

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**DIONATHAN STEIL SCHEID**

**PERDAS DE POTÊNCIA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS  
PELA ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA**

**Alegrete**

**2018.**

**DIONATHAN STEIL SCHEID**

**PERDAS DE POTÊNCIA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS  
PELA ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA**

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: Jumar Luís Russi

**Alegrete**

**2018.**

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) .

S29lp Scheid, Dionathan Steil  
PERDAS DE POTÊNCIA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PELA  
ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA / Dionathan Steil Scheid.  
42 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)--  
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA,  
2018.

"Orientação: Jumar Luis Russi".

1. Sistema Fotovoltaico. 2. Arrefecimento. 3.  
Eficiência energética. I. Título.

**DIONATHAN STEIL SCHEID**

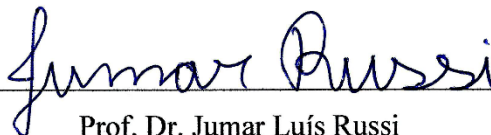
**PERDAS DE POTÊNCIA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS  
PELA ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA**

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.

Área de concentração: Geração de energia elétrica

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 03 de dezembro de 2018.

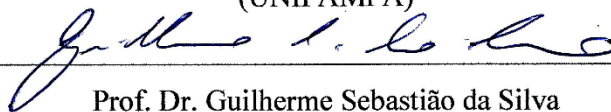
Banca examinadora:



Prof. Dr. Jumar Luís Russi

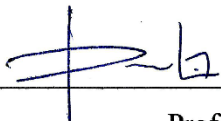
Orientador

(UNIPAMPA)



Prof. Dr. Guilherme Sebastião da Silva

(UNIPAMPA)



Prof. Me. Daniel Lima Lemes

(UNIPAMPA)

Dedico este trabalho a meus amados pais, Marcelo Scheid e Cleusa Glaci Steil Scheid, que não mediram esforços para meu desenvolvimento profissional e me deram apoio e amor de forma incondicional.

## **AGRADECIMENTO**

A Deus pela minha vida, pela minha saúde e por todas as bênçãos que me concedeu.

A meus pais, Marcelo Scheid e Cleusa Glaci Steil Scheid, por todo apoio, amor e compreensão.

A Kelly Ruoso por todo seu amor, atenção, compreensão e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Jumar Luís Russi, por toda orientação e esforços para que eu realizasse esse trabalho.

Aos meus professores, fontes de conhecimento e informação.

A todos meus familiares que de alguma forma contribuíram para minha formação profissional.

A todos os meus amigos que me proporcionaram muitos momentos felizes.

A meus colegas que me ajudaram durante toda a graduação.

## RESUMO

Este trabalho aborda as perdas de potência dos sistemas fotovoltaicos devido ao aumento da temperatura dos módulos fotovoltaicos, bem como uma proposta de solução para o problema. O sistema proposto para solucionar esse problema é baseado em um trocador de calor acoplado em um módulo fotovoltaico convencional, por onde ocorre a circulação de um fluido pela ação de uma bomba, a qual é acoplada a um reservatório. O sistema proposto é muito similar ao utilizado em computadores de alto desempenho, onde o fluido troca calor com o processador. Algumas simulações preliminares foram feitas, onde ocorreram ganhos na potência média extraída dos módulos fotovoltaicos. Com base nesses resultados foi construído um protótipo do sistema de arrefecimento, o qual foi comparado a um módulo convencional do mesmo modelo, onde se verificou que ocorreu ganho de potência e energia térmica na água utilizada no arrefecimento. A partir desses resultados foram feitas mais algumas simulações onde o sistema proposto se mostrou mais eficiente em dias com maior irradiação solar e temperatura.

Palavras-chave: Sistema Fotovoltaico, Arrefecimento, Eficiência energética.

## **ABSTRACT**

This work deals with the power losses of photovoltaic systems with the temperature increase of the photovoltaic modules, as well as a proposal of solution to the problem. The proposed system to solve this problem is based on a heat exchanger coupled in a conventional photovoltaic module, through which a fluid will flow through the action of a pump, which will be coupled in a reservoir. The proposed system is very similar to that used in high performance computers, where the fluid exchanges heat with the processor. Some preliminary simulations were made, where there were gains in the average power extracted from the photovoltaic modules. Based on these results a prototype of the cooling system was constructed, which was compared to a conventional module of the same model, where it was verified that power and thermal energy gain occurred in the water used in the cooling. From these results were made some more simulations where the proposed system was more efficient in days with higher solar irradiance and temperature.

**Keywords:** Photovoltaic System, Cooling, Energy Efficiency.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curvas I x V para variação de irradiação.....	11
Figura 2 - Curvas I x V para diferentes temperaturas.....	12
Figura 3 - Curva P x V .....	13
Figura 4 - Diagrama de Blocos do método P&O.....	17
Figura 5 - Diagrama de blocos IC .....	19
Figura 6 - Arranjo conversor <i>Buck</i> .....	20
Figura 7 - Arranjo conversor Boost.....	21
Figura 8 - Fluxograma do trabalho.....	23
Figura 9 - Módulo Fotovoltaico com sistema de refrigeração.....	25
Figura 10 - Curvas de temperatura utilizadas na simulação.....	28
Figura 11 - Curva de Potência com arrefecimento.....	28
Figura 12 - Curva de Potência sem arrefecimento.....	29
Figura 13 - Topologia utilizada nos experimentos.....	30
Figura 14 - Topologia da conexão do Wattímetro.....	30
Figura 15 - Módulos fotovoltaicos utilizados nos ensaios.....	31
Figura 16 - Serpentina de cobre instalada no módulo fotovoltaico com arrefecimento.....	32
Figura 17 - Bomba utilizada nos ensaios.....	32
Figura 18 - Curvas de temperatura.....	34
Figura 19 - Resultados Experimentais.....	35
Figura 20 - Simulação com curvas de temperatura experimentais.....	36
Figura 21 - Curvas de potência de uma semana simulada.....	38
Figura 22 - Ampliação do ultimo dia de simulação.....	39

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Materiais utilizados .....	24
TABELA 2 - Condições de simulação .....	27
TABELA 3 - Dados de simulação .....	38

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Considerações iniciais.....	8
1.2 Objetivo geral e específicos.....	8
1.3 Distribuição do trabalho.....	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	10
2.1 Sistemas Solares de energia.....	10
2.2 Métodos de transferência de calor.....	14
2.3 Rastreamento de máxima potência.....	16
2.4 Conversores.....	19
3. METODOLOGIA.....	23
4. RESULTADOS.....	27
4.1 Resultados iniciais de simulação.....	27
4.2 Resultado experimentais.....	29
4.3 Resultados de Simulação.....	37
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
REFERÊNCIAS.....	41

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações iniciais

A produção de energia elétrica a partir de módulos fotovoltaicos, principalmente em sistemas conectados à rede de distribuição, por ser uma alternativa renovável, vem crescendo e se consolidando muito nos últimos anos em diversos países (LISATA, 2005).

Um módulo fotovoltaico, ao ser exposto à irradiação solar, recebe calor por ondas eletromagnéticas causando o aumento de sua temperatura. Esse aumento de temperatura diminui a tensão das células fotovoltaicas, o que reduz a tensão e a potência de saída de todo o sistema fotovoltaico (INCROPERA, 2008) (VILLALVA; GAZOLI, 2015).

Para contornar esse problema, este trabalho propõe um sistema que reduz as perdas de potência de um módulo fotovoltaico, acoplando um trocador de calor por onde um fluido irá circular com a finalidade de reduzir a temperatura do módulo fotovoltaico. Dessa forma, espera-se que o sistema tenha um ganho de geração de energia elétrica no módulo fotovoltaico, além de ainda ter energia térmica disponível proveniente do fluido usado no arrefecimento, assim como em (ZANLORENZI, SZEJKA, SOUZA, 2017), onde o sistema de arrefecimento utilizado reduziu a temperatura do módulo fotovoltaico em 14,6 °C, melhorando sua eficiência em 1,16%.

### 1.2 Objetivos do trabalho

#### 1.2.1 Objetivo geral.

O principal objetivo do presente estudo é melhorar o aproveitamento da energia que um sistema fotovoltaico recebe do Sol, seja ela luminosa, para geração de eletricidade, ou térmica.

#### 1.2.2 Objetivos específicos.

- Resfriar o módulo fotovoltaico para aumentar a potência de saída;
- Usar a energia térmica do módulo fotovoltaico para aquecer água;
- Analisar a eficiência energética do sistema fotovoltaico com refrigeração;
- Estudar os conversores CC-CC mais adequados para esta aplicação;

- Estudar os métodos de rastreamento do ponto de máxima potência, que controlarão o chaveamento do conversor CC-CC.

### 1.3 Organização do trabalho

Inicialmente será apresentada uma revisão bibliográfica, que aborda os tipos de sistemas solares térmicos e fotovoltaicos, métodos de transferência de calor, técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência e conversores CC-CC. Em seguida será apresentada uma simulação realizada na ferramenta Simulink do software MATLAB®, que ilustra o princípio de funcionamento do sistema fotovoltaico com o arrefecimento que este trabalho propõe. Posteriormente, serão apresentados os resultados experimentais onde serão analisados os ganhos de energia elétrica e térmica obtidos na prática. A partir desses resultados, novas simulações com base nos dados meteorológicos do INMET e nos resultados práticos, mostrarão as curvas de potência de uma semana para 3 condições de temperatura. Por fim, são feitas as considerações finais desse trabalho.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Sistemas Solares de energia

A energia proveniente do Sol, inesgotável em uma escala de tempo terrestre, é responsável por praticamente todas as formas de energia luminosa e térmica que temos no planeta. As principais formas de geração de energia renovável são derivadas de fenômenos naturais causados pela energia solar, como os ventos, chuvas e a energia solar fotovoltaica (LISATA, 2005).

#### 2.1.1 Sistema Solar-térmico

Para esta aplicação, a utilização dessa forma da energia solar está relacionada com a capacidade que um corpo tem de absorver energia na forma de calor. O bom aproveitamento dessa energia está ligado tanto à forma de captação, quanto à forma de armazenamento para o uso posterior. Os dispositivos mais conhecidos para receber a energia solar térmica são conhecidos como coletores solares (BORGES; CARVALHO, 2012) (INCROPERA, 2008).

Os coletores solares nada mais são do que aquecedores de fluido que podem operar de 60 °C até em torno de 400 °C, dependendo da existência ou não de um concentrador, o que é definido com base na aplicação posterior da energia térmica (BORGES; CARVALHO, 2012).

Coletores solares planos são largamente utilizados no aquecimento de água em residências, hotéis, hospitais, etc., tendo em vista a redução do consumo de energia elétrica e/ou combustível no aquecimento de água para o banho, aquecimento da água da piscina, ar quente para secagem de grãos, água quente para limpeza, entre outros (BORGES; CARVALHO, 2012).

Coletores solares com concentrador normalmente são utilizados em aplicações de médio e grande porte, quando o objetivo final normalmente é usar o fluido para alimentar uma turbina para geração de energia elétrica (BORGES; CARVALHO, 2012).

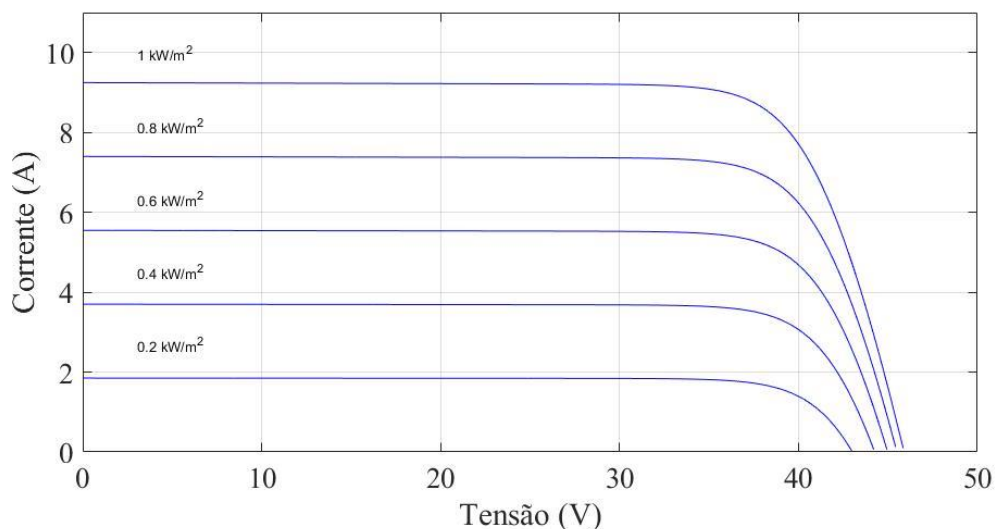
### 2.1.2 Sistemas Fotovoltaicos

Um sistema de energia fotovoltaica é um sistema capaz de gerar energia elétrica através da radiação solar. É uma alternativa renovável e de baixo impacto ambiental em comparação aos métodos convencionais de geração, tais como a queima de combustíveis fósseis. A geração fotovoltaica tem crescido exponencialmente nos últimos anos, tanto no Brasil como no mundo (ASSOCIATION et al., 2014).

As células fotovoltaicas são as responsáveis pela geração de energia fotovoltaica dos módulos fotovoltaicos. Elas são produzidas a partir de um elemento semicondutor, normalmente o silício (Si), o qual passa por um processo de dopagem, onde outros elementos são adicionados, a fim de criar regiões com excesso de elétrons e outra com excesso de lacunas. O fenômeno fotovoltaico ocorre quando a irradiação solar produz uma diferença de potencial entre essas regiões (PINHO; GALDINO, 2014).

Os módulos fotovoltaicos são arranjos de células fotovoltaicas que tem o objetivo de somar seus potenciais energéticos. Esses arranjos são formados pela associação das células em série e paralelo, criando na saída do sistema uma característica de tensão e corrente de acordo com a finalidade do projeto (PINHO; GALDINO, 2014).

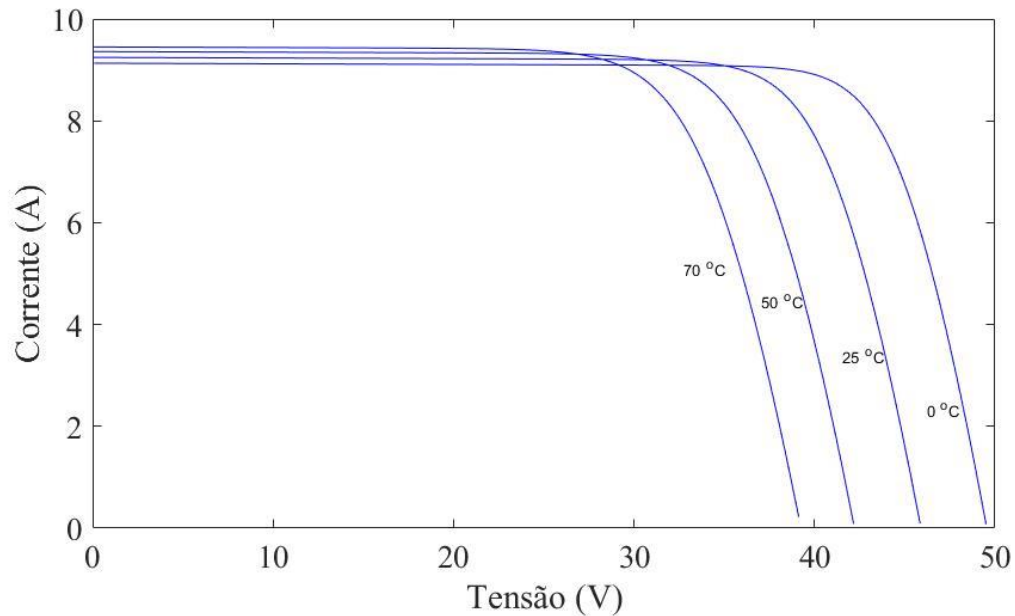
Figura 1 - Curvas I x V para variação de irradiação.



Fonte: Adaptação do datasheet do módulo fotovoltaico Seraphim.

A saída característica de tensão e corrente do módulo varia de um modelo para o outro, de forma que cada um tem suas curvas I x V (Corrente por Tensão) para variação de irradiação solar e para variação de temperatura. A Figura 1 mostra as curvas I x V para diferentes níveis de irradiação solar. A Figura 2 mostra as curvas I x V para diferentes temperaturas, onde fica clara a redução de potência na saída do módulo quando a temperatura sobe. Também é interessante observar a curva P x V (Potência por Tensão) da Figura 3, onde essa variação de potência fica mais evidente.

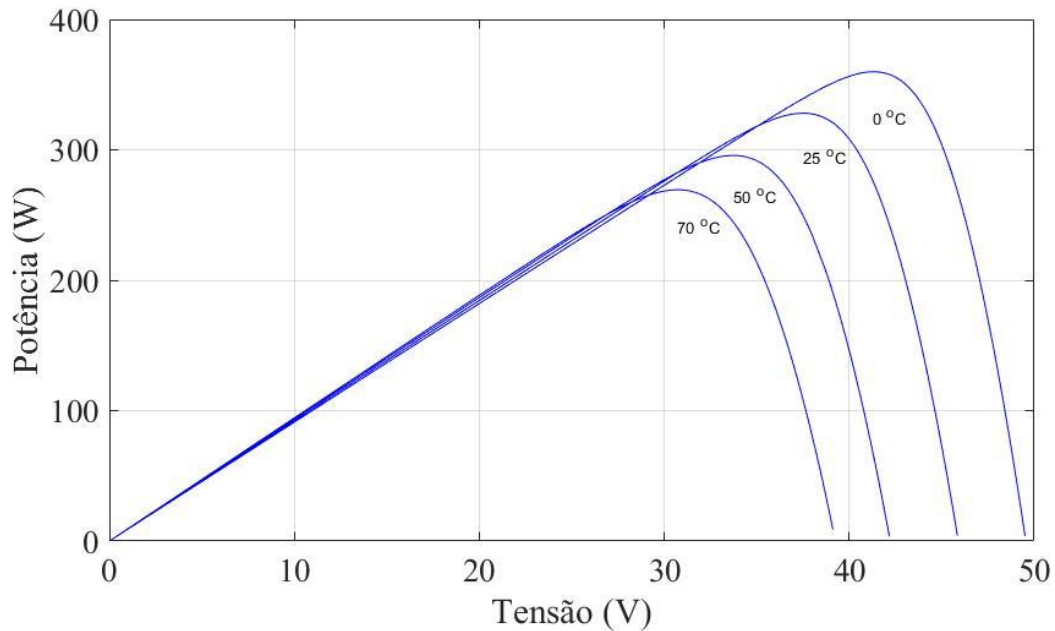
Figura 2 - Curvas I x V para diferentes temperaturas.



Fonte: Adaptação do datasheet do módulo fotovoltaico Seraphim.



Figura 3 - Curva P x V



Fonte: Construída no Simulink com base no datasheet do módulo fotovoltaico Seraphim.

#### 2.1.2.1 Sistemas Isolados

Os sistemas *off-grid* são formados por módulos fotovoltaicos, conversor CC-CC, inversor de frequência e banco de baterias. Nesse caso, a energia gerada durante o dia é armazenada no banco de baterias para ser usada quando não tiver disponibilidade de irradiação solar (VILLALVA; GAZOLI, 2015).

As vantagens desse tipo de sistema é que ele não depende da rede de distribuição de energia elétrica para funcionar, é livre de tarifas e de impostos sobre a energia. Outro ponto positivo é que a qualidade da energia disponível pode ser muito superior que a fornecida pela rede de distribuição (PINHO; GALDINO, 2014) (VILLALVA; GAZOLI, 2015).

Apesar de ter grandes vantagens, esse tipo de sistema fotovoltaico é pouco utilizado, pois seu custo é maior devido ao custo do banco de baterias, as quais tem preço elevado e vida útil baixa comparada à dos demais componentes do sistema (PINHO; GALDINO, 2014).

### 2.1.2.2 Sistemas conectados à Rede

Sistemas *on-grid* são os mais utilizados para geração de energia elétrica fotovoltaica. São formados pelos módulos fotovoltaicos, conversor CC-CC e inversor de frequência, o qual é conectado à rede de distribuição de energia elétrica. Sua popularidade se deve ao custo de implementação menor, por não necessitar de um banco de baterias (VILLALVA; GAZOLI, 2015).

Um importante incentivo para esse tipo de sistema fotovoltaico foi introduzido pela Resolução Normativa nº 482/2012, conhecida como Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Essa Resolução Normativa permite que a energia excedente, gerada pelo sistema fotovoltaico, seja injetada na rede da distribuidora, onde será consumida por outros clientes da concessionária. Quando a energia injetada na rede for maior que a consumida, o consumidor receberá um crédito em energia (kWh) a ser utilizado para reduzir o consumo na fatura dos meses subsequentes. Os créditos de energia gerados continuam válidos por 60 meses (ANEEL, 2016).

Apesar de gerar a própria energia, sistemas *on-grid* só podem operar se a rede de distribuição de energia estiver operando. Isso ocorre devido ao sistema de anti-ilhamento que deve estar presente no inversor para evitar danos aos equipamentos a ele conectados, além de evitar riscos aos funcionários da concessionária de distribuição durante uma manutenção da rede (VILLALVA; GAZOLI, 2015).

## 2.2 Métodos de transferência de calor

Todas as formas de transferência de calor estão presentes em um sistema fotovoltaico, onde o sol aquece o módulo fotovoltaico por radiação, o módulo transfere calor por condução para a estrutura de sustentação, e ambos transferem calor para o ar atmosférico por convecção.

### 2.2.1 Condução térmica

A temperatura de um material está associada à sua energia molecular, onde temperaturas mais altas estão associadas à energias moleculares maiores e temperaturas menores associadas à

energias moleculares menores. Assim, quando dois materiais estão em contato, as moléculas se chocam, fazendo com que as moléculas com mais energia transfiram energia para as moléculas vizinhas com menos energia, formando assim um gradiente de temperatura por todo o material em contato (INCROPERA, 2008)

É possível quantificar a transferência de calor por uma equação de taxa (diferencial). Para transferência de calor por condução entre superfícies planas é utilizada a equação de taxa conhecida como Lei de Fourier (Equação 1) (INCROPERA, 2008).

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Onde  $q_x$  é a taxa de transferência de calor na direção  $x$  por unidade de área perpendicular à direção da transferência de calor,  $dT/dx$  é o gradiente de temperatura, e  $k$  é uma constante de proporcionalidade que depende do material (INCROPERA, 2008)

### 2.2.2 Convecção Térmica

O modo de transferência de calor por convecção envolve dois fenômenos que ocorrem com o fluido, a transferência de energia pelo movimento das moléculas, e o movimento global do fluido. Geralmente um fluido com temperatura mais elevada tem uma densidade menor do que quando está com temperatura mais baixa, o que gera um movimento contínuo até que todo o fluido esteja com a mesma temperatura. Então, a convecção é a soma da transferência de energia pelo contato com uma superfície, com a transferência de calor pelo movimento global do fluido (INCROPERA, 2008).

A equação que descreve a taxa de transferência de calor por convecção é conhecida como Lei do resfriamento de Newton, dada pela Equação 2.

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Onde  $q$  é o fluxo de calor por convecção,  $T_s$  é a temperatura da superfície,  $T_\infty$  é a temperatura do fluido e  $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção, o qual depende da geometria da superfície, do escoamento do fluido e de características termodinâmicas do fluido (INCROPERA, 2008).

### 2.2.3 Radiação Térmica

Radiação térmica é a energia emitida por uma matéria cuja temperatura não seja nula. Ela se deve à mudanças na configuração eletrônica dos átomos ou moléculas do material. A radiação térmica é transmitida através de ondas eletromagnéticas e não necessita de um meio material para se propagar. O fluxo térmico deste tipo de transferência de calor é determinado pelo produto da lei de Stefan-Boltzmann pela emissividade do material  $\varepsilon$  (INCROPERA, 2008).

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (3)$$

Onde  $E$  é o fluxo de temperatura,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann e  $T_s$  é a temperatura absoluta da superfície (INCROPERA, 2008).

## 2.3 Rastreamento de máxima potência

Técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência são algoritmos que permitem que um sistema fotovoltaico opere muito próximo do seu ponto ideal. Essas técnicas são conhecidas como MPPT (*Maximum power point tracking*).

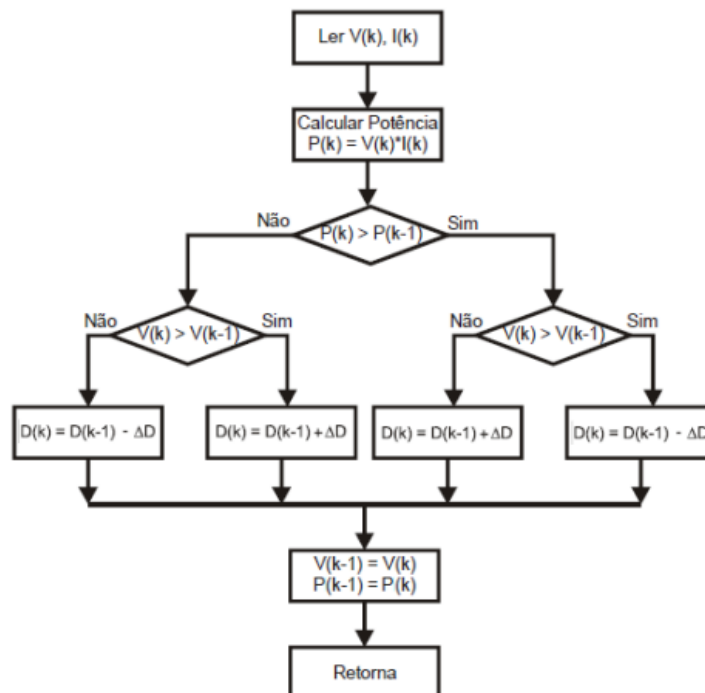
As estratégias de MPPT tem por objetivo extrair a máxima potência dos módulos fotovoltaicos conectados ao conversor de energia através da determinação da razão cíclica  $D$  de chaveamento deste conversor (VILLALVA; GAZOLI, 2015).

### 2.3.1 Perturba e observa (P&O)

O método P&O é classificado como direto, pois o algoritmo obtém os valores da corrente e da tensão de entrada do módulo fotovoltaico a todo o instante, para que o algoritmo encontre o ponto de máxima potência. Este método não depende das características do módulo, podendo ser utilizado para qualquer modelo (PINHO; GALDINO, 2014).

Para rastreamento do ponto de máxima potência de um módulo fotovoltaico com esse método, é necessário ter acesso apenas à medição da tensão  $V(k)$  e da corrente  $I(k)$  a cada ciclo de amostragem. Inicialmente calcula-se a potência do sistema fotovoltaico  $P(k)$  e realiza-se uma comparação com a medida anterior  $P(k-1)$ . Da mesma forma ocorre com a tensão  $V(k)$  e  $V(k-1)$ ; de acordo com o resultado dessas duas comparações o algoritmo atualiza o valor da razão cíclica  $D(k)$  do conversor CC-CC, incrementando ou decrementando um determinado  $\Delta D$ , conforme ilustrado na Figura 4 (VILLALVA; GAZOLI, 2015).

Figura 4 - Diagrama de Blocos do método P&O



fonte: adaptação de MOÇAMBIQUE (2012)

Este método utiliza um dos conceitos mais simples e de fácil implementação existentes para a utilização de uma técnica de MPPT. Além disso, alguns aprimoramentos podem ser agregados, melhorando sua resposta em regime, e/ou reduzindo o tempo de convergência do algoritmo, o que o torna a técnica mais conhecida e utilizada para rastreamento do ponto de máxima potência em sistemas fotovoltaicos (VILLALVA; GAZOLI, 2015) (CARDOSO et al, 2018).

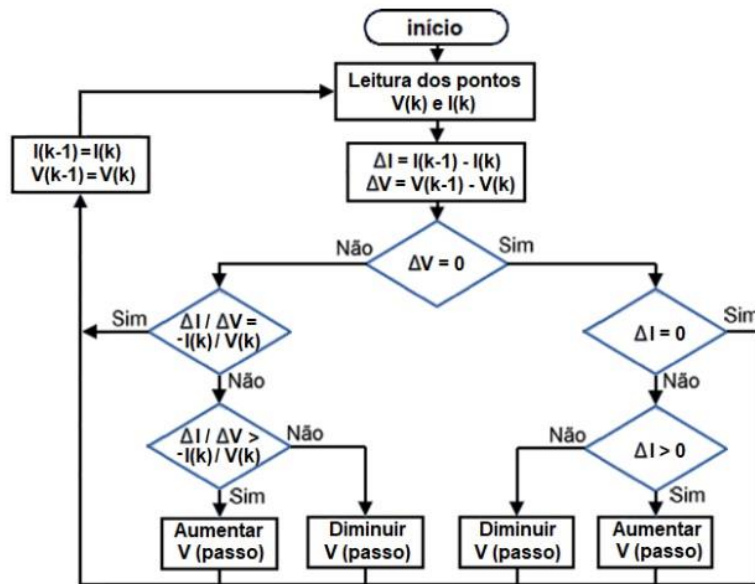
Para a realização das simulações com conversor CC-CC *Boost* foi utilizado um algoritmo P&O modificado, o qual não atualiza a razão cíclica quando não ocorrerem variações de temperatura e irradiância solar, e a potência de saída está acima de 99% de seu valor ideal. Dessa forma, a resposta em regime não é oscilatória, mantendo uma potência média maior ou igual ao P&O convencional, melhorando o aproveitamento da energia que passa pelo conversor.

### 2.3.2 Condutância incremental (IC)

O princípio de funcionamento desse algoritmo baseia-se na análise da inclinação da curva característica P-V. Quando o valor da inclinação for nulo, então o ponto de máxima potência foi alcançado, o que é determinado pela derivada da potência pela tensão, ou seja, onde  $dP/dV$  é zero. Da mesma forma, para valores positivos da derivada da potência, é necessário elevar a tensão de referência, e para valores negativos, o valor de referência deve ser reduzido. A Figura 5 detalha o algoritmo (CUNHA, 2016).

Esse algoritmo apresenta uma maior complexidade para ser implementado, como pode ser observado ao comparar os diagramas de blocos do P&O (Figura 4) e do IC (Figura 5). No entanto, este método converge mais rápido quando submetido à mudanças bruscas de temperatura e irradiação porque a variação da tensão determina o tamanho do passo, que é grande quando  $\Delta V$  for grande e pequeno para valores de tensão próximos ao ponto de máxima potência (ESRAM; CHAPMAN, 2007).

Figura 5 - Diagrama de blocos IC



fonte: CARDOSO et al, (2018)

## 2.4 Conversores

### 2.4.1 Conversores CC-CC

Conversores CC-CC podem ser definidos como circuitos formados por semicondutores e elementos passivos que têm a função de controlar o fluxo de potência de uma porta de entrada para uma porta de saída. Os semicondutores, nessa aplicação, funcionam como interruptores, e os elementos passivos, normalmente indutores e capacitores, servem para controlar o fluxo de potência da entrada para a porta de saída. O controle do fluxo de potência é feito pela variável  $D$ , conhecida como razão cíclica, que é a relação entre o tempo de condução e o período de chaveamento da chave semicondutora (MARTINS; BARBI, 2006).

A razão cíclica pode ser definida por:

$$D = \frac{tc}{T} \quad (4)$$

Onde:

$t_c$  é o tempo que a chave semicondutora permanece fechada;

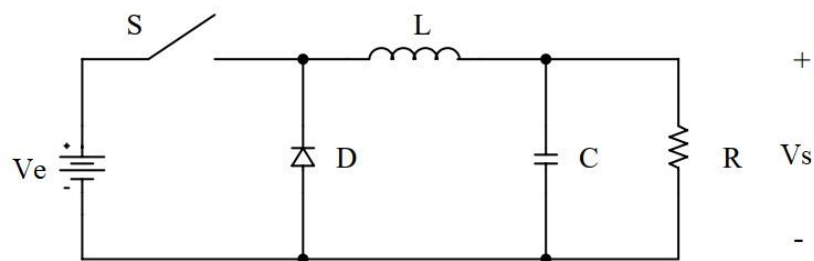
$T$  é o período de chaveamento do conversor.

Dependendo do arranjo dos elementos no circuito do conversor, pode-se ter uma relação de ganho diferente entre entrada e saída. Para esta aplicação, os conversores são considerados no modo de condução contínua. Os arranjos mais comuns em sistemas fotovoltaicos são o conversor elevador *Boost* e o conversor abaixador *Buck* que serão abordados a seguir.

#### 2.4.1.1 Conversor abaixador de tensão: *Buck*.

Este conversor tem como propósito reduzir a tensão média de saída em relação à tensão média de entrada. Consequentemente, pelo princípio da conservação de energia, a corrente média de saída será maior que a corrente média de entrada (MARTINS; BARBI, 2006).

Figura 6 - Arranjo conversor *Buck*



Fonte: adaptação de MARTINS; BARBI (2006)

A Figura 6 mostra o circuito de um conversor *Buck*, onde é possível analisar que o mesmo funciona em duas etapas, uma com a chave  $S$  aberta e outra com esta chave fechada, as quais são definidas pela razão-cíclica.

Na primeira etapa, considera-se que a chave está fechada. Dessa forma, a fonte de tensão  $V_e$  fornecerá uma corrente ao circuito, que vai carregar o capacitor  $C$  e o indutor  $L$  e alimentar o



resistor  $R$  que funciona como carga. Assim, a máxima tensão sobre a carga  $R$  é igual a tensão da fonte de entrada  $V_e$ .

Na segunda etapa, a chave  $S$  está aberta, assim, a corrente imposta pelo indutor  $L$  passa a circular pelo diodo  $D$ . Como o indutor  $L$  começa a descarregar, pois não existe uma fonte de alimentação conectada ao circuito, a tensão de saída sobre a carga  $RC$  começa a diminuir até chegar a zero, se os componentes descarregarem completamente (Modo de condução descontínuo). Dessa forma, o ganho estático, que é a relação da tensão de saída pela tensão de entrada, é dado pela Equação 5 (MARTINS; BARBI, 2006).

$$G = \frac{V_s}{V_e} = D \quad (5)$$

Onde:

$G$  é o ganho estático;

$V_e$  é a tensão de entrada;

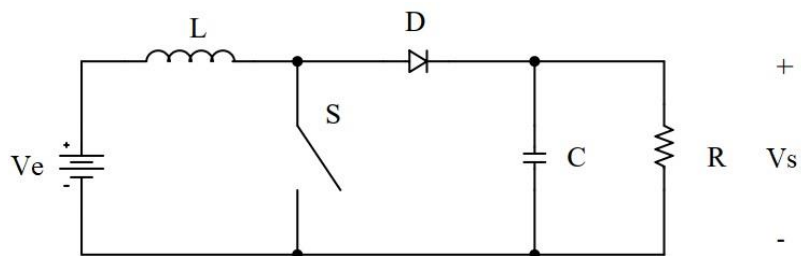
$V_s$  é a tensão de saída;

$D$  é a razão cíclica do conversor.

#### 2.4.1.2 Conversor elevador de tensão: *Boost*.

O conversor Boost tem como princípio fornecer uma tensão maior que a tensão de entrada. Assim, a menor tensão de saída, teoricamente, é igual a tensão de entrada. Este conversor utiliza o mesmo número de componentes do conversor Buck, porém o arranjo é diferente, conforme a Figura 7:

Figura 7 - Arranjo conversor Boost



Fonte: adaptação de MARTINS; BARBI (2006).

De forma similar ao Buck, o conversor Boost também apresenta ao menos duas etapas de funcionamento, que são determinadas pelo estado de condução da chave semicondutora.

Na primeira etapa, a chave  $S$  está fechada. Dessa forma, o diodo  $D$  é polarizado reversamente, pois a carga funciona como uma fonte de tensão  $V_s$ . Simultaneamente, a corrente fornecida pela fonte de entrada  $V_e$  passa apenas pelo indutor  $L$ , que carrega até que a chave  $S$  abra.

Na segunda etapa a chave  $S$  abre, o diodo  $D$  entra em condução e a fonte  $V_e$  entrega energia para a carga  $RC$ , onde a tensão média se eleva. Assim, o ganho estático é dado pela Equação 6 (MARTINS; BARBI, 2006).

$$G = \frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1 - D} \quad (6)$$

Onde:

$G$  é o ganho estático;

$V_e$  é a tensão de entrada;

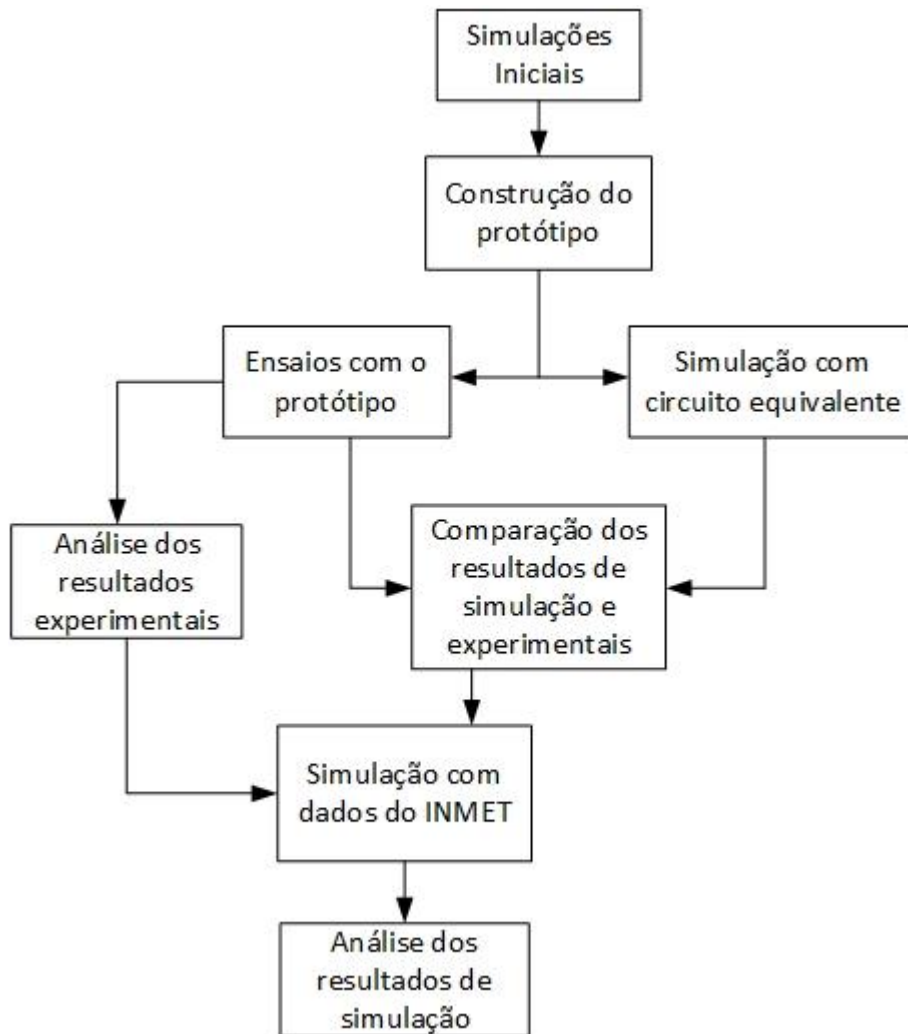
$V_s$  é a tensão de saída;

$D$  é a razão cíclica do conversor.

### 3. METODOLOGIA

Quando um módulo fotovoltaico é exposto à irradiação solar, dois fenômenos acontecem, o fenômeno fotovoltaico, o qual é responsável pela geração de energia elétrica pelo módulo, e a transferência de calor por ondas eletromagnéticas (INCROPERA, 2008). Este aumento de temperatura diminui a tensão das células fotovoltaicas, o que reduz a tensão e a potência de saída de todo o sistema fotovoltaico (VILLALVA; GAZOLI, 2015).

Figura 8 - Fluxograma do trabalho.



Fonte: Construção própria.

Com o objetivo de aumentar a potência média de saída dos sistemas fotovoltaicos foram feitas algumas simulações, construção e ensaios um protótipo e análises, que estão descritas no fluxograma da Figura 8.

Para verificar a perda de potência com o aumento da temperatura, foram realizadas, inicialmente, algumas simulações com um modelo simplificado do sistema fotovoltaico com arrefecimento proposto. As simulações foram feitas na ferramenta *simulink* do software MATLAB®, e serão expostas na seção seguinte. Como uma tentativa de reduzir essa perda de potência, o presente trabalho propõe a utilização de um sistema de arrefecimento líquido que, de uma forma geral, possui um trocador de calor acoplado a um módulo fotovoltaico convencional. Para a construção do protótipo foram utilizados os materiais da Tabela 1.

TABELA 1 - Materiais utilizados

Quantidade	Características
2	Módulos fotovoltaicos 330Wp
15	Metros de tubo de cobre de meia polegada
3,5	Metros de tubos em “U” de alumínio
2,5	Metros de cantoneira de ferro
1	Bomba d’água
1	Reservatório
250	Gramas de pasta térmica
-	Mangueiras
-	Parafusos
-	Porcas
-	Arruelas

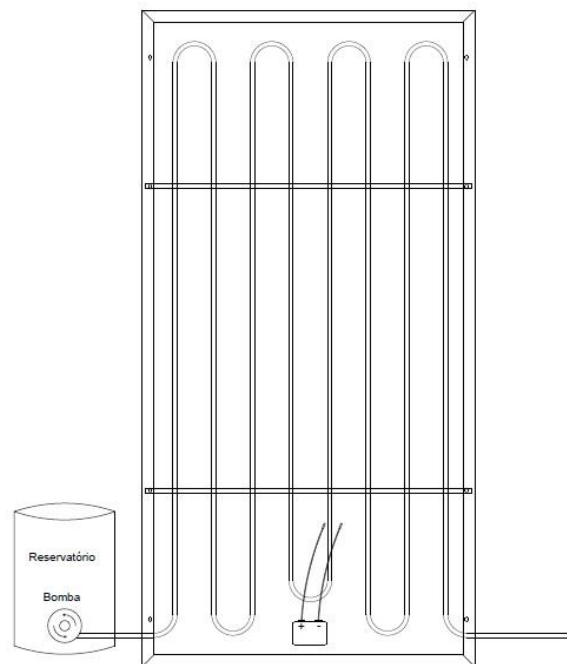
Fonte: Construção própria.

Esse trocador de calor é composto por uma serpentina de cobre, que é fixada na parte de trás do módulo fotovoltaico por três tubos em “U” de alumínio, sendo parafusado nos furos das bordas do módulo fotovoltaico. Ambos os tubos de fixação são cortados e escareados de forma que tenham um encaixe mais firme, mantendo o afastamento entre os tubos da serpentina mais uniforme. Os dois tubos de alumínio localizados mais ao centro do módulo foram reforçados por

duas cantoneiras de ferro, pois não estavam suportando os esforços mecânicos impostos pela serpentina.

A serpentina é feita a partir de uma tubulação de cobre de meia polegada, a qual é moldada conforme a Figura 9, onde estão ilustrados o módulo fotovoltaico com a serpentina, a estrutura de fixação, a bomba e o reservatório. Para melhorar a condutividade térmica entre a serpentina e o módulo fotovoltaico foi adicionada uma camada de pasta térmica entre os mesmos.

Figura 9 - Módulo Fotovoltaico com sistema de refrigeração.



Fonte: Construção própria.

Um sistema de bombeamento gera uma circulação forçada da água que fica armazenada em um reservatório, pela serpentina. Para esse trocador de calor, o sistema de bombeamento poderia ser dispensado, pois a água circularia pela serpentina por convecção, mas o mesmo foi utilizado para aumentar a eficiência.

Conforme a Figura 9, a bomba fica acoplada ao reservatório de forma que funcione afogada. A água sai do reservatório e passa pela bomba, onde é pressurizada e percorre a serpentina. Como a serpentina está em contato com o módulo fotovoltaico, ocorre transferência de calor (por contato)

do módulo para a serpentina e da serpentina para a água. Após a troca de calor a água sai da serpentina e retorna para o reservatório através de uma mangueira. Esse ciclo de troca de calor ocorrerá até que o módulo fotovoltaico e a água estejam em equilíbrio térmico.

Para a realização dos experimentos foram necessários dois sistemas com componentes idênticos, um com e outro sem o sistema de arrefecimento. Nos dois sistemas foram realizadas diversas medidas das grandezas elétricas para verificar se ocorreu ganho de energia elétrica, além de medir a temperatura para verificar o potencial de aproveitamento da energia térmica resultante.

Para calcular a energia térmica que o sistema forneceu à água do reservatório é necessário calcular o calor latente necessário para derreter o bloco de gelo, e o calor sensível necessário para levar a água do reservatório da temperatura inicial até a temperatura final. Para isso, foram utilizadas as seguintes equações:

$$Q_L = L m \quad (7)$$

Onde:

$Q_L$  é o calor latente;

$L$  é o calor latente de fusão do gelo;

$m$  é a massa.

$$Q_S = m c \Delta t \quad (8)$$

Onde:

$Q_S$  é o calor sensível;

$c$  é o calor específico da água;

$\Delta t$  é a variação de temperatura.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Resultados iniciais de simulação

Neste estudo foi utilizado o *Simulink* como ferramenta de simulação, do software MATLAB®, onde foi montado um sistema fotovoltaico composto por módulos fotovoltaicos, conversor CC-CC *Boost* com o método MPPT e carga, não sendo utilizados inversor de frequência e banco de baterias.

Os componentes do sistema foram dimensionados para operarem de acordo com o arranjo fotovoltaico da Tabela 2, onde também estão presentes as características de amostragem do P&O, e a frequência de chaveamento do *Gate Driver* do conversor *Boost*.

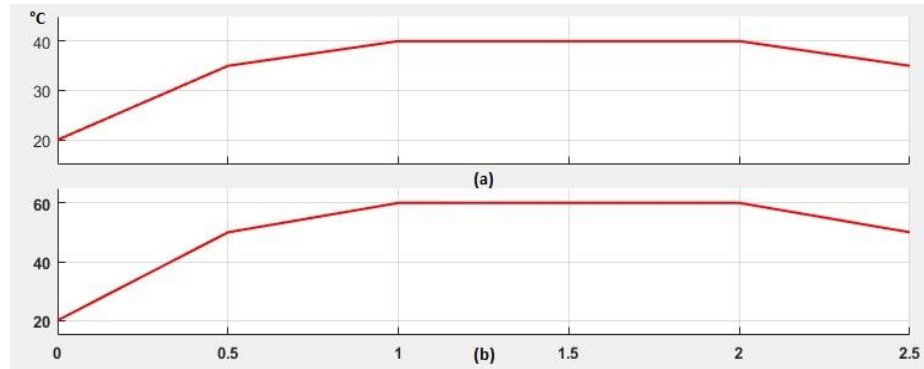
O sistema com arrefecimento e o sistema convencional foram simulados com o objetivo de comparação. O sistema proposto pelo presente estudo não pôde ser construído na simulação, apenas foi considerado que o sistema opera com irradiação solar constante e temperaturas supostas conforme as curvas da Figura 9.

TABELA 2 - Condições de simulação

Parâmetro	Valor
Módulos em série	4
Módulos em paralelo	4
Potência máxima do módulo	315 W
Potência do sistema	5040 W
Tensão MPP do conjunto	218,8 V
Corrente MPP do conjunto	23,4 A
Frequência de chaveamento	5 kHz
Período de amostragem	1 $\mu$ s
Tensão de saída	400 V
Irradiação Solar	1000 W/m <sup>2</sup>

Fonte: Construção própria.

Figura 10 - Curvas de temperatura utilizadas na simulação.

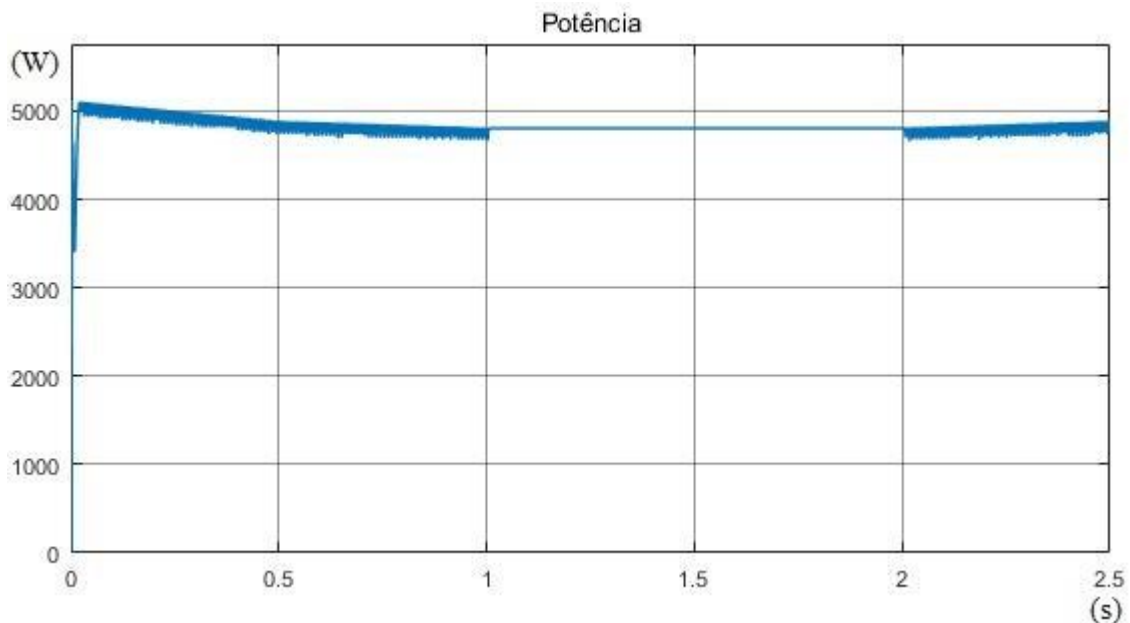


(a) sistema com arrefecimento; (b) sistema convencional.

Fonte: Construção própria.

A Figura 10 ilustra duas curvas de temperaturas fictícias para verificar se o aumento de temperatura diminui a potência fornecida pelos módulos fotovoltaicos. O sistema foi simulado por 2,5 segundos, para obter-se as curvas da potência fornecida pelos módulos fotovoltaicos. Para as curvas de temperatura ilustradas nas Figuras 10 (a) e (b) obteve-se as respostas da Figura 11 e da Figura 12 respectivamente.

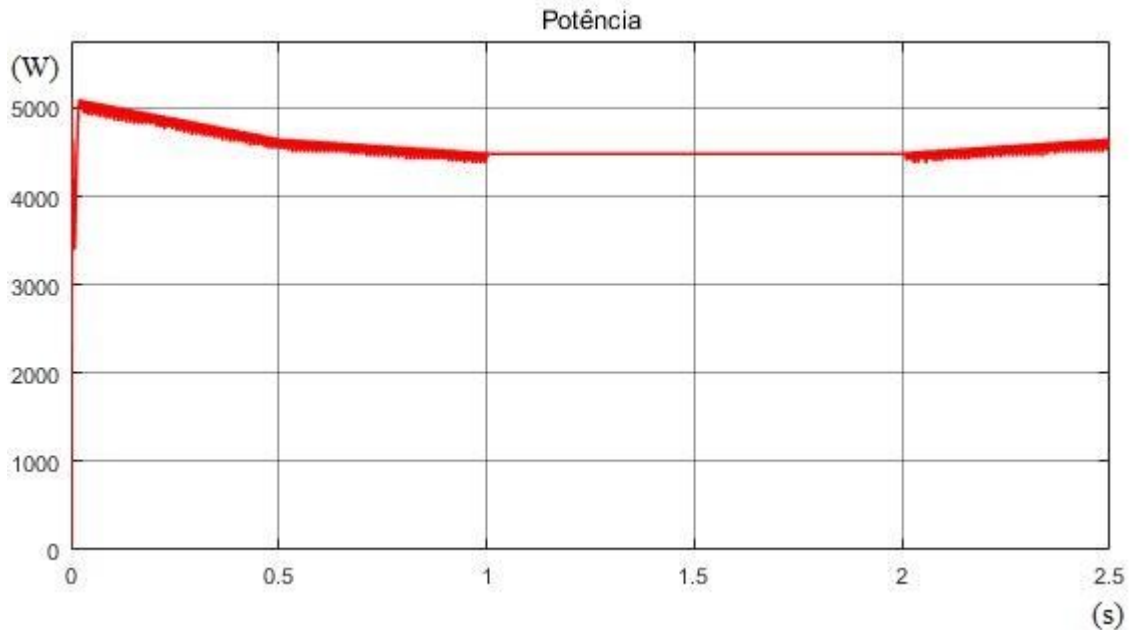
Figura 11 - Curva de Potência com arrefecimento.





Fonte: Construção própria.

Figura 12 - Curva de Potência sem arrefecimento.



Fonte: Construção própria.

A potência média do sistema foi de 4817 W para a curva da Figura 11, e 4560 W para a curva da Figura 12, um ganho de 5,6 % de energia elétrica no sistema com arrefecimento.

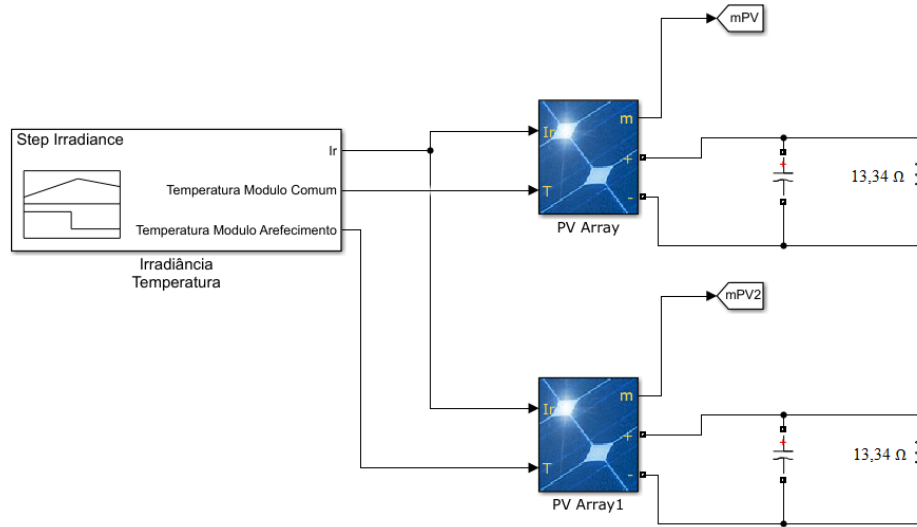
## 4.2 Resultado experimentais

Para realização do experimento, dois módulos fotovoltaicos foram posicionados dentro da UNIPAMPA, campus Alegrete, voltados para o norte geográfico, com uma inclinação de trinta graus em relação ao plano horizontal. O experimento foi realizado no dia 16 de novembro de 2018, um dia ensolarado e sem nuvens, com temperaturas que variaram entre 25°C e 30°C (dados do Instituto Nacional de Meteorologia).

Os instrumentos de medição utilizados para coletar os dados foram:

- Um wattímetro YOKOGAWA WT1600;
- Um *datalogger* com termopares;
- Computador com software para registrar as medições.

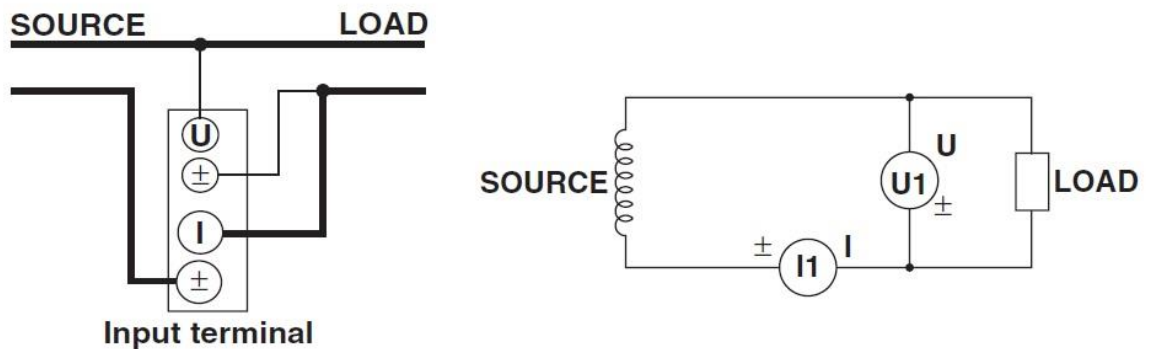
Figura 13 - Topologia utilizada nos experimentos.



Fonte: Construção própria.

Nos experimentos foi utilizada a topologia da Figura 13. Para a realização das medições das grandezas elétricas foi utilizado o esquema da Figura 14, onde o canal 1 do wattímetro foi utilizado para a medição da saída de potência do módulo convencional, e o canal 2 foi utilizado para a saída de potência do modulo com sistema de arrefecimento.

Figura 14 - Topologia da conexão do Wattímetro



Fonte: Manual do Wattímetro YOKOGAWA WT1600.

Figura 15 - Módulos fotovoltaicos utilizados nos ensaios.



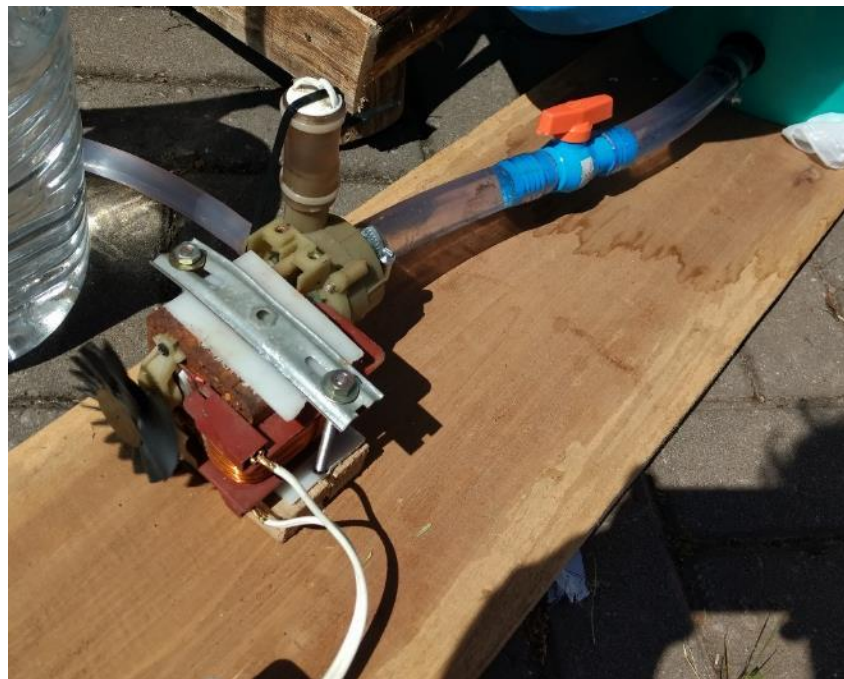
Fonte: Construção própria.

Figura 16 - Serpentina de cobre instalada no módulo fotovoltaico com arrefecimento.



Fonte: Construção própria.

Figura 17 - Bomba utilizada nos ensaios.



Fonte: Construção própria.

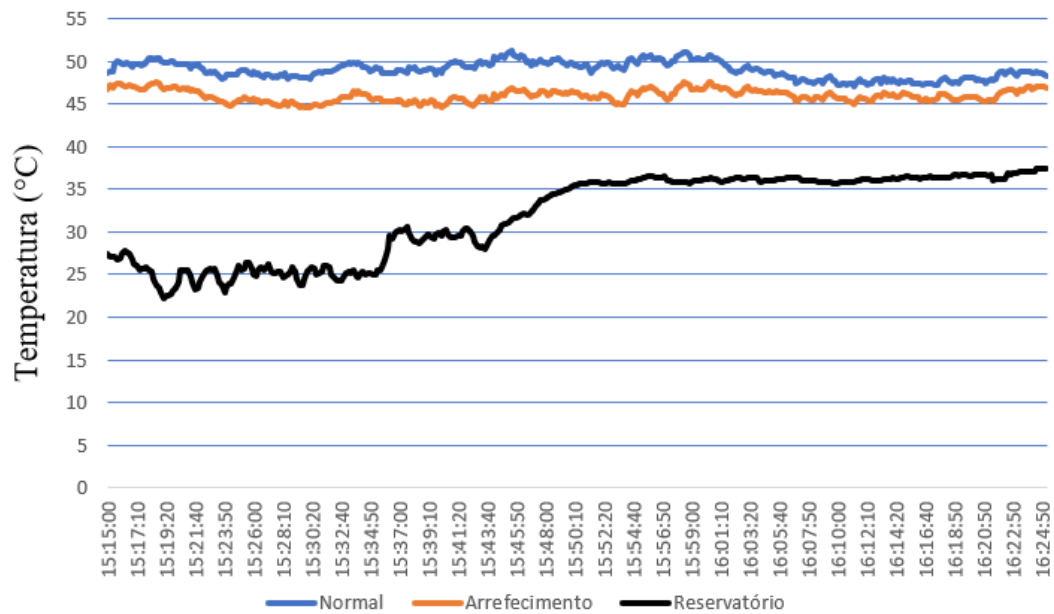
A Figura 15 mostra os dois módulos utilizados nos ensaios experimentais posicionados lado a lado. Mais ao fundo dessa figura está o módulo com o sistema de arrefecimento. A Figura 16 mostra, em detalhe, a serpentina de cobre utilizada no arrefecimento do módulo, sob ela a camada de pasta térmica utilizada para melhorar a condutividade térmica, bem como sua estrutura de fixação e os termopares utilizados nas medições de temperatura.

Para forçar a circulação de água pela serpentina de cobre foi utilizada uma bomba de máquina de lavar louça (Figura 17), acoplada a um motor com potência nominal de 440 W e rendimento de 87%. O motor é monofásico 220 V<sub>rms</sub>, sendo acionado através de um disjuntor por partida direta.

Após os módulos serem posicionados e o equipamento montado, foram realizados alguns testes para verificar o funcionamento do equipamento, tendo sido identificado que a água do reservatório da bomba aquecia em alguns minutos, de forma que a temperatura do módulo com arrefecimento ficou muito próxima àquela do módulo convencional. Sabendo disso, foi necessário trocar toda a água do reservatório antes de começar as medições. Para garantir que a água do reservatório da bomba permanecesse em uma temperatura menor, por um período de tempo maior, foi adicionado ao reservatório um bloco de gelo com volume de 2 litros.

As medições de temperatura foram feitas por termopares que foram posicionados nos módulos e no reservatório da bomba. Para uma medição mais precisa da temperatura, os termopares foram posicionados com uma camada de pasta térmica, e fixados por fita adesiva. O *datalogger* realizava amostragem de temperatura em cada termopar com um intervalo de 10 segundos e os valores foram armazenados em um computador.

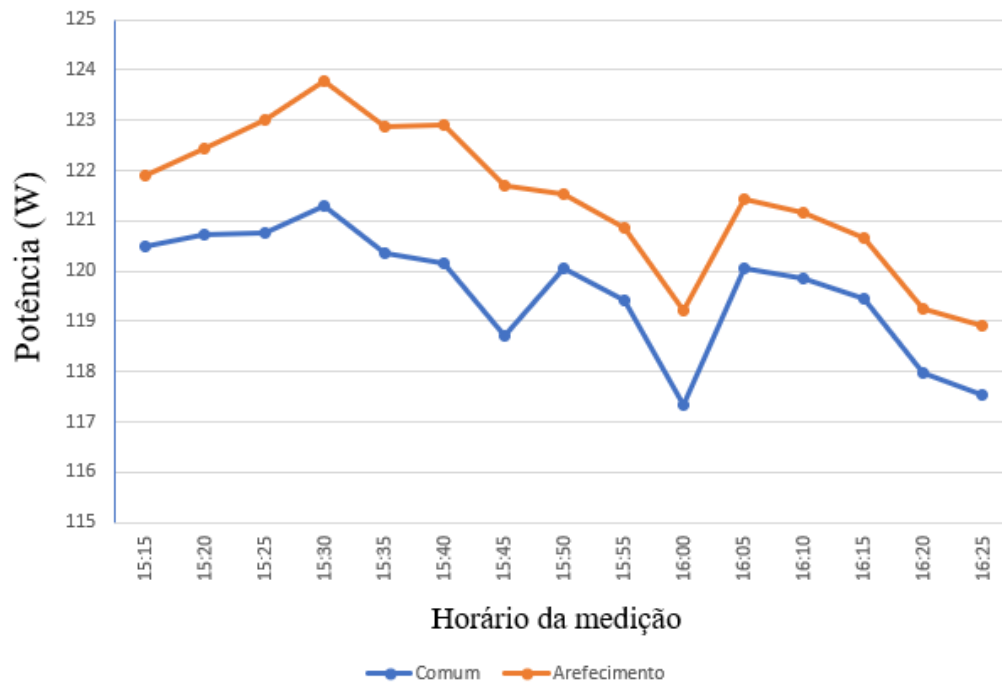
Figura 18 - Curvas de temperatura.



Fonte: Construção própria.

No dia da medição ocorreram problemas de comunicação/compatibilidade do software com o wattímetro YOKOGAWA WT1600, o qual era identificado como sendo do modelo WT3000, assim os valores não eram reconhecidos pelo software, impossibilitando o registro automático dos dados de medição. Dessa forma, os valores de tensão, corrente e potência foram anotados manualmente, com intervalos de 5 minutos. A partir destes dados foi gerado o gráfico da Figura 19. Como carga, foi utilizada uma resistência de chuveiro com  $13,34 \Omega$  para cada um dos módulos. As cargas foram posicionadas em um outro reservatório com água para que dissipassem sua potência sem ocorrer superaquecimento.

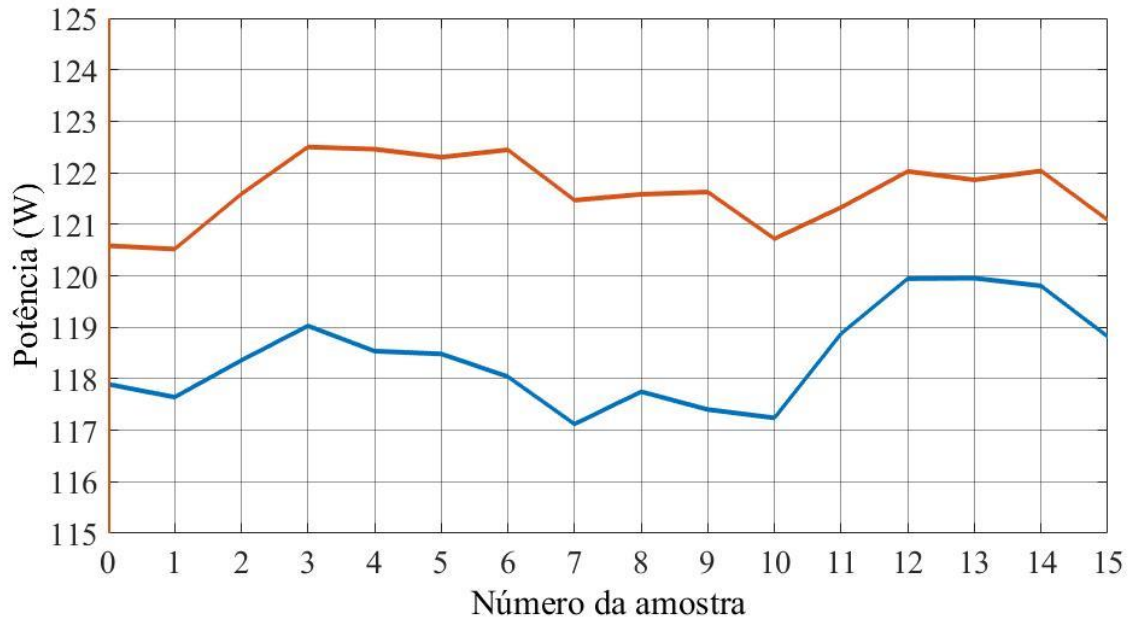
Figura 19 - Resultados Experimentais



Fonte: Construção própria.

Para verificar se os resultados experimentais são compatíveis com as simulações foi montado um circuito no *Simulink* com as mesmas características para a comparação, conforme a topologia da Figura 13. Para essa simulação foram utilizados os dados de temperatura medidos no experimento prático, da Figura 17, os quais foram utilizados para gerar a curva de temperatura na entrada do módulo da simulação. Para a entrada de irradiação foi utilizado  $1000 \text{ W/m}^2$  e na saída foi utilizada uma carga resistiva com os mesmos  $13,34 \Omega$  da resistência de chuveiro utilizada no experimento prático. Com os valores de saída de potência foi construído o gráfico da Figura 20, onde a curva em laranja mostra o resultado da curva de temperatura do módulo com sistema de arrefecimento, e a curva em azul mostra o resultado para a curva de temperatura do módulo convencional.

Figura 20 - Simulação com curvas de temperatura experimentais.



Fonte: Construção própria.

Como pode ser observado, as curvas respondem à variação de temperatura de forma muito similar, de modo que mostra uma equivalência entre os resultados, onde as variações se devem às condições experimentais que são imprevisíveis e de difícil reprodução em simulação. Comparando os resultados de potência, do módulo com arrefecimento ao módulo comum, observa-se um ganho de aproximadamente 2% em média, o que está de acordo com os resultados iniciais de simulação, já que a diferença de temperatura alcançada na prática foi menor.

Como o reservatório continha 18 litros de água a 27 °C, e por 2 litros de gelo a aproximadamente 0 °C, é necessário primeiro calcular o calor necessário para a fusão do gelo com a Equação 7, em seguida calcular a energia necessária para elevar a água resultante até os 27 °C com a Equação 8 e, por fim, a energia para levar toda a água até os 38 °C, também com a Equação 8, que foi a temperatura final da água no reservatório. Sabendo que o calor latente de fusão do gelo  $L$  é 80 cal/g, o calor específico da água é 1 cal/g°C, e que 1 litro de água pesa aproximadamente 1 kg, pode-se calcular que o sistema recebeu aproximadamente 434 kcal, já que não foram consideradas as trocas térmicas com o ambiente. Tendo em vista que o sistema recebeu essa energia em 1 hora e 10 min, o sistema permitiria a economia de 432,34 Wh de energia elétrica que seria utilizada para o aquecimento de água.



### 4.3 Resultados de Simulação

De acordo com os resultados experimentais, a temperatura de um módulo fotovoltaico é aproximadamente 70% maior que a temperatura ambiente, quando exposto a uma irradiância solar de 1000W/m<sup>2</sup>. Esta diferença de temperatura se mostrou linearmente menor para irradiações menores, então a temperatura de um módulo fotovoltaico é aproximadamente definida pela Equação 9.

$$T_M = T_A + 0,7T_A \left( \frac{I_r}{1000} \right) \quad (9)$$

Onde:

$T_M$  é a temperatura do módulo fotovoltaico;

$T_A$  é a temperatura ambiente;

$I_r$  é a irradiação solar sobre o módulo.

Dessa forma, é possível aproximar, através de simulação, a curva de temperatura de um módulo fotovoltaico e a potência de saída em um sistema com conversor Boost e MPPT, além de simular um sistema com arrefecimento para um reservatório grande, onde a água não aquece.

Para essa simulação, foram utilizados dados do INMET de radiação solar e temperatura, no município de Alegrete-RS entre os dias 15 e 21 de novembro de 2018. As temperaturas dos módulos foram obtidas através da Equação 9, onde foi utilizado 70% de temperatura acima da temperatura ambiente para os módulos convencionais, e 50% e 25% como duas condições para os módulos com arrefecimento. As demais condições de simulação estão na Tabela 3.

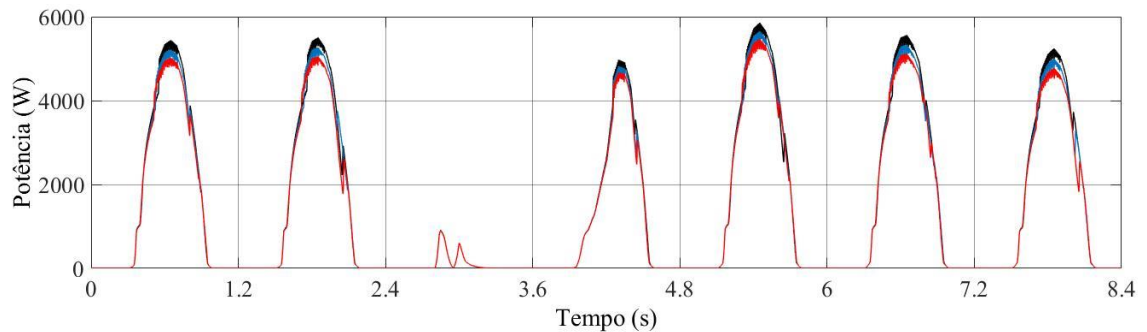
Para diminuir o tempo de simulação, os dados de entrada que são amostrados pelo INMET a cada hora foram simulados como sendo a cada 0,05 segundos. Os resultados para as três entradas de temperatura estão no gráfico da Figura 21, onde as curvas em preto, azul e vermelho são as entradas para 25%, 50% e 70% acima da temperatura ambiente, respectivamente.

TABELA 3 - Dados de simulação

Parâmetro	Valor
Módulos em série	4
Módulos em paralelo	4
Potência máxima do módulo	330 W
Potência do sistema	5280 W
Tensão MPP do conjunto	150 V
Corrente MPP do conjunto	35,2 A
Frequência de chaveamento	5 kHz
Período de amostragem	1 $\mu$ s
Tensão de saída	400 V

Fonte: Construção própria.

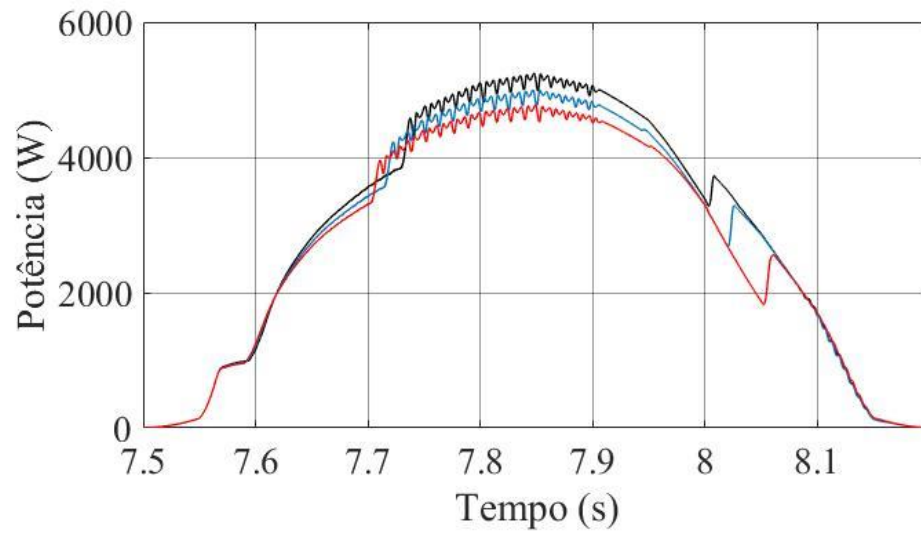
Figura 21 - Curvas de potência de uma semana simulada.



Fonte: Construção própria.

As curvas em preto, azul e vermelho obtiveram potências de saída de 1458W, 1423W e 1379W, respectivamente, o que mostra um ganho de 3,19% na média semanal de geração da curva em azul em relação à curva em vermelho, e 5,72% da curva em preto em relação à curva em vermelho. Na Figura 22 pode-se observar uma ampliação do último dia de simulação, onde a diferença entre as curvas fica mais evidente.

Figura 22 - Ampliação do último dia de simulação.



Fonte: Construção própria.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados alcançados fica evidente a diminuição da potência com o aumento da temperatura do sistema fotovoltaico e que um sistema com arrefecimento pode proporcionar um ganho considerável na potência média.

Observou-se que os resultados experimentais do sistema proposto foram satisfatórios, tendo em vista que se obteve um ganho de potência elétrica e 434 kcal de energia térmica. Os resultados experimentais de temperatura também foram de suma importância para verificar a relação da temperatura de um módulo fotovoltaico com a irradiação solar e a temperatura ambiente.

Com a comparação das Figuras 14 e 15 pode-se dizer que os resultados foram equivalentes, pois as curvas têm valores e formatos semelhantes, o que mostra que os resultados do experimento prático e da simulação estão dentro de uma margem de erro que é definida por condições do ambiente de ensaio.

Analisando a energia térmica que o sistema transferiu para a água do reservatório, pode-se constatar que o sistema não é viável de forma autônoma, pois a energia gasta pela bomba é maior que o somatório de energia térmica transferida para a água e o ganho de potência na saída do módulo. É importante ressaltar que esse sistema pode ser viável para algumas aplicações específicas, como para o aquecimento da água de uma piscina, onde a bomba da mesma poderia ser utilizada para fazer a água circular, e a energia utilizada para acionamento dessa bomba seria gasta com ou sem o sistema de arrefecimento do módulo.

Com base nos resultados da simulação com os dados do INMET para uma semana, o sistema de arrefecimento se mostra mais eficiente em dias com maior índice de irradiação solar e temperatura, pois no dia 17 de novembro choveu, de forma que é impossível diferenciar as curvas de temperatura.

Também a partir dessa simulação e do ensaio experimental, o sistema de arrefecimento mostra que sua eficiência depende da disponibilidade de água à baixas temperaturas em seu reservatório, pois a diferença de potência na saída do sistema fotovoltaico com arrefecimento, em relação ao sistema comum, depende da diferença de temperatura da água do reservatório e do módulo fotovoltaico.

## REFERÊNCIAS

ANEEL, Micro e Minigeração Distribuída: **Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. 2 ed. Brasília, 2016.

ASSOCIATION, E. P. I. et al. **Global market outlook for photovoltaics 2014-2018**. EPIA Report, 2014.

BORGES, M. R. N.; Carvalho, P. C. M., **Geração de energia elétrica: fundamentos**, vol. único, 1 ed., Érica: São Paulo, 2012, 160p.

CARDOSO, E. A.; Trigo, F. B. M.; Benedito, R. S.; Puma, J. L. A., “**Proposta de algoritmo de otimização para obtenção do ponto de máxima potência de um sistema fotovoltaico baseado em redes neurais artificiais**”, Universidade Federal do ABC, VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, abril, 2018.

CUNHA, R.B.A., **Proposta de sistema fotovoltaico monofásico conectado à rede elétrica, dissertação de mestrado**, UFBA, Salvador, 2016.

ESRAM, T.; Chapman, P.L. **Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques**. In: IEEE Transactions on Energy Conversion, v.22, n.2, p.439-449, 2007.

INCROPERA, F. P. et al, “**Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**,” vol. único, 6 ed., Rio de Janeiro: LTC, 2008, 663p.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia, **Estações e Dados**, Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso em: 22 nov. 2018.

LISITA J., O., **Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede: estudo de caso de 3 kWp instalados no estacionamento do IEE-USP**, orientador Roberto Zilles; Dissertação (Mestrado em Energia) – USP, São Paulo, 87p. 2005.

MARTINS, D.C.; Barbi, I., **Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**, 2ª ed., Florianópolis, 2006, 337p.

MOÇAMBIQUE, N. E. M., **Aplicação de Algoritmo de Busca de Ponto do Ponto de Máxima Potência e Controladores Lineares e/ou Fuzzy para a regulação da tensão terminal de painéis fotovoltaicos**, orientador prof. Dr. Ricardo Quadros Machado; Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – USP, São Carlos, 134p. 2012.

PINHO, J. T.; Galdino, M. A., **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**, edição revisada e atualizada, CEPEL-CRESESB: Rio de Janeiro, 2014, 530p.

VILLALVA, M. G.; Gazoli, J. R., **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**, vol. único, 2 ed., Érica/Saraiva: São Paulo, 2015.

ZANLORENZI, G.; Szejka, A. L.; Souza, T. M.; **Proposta conceitual de um módulo fotovoltaico híbrido com resfriamento por serpentina de água**, 6º International Workshop Advances in Cleaner Production.; São Paulo, 2017.