by thermoelectric generators.** In: Electrical & Electronics Engineers in Israel (IEEEI), 2012 IEEE 27th Convention of. IEEE, p. 1-5, 2012.

- KANG, T.; KIM, S.; HYOUNG, C.; KANG, S.; PARK, K. **An Energy Combiner for a Multi-Input Energy-Harvesting System**. IEEE Transactions on Circuits and Systems—II: Express Briefs, Vol. 62, no.9. Setembro, 2015.
- KANSAL, A.; HSU, J.; ZAHEDI, S.; SRIVASTAVA, M. B. **Power Management in Energy Harvesting Sensor Networks**. Trans. Embedded Computing Systems, vol. 6, no. 4, p. 32, 2007
- KHALIGH, A.; ZENG, P.; ZHENG, C. **Kinetic energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic technologies**—State of the art. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 3, pp. 850–860, 2010.
- KOUL, S.; AHMED, S.; KAKKAR, V. **A Comparative Analysis of Different Vibration Based Energy Harvesting Techniques for Implantables**. International Conference on Computing, Communication and Automation, 2015.
- LHERMET, H.; CONDEMINE, C.; PLISSONNIER, M.; SALOT, R.; AUDEBERT, P.; ROSSET, M. **Efficient power management circuit: From thermal energy harvesting to above-IC microbattery energy storage**. IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 43, no. 1, pp. 246–255, 2008.
- LINEAR TECHNOLOGY. **LTC2935 Ultra-low Power Supervisor with Power-Fail Output, Selectable Thresholds**. Disponível em <<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/2935fa.pdf>>. Acessado em junho 2017.
- LINEAR TECHNOLOGY. **LTC3108 Ultra-low Voltage Step-Up Converter and Power Manager**. Disponível em <<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3108fc.pdf>>. Acessado em maio 2017.
- LINEAR TECHNOLOGY. **LTC3459 10V Micropower Synchronous Boost Converter**. Disponível em <<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3459fc.pdf>>. Acessado em junho 2017.
- LINEAR TECHNOLOGY. **LTC3588-1 Nanopower Energy Harvesting Power Supply**. Disponível em <<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/35881fc.pdf>>. Acessado em junho 2017
- MARTINS, Denizar Cruz; BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potência: Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**. 2. ed. rev. Florianópolis: Edição dos Autores, 2006. 377 p.
- RANDALL, J. F.; JACOT, J. **Is AM1.5 applicable in practice? Modelling eight photovoltaic materials with respect to light intensity and two spectra**. *Renew. Energy*, vol. 28, no. 12, pp. 1851–1864, Oct. 2003.
- RASHID, Muhammad H. **Power Electronics Handbook**. Florida: Academic Press, 2001. 895 p.

- ROSCOE, N. M.; JUDD, M. D. **Harvesting energy from magnetic fields to power condition monitoring sensors**. IEEE Sensors Journal, v. 13, n. 6, p. 2263-2270, 2013.
- SANTOS, M. P. ; VIEIRA, D. A. ; Rodriguez, Y. P. M. ; SOUZA, C. P. ; MORAES JUNIOR, T. O. . **Energy harvesting using magnetic induction considering different core materials**. In: 2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2014, Montevideo. 2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2014.
- SANTOS, Maraiza Prescila dos. **Sistema Eletrônico Energeticamente Autônomo com Colheita de Energia por Indução Magnética**. 2015. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.
- SINGH, A.; PATTNAIK, S. **Design of a efficient power sharing strategy for a battery-ultracapacitor hybrid energy storage system**. In: Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), IEEE International Conference on. IEEE, p. 1-5, 2016.
- SINGH, M.; SINGH, J.; KUCHROO, P.; BHATIA, H.; BHAGAT, S.; SHARMA, G.; SIDHU, E. **Efficient Autonomous Solar Panel and Thermo-Electric Generator (TEG) Integrated Hybrid Energy Harvesting System**. Progress In Electromagnetic Research Symposium (PIERS). Shangai, 2016.
- SOUZA, C. P.; CARVALHO, F. B. S.; SILVA, F. A. N.; ANDRADE, H. A.; SILVA, N. DE V.; BAIOCCHI, O.; MÜLLER, I. **On Harvesting Energy from Tree Trunks for Environmental Monitoring**. International Journal of Distributed Sensor Networks (Online), v. 2016, p. 1-9, 2016.
- SUDEVALAYAM, S.; KULKARNI, P. **Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications**. IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 13, no. 3, 2011.
- TADESSE, Y.; ZHANG, S.; PRIYA, S. **Multimodal energy harvesting system: piezoelectric and electromagnetic**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v. 20, n. 5, p. 625-632, 2009.
- TAN, W. M.; JARVIS, S. A. **Energy harvesting noise pollution sensing WSN mote: Survey of capabilities and limitations**. In: Wireless Sensor (ICWISE), 2013 IEEE Conference on. IEEE, p. 53-60, 2013.
- TAN, Y. K.; PANDA, S. K. **Energy Harvesting from Hybrid Indoor Ambient Light and Thermal Energy Sources for Enhanced Performance of Wireless Sensor Nodes**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol, 58, no. 9, pp. 4424-4435, 2011.
- TARTAGNI, M. **Energy Autonomous Systems: Future Trends in Devices, Technology, and Systems**. CATRENE Working Group on Energy Autonomous Systems. [S.l.], p. 84. 2009.

VIEHWEGER, C. et al. **Hybrid energy harvesting for autonomous sensors in building automation**. In: Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International. IEEE, p. 610-613, 2012.

VIEIRA, D. A.; SANTOS, M. P.; COSTA, A. C. F. M.; SOUZA, C. P. **Ni-Zn Ferrite Core Characterization for Magnetic-based Energy Harvesting Application**. Revista IEEE América Latina, v. 14, p. 4070-4075, 2016.

WAN, Q.; TEH, Y. K.; MOK, P. KT. **Analysis of a reconfigurable TEG array for high efficiency thermoelectric energy harvesting**. In: Circuits and Systems (APCCAS), 2016 IEEE Asia Pacific Conference on. IEEE, p. 662-665, 2016.

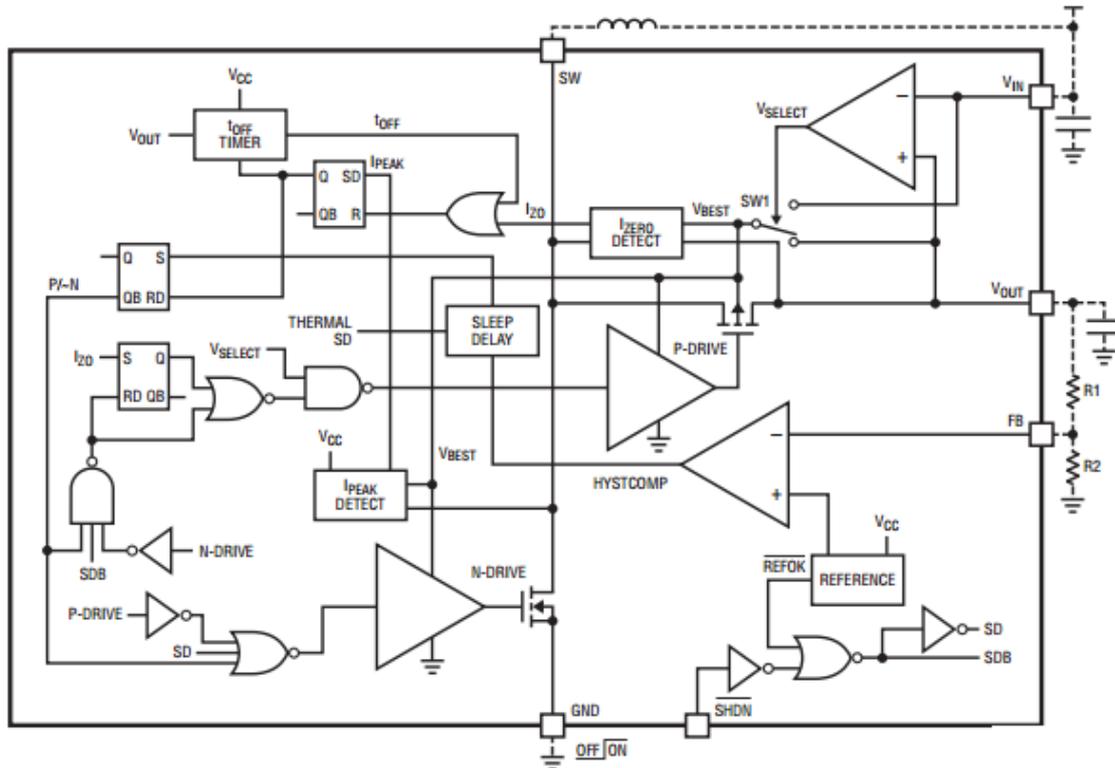
World Bank Group and Institute for Health Metrics and Evaluation. **The Cost of Air Pollution: Strengthening the Economic Case for Action**. Seattle: International Bank for Reconstruction And Development, 2016. 103 p.

ANEXOS

ANEXO A - DIAGRAMA INTERNO DETALHADO DO CI LTC3459

A figura abaixo ilustra o diagrama interno detalhado do CI LTC3459. Para maiores informações, consultar o *datasheet* do CI.

FIGURA A.1 - DIAGRAMA INTERNO DO CI LTC3459.

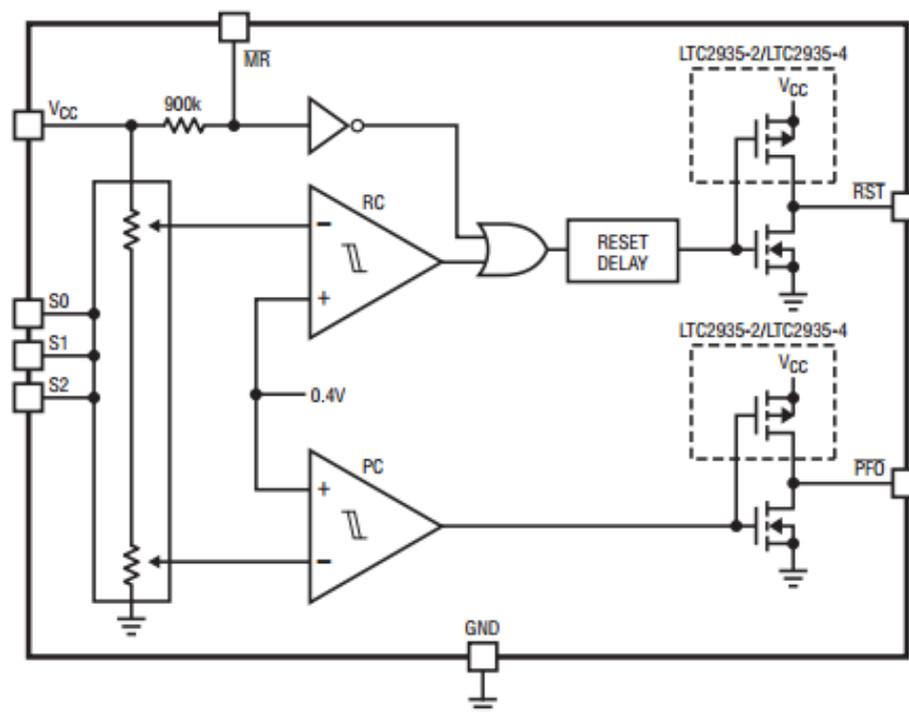


Fonte: Linear Technology (Datasheet LTC3459).

ANEXO B - DIAGRAMA INTERNO DETALHADO DO CI LTC2935

A figura abaixo ilustra o diagrama interno detalhado do CI LTC2935. Para maiores informações, consultar o *datasheet* do CI.

FIGURA B.1 - DIAGRAMA INTERNO DO CI LTC2935.

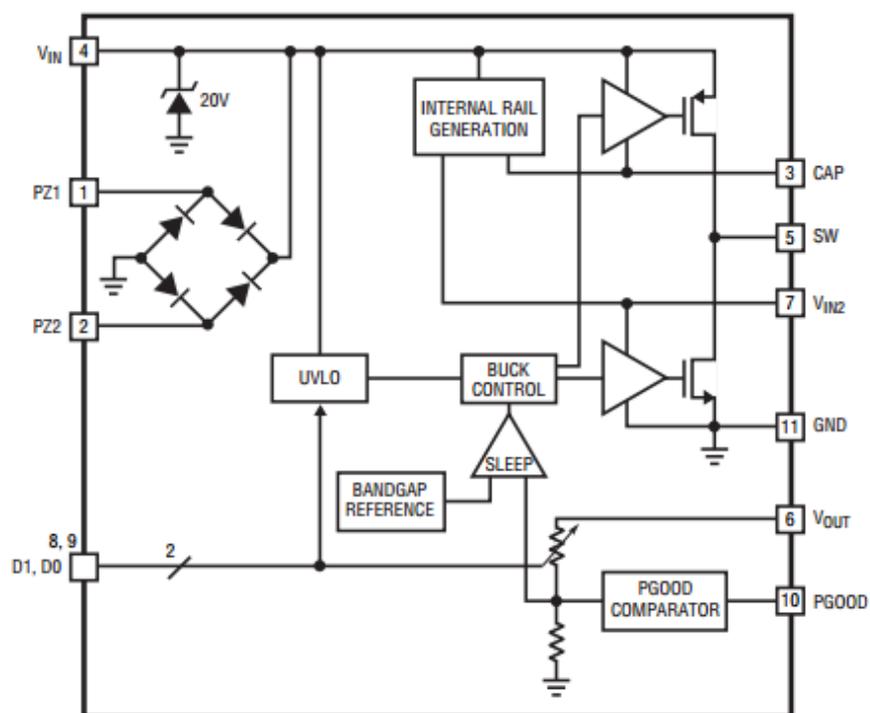


Fonte: Linear Technology (Datasheet LTC2935).

ANEXO C - DIAGRAMA INTERNO DETALHADO DO CI LTC3588-1

A figura abaixo ilustra o diagrama interno detalhado do CI LTC3588-1. Para maiores informações, consultar o *datasheet* do CI.

FIGURA C.1 - DIAGRAMA INTERNO DO CI LTC3588-1.



Fonte: *Linear Technology (Datasheet LTC3588-1)*.

