

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MATHEUS BAIROS SOARES CARVALHO

SISTEMA DE GESTÃO DE ENERGIA PARA PICO-BALÕES DE ALTA ALTITUDE

Alegrete

2023

MATHEUS BAIROS SOARES CARVALHO

SISTEMA DE GESTÃO DE ENERGIA PARA PICO-BALÕES DE ALTA ALTITUDE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Compassi Severo

Alegrete

2023

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a)
autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

C331s Carvalho, Matheus Bairros Soares

Sistema de gestão de energia para pico-balões de alta altitude / Matheus Bairros Soares
Carvalho.
89 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA
ELÉTRICA, 2023.

"Orientação: Lucas Compassi Severo".

1. Células Solares. 2. Conversor DC - DC. 3. Pico - Balões.
I. Título.

MATHEUS BAIROS SOARES CARVALHO

SISTEMA DE GESTÃO DE ENERGIA PARA PICO-BALÕES DE ALTA ALTITUDE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 16 de janeiro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Lucas Compassi Severo
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Sidinei Ghissoni
UNIPAMPA

Prof. Dr. Cristian Muller
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **CRISTIAN MULLER, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/01/2023, às 12:03, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SIDINEI GHISSONI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/01/2023, às 13:13, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUCAS COMPASSI SEVERO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/01/2023, às 17:37, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_o_rgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1032162** e o código CRC **58D2F4A6**.

RESUMO

Esta monografia visa apresentar o desenvolvimento do projeto de sistema de gestão de energia para pico-balões de alta altitude, mais especificamente o projeto capaz de gerar energia suficiente de 245,03 mW de potência a fim de alimentar os componentes eletrônicos do tracker do pico-balão de alta altitude que está em desenvolvimento pelo clube do rádio através do Projeto Minuano.

No documento são apresentados resultados de máxima potência de sete arranjos de células solares para determinada carga, de testes de células solares conectados em conversor DC-DC, de criação de três PCIs funcionais de dois conversores DC-DC e apresentação da metodologia utilizada para obtenção dos resultados, sendo os testes realizado na Universidade Federal do Pampa, no laboratório do Grupo de Arquitetura de Computadores e Microeletrônica (GAMA).

Para a validação e testes da metodologia foram criados três sistemas com os conversores TPS61097A e TPS61200. Nos quais são compostos por conjuntos de células solares em série e/ou paralelo conectado em conversores citados acima.

Destes três sistemas, o com o conversor TPS61200 atingiu 3,28 V e 284,6 mW para uma potência de entrada de 338,6 mW, tendo assim 84,05% de eficiência.

Palavras-Chave: Pico-balão; Células solares; conversores.

ABSTRACT

This monograph aims to present the development of the energy management system project for high altitude pico-balloons, more specifically the project capable of generating enough energy of 245.03 mW of power in order to feed the electronic components of the high-altitude pico-balloon tracker that is being developed by the radio club through the Minuano Project.

The document presents results of maximum power of seven arrangements of solar cells for a given load, of tests of solar cells connected to a DC-DC converter, of the creation of three functional PCIs of two DC-DC converters and presentation of the methodology used to obtain the results, and the tests were carried out at the Federal University of Pampa, in the laboratory of the Computer Architecture and Microelectronics Group (GAMA).

For validation and testing of the methodology, three systems were created with the TPS61097A and TPS61200 converters. In which they are composed of sets of solar cells in series and/or parallel connected to the converters mentioned above.

Of these three systems, the one with the TPS61200 converter reached 3.28 V and 284.6 mW for an input power of 338.6 mW, thus having 84.05% efficiency.

Keywords: pico-balloons; Solar Cells; converters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Balão de alta altitude.....	16
Figura 2 - Camadas da atmosfera.....	17
Figura 3 - Pico Balloon Tracker	19
Figura 4 - Modelo elétrico equivalente da célula solar	23
Figura 5 - Exemplo de curva característica I-V.....	25
Figura 6 - 1ª etapa - Conversor Buck	26
Figura 7 - 2ª etapa - Conversor Buck	27
Figura 8 - Tensão nos terminais a e b.....	27
Figura 9 - 1ª etapa - Conversor Boost.....	28
Figura 10 - 2ª etapa - Conversor Boost.....	28
Figura 11 - Tensão sobre o indutor	29
Figura 12 - Conversor TPS61097A	30
Figura 13 - Conversor TPS61200.....	32
Figura 14 - Fluxograma da metodologia para alcançar os resultados requeridos (PP&D)	34
Figura 15 - Fluxograma da metodologia para alcançar os resultados requeridos (TCC)	36
Figura 16 - Fonte de alimentação Keysight modelo E36312A	38
Figura 17 - Osciloscópio digital YOKOGAWA modelo DLM2054	38
Figura 18 - Multímetro Digital TRUE-RMS Politem modelo POL-41A.....	39
Figura 19 - Multímetro digital Minipa modelo ET-1110A	39
Figura 20 - Célula solar de silício policristalino SUNYIMA 52 mm x 52 mm.....	40
Figura 21 - Célula solar 40 mm x 20 mm	40
Figura 22 - Célula solar de silício policristalino SUNYIMA 52 mm x 19 mm.....	40
Figura 23 - Contatos da célula solar de 52 mm x 19 mm	41
Figura 24 - Fluxo pastoso 30G seringa pro solder BGA.....	41
Figura 25 - Ferro de solda EDA modelo 9XG 40 W	42
Figura 26 - Resistor de potência de 10 W	42
Figura 27 - Forno de refusão fraca ProtoFlow E	42
Figura 28 - Balança de Cozinha Digital 10 kg Folia Imports.....	43
Figura 29 - Peça de polipropileno.....	43

Figura 30 - Modelo 3D da estrutura.....	44
Figura 31 - Estrutura inclinada com 4 células solares em série	44
Figura 32 - Modelo equivalente em circuitos elétricos da figura 29	45
Figura 33 - Circuito do TPS61097A.....	46
Figura 34 - Esquemático da PCI TPS61097A	46
Figura 35 - PCI do TPS61097A.....	46
Figura 36 - PCI do TPS61097A com todos os componentes	47
Figura 37 - Conversor TPS61097A conectado à estrutura.....	47
Figura 38 - Esquemático da proposta	49
Figura 39 - Circuito do TPS61200 versão 1	50
Figura 40 - Esquemático da PCI TPS61200 versão 1	50
Figura 41 - PCI do TPS61200 versão 1	50
Figura 42 - PCI TPS61200 com todos os componentes	51
Figura 43 - Circuito de três TPS61097A com a entrada em comum	51
Figura 44 - Esquemático da PCI de três TPS61097A com entrada em comum.....	52
Figura 45 - PCI de três TPS61097A com todos os componentes	52
Figura 46 - Massa dos três conversores TPS61097A	53
Figura 47 - Valores de funcionamento sem carga de três conversores TPS61097A.....	54
Figura 48 - Valores de funcionamento com carga de 33,3 Ω de três conversores TPS61097A.....	55
Figura 49 - Valores de funcionamento com carga de 48,3 Ω , 10 k Ω e 220 Ω de três conversores TPS61097A.....	56
Figura 50 - Valores de funcionamento com carga de 48,3 Ω , 18 k Ω e 220 Ω de três conversores TPS61097A.....	57
Figura 51 - Esquemático da PCI TPS61200 versão 2.....	58
Figura 52 - PCI do TPS61200 versão 2	58
Figura 53 - Circuito do TPS61200 versão 3	58
Figura 54 - Esquemático da PCI TPS61200 versão 3.....	59
Figura 55 - PCI do TPS61200 versão 3	59
Figura 56 - Circuito do TPS61200 versão 4	59
Figura 57 - Esquemático da PCI TPS61200 versão 4.....	60
Figura 58 - PCI do TPS61200 versão 4	60
Figura 59 - Circuito do TPS61200 versão 5	60

Figura 60 - Esquemático da PCI TPS61200 versão 5.....	61
Figura 61 - PCI do TPS61200 versão 5	61
Figura 62 - Traseira da PCI do TPS61200 versão 5	61
Figura 63 - Massa do conversor TPS61200.....	62
Figura 64 - Valores de funcionamento, sem carga, do conversor TPS61200 ..	63
Figura 65 - Valores de funcionamento, com carga 58,3 Ω , do conversor TPS61200	64
Figura 66 - Valores de funcionamento, com carga 36,3 Ω , do conversor TPS61200	65
Figura 67 - Massa do Conversor TPS61097A.....	66
Figura 68 - Valores de funcionamento, sem carga, do conversor TPS61097A	67
Figura 69 - Valores de funcionamento, com carga de 36,3 Ω , do conversor TPS61097A.....	68
Figura 70 - Estrutura com três células solares em série	68
Figura 71 - Modelo equivalente em circuitos elétricos da figura 68.....	69
Figura 72 - Estrutura com quatro células solares em série	70
Figura 73 - Modelo equivalente em circuitos elétricos da figura 70.....	70
Figura 74 - Estrutura com quatro células solares em série conectadas em paralelo com quatro outras em série	71
Figura 75 - Modelo equivalente em circuitos elétricos da figura 72.....	71
Figura 76 - Massa da estrutura da figura 72	72
Figura 77 - Estrutura com cinco células solares em série conectadas em paralelo com cinco outras em série.....	74
Figura 78 - Modelo equivalente em circuitos elétricos da figura 75.....	74
Figura 79 - Massa da estrutura da figura 75	75
Figura 80 - Estrutura com onze células solares em série.....	77
Figura 81 - Modelo equivalente em circuitos elétricos da figura 78.....	77
Figura 82 - Estrutura com oito células solares em série.....	79
Figura 83 - Modelo equivalente em circuitos elétricos da figura 80.....	79
Figura 84 - Massa da estrutura da figura 80	80
Figura 85 - Conversor 3xTPS61097A conectado à estrutura	82
Figura 86 - Conversor TPS61200 conectado à estrutura	83
Figura 87 - Conversor TPS61097A conectado à estrutura.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potências exigidas para os componentes do tracker	33
Tabela 2 - Dados da geração de energia de quatro células solares em série..	45
Tabela 3 - Dados da geração de energia das quatro células solares em série conectadas ao conversor DC-DC	48
Tabela 4 - Dados da geração de energia de três células solares em série	69
Tabela 5 - Dados da geração de energia de quatro células solares em série..	70
Tabela 6 - Dados da geração de energia de quatro células solares em série conectadas em paralelo com quatro outras em série	73
Tabela 7 - Dados da geração de energia de cinco células solares em série conectadas em paralelo com cinco outras em série	76
Tabela 8 - Dados da geração de energia de onze células solares em série	78
Tabela 9 - Dados da geração de energia de oito células solares em série	81
Tabela 10 - Dados da geração de energia de oito células solares em série conectadas ao conversor DC-DC	83
Tabela 11 - Dados da geração de energia das cinco células solares em série conectadas em paralelo com cinco outras conectadas ao conversor DC-DC ..	84
Tabela 12 - Dados da geração de energia das cinco células solares em série conectadas em paralelo com cinco outras conectadas ao conversor DC-DC ..	85

LISTA DE ABREVIATURAS

mph – milhas por hora

m/s – metros por segundo

μm – micrômetro

cm – centímetro

km – quilômetro

m^3 – metro cúbico

mW – miliwatt

kHz – quilohertz

MHz – mega-hertz

η – rendimento

mA – miliampere

Ω – ohm

k Ω - quiloohm

V – volt

μF – microfarad

μH – microhenry

C.I. – circuito integrado

P_{OUT} – potência de saída

P_{IN} – potência de entrada

R_L – resistência da carga

I_L – corrente da carga

V_L – tensão da carga

I_P – corrente de entrada

V_P – tensão de entrada

g – grama

kg – quilograma

LISTA DE SIGLAS

FEI – Centro Universitário da Fundação Educacional Inaciana

GPIO – Portas Programáveis de Entrada e Saída de Dados

PCI – Placa de Circuito Impresso

GPS – Sistema de Posicionamento Global

DC – Direct Current

SMD – Tecnologia de montagem superficial

PP&D – Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento

TCC – Trabalho de Conclusão ao Curso

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Projeto Minuano	18
1.2	Motivação	20
1.3	Objetivos	21
1.3.1	Objetivo Geral	21
1.3.2	Objetivos Específicos	21
1.4	Organização	21
2	Conceitos Gerais e Revisão de Literatura	22
2.1	Energia Fotovoltaica	22
2.1.1	Modelagem da célula solar	23
2.1.2	Curva Característica	25
2.2	Conversor DC – DC	26
2.2.1	Conversor Buck	26
2.2.2	Conversor Boost	28
2.2.3	Conversor DC-DC TPS61097A	30
2.2.4	Conversor DC-DC TPS61200	31
3	Metodologia, Equipamentos e Materiais	33
3.1	Materiais e Equipamentos	38
4	Apresentação da Pesquisa e Análise dos Resultados	44
4.1	Resultados do PP&D	44
4.1.1	Proposta do PP&D para o TCC	48
4.2	Resultados do TCC	51
4.3	Sistemas finais de cada conversor	82
5	Considerações Finais	86
	Referências	87

1 Introdução

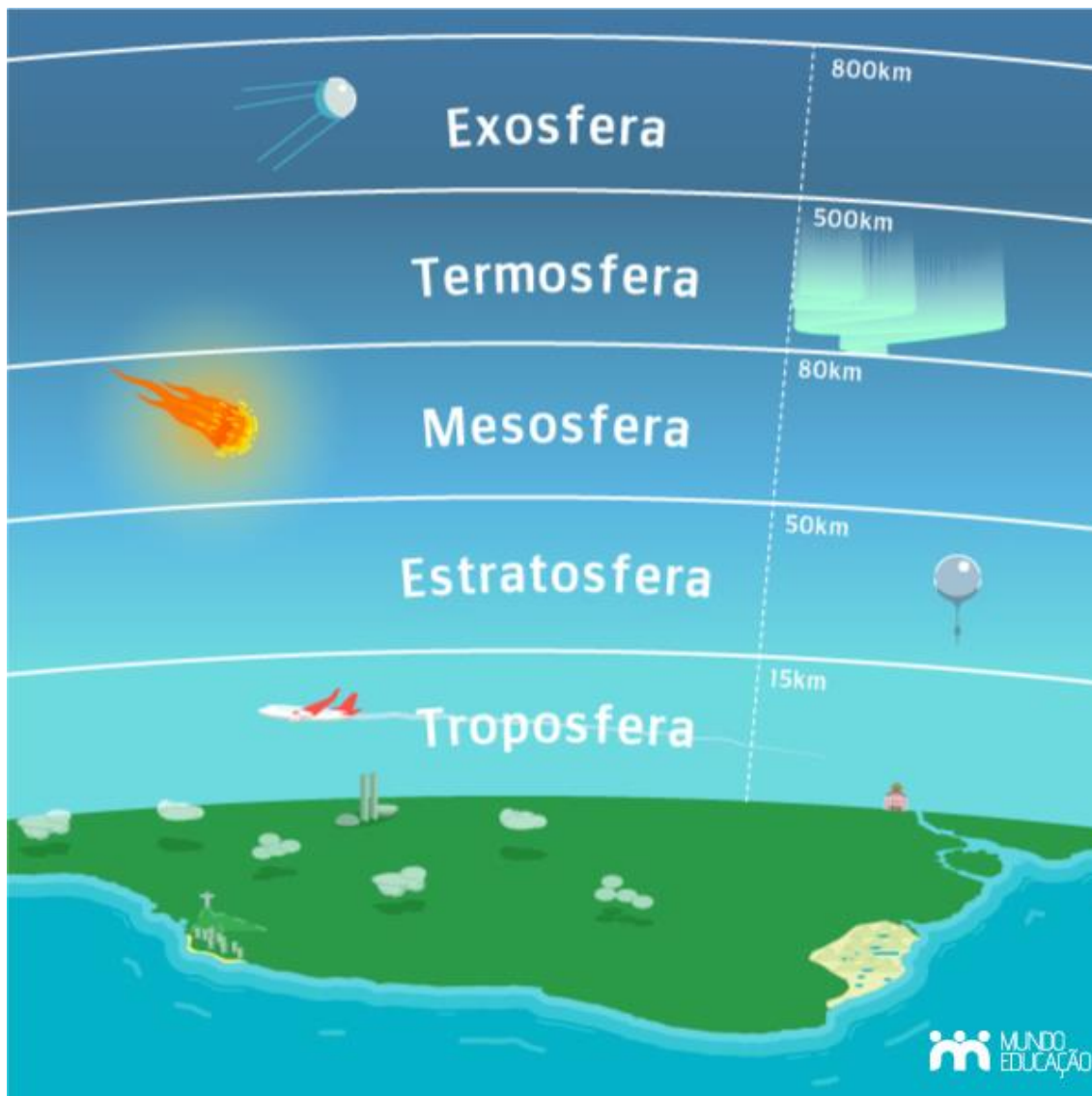
Balões de alta altitude (High-Altitude Balloons - HAB) são balões geralmente preenchidos com hélio ou hidrogênio (Figura 1) que são mais leves que o ar, os quais são liberados na atmosfera com uma altitude capaz de atingir a estratosfera (11 Km a 50 Km de altitude). Na Figura 2 são mostradas as camadas da atmosfera.

Figura 1 - Balão de alta altitude



Fonte: <https://www.rmham.org/rmham-nm-launches-pico-balloon/>

Figura 2 - Camadas da atmosfera



Fonte: <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/camadas-atmosfera.htm>

Em 23 de maio de 2002, o grupo ISAS (Institute of Space and Astronautical Science) lançou um balão (o BU60-1) com volume de 60.000 m³ fabricado com filme de polietileno ultrafino com espessura de 3,4 µm. O balão atingiu a altitude de 53,0 Km, que é a maior altitude já alcançada por um balão, ultrapassando o recorde mundial anterior de 51,8 Km alcançado pelo ultra grande balão de 1.350.000 m³ lançado pelos EUA em 1972. Este acontecimento proporcionou uma nova era para observações científicas em grandes altitudes (JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (2008)).

Esses balões carregam uma carga útil (caixa isolada, contendo alguns componentes eletrônicos, como GPS, microcontrolador e um rádio). Com essa

carga, o módulo GPS pode fornecer informações sobre a posição do balão, as quais são passadas para o microcontrolador que lê as informações e as converte para transmitir esses dados por um sinal de rádio para uma estação terrestre a fim de estudar o comportamento atmosférico.

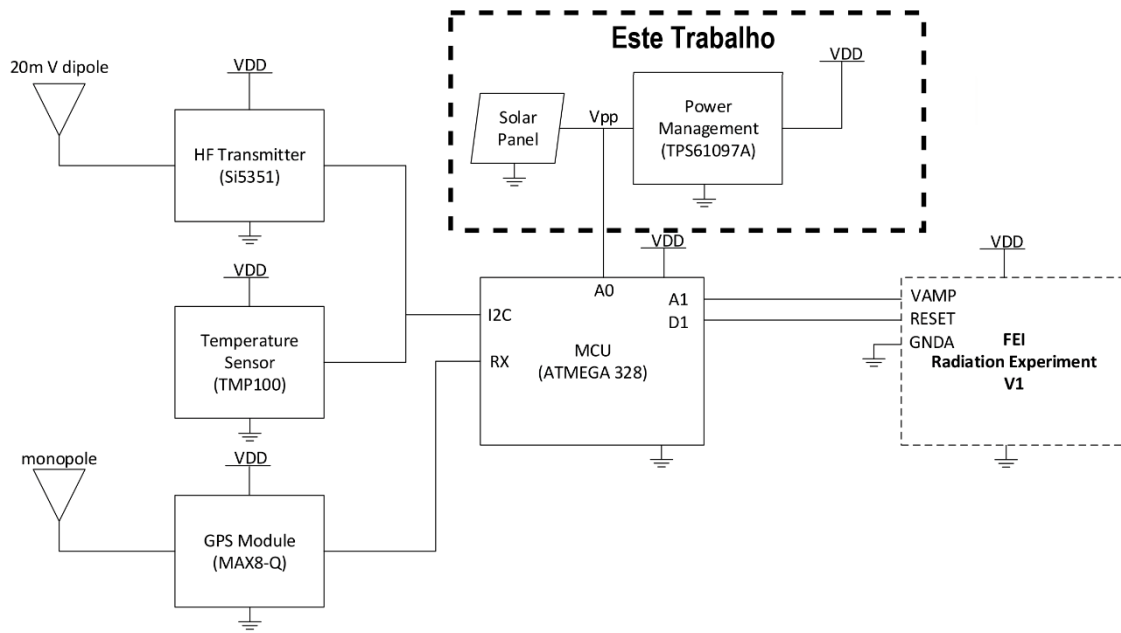
1.1 Projeto Minuano

O projeto minuano é inspirado no projeto Picoballoon, que é um esforço de pesquisa internacional que permite que estudantes trabalhem em conjunto e desenvolvam métodos e tecnologia para pesquisar o comportamento da atmosfera. Picoballoon é uma sonda estratosférica ultraleve que pode sobreviver a condições extremas e que pode voar por períodos muito longos e coletar dados atmosféricos.

O projeto minuano visa lançar um balão com um transmissor de sinais de rádio com uma massa desejável de no máximo 15 gramas e um receptor que será instalado no Campus Alegrete da UNIPAMPA, a fim de receber os sinais do transmissor. O objetivo do projeto é realizar o lançamento do balão para que o mesmo se mantenha numa altitude próxima a 14 Km, para que a pressão do balão e da atmosfera alcancem valores equivalentes, durante um longo período, capaz de percorrer todo o globo terrestre tornando possível que diversos radioamadores consigam captar o sinal transmitido pelo balão. Segundo o Euronews, com uma altitude maior, os painéis solares produzem mais energia do que em altitudes menores. Todo o desenvolvimento do projeto será feito na Universidade Federal do Pampa em Alegrete.

O tracker do projeto minuano é constituído por um microcontrolador, um módulo GPS, um transmissor, um sensor de temperatura, um sensor de radiação desenvolvido pela FEI e um sistema de gestão de energia constituído por painéis solares e conversores DC-DC como mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Pico Balloon Tracker



Fonte: Clube do Rádio – Projeto Minuano

O Projeto Minuano tem como parceria:

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa;

GAMA – Computer Architecture and Microelectronics Group;

CLUBE DO RÁDIO – UNIPAMPA;

AMSAT-BR – The Radio Amateur Satellite Corporation Brazil;

LABRE – Liga de Amadores Brasileiros de Radioemissão;

USP – Universidade de São Paulo;

FEI – Centro Universitário da Fundação Educacional Inaciana "Padre Sabóia de Medeiros";

CRIAR SPACE SYSTEM - Desenvolvimento de soluções e sistemas inteligentes aplicados às áreas de trânsito, transporte, segurança, educação a distância e comunicação.

1.2 Motivação

A motivação para esse projeto surge a partir do fato do tracker do Projeto Minuano necessitar de um longo tempo de vida e de uma baixa massa para o balão sustentá-lo. Logo a única forma possível de alimentá-lo é utilizar células solares. Em função da impossibilidade do uso de bateria, devido sua massa ser elevada demais para o balão. Logo, com as células solares como fonte de alimentação, o tracker funcionará somente durante o dia.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Criar um sistema, composto por células solares e conversor DC-DC, capaz de gerar, no mínimo uma potência de 200 mW para alimentar os circuitos presentes no tracker.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Fabricar e realizar testes em conversores DC-DC a fim de encontrar o conversor com a melhor eficiência;
- Realizar o estudo dos efeitos da conexão série e paralelo das células solares e definir a ideal para o sistema, comprovando com testes;
- Utilizar células solares conectadas com conversor DC-DC a fim de gerar um nível de potência adequado e tensão de 3,3 V para o microcontrolador;
- Criar um sistema mais leve que 15 gramas.

1.4 Organização

A presente monografia está organizada da seguinte forma:

- **Capítulo 2:** Conceitos relacionados aos conversores DC – DC e às células solares.
- **Capítulo 3:** Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para a obtenção dos resultados e os materiais e equipamentos utilizados.
- **Capítulo 4:** Resultados dos testes dos sistemas criados.
- **Capítulo 5:** A conclusão do projeto.

2 Conceitos Gerais e Revisão de Literatura

2.1 Energia Fotovoltaica

Segundo Michael Boxwell (2021), a energia fotovoltaica é a energia dos fótons convertidas em energia elétrica graças a tecnologia das células fotovoltaica. O sol produz radiação no centro, que emite energia luminosa chamadas fótons. Os próprios fótons não têm peso físico, mas carregam enormes quantidades de energia e momento.

Os fótons viajam do núcleo do sol para a superfície com certo tempo (aproximadamente um milhão de anos). Uma vez que atingem as superfícies do sol, os fótons disparam pelo espaço a uma velocidade de 670.000.000 mph (299.516.800 m/s). Eles atingem a terra em aproximadamente 8 minutos.

Em 1839, um físico francês chamado Edmond Becquerel descobriu que certos materiais produziam uma corrente elétrica quando expostos à luz. Este efeito fotovoltaico é usado para gerar eletricidade em painéis solares.

Este material é criado por camadas de dois materiais semicondutores. Uma das camadas de material deve ter menos elétrons. Quando este material é exposto à luz solar, as camadas absorvem os fótons, excitando os elétrons e fazendo com que alguns deles saltem de uma camada para outra. Isso gera uma carga elétrica entre as duas camadas de material. As células solares são feitas de silício, que é cortado em wafers (fina fatia de material semicondutor).

Os fótons de luz que atingem uma célula solar podem ser refletidos ou absorvidos. Quando um fóton é absorvido pela célula de silício, uma corrente é produzida. Quanto mais fótons de luz são absorvidos pela célula solar, maior a corrente.

Alguns sistemas de células solares podem produzir uma quantidade muito pequena de eletricidade em noites de luar e até mesmo em dias nublados. A maior parte de sua eletricidade é produzida diretamente dos raios do sol.

Para obter quantidades significativas de eletricidade, várias células solares são conectadas. Esses grupos de células são chamados de módulos fotovoltaicos, ou painéis solares.

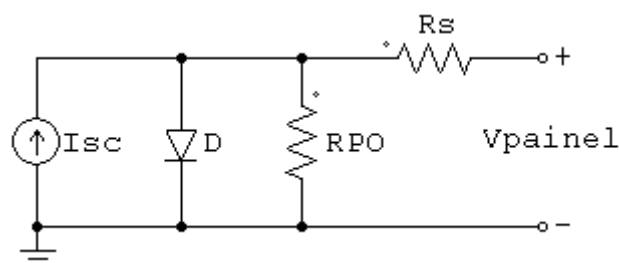
2.1.1 Modelagem da célula solar

A célula solar é um dispositivo fotovoltaico que converte a corrente contínua da luz solar em eletricidade. As células solares usam um material semicondutor para coletar fótons e produzir elétrons. Desta forma, os elétrons podem transferir energia do sol para o circuito e criar eletricidade. Nos últimos anos, o interesse em células fotovoltaicas aumentou dramaticamente devido à sua sustentabilidade e capacidade de gerar energia verde. Energia verde refere-se a qualquer energia gerada a partir de matérias-primas naturais e renováveis. (PORTAL SOLAR, 2021).

As células solares usam um semicondutor para conduzir elétrons através de uma corrente elétrica. O semicondutor em uma célula solar é composto de um único tipo de silício cristalino. Quando a luz solar atinge uma superfície feita de silício, ela produz calor e cria um movimento nos átomos. Esse movimento faz com que os elétrons se movam livremente, criando uma corrente elétrica. A direção dessa corrente depende se é positiva ou negativa. Uma corrente positiva move os elétrons de locais de maior potencial para locais de menor potencial. Uma corrente negativa move o oposto: movendo elétrons de locais de menor potencial para locais de maior potencial.

Na Figura 4 é mostrado o modelo da célula solar equivalente em circuitos elétricos, onde D é o diodo intrínseco, I_{sc} é a corrente injetada devido à incidência de fótons, R_{PO} são as perdas ôhmicas devido à estrutura da célula e R_s é a resistência série do contato à conexão externa.

Figura 4 - Modelo elétrico equivalente da célula solar



Fonte: Autor

Segundo Roger Zamparete, é possível escrever a relação entre a corrente de saída, I_{PAINEL} , e as correntes internas da célula fotovoltaica, Equação 1.

$$I_{PH} = I_D + I_{SH} + I_{PAINEL} \quad (1)$$

O comportamento atual de um diodo é bem conhecido e descrito pela equação 2. I_D é a corrente do diodo, I_{SAT} é a corrente quando o diodo é polarizado reversamente, V_D é a tensão do diodo, n é o fator de idealidade e V_T é a tensão térmica.

$$I_D = I_{SAT} \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right) \quad (2)$$

É possível relacionar V_D e V_{PAINEL} com I_{PAINEL} através da Equação 3 e usá-la para relacionar V_{PAINEL} e I_{PAINEL} com I_{SH} , Equação 4

$$V_D = V_{PAINEL} + R_S I_{PAINEL} \quad (3)$$

$$I_{SH} = \frac{V_{PAINEL} + R_S I_{PAINEL}}{R_{SH}} \quad (4)$$

Substituindo a Equação 2 e Equação 4 na Equação 1, uma equação que representa o comportamento da célula PV é obtida, Equação 5.

$$I_{PAINEL} = I_{PH} - I_{SAT} \left(e^{\frac{V_{PAINEL} + R_S I_{PAINEL}}{nV_T}} - 1 \right) - \frac{V_{PAINEL} + R_S I_{PAINEL}}{R_{SH}} \quad (5)$$

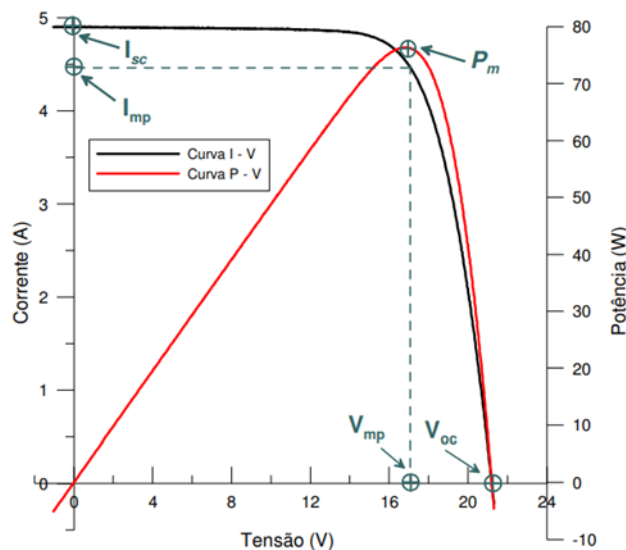
As relações I_{PAINEL} vs. V_{PAINEL} e P_{PAINEL} vs. V_{PAINEL} são apresentadas na Figura 5, com base na Equação 5.

2.1.2 Curva Característica

Segundo Fernando Schuck (2015), a curva característica de uma célula solar fornece informações importantes sobre sua qualidade e desempenho. Envolve levar pares de tensão e corrente de um ponto onde a tensão é zero e a corrente é máxima para um ponto onde a tensão é máxima e a corrente é zero e vice-versa. Nesta varredura, as características do gerador fotovoltaico têm três pontos importantes (Figura 5):

- Tensão de circuito aberto (V_{oc}): esta tensão é obtida quando os terminais do gerador estão desconectados de qualquer carga, então a corrente será zero.
- Corrente de curto-circuito (I_{sc}): é a corrente que flui através do gerador quando os terminais do gerador estão em curto-circuito. Neste ponto, a tensão é zero.
- Máxima Potência (P_m): Este é o ponto em que o produto da tensão e da corrente tem um valor máximo. Neste momento, V_m e I_m representam tensão e corrente máxima respectivamente, que determinam a potência máxima.

Figura 5 - Exemplo de curva característica I-V



Fonte: Gasparin, 2009.

2.2 Conversor DC – DC

Um conversor de tensão DC-DC é um circuito eletrônico que converte o nível de tensão em corrente contínua de um nível para outro. Este conversor usa uma tensão direta pulsada aplicada a um indutor ou capacitor para gerar energia, que é então armazenada. Essa energia armazenada é então usada na saída do conversor de tensão DC-DC. A frequência na qual a tensão direta é aplicada é geralmente entre 100 kHz e 5 MHz.

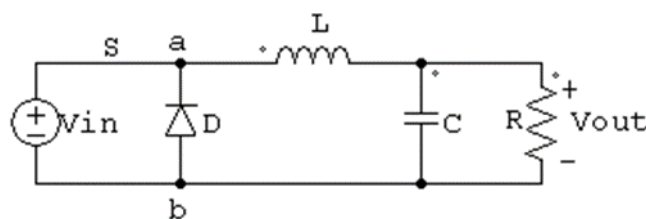
2.2.1 Conversor Buck

Segundo Ivo Barbi (2001), um conversor buck, ou conversor abaixador, é um conversor DC-DC que diminui a tensão da entrada (fonte) para a saída (carga) enquanto aumenta a corrente. É um tipo de fonte de alimentação comutada. Como um conversor DC/DC, os conversores de comutação, como os conversores buck, oferecem uma eficiência energética muito maior do que os reguladores lineares, que são circuitos mais simples que reduzem a tensão dissipando energia como calor, mas não aumentarão a corrente de saída.

O conversor buck opera, segundo Petry (2001), em duas fases distintas:

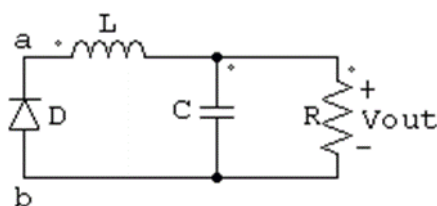
Na primeira etapa ($0 - DT_s$), mostrada na Figura 6, o S está conduzindo, logo conduz a corrente pelo L e o R. Nesta Etapa, V_{in} alimenta o V_{out} e magnetiza o indutor L.

Figura 6 - 1ª etapa - Conversor Buck



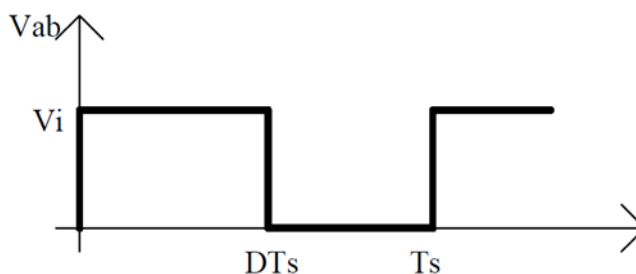
Fonte: Autor

Na segunda etapa ($DT_s - (1-D)T_s$), mostrada na Figura 7, o S é bloqueado e a energia do indutor L é transferida para a carga R. Isto é, o indutor é desmagnetizado.

Figura 7 - 2ª etapa - Conversor Buck

Fonte: Autor

O gráfico gerado da tensão V_{ab} pelas etapas do conversor buck é mostrada na Figura 8.

Figura 8 - Tensão nos terminais a e b

Fonte: Petry (2001, p. 5)

Vendo a Figura 8 e sabendo que a tensão média sobre o indutor tem que ser nula, tem-se a equação 6:

$$V_{out} = V_{ab_med} = \frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} V_{in} dt \quad (6)$$

Onde:

V_{out} : Tensão sobre a carga

V_{ab_med} : Tensão nos terminais a-b

T_s : Período

DT_s : Primeiro ciclo do período

V_{in} : Tensão de entrada

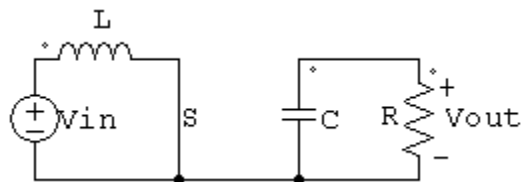
2.2.2 Conversor Boost

Segundo Ivo Barbi (2001), os conversores Boost são usados em aplicações eletrônicas para aumentar a tensão aplicada aos circuitos eletrônicos. Eles também são usados para regular a tensão aplicada aos circuitos e para retificar fontes de alimentação chaveadas. Um conversor boost é um circuito eletrônico que aumenta a tensão aplicada a uma carga e reduz a corrente consumida pela carga.

O conversor boost opera, segundo Petry (2001), em duas fases distintas:

Na primeira etapa ($0 - DTs$), mostrada na Figura 9, o S está conduzindo, logo conduz a corrente pelo L. Nesta Etapa, V_{in} magnetiza o indutor L.

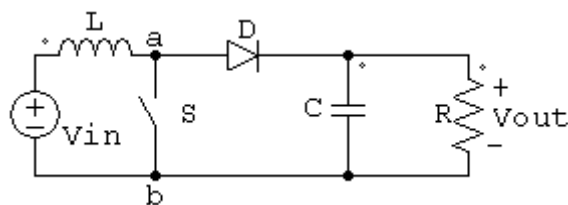
Figura 9 - 1ª etapa - Conversor Boost



Fonte: Autor

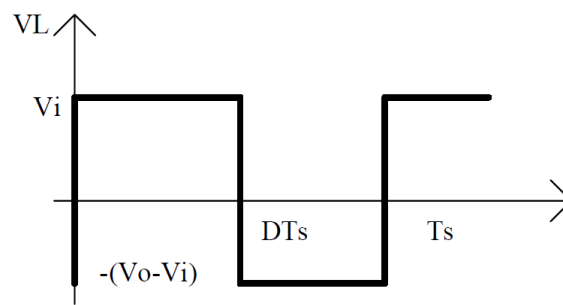
Na segunda etapa ($DTs - (1-D)Ts$), mostrada na Figura 10, o S é bloqueado e a fonte V_{in} e o indutor L fornecem energia para a carga R. Isto é, a tensão aumenta.

Figura 10 - 2ª etapa - Conversor Boost



Fonte: Autor

O gráfico gerado da tensão sobre o indutor pelas etapas do conversor boost é mostrada na Figura 11.

Figura 11 - Tensão sobre o indutor

Fonte: Petry (2001, p. 7)

Vendo a Figura 11 e sabendo que a tensão média sobre o indutor tem que ser nula, tem-se a equação 7:

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} V_{in} dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{(1-D)T_s} (V_{out} - V_{in}) dt \quad (7)$$

Onde:

V_{out} : Tensão sobre a carga

V_{ab_med} : Tensão nos terminais a-b

T_s : Período

DT_s : Primeiro ciclo do período

V_{in} : Tensão de entrada

D : Razão cíclica

2.2.3 Conversor DC-DC TPS61097A

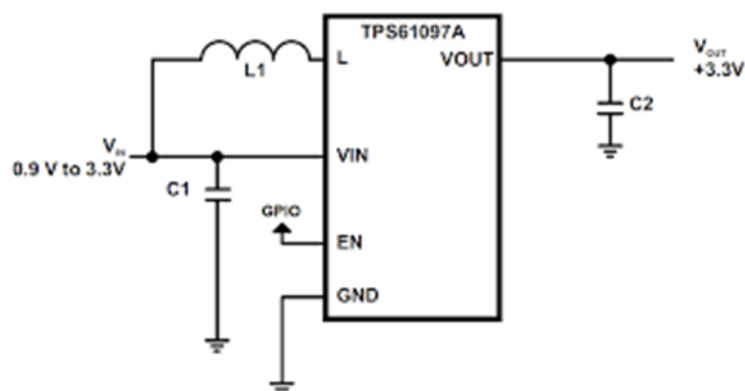
O circuito integrado TPS61097A [6] é um conversor DC-DC com larga aplicação em produtos comerciais. Segundo o datasheet do TPS61097A, ele fornece uma solução de energia para dispositivos alimentados por uma bateria alcalina de uma célula ou mais, NiCd ou NiMH, ou uma bateria Li-Ion ou Li-Polymer. Eles também podem ser usados em dispositivos alimentados por uma célula de combustível ou célula solar.

O TPS61097A pode fornecer até 100 mA na saída de 3,3 V ao usar uma bateria de Li-Ion ou Li-Polymer de célula única. O TPS61097A possui uma relação de tensão que determina a corrente de saída: quanto maior a relação de tensão, maior a corrente de saída.

A Figura 12 mostra o circuito de aplicação típica do conversor TPS61097A. Ele necessita de um indutor L1 e dois capacitores C1 e C2. O indutor L1 pode ser na faixa de 2,2 μH a 4,7 μH e os capacitores na faixa de 4,7 μF a 10 μF . A tensão de entrada de operação é de 0,9 V a 3,3V.

Entre os conversores DC-DC encontrados na literatura. O conversor em questão foi escolhido devido a sua faixa de tensão e potência adequadas para o projeto, pois ele consegue manter a tensão de saída em 3,3 V.

Figura 12 - Conversor TPS61097A



Fonte: Datasheet do conversor TPS61097A da TEXAS INSTRUMENTS

2.2.4 Conversor DC-DC TPS61200

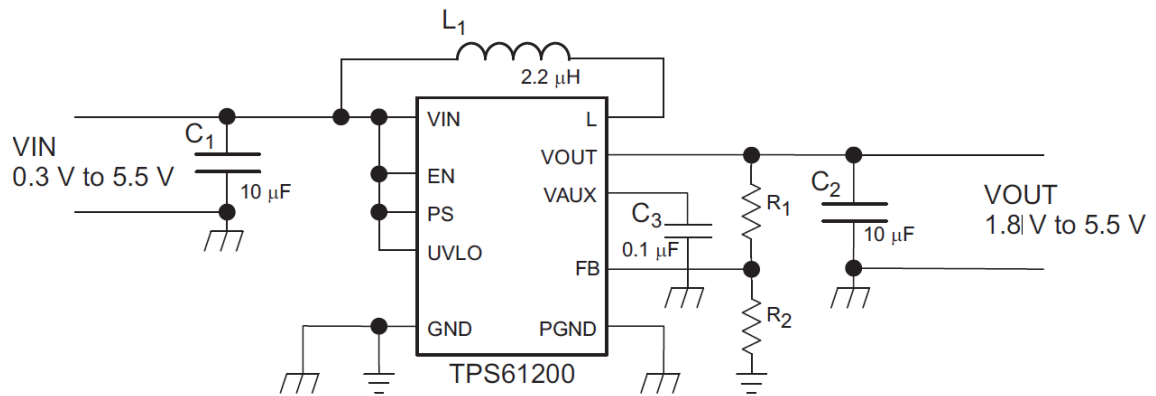
O Outro conversor DC-DC estudado neste trabalho é o TPS61200. Segundo o datasheet do TPS61200, ele fornece uma fonte de alimentação para produtos que usam uma bateria de uma célula ou mais (alcalina, NiCd, NiMH ou Li-Ion ou Li-Polymer). Eles também podem ser usados em dispositivos alimentados por uma célula solar ou célula de combustível.

O TPS61200 pode lidar com baixas tensões de entrada com eficiência e fornecer até 600 mA em uma saída de 5 V usando uma bateria de Li-Ion ou Li-Polymer de célula. O conversor é baseado em uma frequência fixa, controlador de modulação de largura de pulso (PWM) que usa retificação síncrona para aumentar a eficiência.

O conversor pode ser configurado para alternar em uma determinada frequência ou colocado no modo de economia de energia para manter a alta eficiência à medida que a corrente de carga aumenta. O modo de economia de energia pode ser desligado e a corrente limitada a 1500 mA em média. A tensão de saída pode ser controlada por um divisor resistivo implementado fora do chip.

A Figura 13 mostra o circuito de aplicação típica do conversor TPS61200. Ele necessita de um indutor L1 e três capacitores C1, C2 e C3. O indutor L1 pode ser na faixa de 1,5 μH a 4,7 μH , os capacitores C1 e C2 na faixa de 4,7 μF a 10 μF e o capacitor C3 na faixa de 0,1 μF a 1 μF . A tensão de entrada de operação é de 0,3 V a 5,5V.

Entre os conversores DC-DC encontrados na literatura. O conversor em questão foi escolhido devido a sua faixa de tensão e potência adequadas para o projeto, pois ele consegue manter a tensão de saída em um valor constante entre 1,8 e 5.5 V.

Figura 13 - Conversor TPS61200

Fonte: Datasheet do conversor TPS61200 da TEXAS INSTRUMENTS

3 Metodologia, Equipamentos e Materiais

Neste capítulo, é mostrado a metodologia, criada e seguida, para a obtenção dos resultados esperados pelo projeto minuano, como também os equipamentos e materiais utilizados no processo.

A ideia desse projeto é criar um sistema que gere energia para o tracker do balão do Projeto Minuano. Cada componente do tracker exige um certo nível de potência para seu funcionamento. Na Tabela abaixo são mostradas as potências exigidas por cada componente (Tabela 1).

Tabela 1 - Potências exigidas para os componentes do tracker

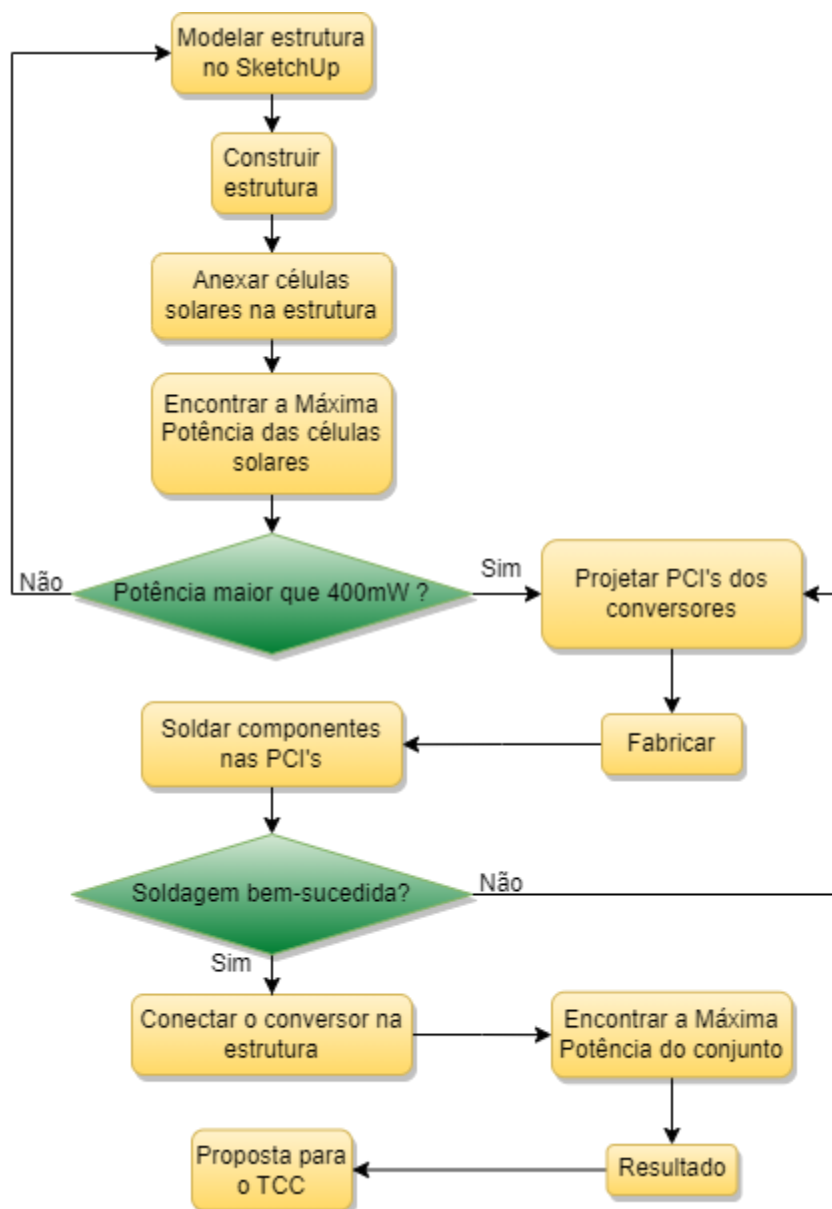
Componente	Potência (mW)
Si5351	79,86
TMP100	0,66
Max-7Q	97,35
ATMEGA 328 (4MHz)	17,16
Experimento da FEI	50,00
Total	245,03

Fonte: Clube do Rádio – Projeto Minuano

Para suprir a potência total dos componentes de 245,03 mW e tensão de 3,3 V foi desenvolvido, na disciplina de PP&D, um protótipo no laboratório GAMA (Grupo de Arquitetura de Computadores e Microeletrônica) na UNIPAMPA que consiste em células solares e conversores DC-DC. A ideia é que as células solares que estarão acima do nível das nuvens gerem um certo nível de tensão que passa pelo conversor e é distribuída para os componentes do tracker.

No Fluxograma abaixo (Figura 14) é mostrado a metodologia seguida no PP&D para a obtenção dos resultados exigidos.

Figura 14 - Fluxograma da metodologia para alcançar os resultados requeridos (PP&D)



Fonte: Autor

Segue os passos do fluxograma abaixo:

Primeiro passo: Utiliza-se o software SketchUp para esboçar a estrutura do sistema.

Segundo Passo: Criado a estrutura no software, confecciona-se um protótipo de estrutura em polietileno.

Terceiro Passo: Acopla-se células de 52 mm de comprimento por 52 mm largura (Figura 20) na estrutura soldando umas nas outras com um ferro de solda (Figura 25) e Fluxo pastoso (Figura 24) para auxiliar a fixação da solda.

Quarto Passo: É realizado testes de máxima potência do sistema que foi criado, utilização multímetros (Figuras 18 e 19) e resistores de potência de 10 W (Figura 26).

Quinto Passo: Analisa-se se o sistema alcança a potência exigida. Se sim, avance para o próximo passo. Se não volta para o primeiro passo.

Sexto Passo: Projetar PCI do conversor TPS61097A no software EasyEDA.

Sétimo Passo: Enviar os arquivos da PCI para o laboratório de telecomunicações, a fim dos profissionais que lá trabalham fabriquem a PCI.

Oitavo Passo: Com a PCI em mãos, soldar os componentes na placa, sendo eles, o CI do conversor, dois capacitores SMD de 10 uF e um indutor SMD de 4,7 uH. Utiliza-se ferro de solda (Figura 25) e fluxo pastoso (Figura 24).

Nono Passo: Analisar se a soldagem foi bem-sucedida, se sim, avance para o próximo passo. Se não volta para o sexto passo.

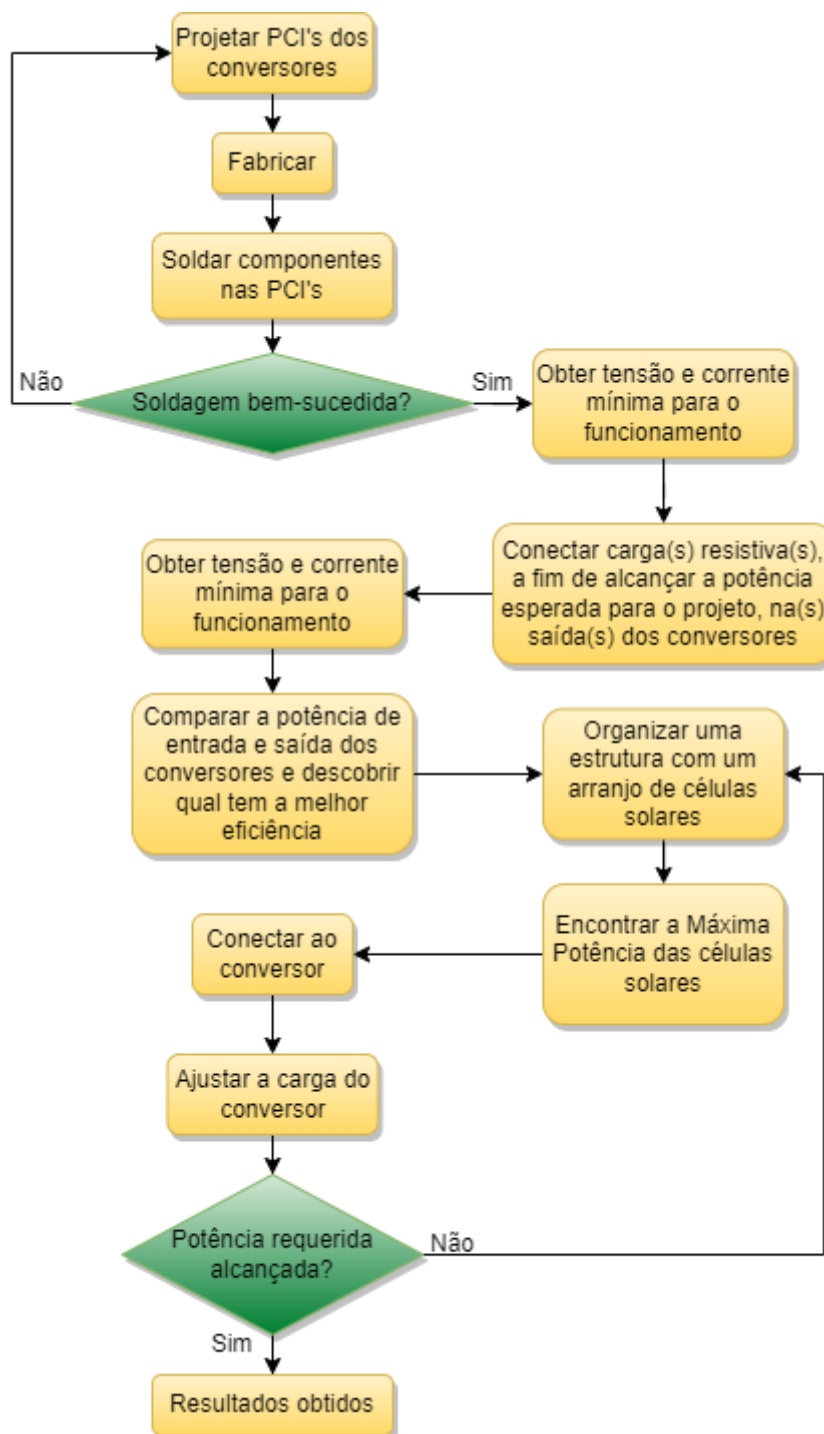
Décimo Passo: Conecta-se o conversor na estrutura com as células solares.

Décimo primeiro Passo: Realiza-se testes de máxima potência no novo sistema, utilizando multímetros (Figuras 18 e 19) e resistores de potência de 10 W (Figura 26).

Décimo segundo Passo: Analisar os resultados do sistema. Após a seguir a metodologia até alcançar os resultados foi proposto a ideia do TCC.

Para o TCC foi criada uma metodologia mais refinada a seguir para a obtenção dos resultados exigidos do sistema. No Fluxograma abaixo (Figura 15) é mostrado a metodologia seguida.

Figura 15 - Fluxograma da metodologia para alcançar os resultados requeridos (TCC)



Fonte: Autor

Segue os passos do fluxograma abaixo:

Primeiro passo: Projetar PCI do conversor TPS61200 no software EasyEDA.

Segundo Passo: Enviar os arquivos da PCI para o laboratório de telecomunicações, a fim dos profissionais do recinto fabriquem a PCI.

Terceiro Passo: Com a PCI em mãos, soldar os componentes na placa, sendo eles, o CI do conversor, três capacitores SMD, no qual, dois são de 10 uF e um é de 0,1 uF e um indutor SMD de 4,7 uH e dois resistores a calcular. Utiliza-se um forno de refusão (Figura 27) para a soldagem do CI, ferro de solda (Figura 25) e fluxo pastoso (Figura 24).

Quarto Passo: Analisar se a soldagem foi bem-sucedida, se sim, avance para o próximo passo. Se não volta para o primeiro passo.

Quinto Passo: Obter tensão mínima de funcionamento do conversor a vazio, utilizando uma fonte de tensão (Figura 16) e um osciloscópio (Figura 17).

Sexto Passo: Conectar uma carga (Figura 26) na saída do conversor.

Sétimo Passo: Obter tensão mínima de funcionamento do conversor com uma carga para gerar 300 mW, utilizando uma fonte de tensão (Figura 16) e um osciloscópio (Figura 17).

Oitavo Passo: Comparar a eficiência dos conversores criados.

Nono Passo: Organizar uma estrutura com um arranjo série e/ou paralelo de células solares (Figura 22), a fim de nutrir os conversores com os resultados obtidos pelo osciloscópio (Figura 17).

Décimo Passo: Encontrar a máxima potência desse arranjo de células solares utilizando resistores de potência (Figura 26) e multímetros para a medição (Figuras 18 e 19).

Décimo primeiro Passo: Conectar o conversor na estrutura de arranjo de células solares.

Décimo segundo Passo: Ajustar a carga para obter a potência desejada.

Décimo terceiro Passo: Se a potência exigida foi alcançada, avançar para o próximo passo, se não voltar para o nono passo.

Por fim, tem-se os resultados

3.1 Materiais e Equipamentos

Nesse subcapítulo são apresentados os principais Materiais e Equipamentos utilizados na obtenção dos resultados.

A Fonte de alimentação Keysight modelo E36312A (Figura 16) foi utilizada para gerar tensão para os conversores a fim de realizar testes.

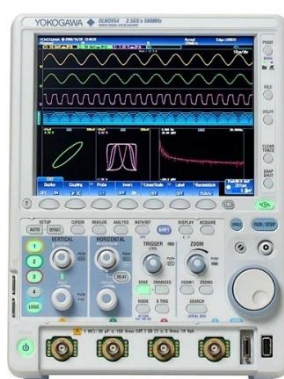
Figura 16 - Fonte de alimentação Keysight modelo E36312A



Fonte: <https://www.keysight.com/br/pt/support/E36312A/80w-triple-output-power-supply-6v-5a-2x-25v-1a.html>

O Osciloscópio digital YOKOGAWA modelo DLM2054 (Figura 17) foi utilizado para medir os valores mínimos de tensão e corrente para o funcionamento dos conversores.

Figura 17 - Osciloscópio digital YOKOGAWA modelo DLM2054



Fonte: <https://tmi.yokogawa.com/solutions/discontinued/dlm2000-mso-series/>

O Multímetro Digital TRUE-RMS Politem modelo POL-41A (Figura 18) foi utilizado para fazer a medição de tensão dentro do laboratório.

Figura 18 - Multímetro Digital TRUE-RMS Politem modelo POL-41A



Fonte: <https://www.asteletronica.com.br/multimetro-digital-true-rms-modelo-pol-41a>

O Multímetro Digital Minipa modelo ET-1110A (Figura 19) foi utilizado para fazer a medição de tensão fora do laboratório.

Figura 19 - Multímetro digital Minipa modelo ET-1110A



Fonte: <https://catalogo.oximaq.com.br/categorias/ferramentas-de-medicao-e-metrologia/multimetros/multimetro-digital-et-1110a-minipa.html>

As Células solares de silício policristalino SUNYIMA 52 mm x 52 mm (Figura 20) foram utilizadas no primeiro protótipo do PP&D.

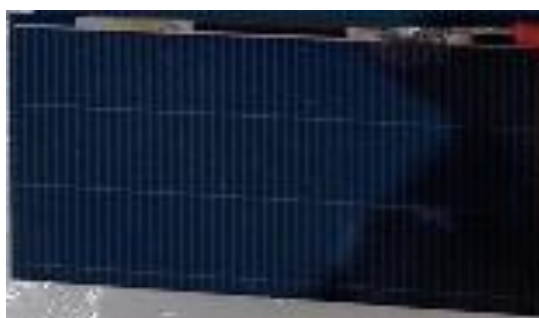
Figura 20 - Célula solar de silício policristalino SUNYIMA 52 mm x 52 mm



Fonte: <https://us.amazon.com/SUNYIMA-100pcs-Polycrystalline-Silicon-2x2inch/dp/B0895XHPKT>

As Células solares 40 mm x 20 mm (Figura 21) foram utilizadas apenas para encontrar a máxima potência delas, já que só havia posse de três dessas células.

Figura 21 - Célula solar 40 mm x 20 mm



Fonte: Autor

As Células solares de silício policristalino SUNYIMA 52 mm x 19 mm (Figura 22) foram utilizadas em todos os testes do TCC.

Figura 22 - Célula solar de silício policristalino SUNYIMA 52 mm x 19 mm



Fonte: <https://www.amazon.sa/-/en/AOSHIKE-Polycrystalline-Silicon-Photovoltaic-Charger/dp/B01NCQRCQR>

Figura 25 - Ferro de solda EDA modelo 9XG 40 W



Fonte: <https://www.magazineluiza.com.br/ferro-solda-soldar-estanho-40w-inmetro-220v-profissional-eda/p/egdeeadb2a/fs/fdsa/>

Os Resistores de potência (Figura 26) foram utilizados como carga para os conversores e também utilizado para encontrar a máxima potência das células solares.

Figura 26 - Resistor de potência de 10 W



Fonte: <https://www.mamuteletronica.com.br/resistor-porcelana-47k-ac10-10w-5>

O forno por refusão (Figura 27) foi utilizada para a soldagem de componentes difíceis de soldas com o ferro de solda.

Figura 27 - Forno de refusão fraca ProtoFlow E



Fonte: <https://www.directindustry.com/pt/prod/lpkf-laser-electronics/product-9183-435896.html>

A Balança digital (Figura 28) foi utilizada para medir as massas dos sistemas criados.

Figura 28 - Balança de Cozinha Digital 10 kg Folia Imports



Fonte: <https://www.submarino.com.br/produto/2899573762>

Pedaços de polipropileno foram utilizados para a confecção dos suportes dos painéis (Figura 29).

Figura 29 - Peça de polipropileno



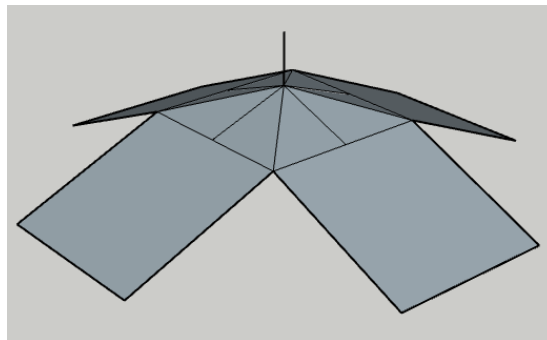
Fonte: Autor

4 Apresentação da Pesquisa e Análise dos Resultados

4.1 Resultados do PP&D

Inicialmente foi realizado, no software SketchUp, o desenho 3D para simular como seria a estrutura do sistema de alimentação do Tracker do Projeto Minuano – HAB (Figura 30).

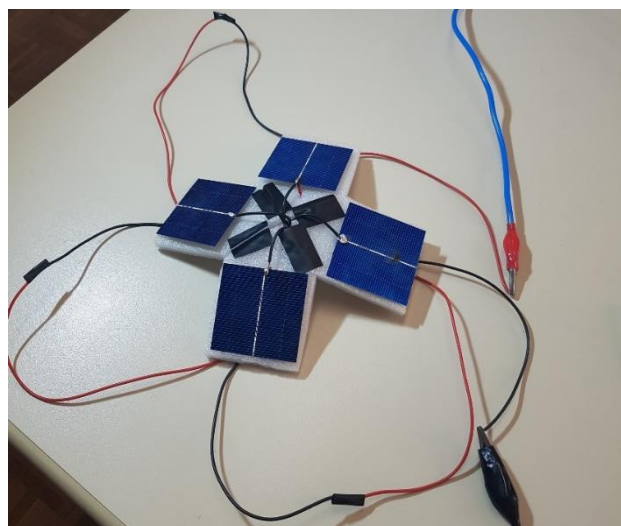
Figura 30 - Modelo 3D da estrutura



Fonte: Autor

Tendo a base do modelo 3D, foi desenvolvido, no laboratório do GAMA, um protótipo (Figura 31) de um sistema de gestão de energia que consiste em quatro células solares de 52 mm por 52 mm conectadas em série que geram no máximo 472,4 mW como visto na Tabela abaixo (Tabela 2).

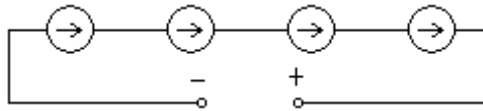
Figura 31 - Estrutura inclinada com 4 células solares em série



Fonte: Autor

Na Figura 32 é mostrado o circuito elétrico equivalente do sistema da Figura 31. Possuindo quatro fontes de corrente em série.

Figura 32 - Modelo equivalente em circuitos elétricos da Figura 31



Fonte: Autor

Tabela 2 - Dados da geração de energia de quatro células solares em série

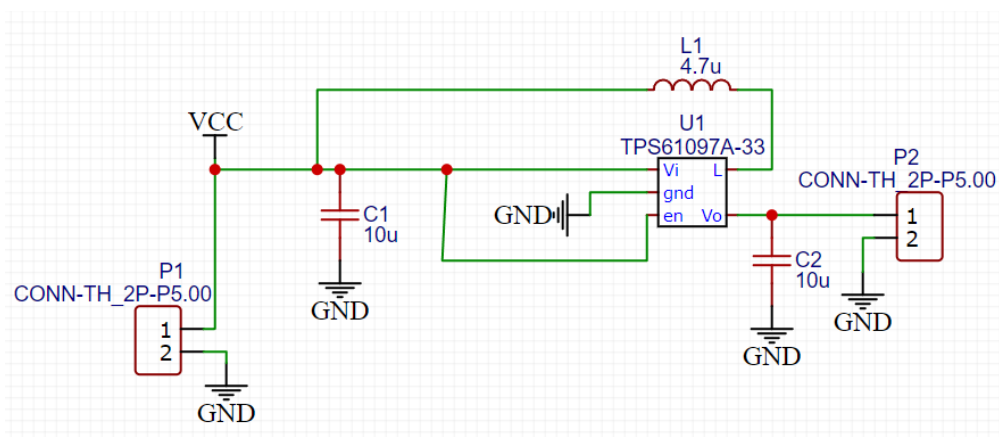
RL (Ω)	Vp (V)	Ip (mA)	P (mW)
3,3	1,25	377,9	472,4
10	1,87	183,4	342,9
12	1,98	160,3	317,4
15	2,02	135,9	274,5

Fonte: Autor

Como visto na Tabela 2, foram feitos alguns testes para descobrir a máxima potência das células solares em série. Utilizando uma carga de 3,3 Ω alimentada pelas células solares foi possível gerar a máxima potência de 472,4 mW para uma tensão de 1,25 V. Com essa potência sendo o suficiente, o próximo procedimento foi aumentar a tensão gerada. Para isso foi utilizado um conversor DC-DC modelo TPS61097A que é capaz de converter um sinal variável de 0,9 V a 5,5 V para uma tensão constante de 3,3 V.

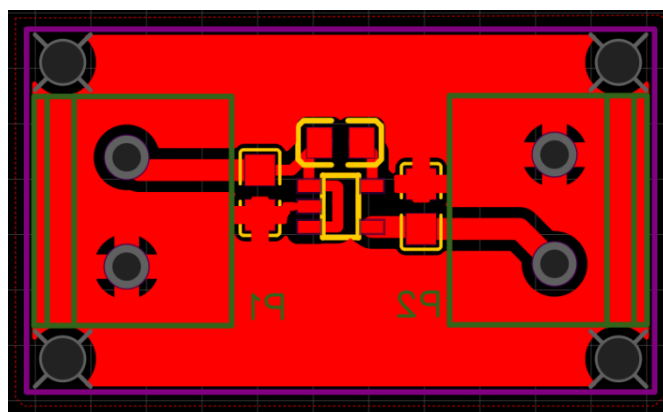
Utilizou-se o software EasyEDA para preparar a PCI do conversor TPS61097A, sendo feito o circuito (Figura 33) e em seguida o esquemático da PCI (Figura 34).

Figura 33 - Circuito do TPS61097A



Fonte: Autor

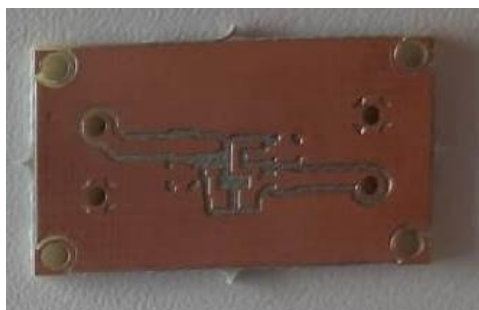
Figura 34 - Esquemático da PCI TPS61097A



Fonte: Autor

Tendo em posse o arquivo do esquemático, foi confeccionado a PCI do TPS61097A (Figura 35):

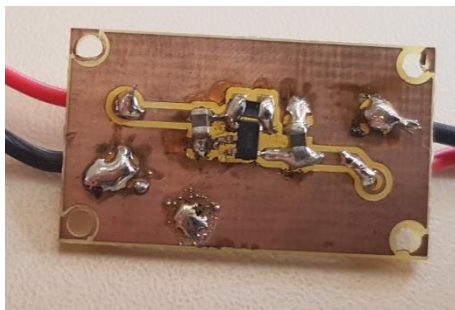
Figura 35 - PCI do TPS61097A



Fonte: Autor

Com posse da PCI, realizou-se a solda dos componentes na placa, sendo eles, dois capacitores de 10 μ F, um indutor de 4,7 μ H e o C.I. do conversor, visto abaixo:

Figura 36 - PCI do TPS61097A com todos os componentes

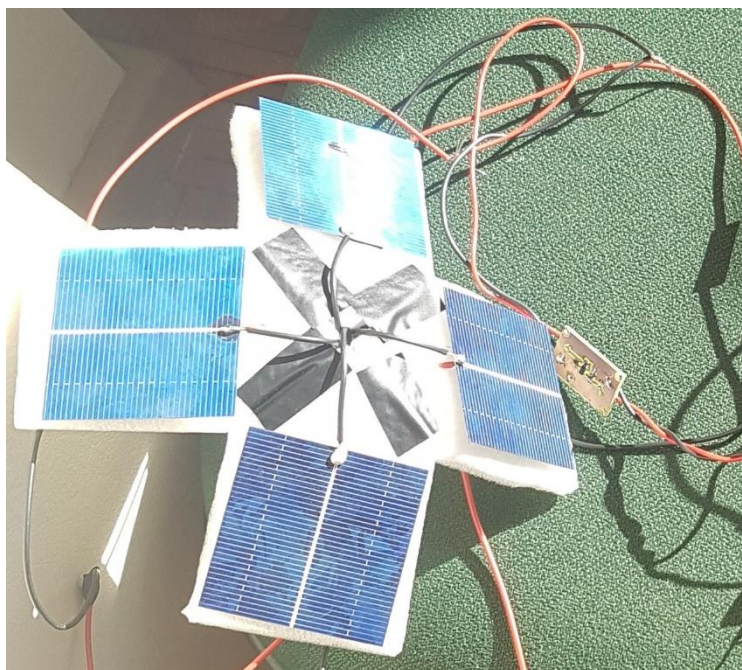


Fonte: Autor

Logo foi realizada a conexão do conversor DC-DC nas células solares (Figura 37), foram realizados mais testes para descobrir a máxima potência com o conversor, como mostrado na Tabela abaixo (Tabela 3).

Os testes foram realizados por volta das dezessete horas, com total incidência solar, no laboratório do GAMA.

Figura 37 - Conversor TPS61097A conectado à estrutura



Fonte: Autor

Tabela 3 - Dados da geração de energia das quatro células solares em série conectadas ao conversor DC-DC

RL (Ω)	Vp (V)	Ip (mA)	Pin (mW)	VL (V)	IL (mA)	Pout (mW)	η
33,3	1,83	287,2	525,60	2,80	84,1	235,6	0,44825
55,3	1,77	306,8	543,04	3,50	63,3	221,5	0,40789
70,3	1,90	246,8	468,92	3,75	53,3	199,8	0,42609
85,3	2,10	75,0	157,50	3,27	38,3	124,2	0,78857

Fonte: Autor

4.1.1 Proposta do PP&D para o TCC

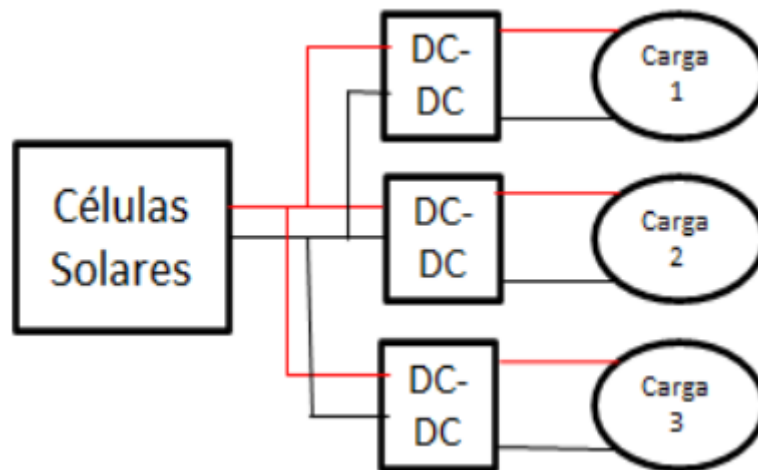
Por conta das potências convertidas pelo conversor TPS61097A (Pout) diminuirão bastante em relação as potências geradas pelas células solares (Pin), com potência máxima de 235,6 mW para uma carga de 33,3 Ω , cerca de 44,8% de rendimento das células solares.

Tendo em vista os resultados obtidos, foi pensado uma solução de utilizar três conversores TPS61097A para conseguir aproveitar toda a potência que as células solares conseguem gerar (Figura 38).

Como visto na Figura 12, o conversor TPS61097A tem uma entrada GPIO (General Purpose Input/Output), com isso é possível, com o microcontrolador, controlar o funcionamento de cada conversor, tendo isso em vista, pensou-se em conectar o primeiro conversor no transmissor (Si5351), no Microcontrolador (ATMEGA 328) e no GPS (MAX-7Q), sendo necessário ele gerar no mínimo 194,37 mW, o segundo conversor no Sensor de temperatura (TMP100), tendo que gerar 0,66 mW e o terceiro conversor no sensor de radiação (experimento da FEI) tendo que gerar 50 mW.

Com isso é possível ao entardecer, quando as células estiverem recebendo menos energia solar, desativar o terceiro conversor e se precisar desativar também o segundo, assim mantendo o funcionamento principal que é o conjunto formado pelo GPS, microcontrolador e transmissor.

Figura 38 - Esquemático da proposta



Fonte: Autor

Como o conversor TPS61097A tem um rendimento abaixo do necessário, foi pensado em realizar testes com o conversor TPS61200 que opera na faixa de tensão de 0,3 V a 5,5 V e tem como saída uma tensão de 1,8 V a 5,5 V que é ajustável através dos valores dos resistores, segundo a equação 8.

$$R1 = R2 * \left(\frac{V_{OUT}}{V_{FB}} - 1 \right) \quad (8)$$

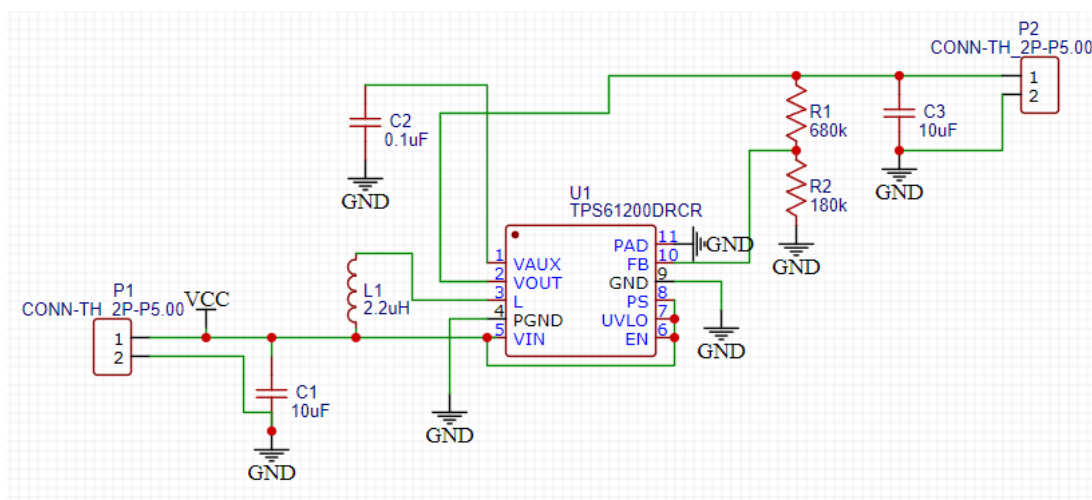
Onde:

V_{OUT} – Tensão de saída

V_{FB} – Tensão de feedback

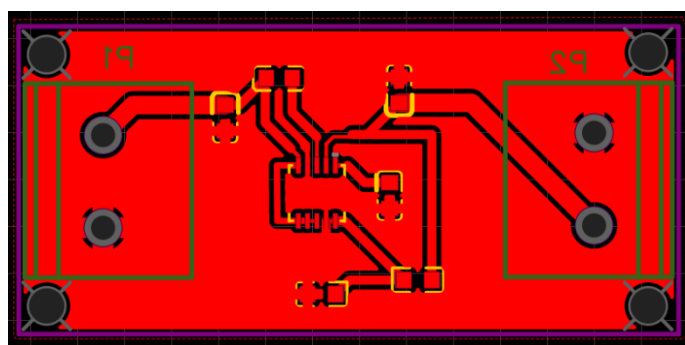
Utilizou-se o software EasyEDA para preparar a PCI do conversor TPS61200, sendo feito o circuito (Figura 39) e em seguida o esquemático da PCI (Figura 40).

Figura 39 - Circuito do TPS61200 versão 1



Fonte: Autor

Figura 40 - Esquemático da PCI TPS61200 versão 1



Fonte: Autor

Tendo em posse o arquivo do esquemático, foi confeccionado a PCI do TPS61200 (Figura 41):

Figura 41 - PCI do TPS61200 versão 1

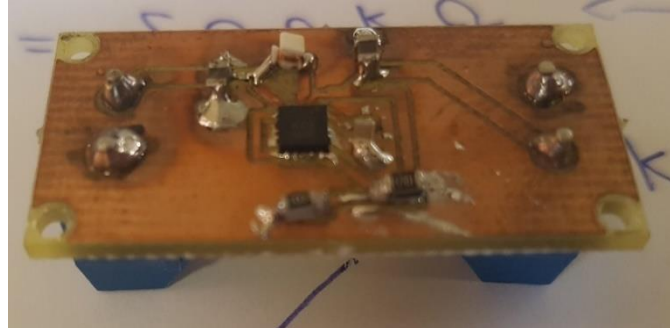


Fonte: Autor

Com posse da PCI, realizou-se a solda dos componentes na placa, sendo eles, dois capacitores de 10 μF , um capacitor de 0,1 μF , um indutor de 2,2 μH ,

um resistor de 3,217 k Ω , um resistor de 5 k Ω e o C.I. do conversor, visto abaixo (Figura 42):

Figura 42 - PCI TPS61200 com todos os componentes



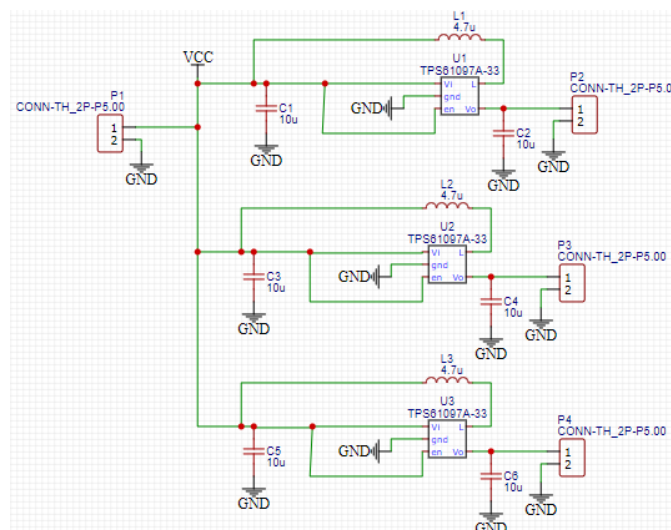
Fonte: Autor

Contudo não foi possível testá-lo, no período do PP&D, junto da estrutura, pois a estrutura foi danificada e também ocorreu um curto na placa queimando o C.I.

4.2 Resultados do TCC

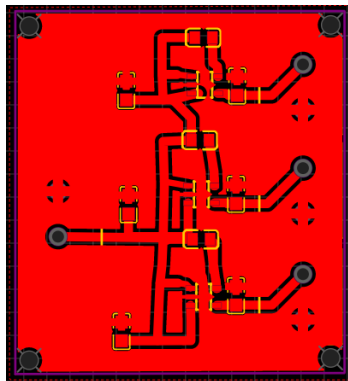
O primeiro passo no período do TCC foi projetar três conversores TPS61097A em uma única PCI com uma entrada única. Visto na Figura 43 o circuito elétrico e na Figura 44 o esquemático da PCI.

Figura 43 - Circuito de três TPS61097A com a entrada em comum



Fonte: Autor

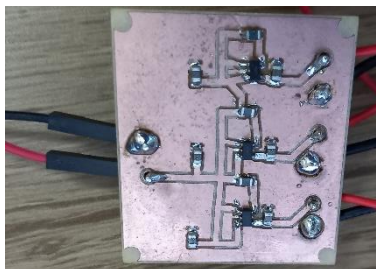
Figura 44 - Esquemático da PCI de três TPS61097A com entrada em comum



Fonte: Autor

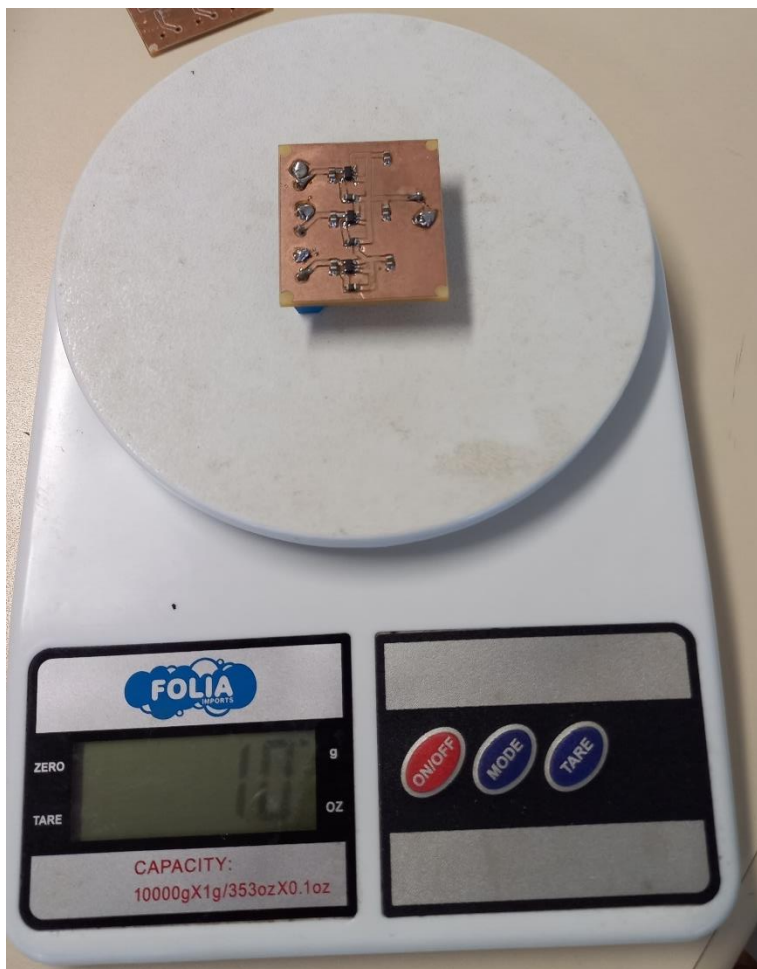
Com posse da PCI, realizou-se a solda dos componentes na placa, sendo eles, seis capacitores de 10 μF , três indutores de 4,7 μH e três C.I.s do conversor, visto abaixo (Figura 45):

Figura 45 - PCI de três TPS61097A com todos os componentes



Fonte: Autor

Na Figura 46 é mostrado a massa de 10 g dessa PCI. Como o projeto final do Minuano não vai ter nenhum borne de conexão é esperado uma massa menor ou igual a essa, com todos os componentes.

Figura 46 - Massa dos três conversores TPS61097A

Fonte: Autor

Após ter a posse da placa foi medido, com auxílio de uma fonte de tensão e um osciloscópio, os valores mínimos de funcionamento dos três conversores.

Primeiro foi medido (Figura 47) sem carga e com uma tensão de 2,2 V foi possível fazer o conversor funcionar, conseguindo manter 3,3 V, com a devida tolerância, nas saídas. Após isso foi reduzida a tensão até que o conversor parasse de operar, última tensão registrada foi 0,63 V. Logo esse é a tensão plena sem carga do conversor.

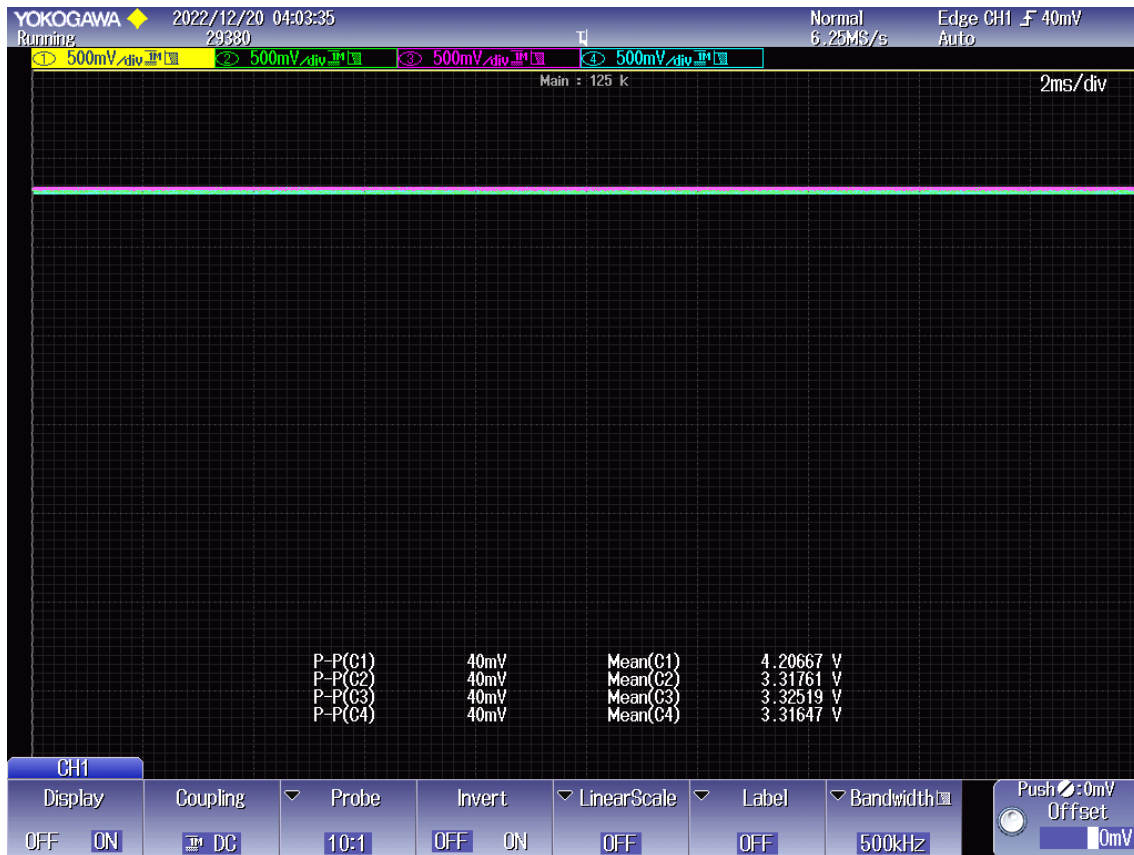
Figura 47 - Valores de funcionamento sem carga de três conversores TPS61097A



Fonte: Autor

Após a medição sem carga, utilizou-se uma fonte de tensão com tensão de 4,364 V e com corrente 314 mA, totalizando uma potência de 1,372 W para uma carga de 33,3 Ω em cada saída. No qual é totalmente ineficiente. Mesmo tendo uma eficiência de 71,5% comparando os valores de saída na Figura 46 e a potência de entrada. É necessário que as células solares consigam gerar esses valores muito altos para o funcionamento correto do conversor.

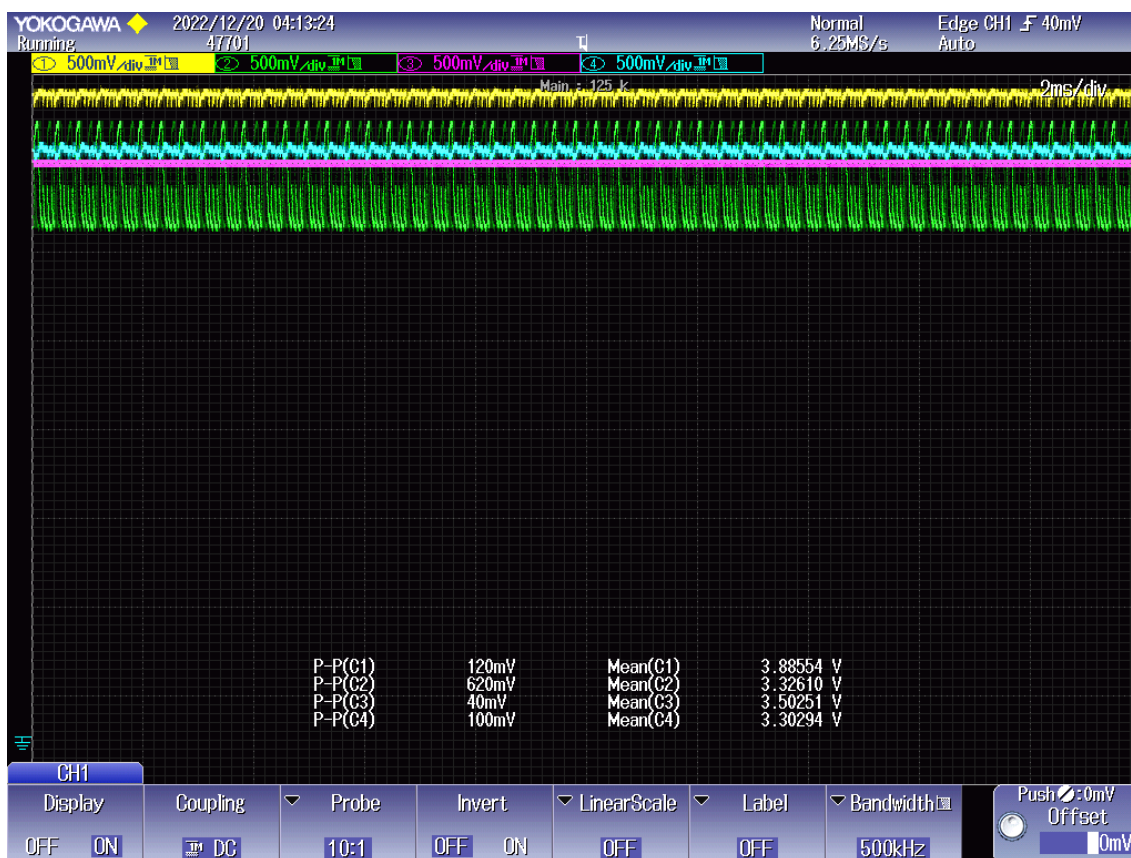
Figura 48 - Valores de funcionamento com carga de 33,3 Ω de três conversores TPS61097A



Fonte: Autor

Posteriormente (visto na Figura 49), utilizou-se uma fonte de tensão com tensão de 3,958 V e com corrente 90 mA, totalizando uma potência de 356 mW com cargas de 48,3 Ω , 220 Ω e 10 k Ω . Com essa configuração foi possível alcançar uma eficiência de 78,57%, com potência de saída de 229 mW na primeira saída, 49,5 mW na segunda saída e 1,225 mW na terceira saída, conseguindo se adequar a primeira proposta do PP&D.

Figura 49 - Valores de funcionamento com carga de 48,3 Ω , 10 k Ω e 220 Ω de três conversores TPS61097A



Fonte: Autor

Também, na Figura 48 utilizou-se uma fonte de tensão com tensão de 3,928 V e com corrente 89 mA, totalizando uma potência de 351 mW com cargas de 48,3 Ω , 18 k Ω e 220 Ω . Com essa configuração foi possível alcançar uma eficiência de 78,98%, com potência de saída de 224,36 mW na primeira saída, 0,6798 mW na segunda saída e 52,2 mW na terceira saída, conseguindo se adequar a primeira proposta do PP&D.

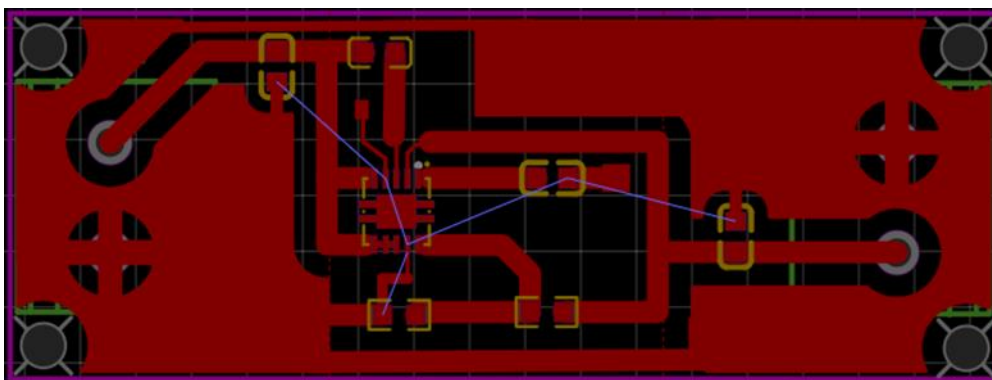
Figura 50 - Valores de funcionamento com carga de 48,3 Ω , 18 k Ω e 220 Ω de três conversores TPS61097A



Fonte: Autor

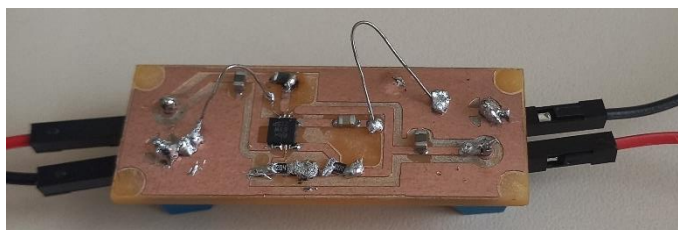
Posteriormente foi projetado a segunda versão da PCI TPS61200, que novamente acabou danificada por conta de um curto-circuito. Abaixo é possível ver o esquemático (Figura 51) e a PCI montado com 2 fios com função de jumpers (Figura 52).

Figura 51 - Esquemático da PCI TPS61200 versão 2



Fonte: Autor

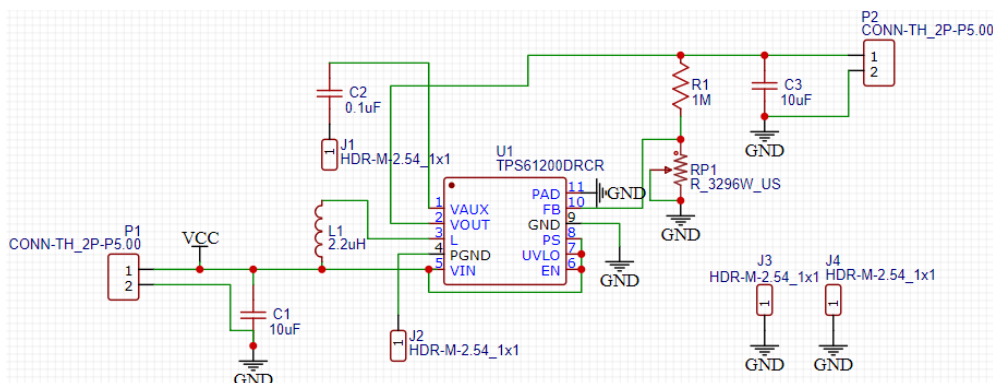
Figura 52 - PCI do TPS61200 versão 2



Fonte: Autor

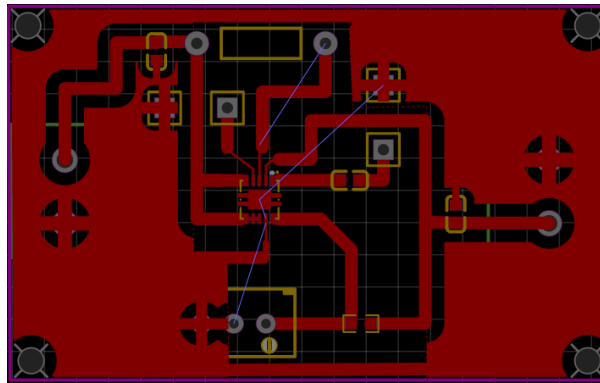
Após isso, foi criado três PCIs de uma vez com conexão para jumpers, uma que usava um indutor normal sem ser em SMD e potenciômetro trimpot de 0 a 200 k Ω (Figuras 53, 54 e 55), outra que usava apenas componentes em SMD (Figura 56, 57 e 58) e outras, que foi a escolha final, que usa um potenciômetro trimpot de 0 a 200 k Ω . O laboratório não possuía o resistor em SMD de 180 k Ω que é o resistor ideal para usar em conjunto com o resistor de 1 M Ω , então por esse motivo foi utilizar um trimpot.

Figura 53 - Circuito do TPS61200 versão 3



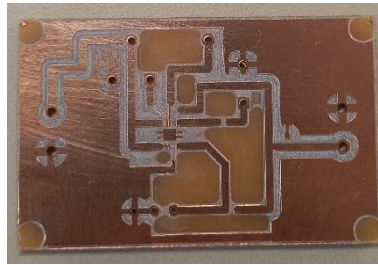
Fonte: Autor

Figura 54 - Esquemático da PCI TPS61200 versão 3



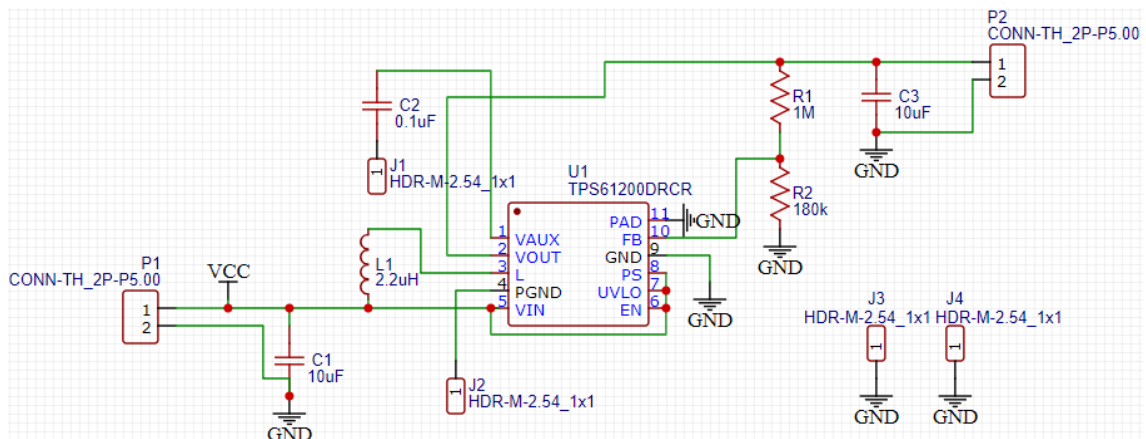
Fonte: Autor

Figura 55 - PCI do TPS61200 versão 3



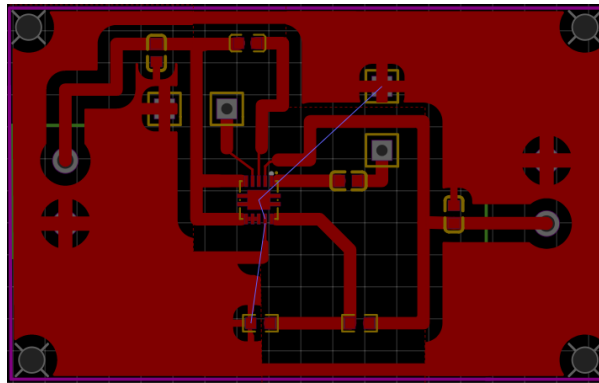
Fonte: Autor

Figura 56 - Circuito do TPS61200 versão 4



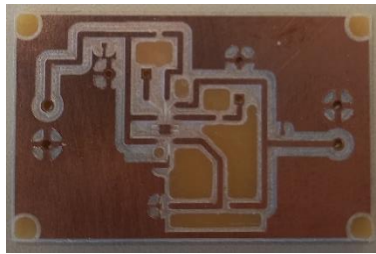
Fonte: Autor

Figura 57 - Esquemático da PCI TPS61200 versão 4



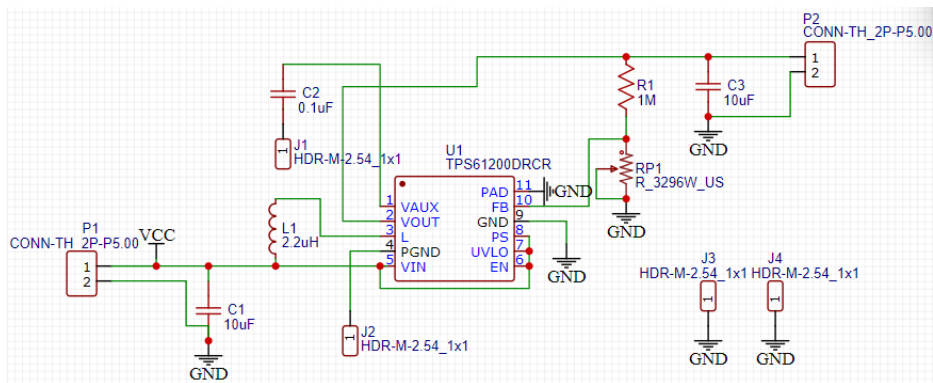
Fonte: Autor

Figura 58 - PCI do TPS61200 versão 4



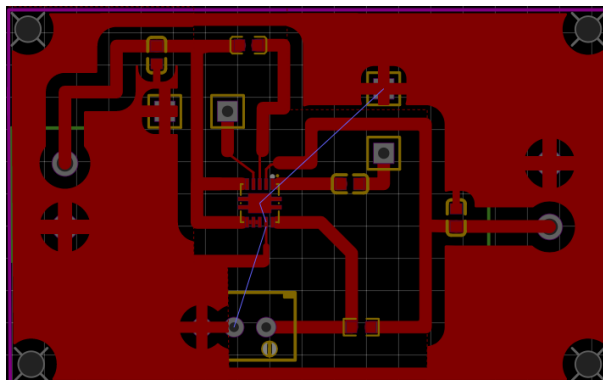
Fonte: Autor

Figura 59 - Circuito do TPS61200 versão 5



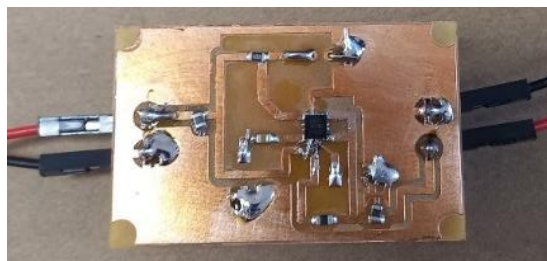
Fonte: Autor

Figura 60 - Esquemático da PCI TPS61200 versão 5



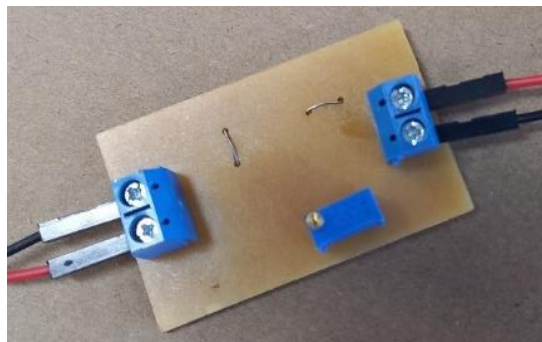
Fonte: Autor

Figura 61 - PCI do TPS61200 versão 5



Fonte: Autor

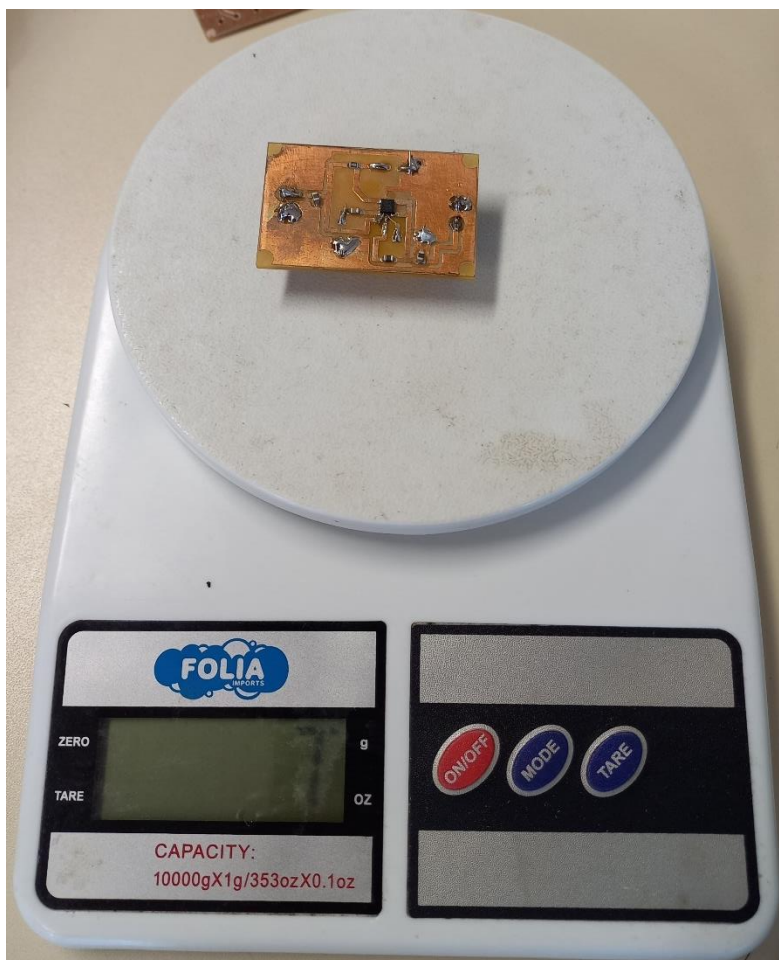
Figura 62 - Traseira da PCI do TPS61200 versão 5



Fonte: Autor

Após soldar todos os componentes na PCI e testá-la para comprovar o funcionamento. Foi utilizado uma balança para medir a massa da placa, tendo uma massa de 7 g considerando os bornes.

Figura 63 - Massa do conversor TPS61200



Fonte: Autor

Após medir a massa do conversor, foi medido (Figura 64) sem carga e com uma tensão de 0,36 V foi possível fazer o conversor funcionar, conseguindo manter 3,3 V, com a devida tolerância, na saída.

Figura 64 - Valores de funcionamento, sem carga, do conversor TPS61200



Fonte: Autor

Após a medição sem carga, utilizou-se uma fonte de tensão com tensão de 1,39 V, para uma carga de 58,3 Ω na saída e tensão de 3,3 V, totalizando 186,79 mW que é ineficiente para o sistema.

Figura 65 - Valores de funcionamento, com carga 58,3 Ω, do conversor TPS61200



Fonte: Autor

Como a potência desejada é de 300 mW e a tensão de saída é 3,3 V, pode-se encontrar a resistência ideal pela equação (9), abaixo:

$$R = \frac{V^2}{P} = 36,3\Omega \quad (9)$$

Utilizando a carga calculada, de 36,3 Ω, foi possível alcançar o funcionamento do conversor com uma tensão de 1,4275 V e potência de 443,2 mW. Para essa carga foi possível alcançar 293,37 mW de potência, tendo assim uma eficiência de 66,2%.

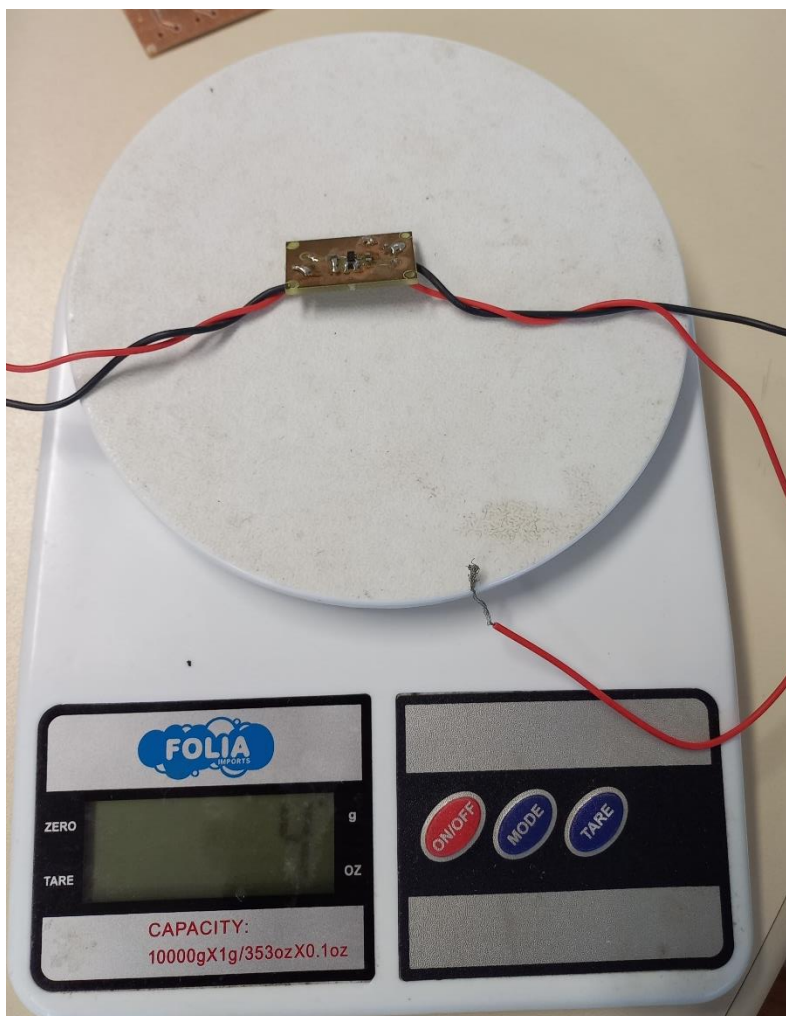
Figura 66 - Valores de funcionamento, com carga $36,3 \Omega$, do conversor TPS61200



Fonte: Autor

No período do TCC aproveitou-se para medir a massa da PCI do TPS61097A mesmo sendo medido com os cabos teve uma massa de 4 g, a menor de todas.

Figura 67 - Massa do Conversor TPS61097A



Fonte: Autor

Aproveitou-se, também para medir o TPS61097A no osciloscópio. Foi medido (Figura 68) sem carga primeiro e com uma tensão de 0,62 V foi possível fazer o conversor funcionar, conseguindo manter 3,3 V, com a devida tolerância, na saída.

Figura 68 - Valores de funcionamento, sem carga, do conversor TPS61097A



Fonte: Autor

Após a medição sem carga, utilizou-se uma fonte de tensão com tensão de 1,55 V e com corrente 345 mA, totalizando uma potência de 534,75 W para uma carga de 36,3 Ω na saída que foi possível alcançar uma potência de 300 mW, tendo eficiência de 56,1%.

Figura 69 - Valores de funcionamento, com carga de $36,3 \Omega$, do conversor TPS61097A

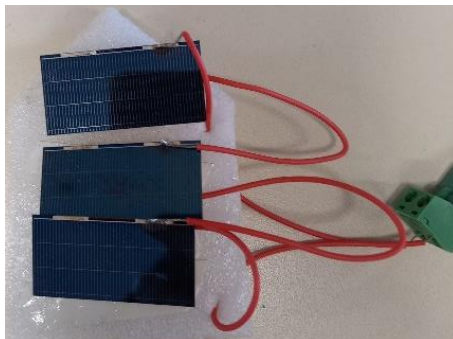


Fonte: Autor

Após as medições dos conversores com o osciloscópio, foi feita a caracterização das células solares para servir com fonte de alimentação dos conversores.

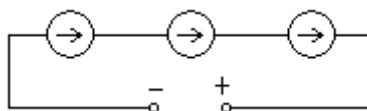
Primeiramente foi feito a caracterização de três células solares em série (as únicas que o laboratório tinha posse), visto na Figura 70.

Figura 70 - Estrutura com três células solares em série



Fonte: Autor

Na Figura 71 é mostrado o circuito elétrico equivalente do sistema da Figura 70. Possuindo três fontes de corrente em série.

Figura 71 - Modelo equivalente em circuitos elétricos da Figura 70

Fonte: Autor

Tabela 4 - Dados da geração de energia de três células solares em série

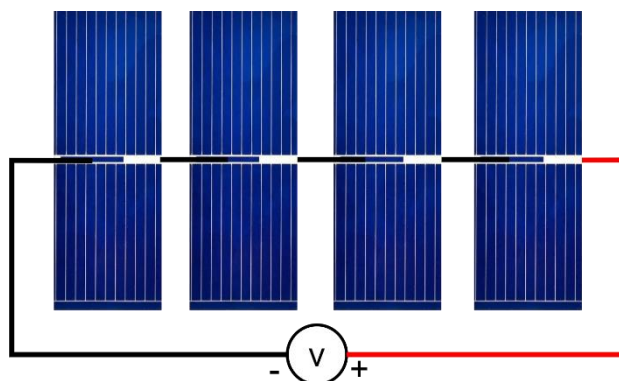
RL (Ω)	Vp (V)	Ip (mA)	Pin (mW)
1	0,21	0,2100	44,1
1,5	0,27	0,1800	48,6
3,3	0,57	0,1727	98,4
10	1,07	0,1070	114,5
12	1,13	0,0942	106,4
15	1,22	0,0813	99,2
30	1,39	0,0463	64,4
40	1,45	0,0363	52,6
52	1,47	0,0283	41,6
55,3	1,52	0,0275	41,8
56,8	1,52	0,0268	40,7

Fonte: Autor

Como visto na Tabela 4, foram feitos alguns testes para descobrir a máxima potência das células solares em série. Os testes foram realizados por volta das dezesseis horas com total incidência solar. Utilizando uma carga de 10 Ω alimentada pelas células solares foi possível gerar a máxima potência de 114,5 mW para uma tensão de 1,07 V. Com essa potência sendo o insuficiente para o sistema.

Após isso foram adquiridas células solares de 52mm por 19mm e então foi feito, primeiramente, o teste da máxima potência de quatro células em série (Figura 72), visto na Tabela 5.

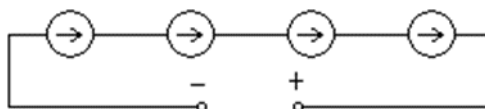
Figura 72 - Estrutura com quatro células solares em série



Fonte: Autor

Na Figura 73 é mostrado o circuito elétrico equivalente do sistema da Figura 72. Possuindo quatro fontes de corrente em série.

Figura 73 - Modelo equivalente em circuitos elétricos da Figura 72



Fonte: Autor

Tabela 5 - Dados da geração de energia de quatro células solares em série

R (Ω)	V _p (V)	I _p (A)	P _{in} (mW)
1	0,17	0,1700	28,9
1,2	0,19	0,1583	30,1
1,5	0,24	0,1600	38,4
3,3	0,44	0,1333	58,7
10	1,24	0,1240	153,8
12	1,39	0,1158	161,0
15	1,51	0,1007	152,0

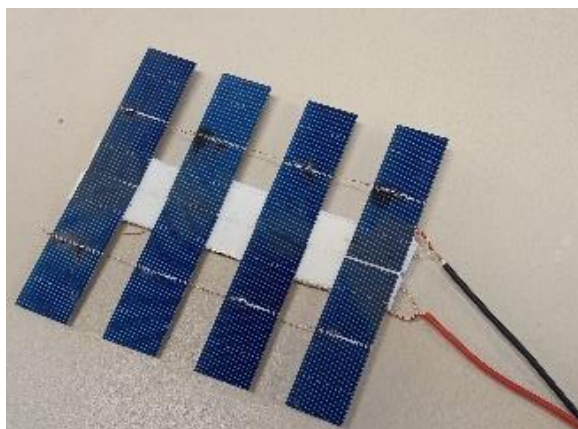
Fonte: Autor

Como visto na Tabela 5, foram feitos alguns testes para descobrir a máxima potência das células solares em série. Os testes foram realizados por volta das dezesseis horas com total incidência solar. Utilizando uma carga de 12

Ω alimentada pelas células solares foi possível gerar a máxima potência de 161 mW para uma tensão de 1,39 V.

Com essa potência sendo o insuficiente para o sistema. Posteriormente foi feito um arranjo de quatro células em série em paralelo, a fim de aumentar sua corrente, com outras quatro células em série (Figura 74) usando um pedaço de polipropileno como base.

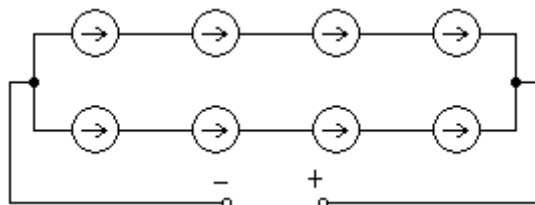
Figura 74 - Estrutura com quatro células solares em série conectadas em paralelo com quatro outras em série



Fonte: Autor

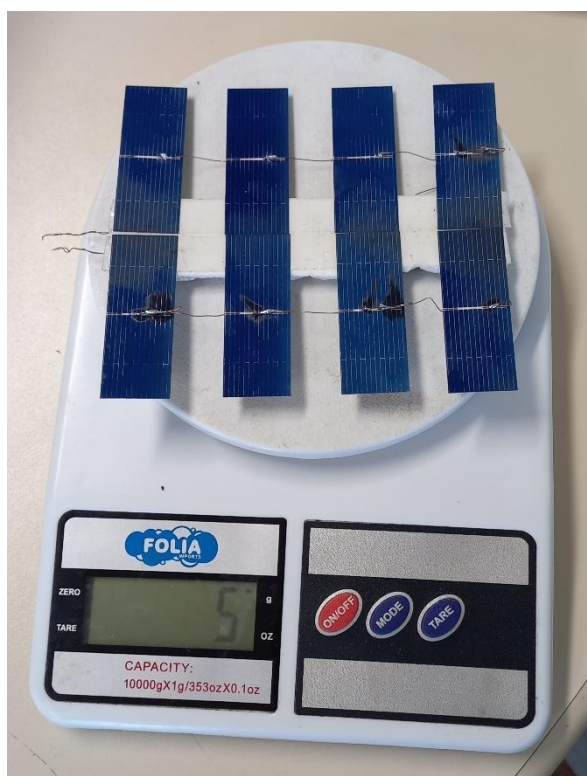
Na Figura 75 é mostrado o circuito elétrico equivalente do sistema da Figura 74. Possuindo quatro fontes de corrente em série em paralelo com outras quatro fontes de corrente em série.

Figura 75 - Modelo equivalente em circuitos elétricos da Figura 74



Fonte: Autor

Figura 76 - Massa da estrutura da Figura 74



Fonte: Autor

Como visto na Figura 76, utilizando-se a balança digital descobriu-se que o arranjo tem massa de 5 g.

Tabela 6 - Dados da geração de energia de quatro células solares em série conectadas em paralelo com quatro outras em série

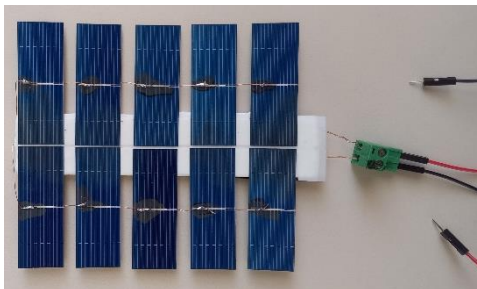
R (Ω)	V _p (V)	I _p (A)	Pin (mW)
1	0,30	0,3000	90,0
1,2	0,35	0,2917	102,1
1,5	0,42	0,2800	117,6
3,3	0,84	0,2545	213,8
4,8	1,04	0,2167	225,3
6,6	1,17	0,1773	207,4
8,1	1,35	0,1667	225,0
9,3	1,66	0,1785	296,3
10	1,48	0,1480	219,0
12	1,62	0,1350	218,7
15	1,74	0,1160	201,8

Fonte: Autor

Como visto na Tabela 6, foi feito alguns testes para descobrir a máxima potência do arranjo das células solares. Os testes foram realizados por volta das dezesseis horas com total incidência solar. Utilizando uma carga de 9,3 Ω alimentada pelas células solares foi possível gerar a máxima potência de 296,3 mW para uma tensão de 1,66 V. Com essa potência sendo o insuficiente para o sistema, pois o conversor ainda iria diminuir mais essa potência.

Posteriormente surgiu a ideia de criar um arranjo com cinco células em série em paralelo com outras cinco células em série (Figura 77).

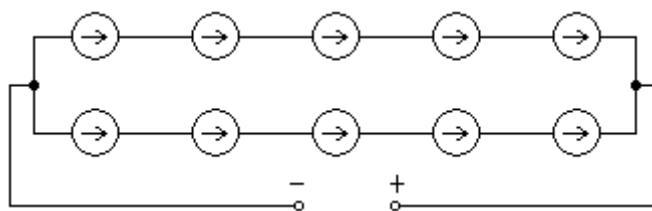
Figura 77 - Estrutura com cinco células solares em série conectadas em paralelo com cinco outras em série



Fonte: Autor

Na Figura 78 é mostrado o circuito elétrico equivalente do sistema da Figura 77. Possui cinco fontes de corrente em série em paralelo com outras cinco fontes de corrente em série.

Figura 78 - Modelo equivalente em circuitos elétricos da Figura 77



Fonte: Autor

Figura 79 - Massa da estrutura da Figura 77



Fonte: Autor

Como visto na Figura 79, utilizando-se a balança digital descobriu-se que o arranjo tem massa de 5 g.

Tabela 7 - Dados da geração de energia de cinco células solares em série conectadas em paralelo com cinco outras em série

R (Ω)	V _p (V)	I _p (A)	Pin (mW)
1	0,30	0,3000	90,0
1,2	0,34	0,2833	96,3
1,5	0,40	0,2667	106,7
3,3	0,80	0,2424	193,9
4,8	1,00	0,2083	208,3
6,6	1,30	0,1969	256,1
8,1	1,57	0,1938	304,3
9,3	1,77	0,1903	336,9
10	1,84	0,1840	338,6
12	1,92	0,1600	307,2
15	2,00	0,1333	266,7

Fonte: Autor

Como visto na Tabela 7, foram feitos alguns testes para descobrir a máxima potência do arranjo das células solares. Os testes foram realizados por volta das dezesseis horas com total incidência solar. Utilizando uma carga de 10 Ω alimentada pelas células solares foi possível gerar a máxima potência de 338,6 mW para uma tensão de 1,84 V. Com essa potência sendo, possivelmente, o suficiente para alimentar o conversor TPS61200.

Posteriormente surgiu a ideia de criar um arranjo com onze células em série (Figura 80), a fim de alcançar a tensão necessária para alimentar a PCI com três conversor TPS61097A.

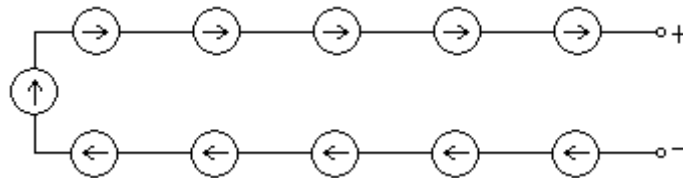
Figura 80 - Estrutura com onze células solares em série



Fonte: Autor

Na Figura 81 é mostrado o circuito elétrico equivalente do sistema da Figura 80. Possuindo onze fontes de corrente em série.

Figura 81 - Modelo equivalente em circuitos elétricos da Figura 80



Fonte: Autor

Tabela 8 - Dados da geração de energia de onze células solares em série

R (Ω)	V _p (V)	I _p (A)	P _{in} (mW)
1	0,41	0,41	168,1
1,2	0,51	0,425	208,3
1,5	0,65	0,4333	281,7
3,3	1,29	0,3909	865,5
4,8	1,68	0,35	588
6,6	2,28	0,3455	787,6
8,1	2,73	0,337	920,1
9,3	3,31	0,3559	1178,1
10	3,72	0,372	1383,84
12	4,01	0,3347	1340
15	4,51	0,3007	1356
20	4,88	0,244	1190,7

Fonte: Autor

Como visto na Tabela 8, foram feitos alguns testes para descobrir a máxima potência do arranjo das células solares. Os testes foram realizados por volta das quinze horas com total incidência solar. Utilizando uma carga de 10 Ω alimentada pelas células solares foi possível gerar a máxima potência de 1383,84 mW para uma tensão de 3,72 V. Com essa potência sendo mais que o suficiente para alimentar o conversor TPS61097A.

Logo, pensou-se em oito células solares em série (Figura 82).

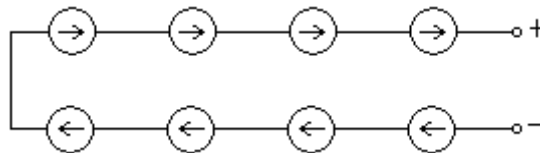
Figura 82 - Estrutura com oito células solares em série



Fonte: Autor

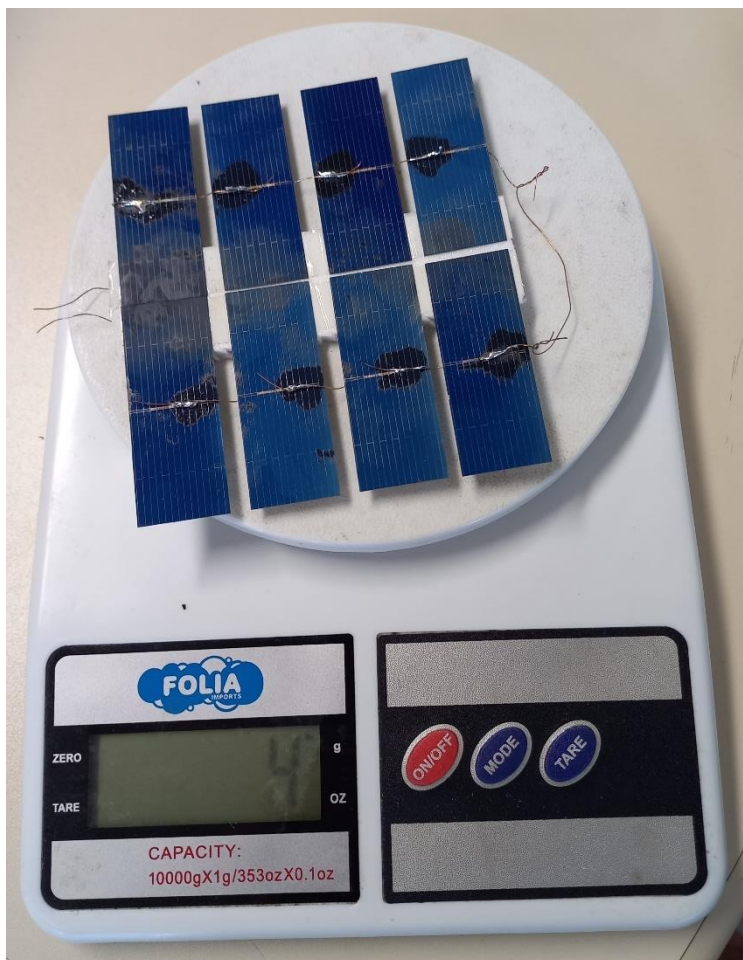
Na Figura 83 é mostrado o circuito elétrico equivalente do sistema da Figura 82. Possuindo oito fontes de corrente em série.

Figura 83 - Modelo equivalente em circuitos elétricos da Figura 82



Fonte: Autor

Figura 84 - Massa da estrutura da Figura 82



Fonte: Autor

Como visto na Figura 84, utilizando-se a balança digital descobriu-se que o arranjo tem massa de 4 g.

Tabela 9 - Dados da geração de energia de oito células solares em série

R (Ω)	V _p (V)	I _p (A)	P _{in} (mW)
1	0,34	0,3400	115,6
1,2	0,55	0,4583	252,1
1,5	0,57	0,3800	216,6
3,3	0,86	0,2606	224,1
4,8	1,21	0,2521	305,0
6,6	1,61	0,2439	392,7
8,1	2,02	0,2493	503,8
9,3	2,34	0,2516	588,8
10	2,61	0,2610	681,2
12	2,95	0,2458	725,2
15	3,29	0,2193	721,6
20	3,89	0,1945	581,4
30	3,93	0,1310	504,4
45	3,41	0,0758	343,2

Fonte: Autor

Como visto na Tabela 9, foi feito alguns testes para descobrir a máxima potência do arranjo das células solares. Os testes foram realizados por volta das dezesseis horas com total incidência solar. Utilizando uma carga de 12 Ω alimentada pelas células solares foi possível gerar a máxima potência de 725,2 mW para uma tensão de 2,95 V. Com essa potência sendo mais que o suficiente para alimentar o conversor TPS61097A.

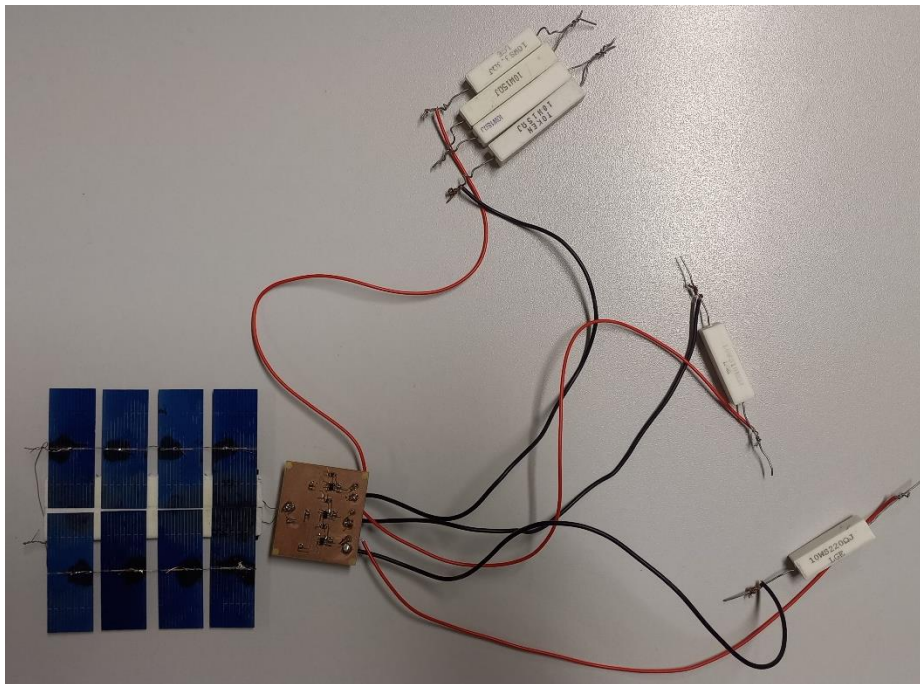
4.3 Sistemas finais de cada conversor

Para os três sistemas as medições foram realizadas em um dia sem nuvens entre o horário das dezesseis e dezessete horas.

Para o sistema com oito células solares ligadas em série, conectadas com três conversores TPS61097A com entrada em comum (Figura 85), ocorreu algo um tanto quanto anormal, as oitos células solares geraram 725,2 mW enquanto a soma nas saídas do conversor gerou 319,87 mW que é uma carga adequada para o projeto minuíano, porém se essa entrada de potência estiver certa o conversor está com uma eficiência de 44,1%. É mais provável que seja um mal funcionamento no multímetro de teste.

Esse sistema possui 14 g sem contar a carga.

Figura 85 - Conversor 3xTPS61097A conectado à estrutura



Fonte: Autor

Tabela 10 - Dados da geração de energia de oito células solares em série conectadas ao conversor DC-DC

Vp (V)	Saída	RL (Ω)	VL (V)	IL (A)	Pout (mW)
	1	48,3	3,55	0,0734	260,9213
4,21	2	10k	3,66	0,0004	1,3396
	3	220	3,56	0,0162	57,6073

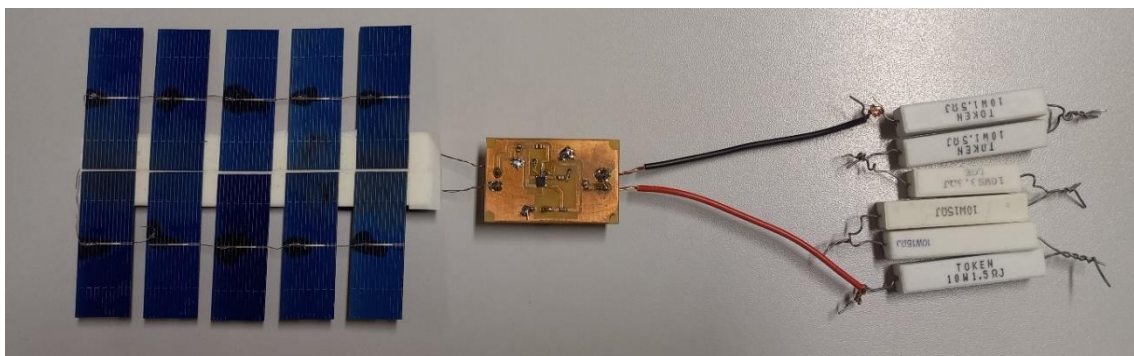
Fonte: Autor

Analisando os resultados da Tabela 10, percebe-se que as tensões de saída estão muito elevadas, sendo inviável a utilização no microcontrolador, pois teria risco de queimá-lo pois esse nível de tensão está acima do tolerável.

Para o sistema com cinco células solares em série e em paralelo com outras cinco células solares em série conectadas com o Conversores TPS61200 (Figura 86), as células solares geraram 338,6 mW (Tabela 7), enquanto o sistema com o conversor gerou 284,61 mW com uma carga de 37,8 Ω , sendo adequada para o projeto miniano e tendo uma eficiência 84,05%.

Tendo uma massa de 12 g sem contar a carga.

Figura 86 - Conversor TPS61200 conectado à estrutura



Fonte: Autor

Tabela 11 - Dados da geração de energia das cinco células solares em série conectadas em paralelo com cinco outras conectadas ao conversor DC-DC

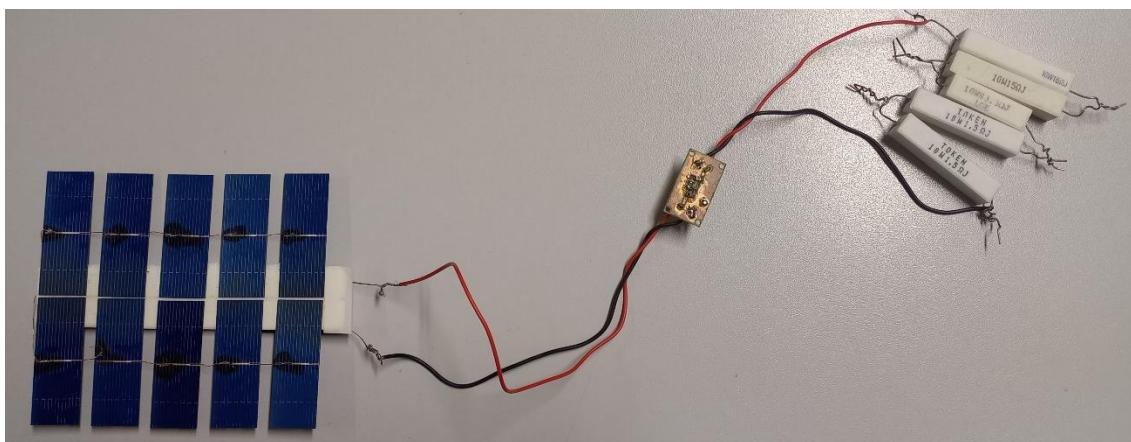
R (Ω)	V _p (V)	I _p (A)	P (mW)
33,3	0,4	0,012012012	4,804805
36,3	1,68	0,046280992	77,752066
37,8	3,28	0,086772487	284,613757
40	3,28	0,082	268,96
42	3,29	0,078333333	257,716667

Fonte: Autor

Para o sistema com cinco células solares em série e em paralelo com outras cinco células solares em série conectadas com o Conversores TPS61097A (Figura 87), as células solares geraram 338,6 mW (Tabela 7), enquanto o sistema com o conversor gerou 212,9 mW com uma carga de 36,3 Ω , sendo inadequada para o projeto miniano, pois não consegue gerar 3,3 V na saída. Sua eficiência é de 62,88%. E para uma carga de 59,6 Ω , alcança-se 3,27 V e 179,41 mW, tendo agora uma eficiência de 52,99%, tornando-o um sistema inadequado.

Tendo uma massa de 9 g sem contar a carga.

Figura 87 - Conversor TPS61097A conectado à estrutura



Fonte: Autor

Tabela 12 - Dados da geração de energia das cinco células solares em série conectadas em paralelo com cinco outras conectadas ao conversor DC-DC

R (Ω)	V _p (V)	I _p (A)	P (mW)
36,3	2,78	0,076584022	212,903581
37,8	2,79	0,073809524	205,928571
40	2,88	0,072	207,36
45	3,01	0,066888889	201,335556
50	3,03	0,0606	183,618
56,3	3,18	0,056483126	179,616341
59,6	3,27	0,054865772	179,411074
60	2,87	0,047833333	137,281667

Fonte: Autor

5 Considerações Finais

Foi apresentado nesta monografia, um trabalho com objetivo de projetar um sistema de alimentação para alimentar o projeto Minuano, composto por um arranjo de células solares e conversores DC-DC.

Este trabalho apresentou uma metodologia utilizada para alcançar, mais rápido, os resultados da junção de arranjo de células solares e conversor DC-DC, utilizando métodos como a máxima potência das células solares e utilizando também equipamentos como o osciloscópio em conjunto com a fonte de tensão totalmente ajuntável, podendo realizar testes e conhecer exatamente os valores mínimos para os conversores DC-DC apresentados, funcionarem corretamente.

Este trabalho, também, apresentou o desenvolvimento e criação de três PCIs de dois conversores, o TPS61097A e o TPS61200 e apresentou sete arranjos diferentes de células solares, incluindo conexões série e série/paralelo.

Tendo em vista os resultados obtidos dos três sistemas desenvolvidos, é possível afirmar que o sistema do conversor TPS61200 (Figura 84) foi o mais satisfatório para o projeto minuano que exige 245,03 mW, tendo em vista que o sistema gerou 284,61 mW, tendo uma eficiência de 84,05% e uma massa de 12 g. Ele torna-se a melhor opção.

Os principais objetivos descritos na introdução foram alcançados nas medidas dos conversores DC-DC e arranjos de células solares.

Durante os testes ocorreu uma sobrepotência nos arranjos de onze e oito células solares em série, alcançando 1383,84 mW e 725,2 mW, respectivamente, mas no momento de conectar as oito células solares com a PCI de três conversores TPS61097A, o conversor atingiu apenas 319,87 mW, mas com uma tensão superior a tensão de 3,3 V suportada pelos circuitos presentes no tracker.

Com base neste trabalho foi possível definir os circuitos possíveis para a implementação do sistema de gerenciamento de potência do tracker. Sugere-se que este seja montado e sejam realizadas medições na faixa de temperatura presente na altitude de 14 km.

Referências

- [1] JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY. 2008. **BALLOONS: Research on Balloons to Float Over 50Km Altitude: Takamasa Tamagami, Prof. Big Balloon Observation Center, ISAS.** Disponível em: <https://www.isas.jaxa.jp/e/special/2003/yamagami/03.shtml>. Acesso em: 08 fev. 2022.
- [2] UNIPAMPA. 2020. **Clube do Rádio – Projeto Minuano.** Disponível em: <https://sites.unipampa.edu.br/clubedoradio/projeto-minuano/>. Acesso em: 17 ago. 2021.
- [3] BOXWELL, M. **Solar Electricity Handbook.** Fourteenth. [S.l.]: Greenstream Publishing, 2021.
- [4] BANDYOPADHYAY, S.; CHANDRAKASAN, A. P. Platform Architecture for Solar, Thermal, and Vibration Energy Combining With MPPT and Single Inductor. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, v. 47, n. 9, p. 2199–2215, Sept 2012. ISSN 0018-9200.
- [5] FILIPEFLOP. 2022. **Como funciona um conversor de tensão DC-DC?**. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/blog/como-funciona-um-conversor-de-tensao-dc-dc/>. Acesso em: 08 fev. 2022.
- [6] TEXAS INSTRUMENTS. **TPS61097A-33 Low-Input Voltage Synchronous-Boost Converter With Low Quiescent Current Datasheet.** [S.l.], 2014.
- [7] TEXAS INSTRUMENTS. **TPS6120x Low Input Voltage Synchronous Boost Converter With 1.3-A Switches Datasheet.** [S.l.], 2007.
- [8] COELHO, Roberto. **Estudo dos Conversores Buck e Boost Aplicados ao Rastreamento de Máxima Potência de Sistemas Solares Fotovoltaicos.** Florianópolis, 2008.
- [9] BARBI, I. **Eletrônica de Potência. Projetos de Fontes Chaveadas.** Edição do autor, Florianópolis, 2001.
- [10] PETRY, Clóvis. **Introdução aos Conversores CC-CC.** Florianópolis, 2001.
- [11] Gasparin, F.P. **Desenvolvimento de um Traçador de Curvas Características de Módulos Fotovoltaicos.** Porto Alegre: Dissertação de Mestrado, 2009.

[12] Schuck, Fernando. **DESENVOLVIMENTO DE TRAÇADOR DE CURVAS I-V PORTÁTIL PARA ARRANJOS FOTOVOLTAICOS**. Porto Alegre: Dissertação de Mestrado, 2015.

[13] KEYSIGHT. 2022. **E36312A Fonte de alimentação de 80 W com saída tripla, 6 V, 5 A & 2x 25 V, 1 A**. Disponível em: <https://www.keysight.com/br/pt/support/E36312A/80w-triple-output-power-supply-6v-5a-2x-25v-1a.html>. Acesso em: 01 jan. 2023.

[14] YOKOGAWA. 2015. **DLM2000 Mixed Signal Oscilloscopes**. Disponível em: <https://tmi.yokogawa.com/solutions/discontinued/dlm2000-mso-series/>. Acesso em: 01 jan. 2023.

[15] ASTEletroEletônica. **Multímetro Digital TRUE-RMS modelo POL-41A**. Disponível em: <https://www.asteletronica.com.br/multimetro-digital-true-rms-modelo-pol-41a>. Acesso em: 01 jan. 2023.

[16] OXIMAQ. 2019. **MULTIMETRO DIGITAL ET-1110**. Disponível em: <https://catalogo.oximaq.com.br/categorias/ferramentas-de-medicao-e-metrologia/multimetros/multimetro-digital-et-1110a-minipa.html>. Acesso em: 01 jan. 2023.

[17] Amazon. 2020. **SUNYIMA 100pcs Mini Solar Cells 0.5V 0.4W Micro Thin Polycrystalline Silicon Solar Panels DIY 52 x 52mm/2x2inch**. Disponível em: <https://us.amazon.com/SUNYIMA-100pcs-Polycrystalline-Silicon-2x2inch/dp/B0895XHPKT>. Acesso em: 01 jan. 2023.

[18] Amazon. 2021. **AOSHIKE 100pcs 0.5V 400mA Micro Mini Solar Cell for Solar Panels 52mmx 19mm/2"x0.75" Polycrystalline Silicon Photovoltaic Solar Cells Sun Power for DIY Cell Phone Charger**. Disponível em: <https://www.amazon.sa/-/en/AOSHIKE-Polycrystalline-Silicon-Photovoltaic-Charger/dp/B01NCQRCQR>. Acesso em: 01 jan. 2023.

[19] EVATRON. 2017. **FLUXO PASTOSO 30G SERINGA PRO SOLDER BGA**. Disponível em: <https://www.lojaevatron.com.br/fluxo-pastoso-10g-seringa-pro-solder-bga/prod-8451626/>. Acesso em: 01 jan. 2023.

[20] MAGALU. 2021. **Ferro Solda Soldar Estanho 40w Inmetro 220v Profissional – Eda**. Disponível em: <https://www.magazineluiza.com.br/ferro-solda-soldar-estanho-40w-inmetro-220v-profissional-eda/p/egdeeadb2a/fs/fdsa/>. Acesso em: 01 jan. 2023.

[21] MAMUTE Eletrônica. **Resistor PORCELANA 47K AC10 10W 5%**. Disponível em: <https://www.mamuteeletronica.com.br/resistor-porcelana-47k-ac10-10w-5>. Acesso em: 01 jan. 2023.

[22] DirectINDUSTRY. 2015. Máquina de brasagem fraca por refusão ProtoFlow E. Disponível em: <https://www.directindustry.com/pt/prod/lpkf-laser-electronics/product-9183-435896.html>. Acesso em: 01 jan. 2023.

[23] Submarino. 2016. **Balança Digital Cozinha 10kg Extrema Precisão E Versatil**. Disponível em: <https://www.submarino.com.br/produto/2899573762>. Acesso em: 01 jan. 2023.

[24] PORTAL SOLAR. 2021. **Energia verde: O que é, tipos e vantagens de utilizar**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-verde>. Acesso em: 19 jan. 2023.

[25] Zamparete, Roger. **High Efficiency MPPT Switched Capacitor DC - DC Converter for Photovoltaic Energy Harvesting Aiming for IoT Applications**. Porto Alegre: Dissertação de Mestrado, 2017.

[26] Euronews. 2021. **A primeira central solar flutuante do mundo em alta altitude**. Disponível em: <https://pt.euronews.com/2021/06/01/a-primeira-central-solar-flutuante-do-mundo-em-alta-altitude>. Acesso em: 24 jan. 2023.

[27] RMHAM. 2021. **RMHAM-NM Launches Pico Balloon**. Disponível em: <https://www.rmham.org/rmham-nm-launches-pico-balloon/>. Acesso em: 27 jan. 2023.

[28] MUNDO EDUCAÇÃO. **Camadas da Atmosfera**. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/camadas-atmosfera.htm>. Acesso em: 27 jan. 2023.