

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**Jalmir Machado da Silva**

**APROVEITAMENTO DE ENERGIA RESIDUAL DO  
PROCESSO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA, UTILIZANDO  
TERMOELETRICIDADE**

**Taubaté – SP  
2010**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**Jalmir Machado da Silva**

**APROVEITAMENTO DE ENERGIA RESIDUAL DO  
PROCESSO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA, UTILIZANDO  
TERMOELETRICIDADE**

Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre pelo curso Engenharia Mecânica do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de concentração: Automação industrial  
Orientador: Prof. Dr. José Rui Camargo

**Taubaté – SP**

**2010**

S586a Silva, Jalmir Machado da  
Aproveitamento de energia residual do processo de geração fotovoltaica, utilizando termoeletricidade / Jalmir Machado da Silva. - 2010.  
102f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica, 2010.  
Orientação: Prof. Dr. José Rui Camargo, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Efeito fotovoltaico. 2. Efeito Seebeck. 3. Temperatura.  
4. Termoeletricidade. I. Título.

Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre pelo curso Engenharia Mecânica do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.  
Área de concentração: Automação industrial  
Orientador: Prof. Dr. José Rui Camargo

Data: 05 de março de 2010

Resultado: \_\_\_\_\_

### **BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. José Rui Camargo

Universidade de Taubaté

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. João Bosco Gonçalves

Universidade de Taubaté

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Edilson Alexandre Camargo

ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Assinatura \_\_\_\_\_

**Dedico este trabalho**

**Aos meus nobres pais Joaquim e Glória, a minha grande namorada e companheira Camila e, sobretudo a Deus sem eles não haveria força suficiente para superar este desafio.**

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho estaria incompleto sem a menção às pessoas, cujo apoio e incentivo influenciaram-me de vários modos durante a sua elaboração.

Ao Professor Dr. José Rui Camargo pela orientação, determinação e apoio fornecido durante a elaboração deste trabalho.

A toda equipe de assistentes e estagiários pelo apoio constante.

À minha namorada e companheira Camila, pela valiosa força, apoio e sabedoria durante todo este trabalho.

À minha família, motivação e também aos momentos em que fiquei ausente.

Aos amigos de mestrado pela ajuda e companheirismo.

Aos amigos de trabalho pela força e compreensão.

Aos demais professores do mestrado que desde o primeiro momento não mediram esforços para busca do resultado.

A mente que se abre a uma nova  
idéia jamais voltará ao seu tamanho  
original.

Albert Einstein

## RESUMO

Este trabalho aborda a geração de energia elétrica através dos efeitos fotovoltaico e termoelétrico. O efeito fotovoltaico consiste na conversão direta de energia luminosa em energia elétrica e foi descoberto em 1839 por Edmond Becquerel. O efeito termoelétrico para geração de energia elétrica que acontece através do efeito Seebeck consiste na conversão direta da energia térmica em energia elétrica e foi descoberto em 1821 por Thomas Johann Seebeck. Um dos problemas encontrados em um sistema de geração de energia fotovoltaica através da energia solar é o aquecimento das células que gera perdas e conseqüentemente reduz a potência elétrica de saída. Estuda-se neste trabalho a influência da temperatura nos processos de geração envolvidos e o desejado aproveitamento da energia térmica residual do processo de geração fotovoltaica, utilizando termoeletricidade. Desta forma, na avaliação teórica, são apresentados os modelos matemáticos dos sistemas fotovoltaico e termoelétrico levantando as curvas de tensão, corrente e potência elétrica gerada, e a partir daí a influência da variação da temperatura é observada em cada modelo. Para obtenção das curvas é feita simulação utilizando o MATLAB<sup>®</sup> 5.3, levando em consideração os parâmetros de módulos termoelétricos e células fotovoltaicas reais. Na avaliação prática, um protótipo é montado contendo módulo termoelétrico acoplado na parte inferior de um painel solar fotovoltaico, de forma a aproveitar a energia térmica absorvida pelo painel. Para as medições de variáveis no sistema protótipo, utilizam-se amperímetros, volímetros e medidores de temperatura no intuito de obter amostras dos dados de: temperatura ambiente, temperatura do painel fotovoltaico, temperaturas dos lados quente e frio do módulo termoelétrico, corrente e tensão de saída dos dois sistemas com e sem carga. Os dados obtidos são armazenados e analisados, sendo possível a observação da influência da temperatura nos dois sistemas, validando a modelagem matemática. Após análise, problemas foram apontados no protótipo e possíveis soluções para correção e melhoria foram propostas e implementadas. Conclui-se a aplicabilidade do modelo matemático face aos resultados obtidos com o sistema protótipo. Sugere-se a continuidade da pesquisa para ampliar e melhorar o desenvolvimento e aproveitamento da idéia central.

Palavras chaves: Efeito fotovoltaico. Efeito Seebeck. Temperatura. Termoeletricidade.

## **ABSTRACT**

### **Utilization of waste energy in the process of photovoltaic generation, using thermoelectricity**

This paper addresses the generation of electricity through the photovoltaic and thermoelectric effects. The photovoltaic effect is the direct conversion of light energy into electrical energy and was discovered in 1839 by Edmond Becquerel. The thermoelectric effect to generate electricity that happens through the Seebeck effect is the direct conversion of thermal energy into electrical energy and was discovered in 1821 by Thomas Johann Seebeck. One of the problems encountered in a system of photovoltaic power generation by solar energy is the heating of the cells that generate losses and therefore reduces the electrical power output. In this paper is studied the influence of temperature on the generation processes involved and the desired use of the residual heat in the process of photovoltaic generation using thermoelectricity. Thus, in the theoretical evaluation, we present the mathematical models of photovoltaic systems and thermoelectric rising curves of voltage, current and electrical power generated, and from there the influence of temperature variation is observed in each model. To obtain the simulation curves is done using MATLAB<sup>®</sup> 5.3, taking into account the parameters of thermoelectric modules and photovoltaic cells real. In the practical evaluation, a prototype is assembled containing thermoelectric module attached to the bottom of a photovoltaic solar panel, in order to take advantage of the heat absorbed by the panel. For measurements of the prototype system are used ammeters, voltmeters and temperature gauges in order to obtain samples of data: ambient temperature, temperature of the photovoltaic panel, temperatures of hot and cold sides of thermoelectric module, current and output voltage of two systems with and without load. The data are stored and analyzed, it is possible to observe the influence of temperature in both systems, validating the mathematical model. After analysis, problems were highlighted in the prototype and possible solutions for correction and improvement have been proposed and implemented. It is the applicability of the mathematical model to the results obtained with the prototype system. It is suggested continuity of the research to extend and to improve the development and use of the central idea.

Key words: Photovoltaic effect. Seebeck effect. Temperature. Thermoelectricity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Camada pn	25
Figura 2.2 – Corrente gerada a partir do efeito fotovoltaico	25
Figura 2.3 - Espectro da radiação solar	26
Figura 2.4 – Curva característica I -V de um módulo fotovoltaico	29
Figura 2.5 - Redução da corrente com a redução da radiação	30
Figura 2.6 - Redução da tensão com o aumento da temperatura	30
Figura 2.7 – Modelo equivalente de uma célula fotovoltaica	31
Figura 2.8 – Curto circuito na saída da célula fotovoltaica	32
Figura 2.9 - Célula fotovoltaica – circuito aberto	33
Figura 2.10 – Curvas características I-V e P-V para determinação da $R_{Lmax}$	39
Figura 3.1- Refrigerador termoelétrico (Efeito Peltier)	42
Figura 3.2 - Junções de medição e referência em um termopar	43
Figura 3.3 - Gerador termoelétrico (Efeito Seebeck)	44
Figura 3.4 - Modelo didático de um sistema termoelétrico	44
Figura 3.5 - Arranjo de módulos termoelétricos	46
Figura 3.6 - Módulos termoelétricos e dissipadores de calor	47
Figura 3.7 - Modelo simplificado módulo termoelétrico sem carga	48
Figura 3.8 – Modelo de um módulo termoelétrico com carga	49
Figura 4.1 – Exemplo de simulação no MATLAB® 5.3	53
Figura 4.2 - Diagrama esquemático do protótipo	56
Figura 4.3 – Instrumentos de medição e banco de resistências	58
Figura 4.4 – Painéis fotovoltaicos expostos à radiação solar	58
Figura 4.5 – Dissipador de calor e módulo termoelétrico ligados ao painel fotovoltaico	59
Figura 4.6 – Conjunto dissipador, módulos termoelétricos e painel fotovoltaico com instalação de isolante térmico	59
Figura 5.1 – Curvas ( $I_{Lf}$ X $V_{Lf}$ e $P_{Lf}$ X $V_{Lf}$ ) para a temperatura de 25°C	60
Figura 5.2 – Curvas ( $I_{Lf}$ X $V_{Lf}$ e $P_{Lf}$ X $V_{Lf}$ ) para a temperatura de 50°C	61
Figura 5.3 – Curvas ( $I_{Lf}$ X $V_{Lf}$ e $P_{Lf}$ X $V_{Lf}$ ) para a temperatura de 75°C	62
Figura 5.4 – Curvas ( $I_{Lf}$ X $V_{Lf}$ e $P_{Lf}$ X $V_{Lf}$ ) para as temperaturas de 25°C, 50°C e 75°C	62
Figura 5.5 – Curvas ( $V_{Lc}$ , $P_{Lc}$ , $I_{Lc}$ X $R_{Lc}$ ) para uma variação de resistência de carga de 0 $\Omega$ a 35 $\Omega$	63

Figura 5.6 – Curvas ( $V_{Lt}$ , $P_{Lt}$ , $I_{Lt}$ X $\Delta t_i$ ) para um $\Delta t$ de 0°C a 50°C	64
Figura 5.7 – Curvas ( $V_{Lt}$ , $P_{Lt}$ , $I_{Lt}$ X $\Delta t_i$ ) para um $\Delta t$ de 50°C a 0°	65
Figura 5.8 – Medição 1 – Tensão X resistência de carga módulo fotovoltaico	66
Figura 5.9 – Medição 1, corrente X resistência de carga para o módulo fotovoltaico	67
Figura 5.10 – Medição 1, potência X resistência de carga para o módulo fotovoltaico	68
Figura 5.11 – Medição 1, corrente X tensão de saída para o módulo fotovoltaico	68
Figura 5.12 – Medição 1, potência X tensão na carga para o módulo fotovoltaico	69
Figura 5.13 – Medição 1, temperatura ambiente X tempo de ensaio	70
Figura 5.14 – Medição 1, $\Delta t_i$ do módulo termoeétrico X tempo de ensaio	71
Figura 5.15 – Medição 1, Temperatura do lado quente e lado frio X tempo de ensaio	72
Figura 5.16 – Análise do problema da propagação de calor	72
Figura 5.17 – Medição 1, tensão na carga módulo termoeétrico X tempo de ensaio	73
Figura 5.18 – Medição 1, corrente na carga do módulo termoeétrico X tempo de ensaio	73
Figura 5.19 – Medição 1, potência na carga do módulo termoeétrico X tempo de ensaio	74
Figura 5.20 – Medição 2, potência X resistência de carga no sistema fotovoltaico	76
Figura 5.21 – Medição 2, potência X tensão na carga no sistema fotovoltaico	76
Figura 5.22 – Medição 2, Corrente X tensão na carga no sistema fotovoltaico	77
Figura 5.23 – Medição 2, $\Delta t_i$ do módulo termoeétrico X tempo de ensaio	79
Figura 5.24 – Medição 2, temperatura do lado quente e lado frio do módulo termoeétrico X tempo de ensaio	79
Figura 5.25– Medição 2, potência na carga do módulo termoeétrico X tempo de ensaio	80
Figura 5.26– Medição 2, tensão, corrente e potência X resistência de carga do módulo termoeétrico	81
Figura 5.27– Simulação e ensaio do sistema fotovoltaico	82
Figura 5.28 – Comparação entre as medições 1 e 2 do módulo fotovoltaico	83
Figura 5.29 – Simulação e ensaio do sistema termoeétrico	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Descrição dos códigos em anexo	54
Tabela 4.2 - Características dos instrumentos de medição	57
Tabela 5.1 - Medição 1, dados do ensaio do sistema fotovoltaico	66
Tabela 5.2 - Medição 1, dados do ensaio do sistema termoelétrico	70
Tabela 5.3 - Medição 2, dados do ensaio do sistema fotovoltaico	75
Tabela 5.4 - Medição 2, dados do ensaio do sistema termoelétrico	78
Tabela 5.5 - Medição 2, ensaio com variação da resistência de carga do sistema termoelétrico	80

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A – CÓDIGO NO MATLAB® 5.3 PARA UM MÓDULO FOTOVOLTAICO A UMA TEMPERATURA DE 25 °C.	90
ANEXO B – CÓDIGO NO MATLAB® 5.3 PARA UM MÓDULO FOTOVOLTAICO A UMA TEMPERATURA DE 50 °C.	91
ANEXO C – CÓDIGO NO MATLAB® 5.3 PARA UM MÓDULO FOTOVOLTAICO A UMA TEMPERATURA DE 75 °C.	92
ANEXO D – CÓDIGO NO MATLAB® 5.3 PARA IM MÓDULO FOTOVOLTAICO CONSIDERANDO AS TEMPERATURAS DE 25 °C, 50 °C E 75 °C.	93
ANEXO E – CÓDIGO NO MATLAB® 5.3 DE UM MÓDULO TERMOELÉTRICO, PARA UMA VARIAÇÃO DE CARGA DE 0 A 35 Ω.	95
ANEXO F – CÓDIGO NO MATLAB® 5.3 DE UM MÓDULO TERMOELÉTRICO, PARA UMA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO LADO QUENTE DE 30 °C A 80 °C.	96
ANEXO G – CÓDIGO NO MATLAB® 5.3 DE UM MÓDULO TERMOELÉTRICO, PARA UMA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO LADO QUENTE DE 80 °C A 30°C.	97
ANEXO H – CÓDIGO NO MATLAB® 5.3 PARA ANÁLISE ENTRE O MODELO SIMULADO E OS DADOS MEDIDOS DURANTE ENSAIO, DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO.	98
ANEXO I – CÓDIGO NO MATLAB® 5.3 PARA ANÁLISE ENTRE O MODELO SIMULADO E OS DADOS MEDIDOS DURANTE ENSAIO, DE UM MÓDULO TERMOELÉTRICO.	100
ANEXO J – FOLHA DE ESPECIFICAÇÕES DO MÓDULO FOTOVOLTAICO. FABRICANTE CONERGY. MODELO Q10P.	101
ANEXO L – FOLHA DE ESPECIFICAÇÕES DO MÓDULO TERMOELÉTRICO. FABRICANTE MELCOR. MODELO HT4-12-40.	102

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_{caf}$ - Tensão elétrica com os terminais de saída em circuito aberto para o módulo fotovoltaico	[V]
$I_{ccf}$ - Corrente elétrica com os terminais de saída em curto circuito para o módulo fotovoltaico	[A]
$P_{Lmaxf}$ - Potência elétrica máxima na carga para o sistema fotovoltaico	[W]
$V_{Lmaxf}$ - Tensão elétrica máxima na carga para o sistema fotovoltaico	[V]
$I_{Lmaxf}$ - Corrente elétrica máxima na carga para o sistema fotovoltaico	[A]
$I_d$ - Corrente elétrica do diodo para o sistema fotovoltaico	[A]
$I_o$ - Corrente reversa máxima de saturação do diodo	[A]
$I_s$ - Corrente gerada pelo efeito fotovoltaico	[A]
$I_{or}$ - Corrente reversa máxima de saturação do diodo nas condições de referência	[A]
$V_{Lf}$ - Tensão dos terminais da célula	[V]
$m$ - Fator de idealidade de uma célula ou módulo fotovoltaico	[adimensional]
$V_t$ - Potencial térmico	[V]
$V_{tr}$ - Potencial térmico nas condições de referência	[V]
$B$ - Constante de Boltzmann	[J/K]
$T_f$ - Temperatura absoluta da célula	[K]
$T_r$ - Temperatura absoluta da célula nas condições de referência	[K]
$G_r$ - Radiação solar incidente nas condições de referência	[W/m <sup>2</sup> ]
$q_e$ - Carga do elétron	[C]
$I_{Lf}$ - Corrente elétrica na carga para o sistema fotovoltaico	[A]
$P_{Lf}$ - Potência elétrica na carga para o sistema fotovoltaico	[W]
$I_{or}$ - Corrente reversa máxima de saturação do diodo nas condições de referência	[A]
$m'$ - Fator de idealidade equivalente fotovoltaicos	[adimensional]
$n_{cs}$ - Número de células em série	[adimensional]
$R_{Lmaxf}$ - Valor da resistência elétrica que permite a maximização da potência de saída de um sistema fotovoltaico	[Ω]
$Q_j$ - Calor de Joule gerado por unidade de volume na unidade de tempo	[W/m <sup>3</sup> ]
$R_j$ - Resistência elétrica no efeito Joule	[Ω]
$I_j$ - Corrente elétrica no efeito Joule	[A]
$Y$ - Condutividade térmica	[W/°C.m]

$q_c$ - Taxa de bombeamento de calor	[W]
$Q_T$ - Calor de Thomson	[W]
$I_h$ - Corrente elétrica no efeito Thomson	[A]
$Q_p$ - Taxa de calor de Peltier por unidade de área da junção	[W]
$T_p$ - Temperatura no efeito Peltier	[°C]
$I_p$ - Corrente elétrica no efeito Peltier	[A]
$V_t$ - Tensão de circuito aberto no efeito Seebeck	[°C]
$t_{2t}$ - Temperatura no lado quente do módulo termoeletrico	[°C]
$t_{1t}$ - Temperatura no lado frio do módulo termoeletrico	[°C]
$I_{L_t}$ - Corrente na carga para o sistema termoeletrico	[A]
$R_{it}$ - Resistência interna para um módulo termoeletrico	[Ω]
$R_{L_t}$ - Resistência de carga para um sistema termoeletrico	[Ω]
$V_{L_t}$ - Tensão na carga para um sistema termoeletrico	[V]
$P_{L_t}$ - Potência na carga para um sistema termoeletrico	[W]
$P_{max_t}$ - Potência máxima na carga para um sistema termoeletrico	[W]
$R_{maxpot}$ - Valor da resistência que permite a maximização da potência de carga no sistema termoeletrico.	[Ω]
$I_{max_t}$ - Corrente máxima na carga para um sistema termoeletrico	[A]
$V_{max_t}$ - Tensão máxima na carga para um sistema termoeletrico	[V]

## SIMBOLOGIA GREGA

$\varepsilon$ - Hiato do silício	[eV]
$\Delta T_j$ - Diferença de temperatura no efeito Joule	[°C]
$\Delta T_h$ – Diferença de temperatura no efeito Thomson	[°C]
$\tau$ - Coeficiente de Thomson	[V/°C]
$\pi$ - Coeficiente de Peltier da ligação térmica	[V]
$\alpha$ - Coeficiente de Seebeck	[V/°C, V/K]
$\Delta t_i$ - Diferença de temperatura entre o lado quente e o lado frio do módulo termoelétrico	[°C]
$\alpha_1$ - Coeficiente de Seebeck do material 1	[V/°C, V/K]
$\alpha_2$ - Coeficiente de Seebeck do material 2	[V/°C, V/K]

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Considerações Iniciais	17
1.2. Objetivos	18
1.3. Desenvolvimento	19
1.4. Revisão Bibliográfica	19
2. SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICO	23
2.1. Efeito fotovoltaico	23
2.2. Tipos de células	27
2.2.1. Silício monocristalino	27
2.2.2. Silício policristalino	27
2.2.3. Filmes finos	28
2.3. Módulos fotovoltaicos	28
2.3.1. Características elétricas dos módulos fotovoltaicos	28
2.3.2. Fatores que alteram as características elétricas dos módulos	30
2.4. Modelo matemático de um módulo fotovoltaico	31
3. SISTEMA DE GERAÇÃO TERMOELÉTRICO	40
3.1. Efeito termoelétrico	40
3.1.1. Efeito Joule	40
3.1.2. Efeito Thomson	41
3.1.3. Efeito Peltier	41
3.1.4. Efeito Seebeck	42
3.2. Módulo termoelétrico	45
3.3. Modelo matemático de um módulo termoelétrico	48

4. METODOLOGIA	53
4.1. Simulações	53
4.1.1. Sistema fotovoltaico	54
4.1.2. Sistema termoelétrico	55
4.2. Sistema experimental	55
4.3. Comparação entre as simulações e os ensaios	59
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
5.1. Simulações	60
5.1.1. Sistema fotovoltaico	60
5.1.2. Sistema termoelétrico	63
5.2. Ensaios	65
5.2.1. Primeiro ensaio experimental (medição 1)	65
5.2.1.1. Sistema fotovoltaico – medição 1	65
5.2.1.2. Sistema termoelétrico – medição 1	69
5.2.2. Segundo ensaio experimental (medição 2)	74
5.2.2.1. Sistema fotovoltaico – medição 2	74
5.2.2.2. Sistema termoelétrico – medição 2	77
5.2.3. Comparação entre as simulações e os ensaios	81
5.2.3.1. Sistema fotovoltaico	81
5.2.3.2. Sistema termoelétrico	83
6. CONCLUSÃO	85
REFERÊNCIAS	87

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com a crescente preocupação com o meio ambiente, aumenta-se a busca por energias alternativas limpas e viáveis. Neste cenário alguns tipos de energias renováveis podem ganhar espaço, como é o caso da energia fotovoltaica e da energia termoelétrica.

O aproveitamento da energia solar, tanto como fonte de luz quanto de calor, é hoje uma das alternativas energéticas mais promissoras do milênio. Quando se fala em energia, deve-se lembrar que o Sol é o responsável ou está envolvido na origem de praticamente todas as outras fontes de energia. Os combustíveis fósseis foram gerados a partir de organismos que obtiveram a energia do Sol. A energia hidrelétrica depende diretamente do ciclo das águas que tem origem na evaporação através da energia solar. A energia eólica é possível, pois a radiação solar participa do processo de circulação atmosférica produzindo os ventos. O álcool combustível deriva-se da cana-de-açúcar que necessita da luz solar para se desenvolver.

A energia solar fotovoltaica e a energia termoelétrica são energias que podem ser derivadas a partir da energia solar, este é o objeto de estudo deste trabalho.

O planeta Terra recebe anualmente  $1,5 \times 10^{18}$  kWh de energia solar, o que corresponde a 10.000 vezes o consumo de energia neste período (CRESESB e CEPTEL, 1999). Este fato vem indicar que, além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a radiação solar constitui-se numa inesgotável fonte energética, havendo um enorme potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia como, por exemplo, a térmica e a elétrica.

A energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico). O efeito fotovoltaico, relatado por Edmond Becquerel, em 1839 consiste no surgimento de uma diferença de potencial, nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz (HECKTHEUER, 2001).

No passado e ainda nos dias de hoje o custo das células solares é um grande desafio para a indústria e o principal obstáculo para a difusão e consolidação dos sistemas fotovoltaicos em larga escala. Com os problemas ambientais atuais, o custo da energia solar fotovoltaica já se torna em alguns países mais atrativa do que o custo de energias mais difundidas, isto porque parâmetros como as poluições do ar e das águas que não eram levados

em conta no passado estão cada vez mais presentes e representam ameaças a vida orgânica na Terra.

A energia termoelétrica é obtida através da conversão direta do calor em eletricidade (Efeito Seebeck). O efeito Seebeck, fenômeno descoberto pelo físico alemão Thomas Johann Seebeck, em 1821, e consiste no surgimento de uma diferença de potencial entre duas junções de condutores ou semicondutores, compostos de materiais diferentes, quando estão a diferentes temperaturas (ALVES, 2007).

A energia termoelétrica estava fora do foco científico durante anos, pois inicialmente era empregada apenas com metais condutores com o objetivo de medição de temperatura, porém com a descoberta dos semicondutores, a termoeletricidade começou a ser estudada com objetivo de geração de energia. Uma das grandes dificuldades desse sistema é o desenvolvimento de materiais que propiciem um melhor rendimento. Atualmente a energia termoelétrica possui aplicações em algumas áreas como: geração de energia para sistemas de comunicação militar e aeroespacial, geração de energia elétrica para estações de monitoramento remoto na área de petróleo.

## **1.2 OBJETIVOS**

A energia térmica em um sistema de geração fotovoltaico é dada pelo aquecimento das células e painéis perante a exposição à radiação solar, a elevação da temperatura do painel reduz a potência elétrica de saída do sistema fotovoltaico quando o mesmo está ligado a uma carga. Assim o primeiro objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema protótipo composto de um painel fotovoltaico e um módulo termoelétrico, onde o módulo termoelétrico tem seu lado quente em contato com a superfície inferior do painel fotovoltaico que se aquece com a exposição a radiação solar, de forma a proporcionar uma geração de energia elétrica pelo módulo termoelétrico através do efeito Seebeck.

Serão apresentados os modelos matemáticos para os sistemas fotovoltaico e termoelétrico e os resultados obtidos após ensaios realizados, para um sistema protótipo de aproveitamento de energia térmica residual proveniente do processo de geração fotovoltaica. A modelagem é utilizada para analisar o comportamento do sistema de forma a validar os dados práticos obtidos nos ensaios com o protótipo.

Os dados obtidos e analisados deverão servir como fator de decisão para a continuidade ou não da pesquisa para trabalhos futuros.

### **1.3 DESENVOLVIMENTO**

O trabalho apresenta-se desenvolvido em seis capítulos.

O primeiro capítulo refere-se às considerações iniciais e traz na introdução uma breve descrição sobre o efeito termoelétrico e o efeito fotovoltaico. Na sequência apresenta-se o objetivo que direciona a linha de desenvolvimento do trabalho, apresentando a revisão bibliográfica sobre as literaturas estudadas e analisadas.

Apresenta-se no segundo capítulo o sistema de geração fotovoltaico, descrevendo o efeito fotovoltaico, os tipos de células: monocristalino, policristalino e de filmes finos e uma breve descrição sobre as mesmas. Na sequência é apresentado o conceito de módulo fotovoltaico e sua importância descrevendo brevemente os arranjos possíveis. Ainda neste capítulo aborda-se o modelo matemático de um módulo fotovoltaico, que é à base da simulação.

O terceiro capítulo traz o sistema de geração termoelétrico. Inicialmente são apresentados os conceitos de efeito termoelétrico, dentro de efeitos termoelétricos são abordados os efeitos: Joule, Thomson, Peltier e Seebeck, este último de maior relevância para a abordagem da geração de energia. Apresenta-se o módulo termoelétrico, suas características e funcionamento. Finalmente é abordado o modelo matemático do módulo termoelétrico para geração de energia elétrica, este modelo é a base da simulação.

O quarto capítulo traz a metodologia utilizada no trabalho que consiste na simulação e ensaios realizados para os sistemas apresentados.

O quinto capítulo traz os resultados e discussões provenientes da simulação e dos ensaios realizados com o protótipo.

O sexto capítulo traz a conclusão do trabalho.

### **1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Vashtsevanos (1986), descreve um simulador híbrido para sistema de geração fotovoltaica utilizando conceitos de eletrônica analógica e digital no desenvolvimento de sua pesquisa. Um simulador baseado nestes princípios foi criado e seu comportamento apresentava-se muito próximo de algumas células fotovoltaicas reais, porém nem todo o conjunto de células fotovoltaicas era possível de serem simuladas. Foi sugerida a utilização deste simulador por estudantes da área de energias renováveis.

Wagner (1991), descreve uma simulação de sistemas fotovoltaicos autônomos, com objetivo de prever de forma rápida e segura o desempenho do sistema sob diferentes condições de funcionamento. O desvio entre os dados simulados e os medidos em campo não foram significativos mostrando uma concordância da simulação com a prática.

Wu (1996) fez um estudo sobre geradores termoelétricos usando o calor dissipado nas placas como fonte para geração de energia, incluído os diferentes modelos, suas características, as equações que determinam as variáveis para especificação de cada modelo, bem como o estudo de alguns casos.

Freire (2001), faz um estudo comparativo entre o modelo de células fotovoltaicas utilizando dois diodos e um diodo e quatro parâmetros, e verifica uma grande semelhança entre os resultados obtidos pelos dois modelos, concluindo assim que a aproximação oferecida pelo modelo de um diodo é suficiente para a maioria das aplicações.

Paghi e Güths (2001) propuseram algumas alterações para o circuito de detecção do sinal Seebeck no anemômetro a efeito Peltier. Primeiramente, uma breve introdução ao princípio de funcionamento é apresentada. Depois, os problemas do circuito original de detecção são comentados. Finalmente, dois novos circuitos são propostos e resultados obtidos através de simulações são apresentados.

Chen et al (2001) analisaram as equações que determinam a potência de saída e o rendimento de um gerador termoelétrico composto de multi-elementos, considerando irreversível a troca de calor entre o gerador e o reservatório. Nesse trabalho foram analisados também os efeitos da transferência de calor e a influencia na quantidade de elementos.

Chen et al (2004) fizeram um estudo sobre a performance ótima de um gerador termoelétrico com dois estágios semicondutores, onde foram apresentadas as principais características. O estudo foi baseado na lei de Newton “Transferência de calor”. O gráfico da potência de saída e da eficiência térmica pela corrente de carga, de acordo com a quantidade de placas, são apresentados no estudo.

Chen et al (2005) estudaram a performance de um gerador termoelétrico multi-elementos assumindo a transferência de calor irreversível, a qual obedece à lei da transferência de calor. Nesse estudo combinou-se a termodinâmica de tempo finito com o desequilíbrio termodinâmico. Foram apresentados ainda a performance, através de exemplos numéricos das características do gerador, tais como: potência de saída, rendimento e a corrente elétrica de trabalho.

Tessaro (2005) faz um estudo sobre o desempenho de um painel fotovoltaico aplicado a um rastreador solar e demonstra que o sistema de geração tem seu desempenho elevado

quando o mesmo tem a capacidade de rastrear o Sol, maximizando assim a radiação sobre as células solares.

Gnoatto et al. (2005), Concluem que para realizar a curva característica de um painel fotovoltaico, pode-se utilizar a fonte natural de radiação solar ou através de um simulador sendo que o procedimento padrão internacional é baseado na norma IEC 904-1, para uma célula ou conjunto de células.

Longat (2005), apresenta um sistema de módulos fotovoltaicos de 60W, simulados no MATLAB. Através da entrada de dados de radiação solar e temperatura, o modelo é capaz de calcular uma corrente para uma determinada carga. O modelo representa o primeiro trabalho para o desenvolvimento de um sistema fotovoltaico de geração de energia elétrica completa com inversores, acumuladores e demais itens que compõem o sistema.

Kathab e Shenawy (2006) fizeram um estudo sobre a possibilidade de usar um gerador solar termoelétrico (TEG) para alimentar pequenas máquinas de resfriamento termoelétrico (TEC). Nesse trabalho foi dado ênfase na especificação da quantidade de módulos TEG que eram necessários para fornecer a potência requerida pelo TEC. São apresentados também alguns modelos experimentais, bem como os resultados obtidos.

DenHerder (2006), desenvolve a simulação de um sistema fotovoltaico completo utilizando o SIMULINK e comprova com dados reais a efetividade do modelo simulado.

Ciobotaru et al (2007) descrevem utilizando MATLAB o algoritmo para controle de um sistema com inversor para sistemas fotovoltaicos. É utilizado a simulação como fator determinante para aplicação prática do experimento.

Campbell (2007), propõe um modelo de módulos fotovoltaicos para uso em conversores para o estudo de transitórios do sistema. Apresenta um modelo simples e com parâmetros suficientes para desenvolvimento de estudantes na área e que pode ser implementado em vários softwares computacionais.

Camargo et al (2008), propuseram um modelo experimental para avaliação de performance de um módulo termoelétrico utilizado na geração de energia elétrica. O sistema foi avaliado em condições de circuito aberto e com uma carga de  $51\Omega$ . Foram apresentadas as curvas de performance baseado nas duas situações de teste mencionadas anteriormente.

Camargo et al (2009) avaliaram o efeito Peltier através de um sistema experimental de condicionamento de ar e os parâmetros envolvidos na maximização do coeficiente de desempenho. Foi montado um sistema de refrigeração com base nos módulos termoelétricos, e foram medidas as temperaturas de entrada e saída do ar do sistema de refrigeração

termoelétrico; voltímetros e amperímetros também foram utilizados para medir as variáveis da fonte de energia elétrica e de consumo por parte do módulo termoelétrico.

Este trabalho apresenta uma proposta de utilização de um sistema protótipo, onde um módulo termoelétrico é acoplado a um painel fotovoltaico, com objetivo de aproveitamento da energia térmica proveniente do aquecimento do painel fotovoltaico quando exposto à radiação solar durante sua operação. Desta forma através do módulo termoelétrico, que trabalha segundo o efeito Seebeck, é possível converter energia térmica em energia elétrica. Portanto os efeitos fotovoltaico e termoelétrico são empregados em conjunto formando o sistema protótipo, que gera energia elétrica através dos dois princípios.

## 2 SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICO

A conversão de energia solar em energia elétrica foi verificada pela primeira vez por Edmond Becquerel, em 1839 onde constatou uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor quando exposto à luz (HECKTHEUER, 2001). Em 1876 foi montado o primeiro aparato fotovoltaico resultado de estudos das estruturas no estado sólido, e apenas em 1956 iniciou-se a produção industrial seguindo o desenvolvimento da microeletrônica (CRESESB e CEPTEL, 1999). Atualmente, os sistemas fotovoltaicos vêm sendo utilizados geralmente em instalações remotas. É pertinente citar algumas vantagens de um sistema fotovoltaico tais como: baixo custo de manutenção e vida útil longa, isto faz com que sejam de grande importância para instalações em lugares remotos onde é inviável a aplicação de um projeto de infra-estrutura convencional de energia elétrica.

### 2.1 EFEITO FOTOVOLTAICO

Os semicondutores são a base do funcionamento do efeito fotovoltaico, estes possuem características como condutividade elétrica entre o isolante e o condutor e que diferentemente dos condutores, aumenta sua condutividade com a elevação da temperatura.

Cada átomo de cobre possui um elétron livre posicionado na banda de condução. Este percorre uma órbita extremamente grande (alto nível de energia), assim a força de atração do núcleo é baixa. Estes elétrons livres são capazes de produzir correntes altas.

Para o átomo de silício a situação é diferente, este possui quatro elétrons na camada de valência. Em um cristal de silício um determinado átomo forma quatro ligações covalentes. Isto quer dizer que este átomo compartilha cada elétron da camada de valência com diferentes camadas de valência de outros quatro átomos de silício. Para o estabelecimento de um cenário que possibilite o surgimento de uma corrente elétrica, visto que o silício não possui elétrons livres na banda de condução, é necessário realizar a dopagem do cristal. A dopagem consiste na introdução em um cristal de silício de elementos positivos em uma metade e negativos na outra. Um cristal de silício puro (aquele no qual cada átomo é um átomo de silício) é conhecido como semicondutor intrínseco já quando um cristal é dopado, ele passa a ser chamado semicondutor extrínseco (MALVINO, 1987).

Dessa forma a metade negativa designada por n, recebe átomos de elementos químicos que possuem cinco elétrons na sua camada de valência, assim um elétron fica livre na estrutura. Diz-se que este elemento é um doador de elétrons ou dopante n, assim o lado n fica com excesso de elétrons caracterizando o lado negativo. O lado positivo designado por p recebe, átomos de elementos químicos que possuem apenas três elétrons na sua camada de valência, este lado faltará um elétron para criar a ligação assim temos uma lacuna ou região tipo p. Diz-se que este elemento é um dopante tipo p, assim o lado p fica com falta de elétrons, ou melhor, fica com excesso de lacunas caracterizando o lado positivo (CASTRO, 2009).

Diferentemente do condutor o semicondutor possui componentes provenientes da banda de condução e valência, assim ele oferece dois trajetos para o surgimento da corrente: um através da banda de condução semelhante a corrente em um condutor e outro através da banda de valência que também é chamado de corrente de lacunas.

De uma maneira simplificada é possível entender o que ocorre num cristal de semicondutor, a Figura 2.1 ilustra a junção entre os elementos p e n onde inicialmente ocorre a difusão dos elétrons do lado n para o lado p, esses elétrons encontram as lacunas no lado p que os capturam, a este fato dá-se o nome de recombinação. A saída destes elétrons gera o surgimento de íons positivos no lado n representados com um círculo com um sinal de +, e faz com que haja um acúmulo de elétrons no lado p, estes elétrons no lado p logo se recombina com as lacunas formando os íons negativos representados pelo círculo com o símbolo de -. À medida que o número de íons aumenta, a região próxima à junção está totalmente deplecionada de elétrons livres e lacunas. Chamamos esta região de camada de depleção. Até um certo ponto, a camada de depleção age como uma barreira impedindo a difusão de elétrons livres através da junção. A intensidade da camada de depleção aumenta com cada elétron que a atravessa até que se atinja o equilíbrio. Nesse ponto a repulsão interna da camada de depleção interrompe a difusão dos elétrons livres através da junção. Assim se forma um campo elétrico na região de junção. A diferença de potencial através da camada de depleção é chamada de barreira de potencial (MALVINO, 1987).

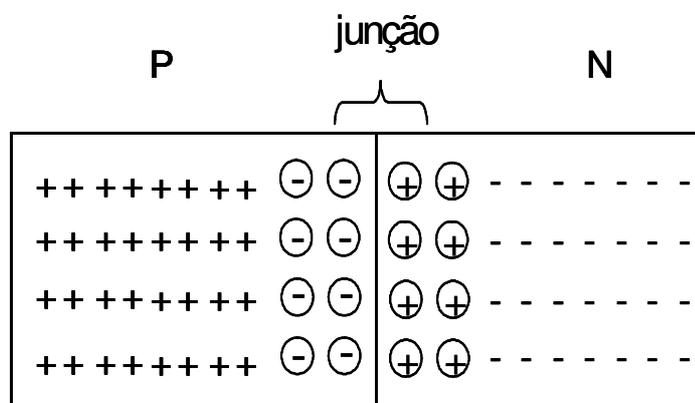


Figura 2.1 – Camada pn

Se fótons com energia suficiente para excitar os elétrons livres entrarem em contato com a camada n, estes elétrons através dos dois trajetos de formação de corrente em um semicondutor podem chegar a extremidade p do cristal, neste momento é possível verificar uma diferença de potencial nos terminais de saída pelo efeito fotovoltaico. Se for conectada uma resistência de carga aos terminais, os elétrons que estão na extremidade da camada p abandonam o cristal e percorrem o percurso determinado pela carga, o circuito é fechado com o retorno dos elétrons da carga para a camada n, assim tem-se o surgimento de uma corrente elétrica pelo efeito fotovoltaico. A Figura 2.2 ilustra o processo de surgimento de corrente elétrica através do efeito fotovoltaico.

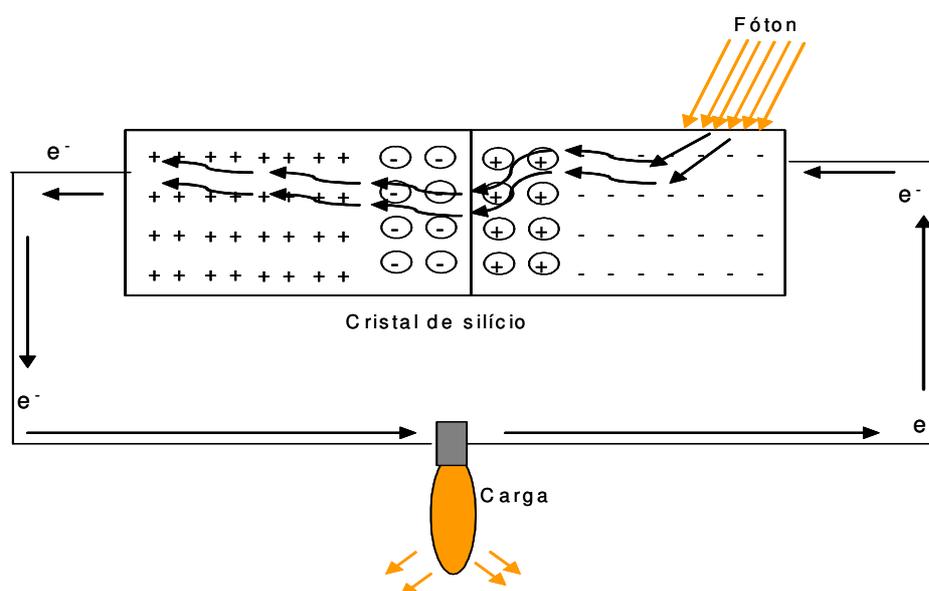


Figura 2.2 – Corrente gerada a partir do efeito fotovoltaico

Um dos fatores limitantes no processo de conversão de energia solar em eletricidade é o espectro da radiação.

A radiação apresenta-se como uma forma de transferência de calor em que a energia é transferida de um corpo para outro, sem que o espaço entre ambos seja, necessariamente aquecido. A energia radiante solar percorre o espaço sob a forma de ondas eletromagnéticas e aquece a superfície terrestre sem causar um aumento significativo da temperatura do ar. De fato, diferentes corpos absorvem energia de formas diferentes. Sem necessitar de um meio de propagação as ondas eletromagnéticas se deslocam à velocidade da luz no vácuo e ao penetrarem na atmosfera sofrem uma redução na sua velocidade. A luz viaja no universo por pequenas partículas chamadas de fótons. Os mesmos formam as ondas eletromagnéticas da radiação solar. O comprimento de cada onda é à distância entre uma crista e outra de uma mesma onda.

A radiação solar se espalha numa ampla faixa, e apenas a parcela com comprimento de onda inferior a aproximadamente  $1\mu\text{m}$ , é capaz de excitar os elétrons em células de silício (PROCLIRA, 2010).

Cada fóton só consegue excitar um elétron, portanto, para fótons com energia superior a energia do gap (hiato), haverá um excesso de energia que será convertida em calor (absorção pelo corpo). Através de desenvolvimento de materiais, fabricantes tentam minimizar estes efeitos que, como já foi visto, influenciam na redução de potência de saída. A Figura 2.3 ilustra o espectro da radiação solar, evidenciando que aproximadamente 22% do espectro amostrado pode ser aproveitado na conversão de energia solar em energia elétrica (CRESESB e CEPEL, 2001).

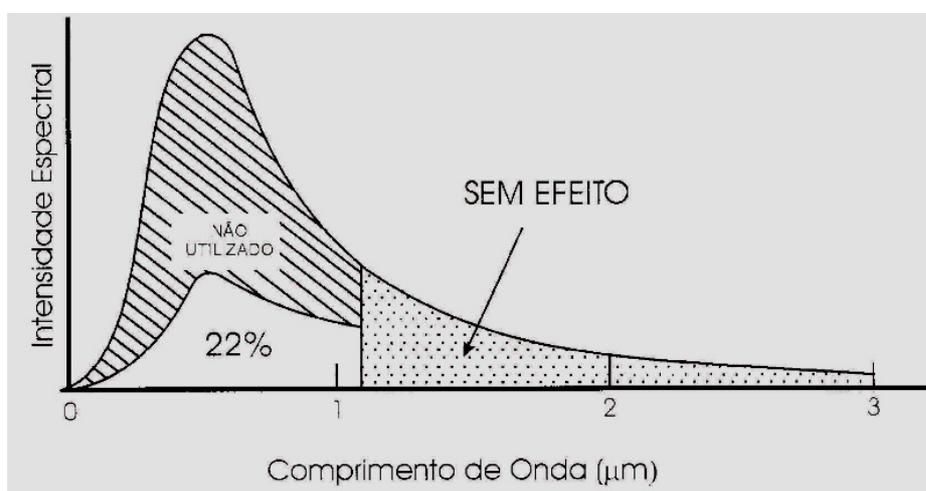


Figura 2.3 - Espectro da radiação solar (CRESESB e CEPEL, 2001).

## **2.2 TIPOS DE CÉLULAS**

O silício está presente na fabricação da maioria das células fotovoltaicas que podem ser constituídas de cristais monocristalinos, policristalinos ou de filmes finos. De uma maneira geral o silício deve passar por uma etapa de purificação, e em seguida por uma etapa de dopagem, através da introdução de impurezas, dosadas na quantidade certa.

### **2.2.1 SILÍCIO MONOCRISTALINO**

A célula de silício monocristalino é historicamente a mais usada e comercializada como conversor direto de energia solar em eletricidade. A fabricação da célula de silício começa com a extração do cristal de dióxido de silício. Este material é desoxidado em grandes fornos, purificado e solidificado.

Para se utilizar o silício na indústria eletrônica além do alto grau de pureza, o material deve ter a estrutura monocristalina e baixa densidade de defeitos na rede. (CRESESB e CEPEL, 2001)

Devido ao seu processo de fabricação e pureza, as células monocristalinas são, as que apresentam as maiores eficiências, em contrapartida possuem o maior custo de aquisição. As células comerciais obtidas com o processo descrito atingem uma eficiência de até 15% podendo chegar em 18% em células feitas em laboratórios. (CRESESB e CEPEL, 2001)

### **2.2.2 SILÍCIO POLICRISTALINO**

As células de silício policristalino são mais baratas que as de silício monocristalino por exigirem um processo de preparação das células menos rigoroso. A eficiência, no entanto, cai um pouco em comparação às células de silício monocristalino. O processo de pureza do silício utilizado na produção das células de policristalinas é similar ao processo das monocristalinas, o que permite a obtenção de níveis de eficiência compatíveis. Basicamente, as técnicas de fabricação de células policristalinas são as mesmas da fabricação das células monocristalinas, porém com menores rigores de controle. Ao longo dos anos, o processo de fabricação tem alcançado eficiência máxima de 12,5% em escalas industriais. As células de silício policristalino tem custo menor do que as de monocristalino (CRESESB e CEPEL, 2001).

### 2.2.3 FILMES FINOS

Com a intenção de busca de formas alternativas de fabricação de células fotovoltaicas com confiabilidade e baixo custo, alguns trabalhos de pesquisa estão sendo realizados. Um dos principais campos de pesquisa é sobre as células de filmes finos. O exemplo é a célula de silício amorfo que são obtidas por meio da deposição de camadas muito finas de silício ou outros materiais semicondutores sobre superfícies de vidro ou metal. Sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade varia entre 5% e 7% (CASTRO, 2009).

## 2.3 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Células fotovoltaicas apresentam baixa tensão e corrente de saída, dessa forma para aplicação, é necessário o arranjo dessas células formando um módulo. O arranjo pode ser série ou em paralelo.

Na ligação em paralelo a corrente total é a soma das correntes de cada módulo, já a tensão é igual a tensão de um módulo. Pelas características típicas de uma célula monocristalina, tem-se 3A de corrente e tensão em torno de 0,7V. Em função da baixa tensão, esse arranjo isoladamente é pouco utilizado (CRESESB e CEPTEL, 2001).

Já a ligação em série, somam-se as tensões dos módulos e a corrente será igual à de um módulo. Neste tipo de arranjo é possível carregar baterias de 7V, 12V (CRESESB e CEPTEL, 2001).

### 2.3.1 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A potência dos módulos é dada pela potência máxima ou potência nominal. As características fornecidas pelos fabricantes são:

- Tensão de circuito aberto ( $V_{caf}$ );
- Corrente de curto circuito ( $I_{ccf}$ );
- Potência máxima ( $P_{Lmaxf}$ );
- Tensão de potência máxima ( $V_{Lmaxf}$ );
- Corrente de potência máxima ( $I_{Lmaxf}$ );

A condição padrão para se obter as curvas características dos módulos é definida para radiação de  $1000\text{W/m}^2$  (radiação recebida na superfície da Terra em dia claro, ao meio dia), e temperatura de  $25^\circ\text{C}$  na célula. A Figura 2.4 ilustra uma curva I V - característica de um módulo fotovoltaico.

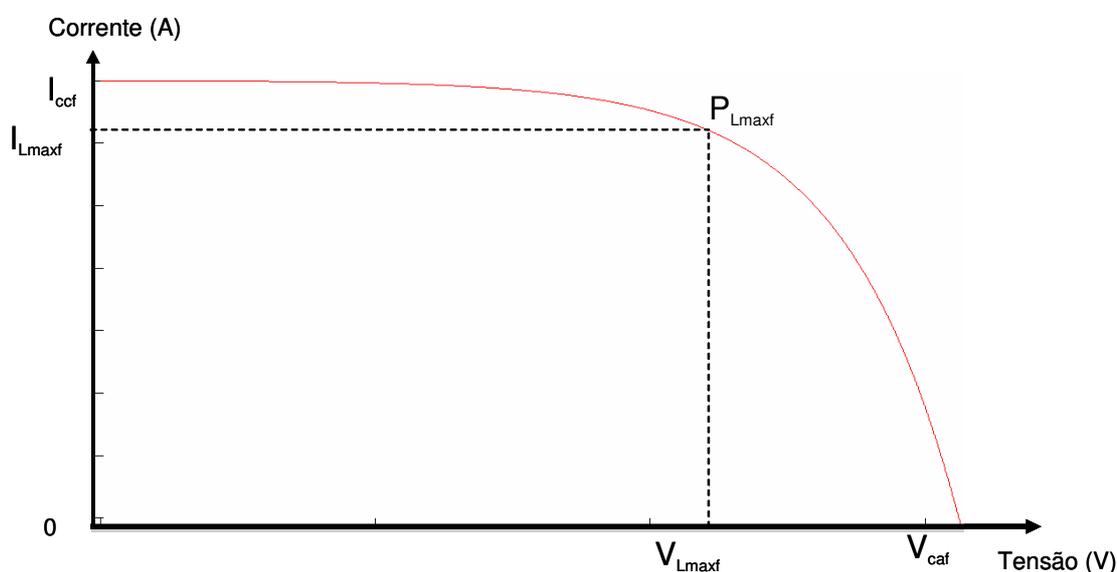


Figura 2.4 – Curva característica I-V de um módulo fotovoltaico.

Os pontos descritos na Figura 2.4 são:

Corrente de curto circuito ( $I_{ccf}$ ): máxima corrente que pode entregar um dispositivo sob condições determinadas de radiação e temperatura correspondendo a tensão nula e consequentemente a potência nula.

Tensão de circuito aberto ( $V_{caf}$ ): máxima tensão que pode entregar um dispositivo sob condições determinadas de radiação e temperatura correspondendo à circulação de corrente nula e consequentemente a potência nula.

Potência máxima ( $P_{Lmaxf}$ ): é o valor máximo de potência que pode entregar o dispositivo. Corresponde ao ponto da curva no qual o produto  $V_{Lmaxf} \times I_{Lmaxf}$  é máximo.

Corrente a máxima potência ( $I_{Lmaxf}$ ): corrente que entrega o dispositivo a potência máxima sob condições determinadas de radiação e temperatura. É utilizada como corrente nominal do mesmo.

Tensão a máxima potência ( $V_{Lmaxf}$ ): tensão que entrega o dispositivo a potência máxima sob condições determinadas de radiação e temperatura. É utilizada como tensão nominal do mesmo.

### 2.3.2 FATORES QUE AFETAM AS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS MÓDULOS

Os principais fatores que influenciam as características elétricas de um painel são a radiação solar e a temperatura das células. A corrente gerada nos módulos aumenta linearmente com o aumento da intensidade luminosa. Por outro lado, o aumento da temperatura na célula faz com que a tensão gerada pelo módulo caia reduzindo assim o produto da tensão pela corrente gerada e conseqüentemente ocorre uma redução no ponto de máxima potência gerada. A Figura 2.5 mostra a influência da radiação na corrente de saída; a Figura 2.6 mostra a influência da temperatura na redução de tensão de saída de um módulo fotovoltaico. Este trabalho limita-se a análise da influência da temperatura.

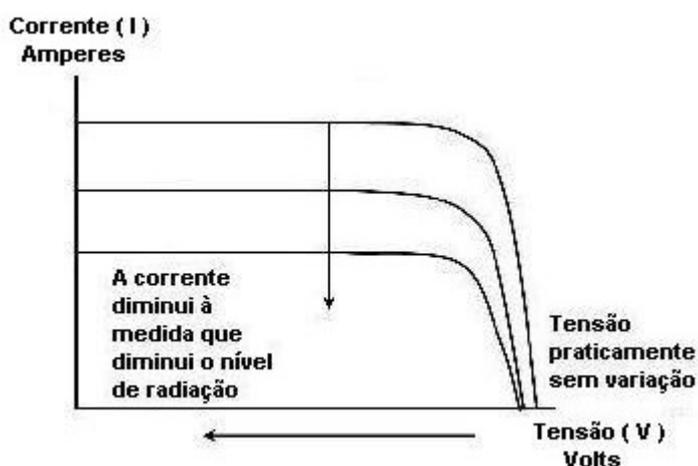


Figura 2.5 - Redução da corrente com a redução da radiação (CRESESB e CEPTEL, 1999)

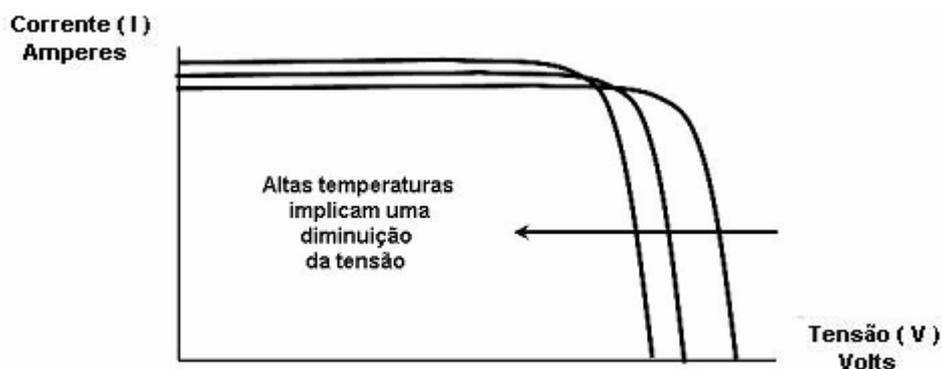


Figura 2.6 - Redução da tensão com o aumento da temperatura (CRESESB e CEPTEL, 1999)

## 2.4 MODELO MATEMÁTICO DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO

A modelagem matemática pode ser realizada descrevendo-se uma célula e seu circuito elétrico equivalente conforme Figura 2.7.

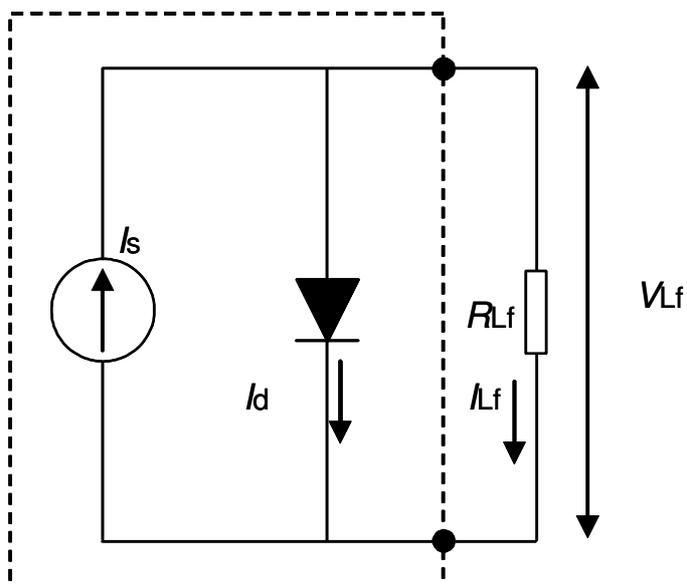


Figura 2.7 – Modelo equivalente de uma célula fotovoltaica

A fonte de corrente  $I_s$  representa a corrente elétrica gerada pelo feixe de radiação luminosa, constituído por fótons ao atingir a superfície da célula (efeito fotovoltaico); esta corrente é constante para uma dada radiação incidente. A junção pn funciona como um diodo que é atravessado por uma corrente  $I_d$ , que depende da tensão  $V_{L_f}$ , aplicado aos terminais da célula. A corrente  $I_d$  que se fecha através do diodo é (CASTRO, 2009):

$$I_d = I_o \left( e^{\frac{V_{L_f}}{mV_t}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

$$V_t = \frac{BT_f}{q_e} \quad (2.2)$$

As constantes relacionadas na Equação 2.2 são expressas pelos seguintes valores:

$B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  constante de Boltzmann;

$q_e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$  carga de 1 elétron;

A corrente  $I_{Lf}$  é, portanto:

$$I_{Lf} = I_s - I_d = I_s - I_o \left( e^{\frac{V_{Lf}}{mV_t}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

Para o desenvolvimento do modelo matemático, dois pontos de operação da célula fotovoltaica são importantes: o de curto circuito nos terminais de saída e o de terminais de saída em circuito aberto.

A Figura 2.8 mostra uma célula fotovoltaica com os terminais de saída em curto-circuito. Neste caso a corrente de curto circuito  $I_{ccf}$  é o valor máximo da corrente de carga, igual, portanto, à corrente gerada por efeito fotovoltaico. O seu valor é uma característica da célula, sendo um dado fornecido pelo fabricante para determinadas condições de radiação incidente e temperatura (CASTRO, 2009).

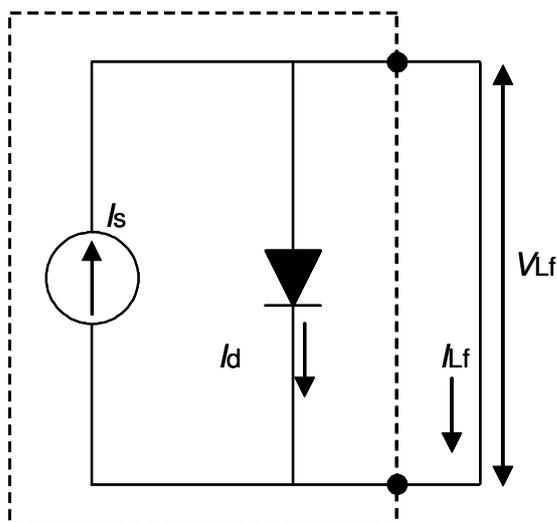


Figura 2.8 – Curto circuito na saída da célula fotovoltaica

Da Figura 2.8 verifica-se que:

$$V_{L_f} = 0 \quad (2.4)$$

$$I_d = 0 \quad (2.5)$$

$$I_{L_f} = I_s = I_{ccf} \quad (2.6)$$

A Figura 2.9 ilustra uma célula fotovoltaica com os terminais de saída em circuito aberto. Neste caso a tensão em vazio  $V_{caf}$  é o valor máximo da tensão nos terminais da célula, que ocorre quando não há carga conectada em seus terminais de saída. O seu valor é uma característica da célula, sendo um dado fornecido pelo fabricante para determinadas condições de radiação incidente e temperatura (CASTRO, 2009).

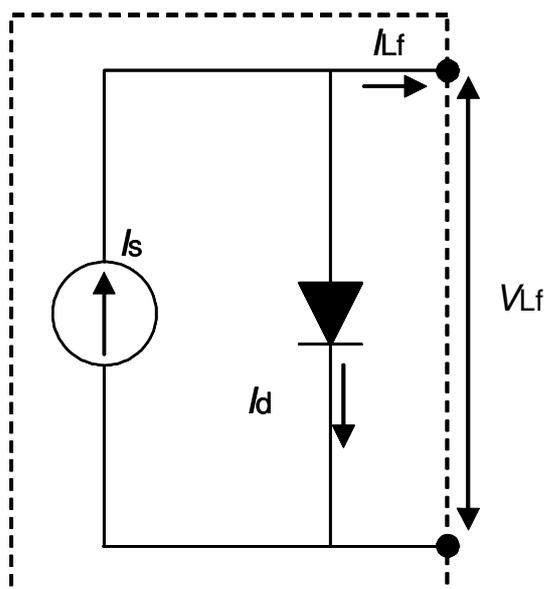


Figura 2.9 - Célula fotovoltaica – circuito aberto

Da Figura 2.9 verifica-se que:

$$I_{L_f} = 0 \quad (2.7)$$

Substituindo a Equação (2.7) na Equação (2.3) tem-se:

$$0 = I_s - I_o \left( e^{\frac{V_{Lf}}{mV_t}} - 1 \right)$$

$$\frac{I_s}{I_o} = \left( e^{\frac{V_{Lf}}{mV_t}} - 1 \right)$$

$$V_{Lf} = m V_t \ln \left( 1 + \frac{I_s}{I_o} \right)$$

Da Figura 2.9,  $V_{Lf}$  é a tensão de circuito aberto, então:

$$V_{caf} = m V_t \ln \left( 1 + \frac{I_s}{I_o} \right) \quad (2.8)$$

Substituindo a Equação (2.6) na Equação (2.3) tem-se a Equação (2.9), que é utilizada para traçar a curva característica I – V.

$$I_{Lf} = I_{ccf} - I_o \left( e^{\frac{V_{Lf}}{mV_t}} - 1 \right) \quad (2.9)$$

Para o cálculo da corrente inversa máxima de saturação do diodo para as condições de referência deve-se recorrer as condições conhecidas de curto circuito e circuito aberto. Dessa forma substituindo a Equação (2.6) na Equação (2.8), tem-se a Equação (2.10):

$$V_{caf} = m V_{tr} \ln \left( 1 + \frac{I_{ccf}}{I_{or}} \right)$$

$$\frac{V_{caf}}{m V_{tr}} = \ln \left( 1 + \frac{I_{ccf}}{I_{or}} \right)$$

$$I_{or} = \frac{I_{ccf}}{\left( e^{\frac{V_{caf}}{m V_{tr}}} - 1 \right)} \quad (2.10)$$

Segundo Castro (2009) é necessário encontrar a corrente inversa máxima de saturação do diodo, esta depende do material e da temperatura conforme segue:

$$I_o = I_{or} \left( \frac{T_f}{T_r} \right)^3 e^{\frac{\varepsilon}{m'} \left( \frac{1}{V_{tr}} - \frac{1}{V_t} \right)} \quad (2.11)$$

$\varepsilon = 1,12$  eV hiato do silício;

Para o cálculo de  $m$  (fator de idealidade da célula ou módulo fotovoltaico), consideram-se a potência máxima e as condições de referência onde a corrente reversa máxima de saturação será a corrente reversa máxima de saturação nas condições de referência e o potencial térmico será o potencial térmico nas condições de referência, assim:

$$I_{Lf} = I_{Lmaxf} \quad (2.12)$$

$$V_{Lf} = V_{Lmaxf} \quad (2.13)$$

$$I_o = I_{or} \quad (2.14)$$

$$V_t = V_{tr} \quad (2.15)$$

A Equação (2.16), pode ser escrita substituindo as Equações (2.12), (2.13), (2.14) e (2.15) na Equação (2.9), assim tem-se:

$$I_{L_{\max f}} = I_{\text{ccf}} - I_{\text{or}} \left( e^{\frac{V_{L_{\max f}}}{mV_{\text{tr}}}} - 1 \right) \quad (2.16)$$

Substituindo a Equação (2.10) na Equação (2.16), resulta:

$$I_{L_{\max f}} = I_{\text{ccf}} - \frac{I_{\text{ccf}}}{\left( e^{\frac{V_{\text{caf}}}{mV_{\text{tr}}}} - 1 \right)} \left( e^{\frac{V_{L_{\max f}}}{mV_{\text{tr}}}} - 1 \right)$$

$$\frac{I_{L_{\max f}} - I_{\text{ccf}}}{I_{\text{ccf}}} = - \frac{\left( e^{\frac{V_{L_{\max f}}}{mV_{\text{tr}}}} - 1 \right)}{\left( e^{\frac{V_{\text{caf}}}{mV_{\text{tr}}}} - 1 \right)}$$

Considera-se que:

$$e^{\frac{V_{L_{\max f}}}{mV_{\text{tr}}}} \gg 1$$

$$e^{\frac{V_{\text{caf}}}{mV_{\text{tr}}}} \gg 1$$

Assim, tem-se:

$$\frac{I_{L_{\max f}} - I_{\text{ccf}}}{I_{\text{ccf}}} = - \frac{\left( e^{\frac{V_{L_{\max f}}}{mV_{\text{tr}}}} \right)}{\left( e^{\frac{V_{\text{caf}}}{mV_{\text{tr}}}} \right)}$$

$$\frac{I_{Lmaxf}}{I_{ccf}} - 1 = - \left( e^{\frac{V_{Lmaxf} - V_{caf}}{mV_{tr}}} \right)$$

$$\ln \left( \frac{I_{Lmaxf}}{I_{ccf}} - 1 \right) = - \ln \left( e^{\frac{V_{Lmaxf} - V_{caf}}{mV_{tr}}} \right)$$

$$\ln \left( 1 - \frac{I_{Lmaxf}}{I_{ccf}} \right) = \frac{V_{Lmaxf} - V_{caf}}{mV_{tr}}$$

$$m = \frac{V_{Lmaxf} - V_{caf}}{V_{tr} \ln \left( 1 - \frac{I_{Lmaxf}}{I_{ccf}} \right)} \quad (2.17)$$

O fator de idealidade  $m$  apresentado na Equação (2.17), representa tanto o comportamento de uma célula quanto a de um módulo fotovoltaico (CASTRO, 2009). Porém para estender o conceito para os módulos, é necessário calcular o fator de idealidade equivalente.

A Equação (2.18), apresenta o cálculo do fator de idealidade equivalente  $m'$ , este fator considera o número de células em série, e deve ser utilizado tanto para o cálculo das células quanto para o cálculo dos módulos. Dessa forma, tem-se:

$$m' = \left( \frac{m}{n_{cs}} \right) \quad (2.18)$$

Para uma única célula fotovoltaica, tem-se que:

$$m' = m \quad (2.19)$$

A determinação de  $m'$  é importante para o cálculo de  $I_o$ , na Equação(2.11).

A potência na carga, para qualquer ponto da curva I-V, é dada através da Equação (2.20):

$$P_{L_f} = V_{L_f} I_{L_f} \quad (2.20)$$

Substituindo a Equação (2.9) na Equação (2.20), tem-se a Equação (2.21) que é utilizada para encontrar a curva característica P-V:

$$P_{L_f} = V_{L_f} \left\{ I_{ccf} - [I_o (e^{\frac{V_{L_f}}{mV_t}} - 1)] \right\} \quad (2.21)$$

Para a potência máxima substituindo as Equações (2.12) e (2.13) na Equação (2.20), tem-se:

$$P_{L_{maxf}} = V_{L_{maxf}} I_{L_{maxf}} \quad (2.22)$$

$P_{L_{maxf}}$ ,  $V_{L_{maxf}}$  e  $I_{L_{maxf}}$  são dados fornecidos pelos fabricantes.

Na Figura 2.10 pode-se verificar o ponto de máxima potência descrita por  $P_{L_{maxf}}$ .

Para definição da resistência de carga que permite o fornecimento máximo de potência de saída, é necessário verificar as características I-V e P-V do módulo fotovoltaico. A Figura 2.10 ilustra as características I-V e P-V de um módulo com os pontos conhecidos e fornecidos pelo fabricante.

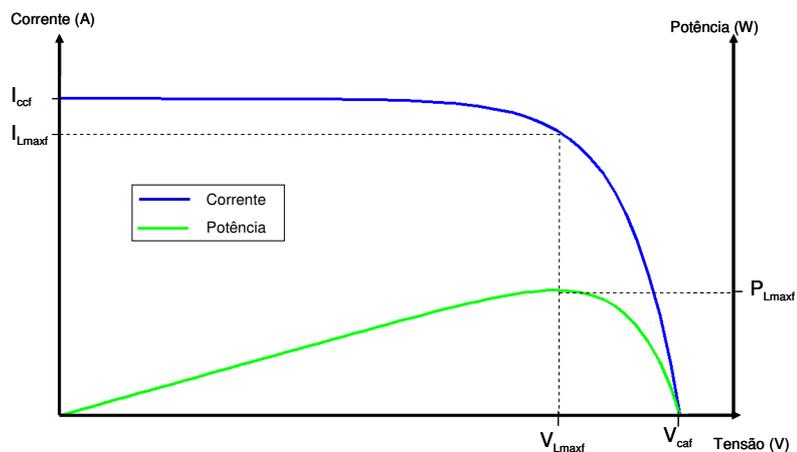


Figura 2.10 – Curvas características I-V e P-V para determinação da  $R_{Lmaxf}$

A potência máxima,  $P_{Lmaxf}$ , conforme Equação (2.22), é devida a tensão máxima (representada por  $V_{Lmaxf}$ ) e a corrente máxima (representada por  $I_{Lmaxf}$ ). Pela lei de ohm, a resistência de carga que promoverá a maior potência será (CABRAL, 2009):

$$R_{Lmaxf} = \left( \frac{V_{Lmaxf}}{I_{Lmaxf}} \right) \quad (2.23)$$

### 3 SISTEMA DE GERAÇÃO TERMOELÉTRICO

#### 3.1 EFEITO TERMOELÉTRICO

Se dois metais ou semicondutores diferentes são conectados e as junções mantidas a diferentes temperaturas, pode-se observar os seguintes fenômenos: o efeito Seebeck, o efeito Peltier, o efeito Thomson e o efeito Joule (DUARTE, 2006).

A aplicação científica e tecnológica destes efeitos é importante para o desenvolvimento da termoeletricidade e sua utilização, no futuro, é cada vez mais promissora. Os estudos das propriedades termoeletricas dos semicondutores e dos metais levam, na prática, à aplicação em processos de medição, geração de energia elétrica e de produção de calor e frio.

A geração de energia elétrica a partir da exposição das junções a temperaturas diferentes é uma aplicação do efeito Seebeck.

Já o efeito Peltier, que consiste na produção de calor ou frio ao se aplicar uma fonte de tensão é a aplicação inversa do efeito Seebeck. Sua utilização se encontra difundida em várias aplicações no mundo moderno como, por exemplo: na refrigeração de componentes na eletrônica, em mini refrigeradores de bebidas, etc.

##### 3.1.1 EFEITO JOULE

Quando uma corrente elétrica percorre um condutor, calor é gerado. A intensidade deste efeito é proporcional ao quadrado da intensidade da corrente elétrica e independe do sentido da corrente. O efeito Joule produzido é dado por (NOGUEIRA, 2005):

$$Q_J = R_J I_J^2 \quad (3.1)$$

A condução térmica resulta do fato que o diferencial de temperatura num material induz o calor a fluir na direção de menor temperatura. A taxa na qual este calor é conduzido por unidade de área é proporcional a diferença de temperatura e é dado por (NOGUEIRA, 2005):

$$q_c = -Y\Delta t_j \quad (3.2)$$

### 3.1.2 EFEITO THOMSON

Em 1854, Thomson concluiu, por meio das leis da termodinâmica, que a condução de calor, ao longo dos fios metálicos de um par termoelétrico que não transporta corrente, origina uma distribuição uniforme de temperatura em cada fio.

Quando existe corrente, modifica-se em cada fio a distribuição de temperatura, em uma quantidade não inteiramente devida ao efeito Joule. Essa variação adicional na distribuição da temperatura denomina-se efeito Thomson.

O efeito Thomson depende do metal de que é feito o fio e da temperatura média da pequena região considerada. Em certos metais, há absorção de calor quando uma corrente elétrica flui da parte fria para a parte quente do metal, e há geração de calor quando se inverte o sentido da corrente. Em outros metais, ocorre o oposto deste efeito, isto é, há a liberação de calor quando uma corrente elétrica flui da parte quente para a parte fria do metal. Conclui-se que, com a circulação de corrente ao longo de um fio condutor, a distribuição de temperatura neste condutor será modificada, tanto pelo calor dissipado por efeito Joule, como pelo efeito Thomson. O calor de Thomson é dado por (ALVES, 2007):

$$Q_T = \tau I_h \Delta T_h \quad (3.3)$$

### 3.1.3 EFEITO PELTIER

Descoberto por Jean Charles Athanase Peltier em 1834, de acordo com este fenômeno, quando uma corrente elétrica e contínua flui na junção de dois materiais semicondutores de propriedades diferentes, calor é dissipado ou absorvido, e a direção de bombeamento de calor é revertida invertendo a polaridade da tensão aplicada. Parte é o “calor de Joule”, sempre dissipado, e é proporcional ao quadrado da intensidade da corrente elétrica. Há uma parcela adicional de calor denominado “calor de Peltier”, é linear com a corrente e é o principal efeito referente a bombeamento de calor e refrigeração termoelétrica (SOUZA, 2007).

O calor de Peltier é dado por:

$$Q_p = -\pi I_p = -\alpha T_p I_p \quad (3.4)$$

A Figura 3.1 mostra o exemplo de um refrigerador com base no efeito Peltier. Na ilustração, é possível observar um módulo termoelétrico com o lado frio, absorvendo calor do ambiente, o lado quente dissipando calor com a ajuda do dissipador e uma fonte de tensão aplicada ao módulo para conseguir realizar o bombeamento de calor.

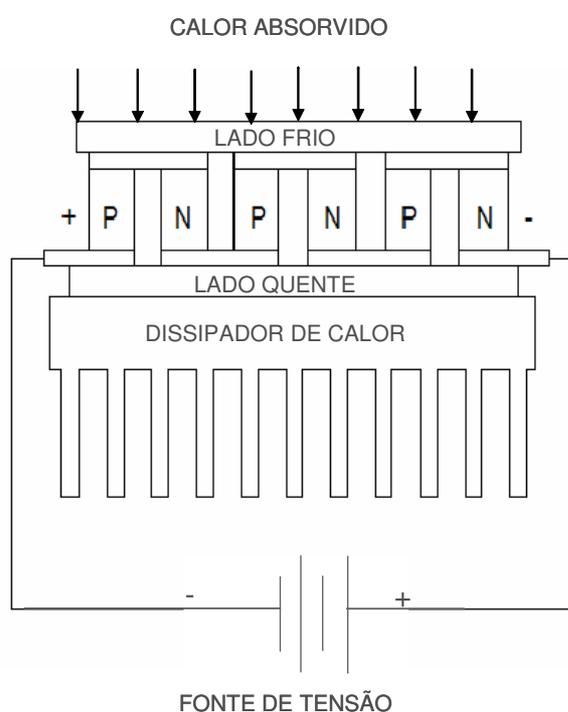


Figura 3.1- Refrigerador termoelétrico (Efeito Peltier)

### 3.1.4 EFEITO SEEBECK

Segundo Souza (2007) o fenômeno da termoeletricidade foi descoberto, em 1821, por Thomas Johann Seebeck, quando ele notou que, em um circuito fechado, formado por dois condutores diferentes A e B, ocorre uma diferença de potencial enquanto existir uma diferença de temperatura  $\Delta t_t$  entre as suas junções. A Figura 3.2 ilustra um par termoelétrico sob o efeito Seebeck onde é possível observar, a junta de medição T1, e a junta de referência

T2. A existência de uma corrente térmica AB, no circuito, é conhecida como efeito Seebeck. Quando a temperatura da junta de referência T2 é mantida constante, verifica-se que a corrente térmica é uma função da temperatura T1 da junção de teste. Esse fenômeno é o princípio de funcionamento dos termopares, um sensor comumente usado na indústria para monitoramento de temperatura.

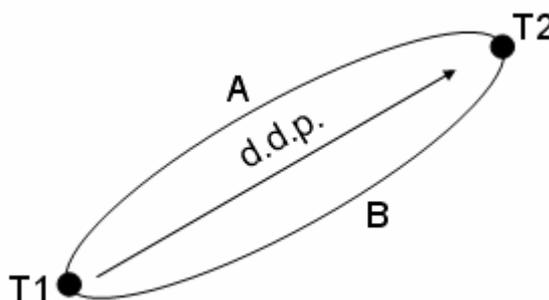


Figura 3.2 - Junções de medição e referência em um termopar

O efeito Seebeck se produz pelo fato de que os elétrons livres de um metal diferem de um condutor para o outro sofrem a influência da temperatura em seus movimentos. Quando dois condutores diferentes são conectados para formar duas junções e estas são mantidas a diferentes temperaturas, a difusão dos elétrons, nas junções, produz-se a ritmos diferentes (ALVES, 2007).

A Figura 3.3 ilustra um gerador de eletricidade com base no efeito Seebeck. É possível observar o módulo termoelétrico, constituído por 3 pares termoelétricos PN, com o lado quente recebendo energia térmica através de uma fonte de calor externa, o lado frio está dissipando calor com o auxílio de um dissipador, observa-se também uma carga ligada as extremidades PN do módulo termoelétrico e por ela flui uma corrente elétrica.

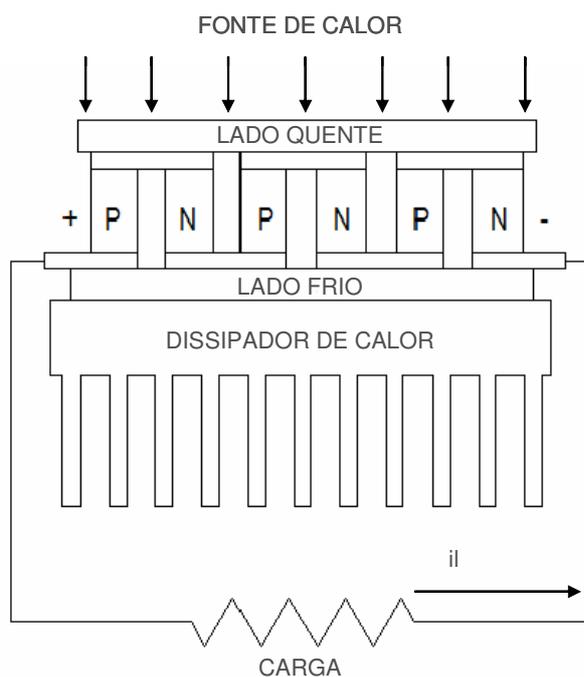


Figura 3.3 - Gerador termoelétrico (Efeito Seebeck)

A Figura 3.4 ilustra o modelo de um módulo termoelétrico didático, para a geração de energia elétrica a partir de uma fonte de calor externa. A partir de uma abordagem simplificada, do ponto de vista atômico, pode-se analisar o efeito termoelétrico que acontece nos módulos da seguinte forma. Devido às impurezas adicionadas, tem-se um excesso de elétrons em um lado representando as cargas negativas e do outro lado temos falta de elétrons que resulta nas lacunas representando as cargas positivas.

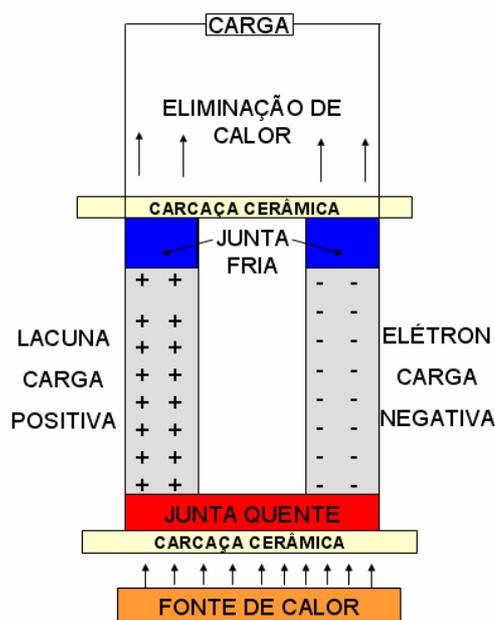


Figura 3.4 - Modelo didático de um sistema termoelétrico

Ao aplicar calor na junta quente, a energia térmica recebida propicia o movimento dos elétrons e lacunas para a outra extremidade que é a junta fria. Desta maneira tem-se a origem de um terminal positivo e outro negativo. Ao acoplar uma carga nos terminais da junta fria, tem-se uma corrente elétrica fluindo pela carga enquanto houver uma diferença de temperatura entre as juntas quente e fria.

Quanto maior for a diferença de temperatura maior será a diferença de potencial entre os terminais positivo e negativo da junta fria.

### **3.2 MÓDULO TERMOELÉTRICO**

Os módulos termoeletrônicos podem converter energia elétrica em um gradiente de temperatura. Esse fenômeno foi descoberto por Peltier em 1834. A aplicação desse fenômeno permaneceu mínima até o desenvolvimento dos materiais semicondutores nos anos 50. Com o advento dos materiais semicondutores veio a capacidade de uma grande variedade de aplicações práticas de refrigeração termoeletrônica.

Os dispositivos termoeletrônicos podem também converter a energia térmica de uma diferença de temperatura entre dois pontos distintos em energia elétrica; este fenômeno foi descoberto em 1821 e foi chamado efeito Seebeck. Como mencionado anteriormente, quando um diferencial de temperatura é estabelecido entre as extremidades quentes e frias do material semicondutor, uma tensão é gerada; isto é, a tensão de Seebeck. Realmente, o efeito de Seebeck é um efeito inverso do efeito de Peltier. Baseado neste efeito de Seebeck, os dispositivos termoeletrônicos podem agir também como geradores de energia elétrica. Na prática, é necessário um grande número de pares termoeletrônicos conectados eletricamente em série para formar um módulo (SOUZA, 2007).

Geralmente mais de um par de semicondutores são montados juntos para dar forma a um dispositivo termoeletrônico (módulo). Dentro do módulo, cada um dos semicondutores é chamado de termoelemento e cada um par dos termoelementos é chamado de termopar. Para descrever o funcionamento dos módulos termoeletrônicos podemos compará-los com os termopares. Os termopares são dispositivos que geram uma diferença de potencial (d.d.p.) a partir de duas junções de metais diferentes que se encontram a diferentes temperaturas.

Devido a esta característica, eles são utilizados para indicação e controle de temperatura em muitos processos industriais.

Um dispositivo termoeletrônico típico é composto por duas carcaças cerâmicas, as quais servem como estrutura para preservar a integridade mecânica do módulo e como isolamento

elétrica para os termoelementos de telureto de bismuto tipo-n e tipo-p (que são conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo entre as placas cerâmicas). Os dispositivos em geral contêm de 3 a 127 termopares. O cobre é usado como material condutor elétrico entre os semicondutores postados em paralelo. O sistema é conectado por solda. As aplicações do módulo para geração de energia exigem uma compactação maior dos termoelementos do que no caso da geração ou absorção de calor (ALVES, 2007).

Em aplicações que exigem maiores potências fornecidas pela fonte, um módulo apenas não suprirá a energia necessária para a carga, assim são utilizados arranjos de módulo em série (para elevar o nível de tensão de saída), em paralelo (para elevar o nível de corrente saída) ou até mesmo o arranjo série/paralelo (para elevar tanto o nível de tensão como o de corrente exigido pela carga). A Figura 3.5 evidencia um exemplo de arranjo em módulos termoelétricos.

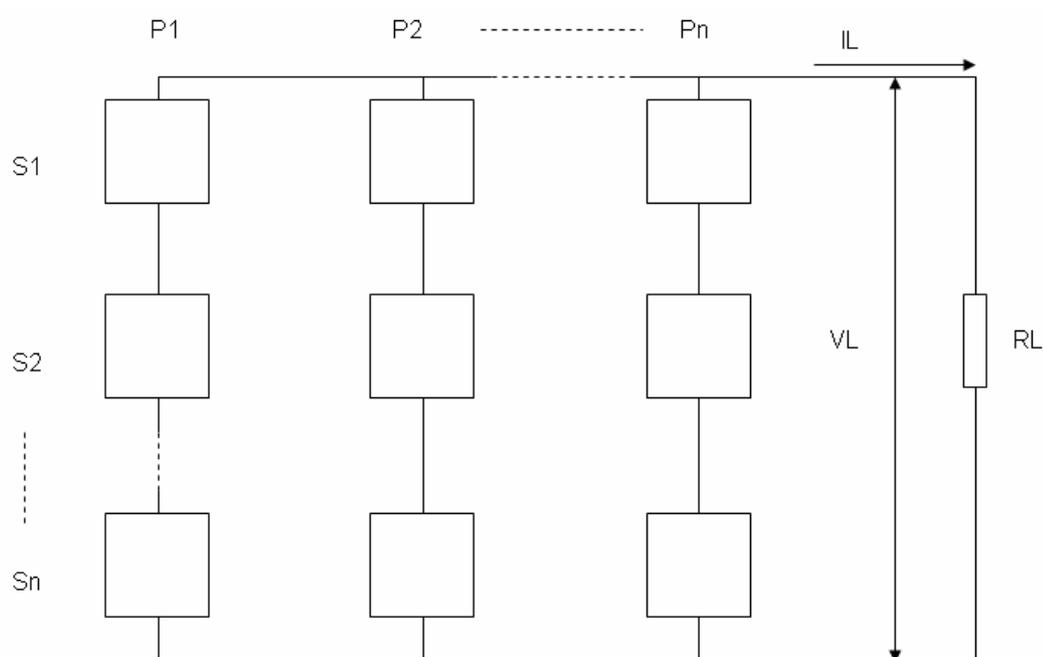


Figura 3.5 - Arranjo de módulos termoelétricos.

Um elemento de fundamental importância para o bom funcionamento do módulo termoelétrico para geração de energia é o emprego adequado do dissipador de calor. Este estará em contato direto com o lado frio do módulo, que deve possuir uma resistência térmica entre eles mínima. O objetivo do dissipador é retirar calor do lado frio da placa de forma a manter a temperatura a mais baixa possível. Um dissipador de calor perfeito seria capaz de

absorver uma quantidade ilimitada de calor sem exibir qualquer aumento de temperatura. Desde que isso não é possível na prática, deve-se selecionar um dissipador de calor, que terá uma elevação de temperatura aceitável durante a operação do módulo termoelétrico. Para evitar o efeito negativo do dissipador de calor, é altamente desejável que a temperatura do mesmo seja no máximo 5°C acima da temperatura ambiente (SOUZA, 2007). Vários tipos de dissipadores de calor estão disponíveis, incluindo de convecção natural, convecção forçada e refrigeração líquida. Utilizou-se neste trabalho de pesquisa, dissipadores de convecção natural. A Figura 3.6 mostra os dissipadores por convecção natural e módulos termoelétricos.

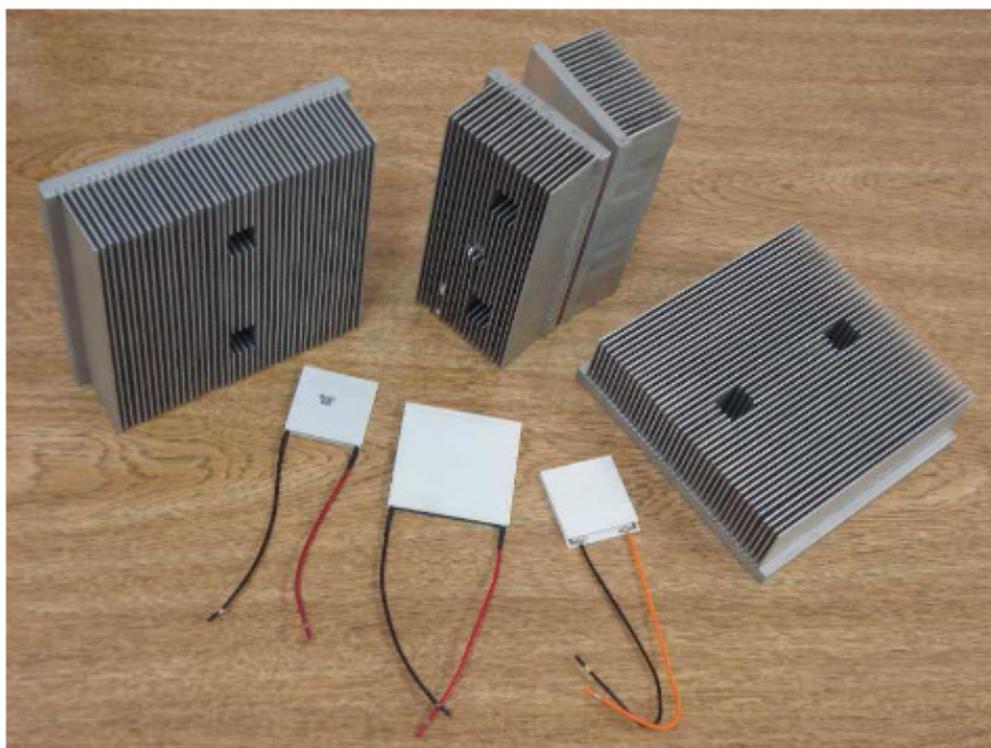


Figura 3.6 - Módulos termoelétricos e dissipadores de calor (CAMARGO et al, 2008)

### 3.3 MODELO MATEMÁTICO DE UM MÓDULO TERMOELÉTRICO

A Figura 3.7 evidencia o módulo disposto sem carga conectada em seus terminais de saída.

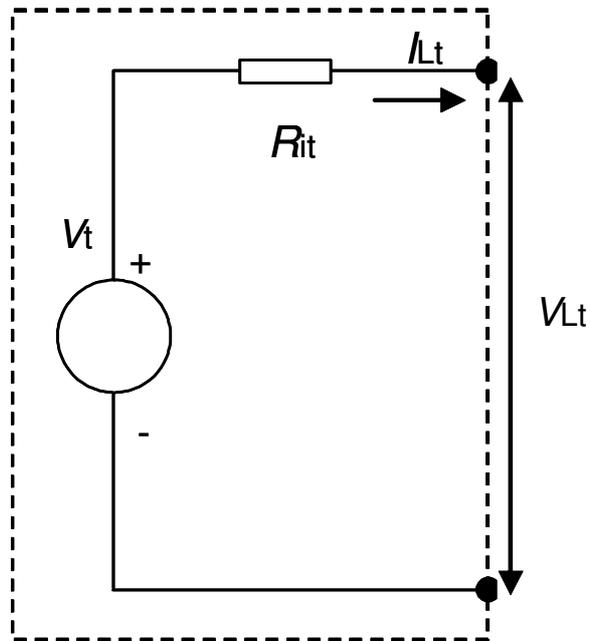


Figura 3.7 - Modelo simplificado módulo termoelétrico sem carga

Com base no efeito Seebeck, tem-se que a tensão de circuito aberto será:

$$V_t = \alpha \Delta t_t \quad (3.7)$$

$$V_{Lt} = V_t \quad (3.8)$$

Onde:

$$\Delta t_t = t_{2t} - t_{1t} \quad (3.9)$$

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (3.10)$$

Os parâmetros  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  são propriedades dos materiais do circuito e são as forças eletromotrizes que aparecem nos materiais 1 e 2 devido à diferença de temperatura de  $1^\circ\text{C}$  entre as extremidades.

Dessa forma, substituindo as Equações (3.9) e (3.10) na Equação (3.7), tem-se que a diferença de potencial será dada por:

$$V_t = (\alpha_1 + \alpha_2)(t_{2t} - t_{1t}) \quad (3.11)$$

Enquanto o circuito está aberto conforme ilustra a Figura 3.7, não existe corrente elétrica. Ao conectar uma resistência de carga, conforme Figura 3.8, nos terminais do módulo surge uma corrente elétrica.

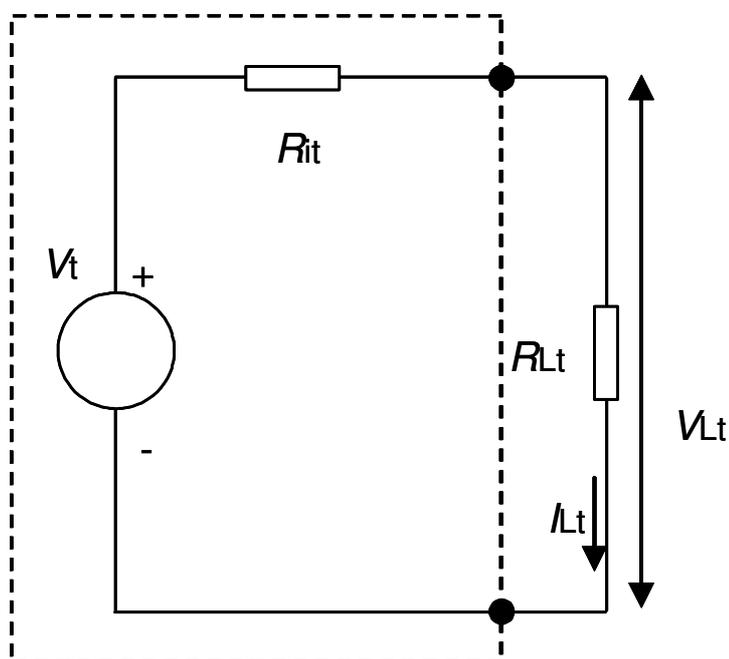


Figura 3.8 – Modelo de um módulo termoelétrico com carga

A corrente na carga é dada por:

$$I_{L_t} = \frac{V_t}{(R_{i_t} + R_{L_t})} \quad (3.12)$$

A tensão na carga é dada por:

$$V_{L_t} = I_{L_t} R_{L_t} \quad (3.13)$$

A potência gerada na carga é dada por:

$$P_{L_t} = V_{L_t} I_{L_t} \quad (3.14)$$

Substituindo as Equações (3.12) e (3.13) na Equação (3.14), tem-se:

$$P_{L_t} = I_{L_t} R_{L_t} \frac{V_t}{(R_{i_t} + R_{L_t})}$$

$$P_{L_t} = \frac{V_t}{(R_{i_t} + R_{L_t})} R_{L_t} \frac{V_t}{(R_{i_t} + R_{L_t})}$$

$$P_{L_t} = \frac{V_t^2 R_{L_t}}{(R_{i_t} + R_{L_t})^2} \quad (3.15)$$

Substituindo as Equações (3.9) e (3.10) na Equação (3.15) tem-se a potência produzida no circuito:

$$P_{L_t} = (\alpha_1 + \alpha_2)^2 (t_{2t} - t_{1t})^2 \frac{R_{L_t}}{(R_{i_t} + R_{L_t})^2} \quad (3.16)$$

Para definir o valor da resistência de carga que possibilitará que o sistema opere em sua máxima potência. O ponto onde a potência é máxima é onde se tem a derivada da potência pela resistência de carga igual a zero.

$$\frac{dP_{L_t}}{dR_{L_t}} = 0$$

Utilizando a Equação (3.15), tem-se:

$$\frac{V_t^2 (R_{i_t} + R_{L_t}) - 2R_{L_t} V_t^2}{(R_{i_t} + R_{L_t})} = 0$$

$$V_t^2 (R_{i_t} + R_{L_t}) = 2R_{L_t} V_t^2$$

$$R_{i_t} + R_{L_t} = 2R_{L_t}$$

$$R_{L_t} = R_{i_t} \tag{3.17}$$

Assim para obter a potência máxima, deve-se ter a resistência de carga igual à resistência interna do módulo termoeletrico. Esse será o valor da resistência para a maximização de potência na carga.

$$R_{L_t} = R_{i_t} = R_{\text{maxpot}} \tag{3.18}$$

Substituindo a Equação (3.18) na Equação (3.16), tem-se a Equação (3.19) que representa a potência máxima na carga.

$$P_{\text{max}} = (\alpha_1 + \alpha_2)^2 (t_{2t} - t_{1t})^2 \frac{R_{\text{maxpot}}}{(R_{\text{maxpot}} + R_{\text{maxpot}})^2}$$

$$P_{\max t} = (\alpha_1 + \alpha_2)^2 (t_{2t} - t_{1t})^2 \frac{R_{\max \text{pot}}}{4R_{\max \text{pot}}^2}$$

$$P_{\max t} = \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)^2 (t_{2t} - t_{1t})^2}{4R_{\max \text{pot}}} \quad (3.19)$$

## 4 METODOLOGIA

Os métodos utilizados para este trabalho são as simulações e ensaios com os sistema termoelétrico e fotovoltaico, com base nas teorias apresentadas.

### 4.1 SIMULAÇÕES

Para as simulações dos modelos matemáticos apresentados nos capítulos 2 e 3 deste trabalho, foi utilizado o software MATLAB<sup>®</sup> 5.3, conforme ilustra a Figura 4.1.

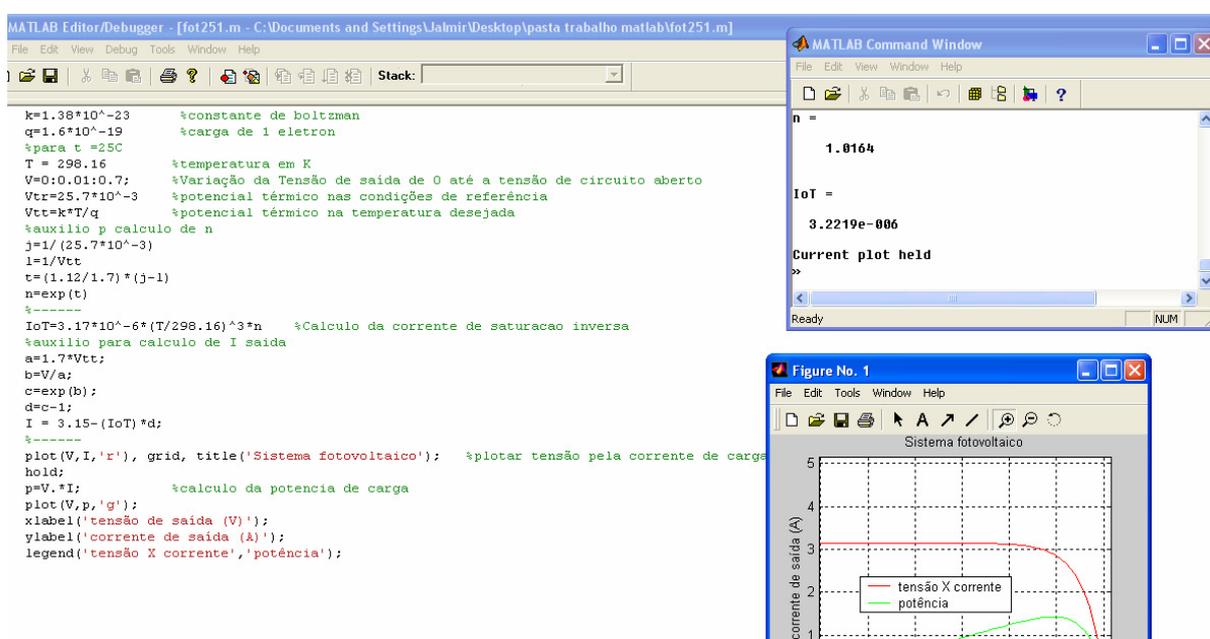


Figura 4.1 – Exemplo de simulação no MATLAB<sup>®</sup> 5.3

O MATLAB é um software de alto desempenho destinado a fazer cálculos com matrizes (MATrix LABoratory), podendo funcionar como uma calculadora ou como uma linguagem de programação científica (FORTRAN, Pascal, C, etc.). Entretanto, os comandos do MATLAB são mais próximos da forma como escrevemos expressões algébricas, tornando mais simples o seu uso. Atualmente, o MATLAB é definido como um sistema interativo e uma linguagem de programação para computação técnica e científica em geral, integrando a capacidade de fazer cálculos, visualização gráfica e programação (TONINI e SCHETTINO 2002).

Para a implementação dos modelos matemáticos no MATLAB<sup>®</sup> 5.3, foram criados códigos que estão ilustrados nos ANEXOS. A Tabela 4.1 mostra a descrição de cada código ilustrado nos anexos.

Tabela 4.1 – Descrição dos códigos em anexo

ANEXO	DESCRIÇÃO
A	Código para simulação de uma célula fotovoltaica a uma temperatura de 25 °C.
B	Código para simulação de uma célula fotovoltaica a uma temperatura de 50 °C.
C	Código para simulação de uma célula fotovoltaica a uma temperatura de 75 °C.
D	Código para simulação de uma célula fotovoltaica a uma temperatura de 25 °C, 50 °C e 75 °C.
E	Código para simulação de um módulo termoeletrico com uma variação da resistência de carga de 0 a 35 Ω.
F	Código para simulação de um módulo termoeletrico com uma variação da temperatura do lado quente de 30 °C a 80° C.
G	Código para simulação de um módulo termoeletrico com uma variação da temperatura do lado quente de 80 °C a 30° C.
H	Código para análise comparativa entre o modelo simulado e os dados medidos no protótipo para um sistema fotovoltaico para uma temperatura de 54C.
I	Código para análise comparativa entre o modelo simulado e os dados medidos no protótipo para um sistema termoeletrico

Para as células fotovoltaicas e módulos termoeletricos, foram simulados curvas de corrente, tensão e potência na carga de forma a gerar informações para as análises.

#### 4.1.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO

O modelo teórico apresentado no capítulo 2 foi simulado no MATLAB<sup>®</sup> 5.3, obtendo assim o comportamento do sistema mediante as variações de temperatura. Para efeito de análise foram considerados abaixo parâmetros típicos fornecido pelo fabricante de módulos fotovoltaicos. São eles: (A folha de especificações do módulo pode ser consultada no ANEXO J).

$$V_{caf} = 20V;$$

$$I_{ccf} = 0,7A;$$

$$P_{Lmaxf} = 10W;$$

$$I_{Lmaxf} = 0,6A ;$$

$$V_{Lmaxf} = 16,5V;$$

$$n_{cs} = 36;$$

As condições de referência normalizadas para testes em módulos fotovoltaicos, são intituladas como condição padrão para teste e é definida para a radiação incidente ( $G_r=1000\text{W/m}^2$ ), e temperatura ( $t_r=25^\circ\text{C}$ ) na célula. A radiação incidente padrão é definida como a radiação solar recebida na Terra em dia claro, ao meio dia.

#### 4.1.2 SISTEMA TERMOELÉTRICO

O modelo teórico apresentado no capítulo 3 foi simulado no MATLAB<sup>®</sup> 5.3, obtendo assim o comportamento do sistema. Abaixo foram considerados parâmetros típicos que são fornecidos pelo fabricante. São eles: (A folha de especificações do módulo pode ser consultada no ANEXO L)

$$R_{it} = 3,49 \Omega;$$

$\alpha = 0,053 \text{ V/K}$  \* A partir da folha de especificações do fabricante, constante no ANEXO L, é possível determinar através da Equação (3.7), o coeficiente de Seebeck do mesmo.

#### 4.2 SISTEMA EXPERIMENTAL

Para o estudo prático do sistema apresentado, foi montado um protótipo experimental para observação da geração de energia elétrica. O sistema é composto por:

- Painel fotovoltaico: Fabricante CONERGY: modelo: Q 10P (ANEXO J);
- Módulo Termoelétrico: Fabricante: MELCOR, modelo: HT4-12-40 (ANEXO L);
- Dissipador de calor – Empregado no lado frio, em alumínio, medindo 154 x 80 x 40mm, 38 aletas e espaçamento entre aletas de 2mm;
- Termo-higrômetros para medição de temperatura;
- Multímetros “Minipa ET-1001”, para medição de corrente e tensão;
- Banco de resistências de 2,5  $\Omega$  a 1500  $\Omega$ .

Apesar do módulo termoelétrico modelo HT4-12-40 do fabricante MELCOR ser destinado a refrigeração, conforme ilustrado no ANEXO L, o mesmo no experimento deste trabalho foi utilizado na geração de energia elétrica, comprovando assim a inversão entre os efeitos Peltier e Seebeck.

Os dados coletados foram inseridos em planilhas do software Microsoft Office Excel 2003<sup>®</sup>, de forma a gerar tabelas e gráficos para otimização das análises.

A Figura 4.2 mostra o esquema proposto para o protótipo do sistema. Na parte inferior do painel fotovoltaico, é acoplado o módulo termoeletrico de forma que o lado quente fique em contato direto com o painel, já o lado frio fica em contato com o dissipador de calor na região de sombra.

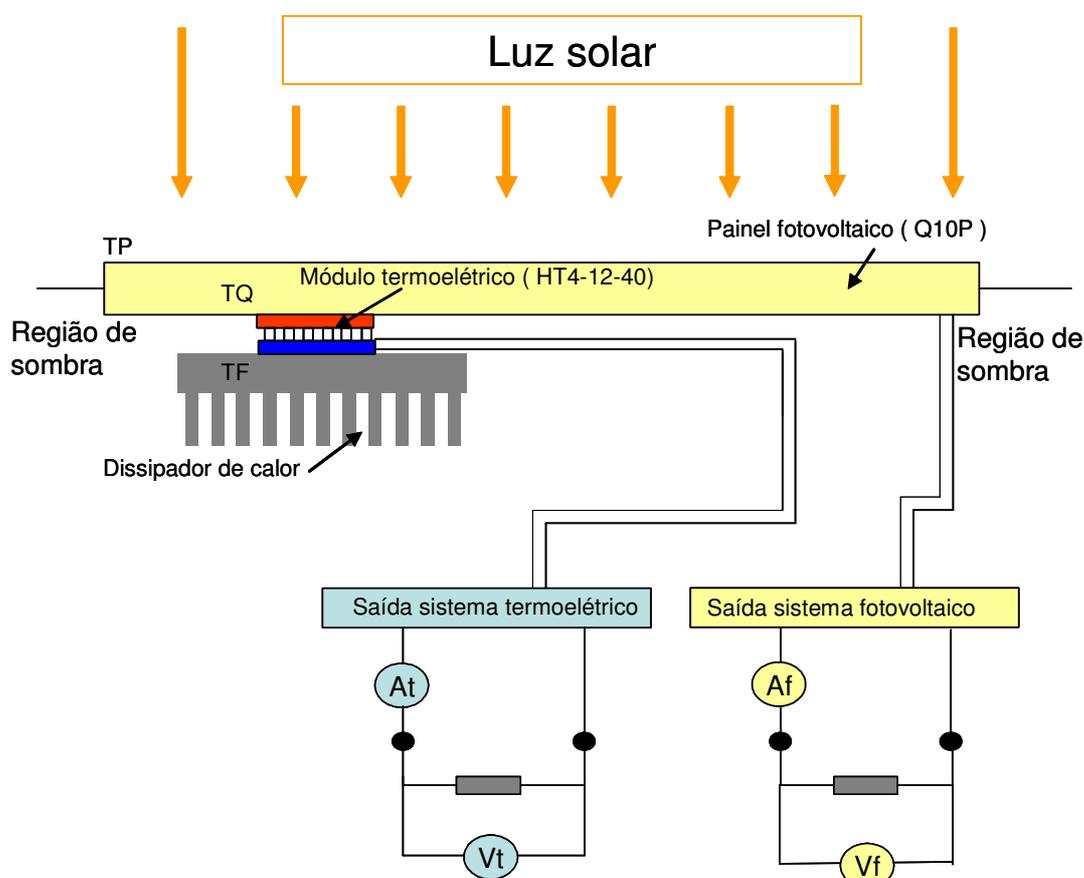


Figura 4.2 - Diagrama esquemático do protótipo

Para medição e posterior avaliação das variáveis envolvidas no processo ilustrado na Figura (4.2) tem-se: o primeiro termo-higrômetro para medição de temperatura da superfície do painel solar (TP), o segundo termo-higrômetro para medição do lado quente do módulo termoeletrico (TQ), o terceiro termo-higrômetro para medição de temperatura do lado frio da placa termoeletrica (TF), o primeiro amperímetro para medição de corrente elétrica de saída do sistema termoeletrico (At), o segundo amperímetro para medição de corrente elétrica de saída do sistema fotovoltaico (Af), o primeiro voltmímetro para medição de tensão elétrica de

saída do sistema termoeletrico ( $V_t$ ), e por ultimo o segundo voltmetro para medição de tensão elétrica de saída do sistema fotovoltaico ( $V_f$ ).

Para avaliação do ensaio foram levadas em consideração a temperatura ambiente (TA), a temperatura do painel solar (TP), a temperatura do lado quente do módulo termoeletrico (TQ), a temperatura do lado frio do módulo termoeletrico (TF), a corrente gerada pelo sistema fotovoltaico ( $A_f$ ), a tensão gerada pelo sistema fotovoltaico ( $V_f$ ), a corrente gerada pelo sistema termoeletrico ( $A_t$ ) e a tensão gerada pelo sistema termoeletrico ( $V_t$ ).

O sistema foi exposto à luz solar e as medições necessárias para a avaliação do sistema foram tomadas.

Para uma melhor qualidade da análise, as medições dos sistemas fotovoltaico e termoeletrico foram coletadas ao mesmo tempo.

As características de exatidão dos instrumentos de medição são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características dos instrumentos de medição

Instrumento	Modelo	Resolução/Tolerância
Termo-higrômetro	Politerm	1°C / ± 0,05 %
Multímetro	Minipa/ET 1001	0,005V / ± 0,5%
Multímetro	Minipa/ET 1001	0,05A / ± 1%

As medições foram realizadas em dias claros e no período entre as doze e quatorze horas.

Foram realizados dois ensaios em dias distintos, pois após o primeiro ensaio foram detectados problemas no sistema termoeletrico que era necessário tratar e posteriormente ensaiar novamente. Após o tratamento do problema encontrado, o sistema foi novamente ensaiado.

A Figura 4.3 mostra o banco de resistências, os multímetros e termohigrômetros para a medição das variáveis envolvidas.

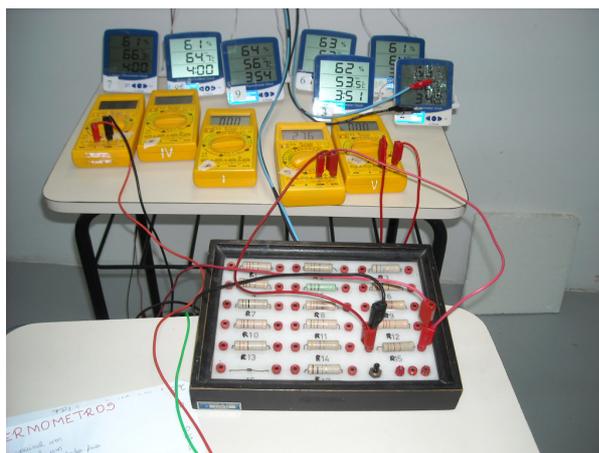


Figura 4.3 – Instrumentos de medição e banco de resistências

A Figura 4.4 mostra os painéis fotovoltaicos expostos a radiação solar, e os cabos de potência de carga e instrumentos de medição encaminhados para um ponto interno da edificação a sombra. Somente foi considerada a medição referente ao painel que está com o módulo termoeletrico instalado.



Figura 4.4 – Painéis fotovoltaicos expostos à radiação solar

A Figura 4.5 mostra o dissipador de calor que está ligado ao lado frio do módulo termoeletrico, que por sua vez tem seu lado quente ligado à parte inferior do painel fotovoltaico. O painel serve de meio de propagação de calor para o lado quente do módulo termoeletrico. Os cabos de potência e medição estão encaminhados para um ponto interno da edificação a sombra.



Figura 4.5 – Dissipador de calor e módulo termoeletrico ligados ao painel fotovoltaico

A Figura 4.6 mostra a melhoria realizada após problemas encontrados durante a primeira medição. É possível observar a instalação de isolante térmico a base de poliuretano em torno dos módulos termoeletricos. Para as medições deste trabalho foi considerado apenas um módulo termoeletrico.

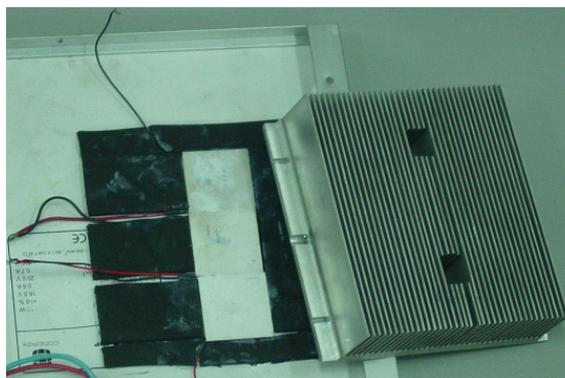


Figura 4.6 – Conjunto dissipador, módulos termoeletricos e painel fotovoltaico com instalação de isolante térmico

### 4.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS SIMULAÇÕES E OS ENSAIOS

De forma a comparar graficamente os resultados obtidos dos modelos matemáticos para alguns gráficos gerados e os dados obtidos durante os ensaios, foram criados códigos no MATLAB<sup>®</sup> 5.3, simulando no mesmo gráfico os dados teóricos com base nos modelos matemáticos e dados práticos coletados durante os ensaios.

O ANEXO H, traz o código para simulação das curvas  $I \times V$  e  $P \times V$ , que descreve as características de um módulo fotovoltaico. O ANEXO I traz o código para simulação das curvas de tensão, corrente e potência na carga para um sistema termoeletrico.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresenta-se neste capítulo os dados e resultados provenientes das simulações e medições realizadas e coletadas no sistema experimental proposto.

### 5.1 SIMULAÇÕES

#### 5.1.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO

O modelo matemático desenvolvido no capítulo 2 para o sistema fotovoltaico foi utilizado para a criação dos códigos para a simulação em MATLAB® 5.3. A Figura 5.1 ilustra a simulação para um módulo fotovoltaico a uma temperatura de 25° C. O código em MATLAB® 5.3, para este caso está contido no ANEXO A. É possível verificar as curvas de corrente ( $I_{L_f}$ ) X tensão ( $V_{L_f}$ ), e Potência ( $P_{L_f}$ ) X tensão ( $V_{L_f}$ ). Observa-se para a temperatura em questão o atingimento da potência máxima ou nominal do painel ( $P_{L_{maxf}}$ ).

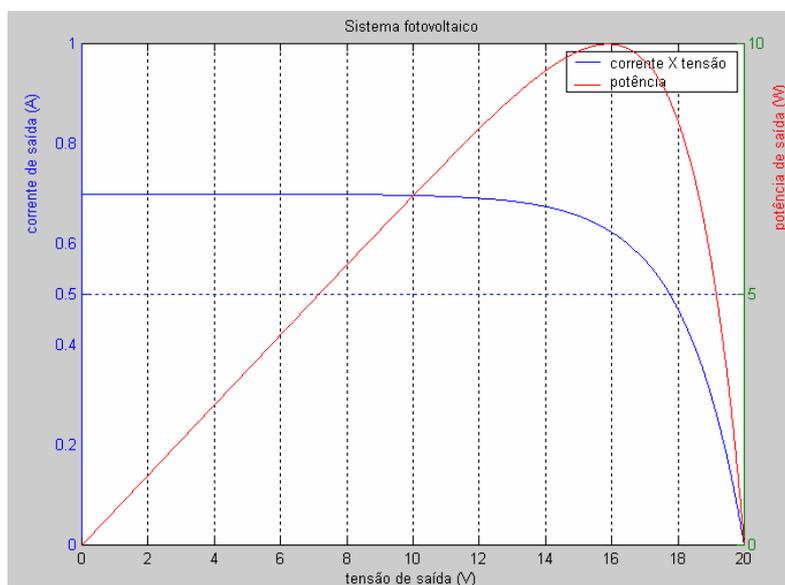


Figura 5.1 – Curvas ( $I_{L_f}$  X  $V_{L_f}$  e  $P_{L_f}$  X  $V_{L_f}$ ) para a temperatura de 25°C

A Figura 5.2 ilustra a simulação para um módulo fotovoltaico a uma temperatura de 50° C. O código em MATLAB® 5.3, para este caso está contido no ANEXO B. É possível

verificar as curvas de corrente ( $I_{Lf}$ ) X tensão ( $V_{Lf}$ ), e Potência ( $P_{Lf}$ ) X tensão ( $V_{Lf}$ ). Observa-se para a temperatura em questão a redução do nível máximo da potência de carga ( $P_{Lmaxf}$ ), bem como a redução do nível de tensão ( $V_{caf}$ ).

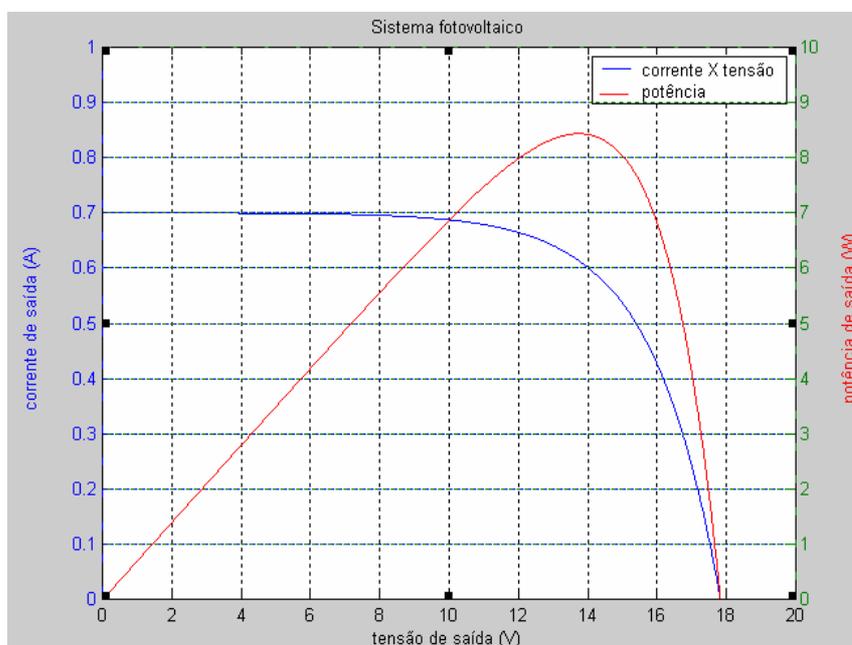


Figura 5.2 – Curvas ( $I_{Lf}$  X  $V_{Lf}$  e  $P_{Lf}$  X  $V_{Lf}$ ) para a temperatura de 50°C

A Figura 5.3 ilustra a simulação para um módulo fotovoltaico a uma temperatura de 75°C. O código em MATLAB® 5.3, para este caso está contido no ANEXO C. É possível verificar as curvas de corrente ( $I_{Lf}$ ) X tensão ( $V_{Lf}$ ), e Potência ( $P_{Lf}$ ) X tensão ( $V_{Lf}$ ). Observa-se para a temperatura em questão a redução do nível máximo da potência de carga ( $P_{Lmaxf}$ ), bem como a redução do nível de tensão ( $V_{caf}$ ) a níveis menores dos que encontrados nos casos de 25°C e 50°C.

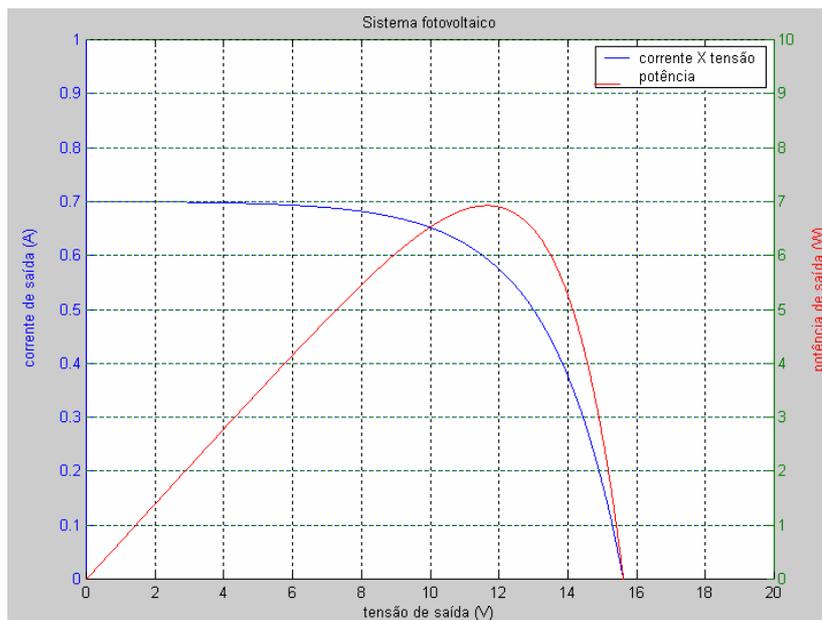


Figura 5.3 – Curvas ( $I_{L_f} \times V_{L_f}$  e  $P_{L_f} \times V_{L_f}$ ) para a temperatura de 75°C

A Figura 5.4 ilustra a simulação para um módulo fotovoltaico dos três casos mostrados anteriormente, ou seja, módulos fotovoltaicos com as temperaturas de 25°C, 50°C e 75°C. O código em MATLAB® 5.3, para este caso está contido no ANEXO E. Observa-se claramente a influência da temperatura das células fotovoltaicas na geração de energia elétrica. O aumento da temperatura reduz a tensão gerada na carga ( $V_{L_f}$ ) e conseqüentemente a potência ( $P_{L_f}$ ) tem seu valor reduzido.

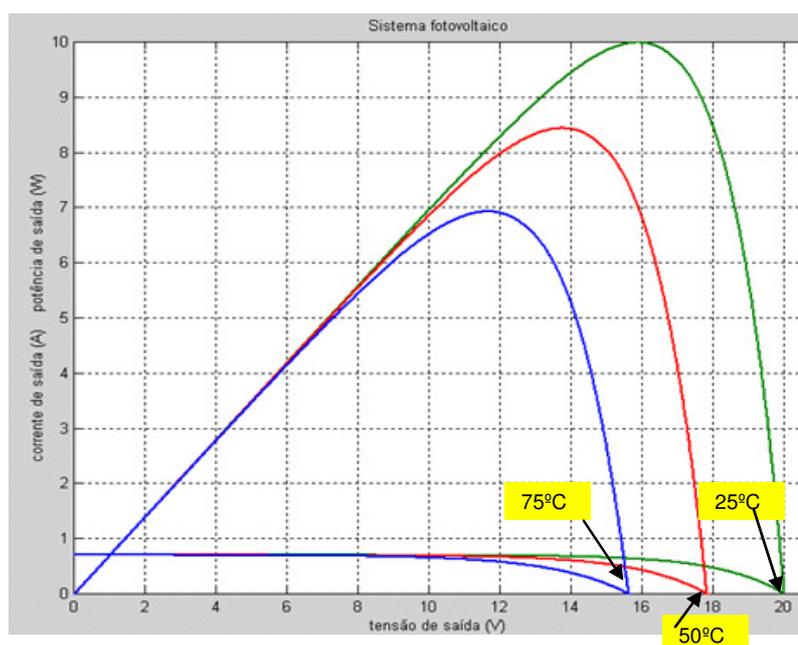


Figura 5.4 – Curvas ( $I_{L_f} \times V_{L_f}$  e  $P_{L_f} \times V_{L_f}$ ) para as temperaturas de 25°C, 50°C e 75°C

### 5.1.2 SISTEMA TERMOELÉTRICO

O modelo matemático desenvolvido no capítulo 3 para o sistema termoelétrico foi utilizado para a criação dos códigos para a simulação em MATLAB<sup>®</sup> 5.3.

A Figura 5.5 ilustra a simulação do módulo termoelétrico, evidenciando as curvas de tensão na carga ( $V_{L_t}$ ), potência na carga ( $P_{L_t}$ ) e corrente na carga ( $I_{L_t}$ ) X resistência de carga ( $R_{L_t}$ ). O código em MATLAB<sup>®</sup> 5.3, para este caso está contido no ANEXO F. Observa-se com o aumento do valor da resistência de carga, a elevação da tensão de saída e a redução da corrente de saída, já a potência tem seu valor elevado até o ponto de máxima potência ( $P_{max}$ ), conforme demonstrado no modelo matemático. O valor máximo se dá quando a resistência de carga ( $R_{L_t}$ ) iguala ao valor da resistência interna do módulo ( $R_{i_t}$ ), após este valor é observado uma redução na potência de saída. Para a simulação foi considerado o valor de  $3,49\Omega$  para a resistência interna do módulo, assim o ponto de máxima potência se dá quando a resistência de carga é igual a  $3,49\Omega$ .

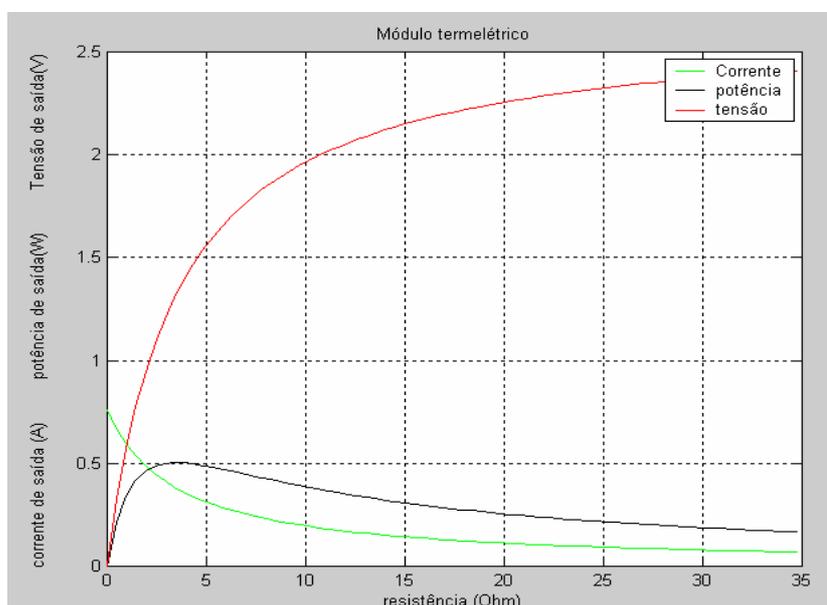


Figura 5.5 – Curvas ( $V_{L_t}$ ,  $P_{L_t}$ ,  $I_{L_t}$  X  $R_{L_t}$ ) para uma variação de resistência de carga de  $0\Omega$  a  $35\Omega$

A Figura 5.6 ilustra a simulação do módulo termoelétrico, evidenciando as curvas de tensão na carga ( $V_{L_t}$ ), potência na carga ( $P_{L_t}$ ) e corrente na carga ( $I_{L_t}$ ) X  $\Delta t_t$  ( temperatura do lado quente menos a temperatura do lado frio). O código em MATLAB<sup>®</sup> 5.3, para este caso está contido no ANEXO G. Considerou-se uma elevação de temperatura no lado quente de

30°C a 80°C com uma temperatura constante no lado frio e igual a 30°C. Observa-se com o aumento do valor de  $\Delta t_c$ , a elevação dos níveis de tensão, corrente e potência na carga.

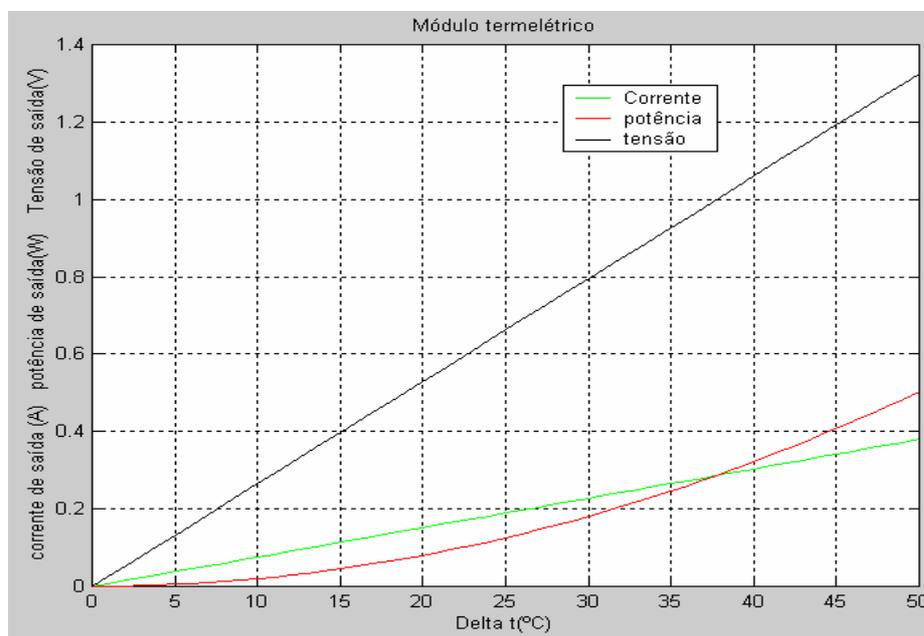


Figura 5.6 – Curvas ( $V_{Lc}$ ,  $P_{Lc}$ ,  $I_{Lc}$  X  $\Delta t_c$ ) para um  $\Delta t_c$  de 0°C a 50°C

A Figura 5.7 ilustra a simulação do módulo termelétrico, evidenciando as curvas de tensão na carga ( $V_{Lc}$ ), potência na carga ( $P_{Lc}$ ) e corrente na carga ( $I_{Lc}$ ) X  $\Delta t_c$  ( temperatura do lado quente menos a temperatura do lado frio). O código em MATLAB® 5.3, para este caso está contido no ANEXO H. Considerou-se uma redução de temperatura no lado quente de 80°C a 30°C com uma temperatura constante no lado frio e igual a 30°C. Observa-se com a redução do valor de  $\Delta t_c$ , a redução dos níveis de tensão, corrente e potência na carga. Este comportamento é exatamente o comportamento inverso ao apresentado na Figura 5.6.

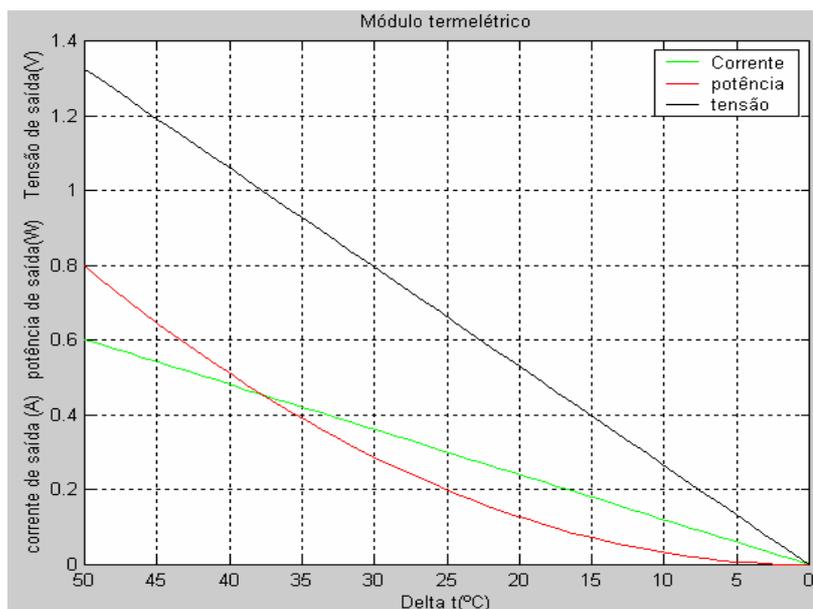


Figura 5.7 – Curvas ( $V_{L_t}$ ,  $P_{L_t}$ ,  $I_{L_t} \times \Delta t$ ) para um  $\Delta t$  de 50°C a 0°C

## 5.2 ENSAIOS

### 5.2.1 PRIMEIRO ENSAIO EXPERIMENTAL (MEDIÇÃO 1)

#### 5.2.1.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO - MEDIÇÃO 1

Variou-se a resistência de carga do módulo fotovoltaico e foram tomadas as medições de tensão, corrente, temperatura do módulo e temperatura ambiente, a potência foi calculada. Os resultados podem ser observados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Medição 1, dados do ensaio do sistema fotovoltaico

Módulo fotovoltaico						
Resistência		Tensão (Vf)	Corrente (Af)	Potência (PLf)	Temperatura ambiente (TA)	Temperatura do painel (TP)
curto circuito	0	0	0,62	0	30,1	54,3
R1	2,5	1,21	0,57	0,6897	30,2	54,5
R2	4,9	2,51	0,57	1,4307	30,3	54,2
R3	5,7	3,07	0,57	1,7499	30,1	54,3
R4	10,3	5,21	0,56	2,9176	30,4	54,4
R5	12,9	6,6	0,56	3,696	30,5	54,6
R6	15,2	7,81	0,55	4,2955	30,6	54,2
R7	22,2	9,3	0,54	5,022	30,5	54,2
R8	33,2	14,79	0,48	7,0992	30,5	54,3
R9	39,5	15,53	0,42	6,5226	30,5	54,1
R10	100,4	17,11	0,18	3,0798	30,6	54,3
R11	150	17,39	0,12	2,0868	30,4	54,3
R12	220	17,58	0,08	1,4064	30,5	54,3
R13	330	17,67	0,05	0,8835	30,3	54,3
R14	470	17,76	0,04	0,7104	30,4	54,4
R15	1500	17,86	0,01	0,1786	30,2	54,5
circuito aberto	$\infty$	17,95	0	0	30,3	54,4

A Figura 5.8 ilustra o comportamento da tensão de saída ou na carga, quando há uma variação na resistência de carga. Esta foi variada de  $2,5\Omega$  a  $1500\Omega$ , desta forma graficamente é possível observar um comportamento semelhante a tensão de curto circuito para o valor de resistência de  $2,5\Omega$  ou seja  $0V$  e uma tendência para a tensão de circuito aberto com o valor de resistência de  $1500\Omega$ .

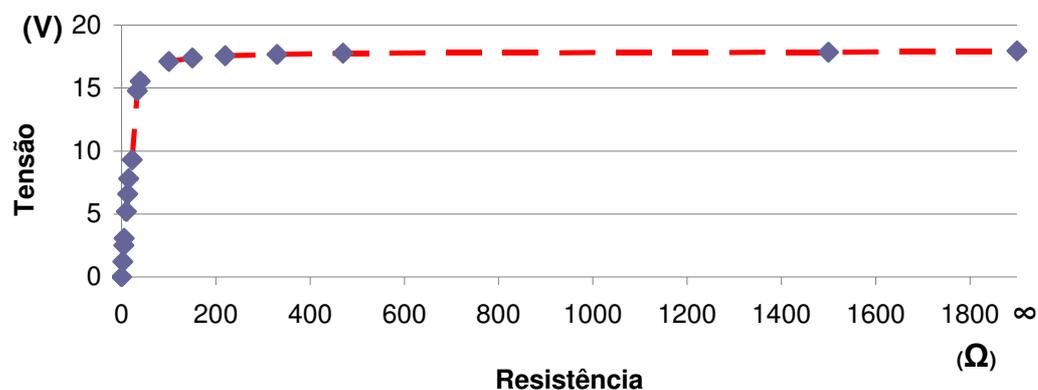


Figura 5.8 – Medição 1 – Tensão X resistência de carga módulo fotovoltaico

A Figura 5.9 ilustra o comportamento da corrente de saída ou na carga, quando há uma variação na resistência carga. Esta foi variada de  $2,5\Omega$  a  $1500\Omega$ , desta forma graficamente é possível observar um comportamento semelhante a corrente máxima para o valor de resistência de  $2,5\Omega$  ou seja  $0,6\text{A}$  e um comportamento próximo a corrente de circuito aberto para o valor de resistência de  $1500\Omega$  ou seja  $0\text{A}$ .

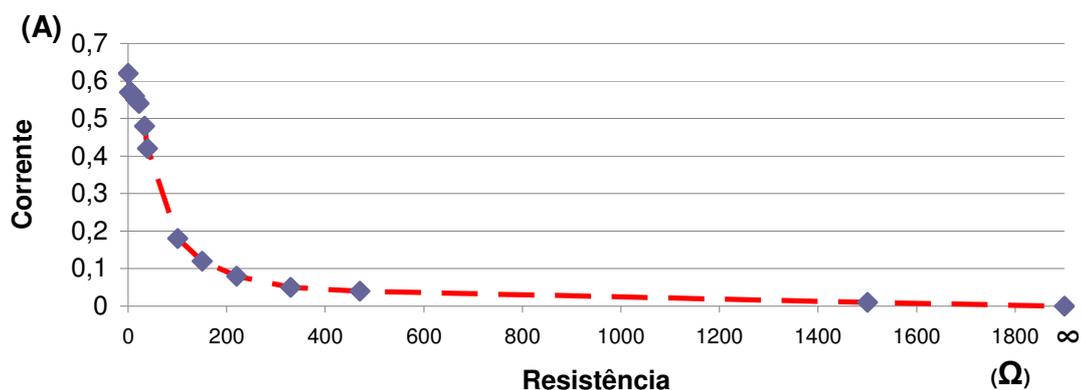


Figura 5.9 – Medição 1, corrente X resistência de carga para o módulo fotovoltaico

A Equação (2.20), que descreve o cálculo da potência na carga pode ser interpretada como o produto entre os valores dos gráficos das Figuras 5.8 e 5.9.

A Figura 5.10 ilustra o comportamento da potência de saída ou na carga, quando há uma variação na resistência de carga. Esta foi variada de  $2,5\Omega$  a  $1500\Omega$ , desta forma graficamente o comportamento da potência de saída tem seu nível elevado até atingir um determinado valor de resistência de carga, a partir daí tem seu valor reduzido.

Analisando os dados fornecidos pelo fabricante conforme ANEXO J onde  $V_{MPP}$  corresponde a  $V_{Lmaxf}$  e  $I_{MPP}$  corresponde a  $I_{Lmaxf}$ , e utilizando a Equação (2.23), tem-se o valor de  $R_{Lmaxf}$  igual a  $27,5\Omega$ . Pelo ensaio realizado a resistência que apresentou a maior potência foi a de valor igual a  $33,2\Omega$ , valor próximo ao teórico. O valor da potência está em torno de  $7\text{W}$ , menor que o valor de  $10\text{W}$  nominal para este módulo, desta forma observa-se a influência da temperatura comprovando o comportamento demonstrado no modelo matemático. Como é apresentado na Equação (2.23) do modelo matemático, é possível observar graficamente um valor de resistência de carga onde sua potência é máxima para o ensaio realizado.

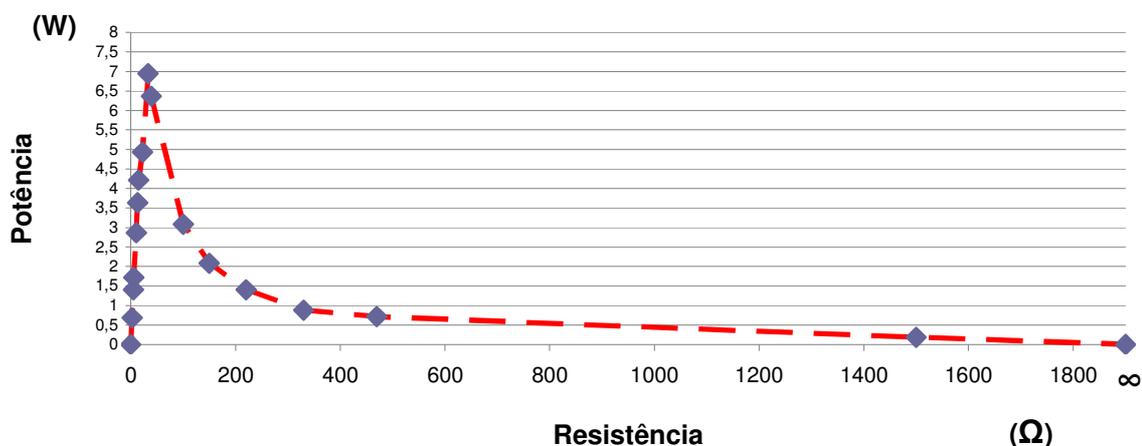


Figura 5.10 – Medição 1, potência X resistência de carga para o módulo fotovoltaico

A Figura 5.11 ilustra o gráfico da curva característica I – V de um módulo fotovoltaico. A resistência de carga foi variada de  $2,5\Omega$  a  $1500\Omega$ , e assim foi medido os valores de tensão e corrente de carga. Verifica-se a aproximação da curva característica demonstrada na teoria, é possível observar os valores de tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito. Esta curva obedece a Equação (2.9), apresentada no modelo matemático.

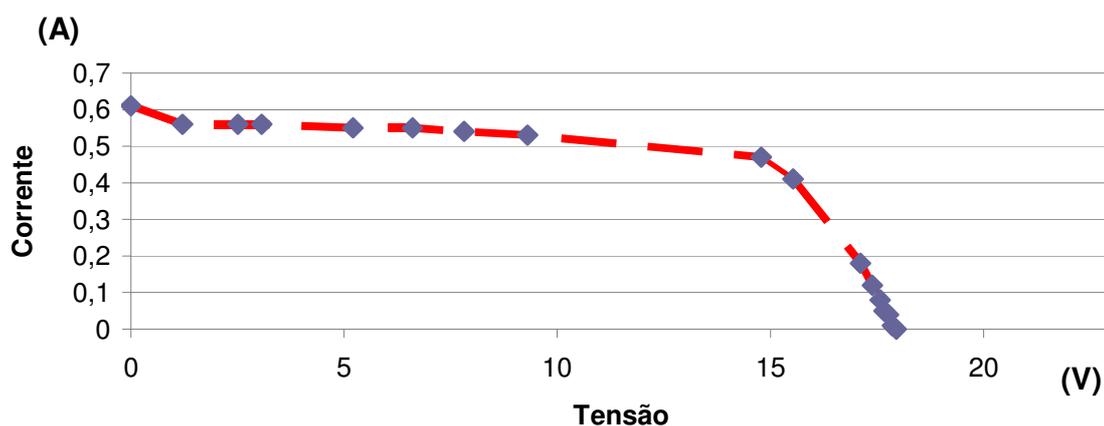


Figura 5.11 – Medição 1, corrente X tensão de saída para o módulo fotovoltaico

A Figura 5.12 ilustra o gráfico da curva característica P – V de um módulo fotovoltaico. A resistência de carga foi variada de  $2,5\Omega$  a  $1500\Omega$ , e assim foi medido os valores de tensão, corrente de carga e logo após foi calculado a potência de carga. Verifica-se

a aproximação da curva característica demonstrada na teoria, é possível observar o valor da potência máxima de carga ou de saída. Esta curva obedece a Equação (2.21), apresentada no modelo matemático.

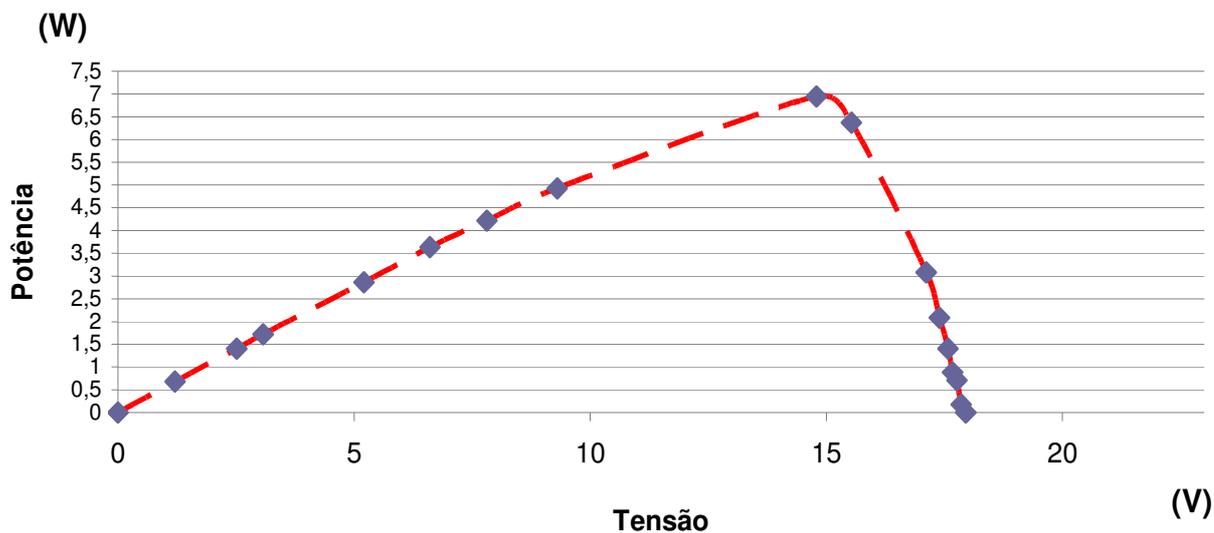


Figura 5.12 – Medição 1, potência X tensão na carga para o módulo fotovoltaico

### 5.2.1.2 SISTEMA TERMOELÉTRICO - MEDIÇÃO 1

O módulo termoelétrico foi acoplado a uma resistência de carga de valor igual a  $5,7\Omega$ . Durante trinta minutos, foram realizadas as medições das variáveis envolvidas no sistema. A Tabela 5.2 ilustra os dados coletados durante o ensaio.

Tabela 5.2 - Medição 1, dados do ensaio do sistema termoeletrico

Módulo termoeletrico								
Tempo (min)	Temperatura lado quente (TQ)	Temperatura lado frio (TF)	$\Delta T$	Temperatura ambiente (TA)	Temperatura do painel (TP)	Tensão na carga (Vt)	Corrente na carga (At)	Potência na carga
1	54,3	29,5	24,8	30,2	54,5	0,59	0,103	0,061
2	54,2	29,7	24,5	30,4	54,4	0,58	0,102	0,059
3	54	30,1	23,9	30,3	54,3	0,57	0,099	0,056
4	54,3	30	24,3	30,5	54,3	0,57	0,101	0,058
5	54,1	30,5	23,6	30,4	54,3	0,56	0,098	0,055
6	54,1	32,1	22	30,5	54,1	0,52	0,091	0,047
7	54,2	33,4	20,8	30,5	54,2	0,49	0,086	0,042
8	54,2	34,4	19,8	30,6	54,2	0,47	0,082	0,039
9	54,4	34,6	19,8	30,5	54,6	0,47	0,082	0,039
10	54,3	34,7	19,6	30,4	54,4	0,46	0,081	0,037
11	54	35	19	30,1	54,3	0,45	0,079	0,036
12	54	35,1	18,9	30,3	54,2	0,45	0,078	0,035
13	54,2	35,7	18,5	30,2	54,5	0,44	0,077	0,034
14	55	35,9	19,1	30,8	55	0,45	0,079	0,036
15	54,8	36	18,8	30,9	55,2	0,44	0,078	0,034
16	54,9	36,4	18,5	30,9	55,3	0,44	0,077	0,034
17	55,2	37	18,2	30,8	55,3	0,43	0,076	0,033
18	55,3	37,6	17,7	30,9	55,4	0,42	0,073	0,031
19	55,4	38,3	17,1	31	55,5	0,4	0,071	0,028
20	55,7	39,2	16,5	31,2	55,8	0,39	0,068	0,027
21	55,4	39	16,4	31,1	55,5	0,39	0,068	0,027
22	55,3	40,5	14,8	31,3	55,4	0,35	0,061	0,021
23	55,2	41,3	13,9	31,2	55,3	0,33	0,058	0,019
24	55,4	42,5	12,9	31	55,5	0,31	0,054	0,017
25	55,4	42,7	12,7	31,3	55,3	0,3	0,053	0,016
26	55,2	43,5	11,7	31,3	55,3	0,28	0,049	0,014
27	55,4	44	11,4	31,3	55,5	0,27	0,047	0,013
28	55,2	45,1	10,1	31,2	55,3	0,24	0,042	0,01
29	55,3	45,8	9,5	31,1	55,4	0,22	0,039	0,009
30	55,4	46,5	8,9	31	55,5	0,21	0,037	0,008

A Figura 5.13 ilustra o comportamento da temperatura ambiente durante os trinta minutos de ensaio para o sistema termoeletrico. Observa-se uma ligeira elevação de 1°C durante o período do ensaio o que não representou problemas.

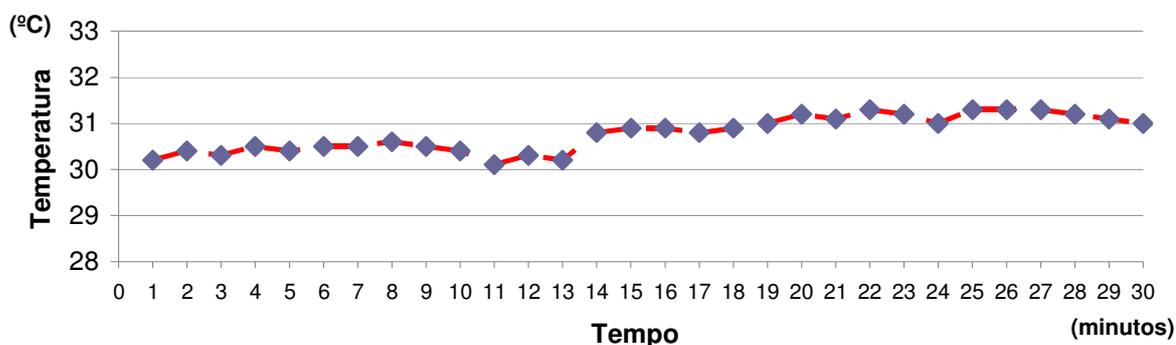


Figura 5.13 – Medição 1, temperatura ambiente X tempo de ensaio

A Figura 5.14 ilustra o comportamento do  $\Delta t_t$  do módulo termoelétrico que é a diferença entre a temperatura do lado quente e a do lado frio no período do ensaio realizado. Observa-se uma redução acentuada no valor do  $\Delta t_t$ . Esta queda acentuada influencia diretamente na redução do nível de geração de energia elétrica pelo módulo termoelétrico. A Equação (3.9) do modelo matemático traz o cálculo de  $\Delta t_t$  evidenciando sua relação entre as temperaturas dos lados quente e frio de um módulo termoelétrico.

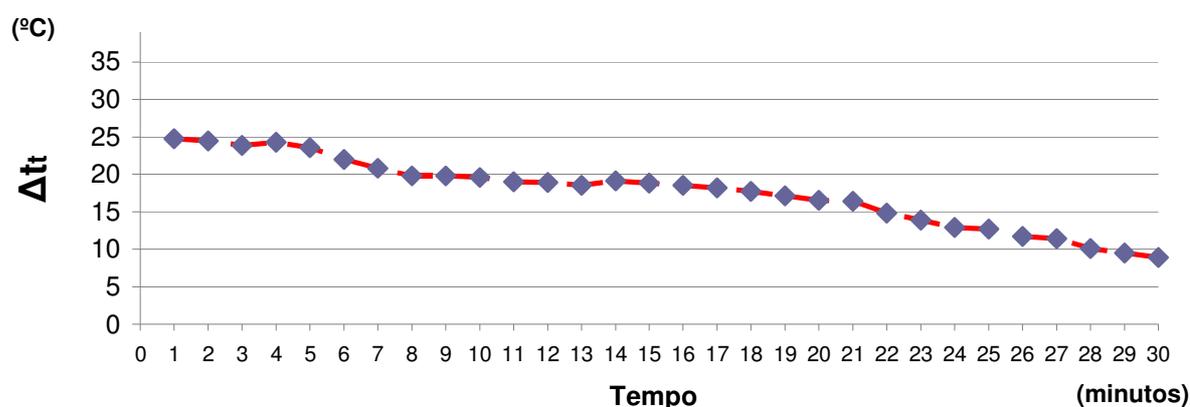


Figura 5.14 – Medição 1,  $\Delta t_t$  do módulo termoelétrico X tempo de ensaio

A Figura 5.15 ilustra o comportamento da temperatura do lado quente e lado frio do módulo termoelétrico. Observa-se uma ligeira elevação de aproximadamente  $1^\circ\text{C}$  na temperatura do lado quente durante o período amostrado, já no lado frio observa-se uma elevação de temperatura considerável durante o ensaio, no primeiro instante a temperatura está em torno de  $29,5^\circ\text{C}$  e após o trigésimo minuto ela já está em  $46,5^\circ\text{C}$ , uma elevação de aproximadamente  $17^\circ\text{C}$ . Este fato representa um obstáculo técnico para o ensaio.

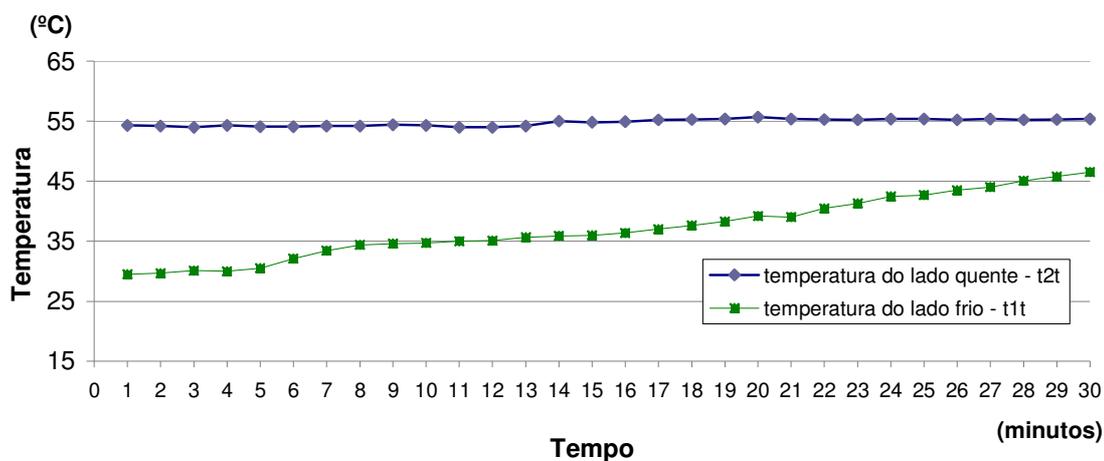


Figura 5.15 – Medição 1, Temperatura do lado quente e lado frio X tempo de ensaio

Analisando Figura 5.16, é possível verificar alguns fenômenos que influenciaram na elevação do nível de temperatura do lado frio do módulo termoelétrico.

A áreas de atenção representam pontos onde é possível a propagação do calor do lado quente para o lado frio e dissipador de calor, dessa forma é necessário preencher essas áreas com material isolante adequado, composto de poliuretano, de forma a minimizar a elevação de temperatura do lado frio e dissipador.

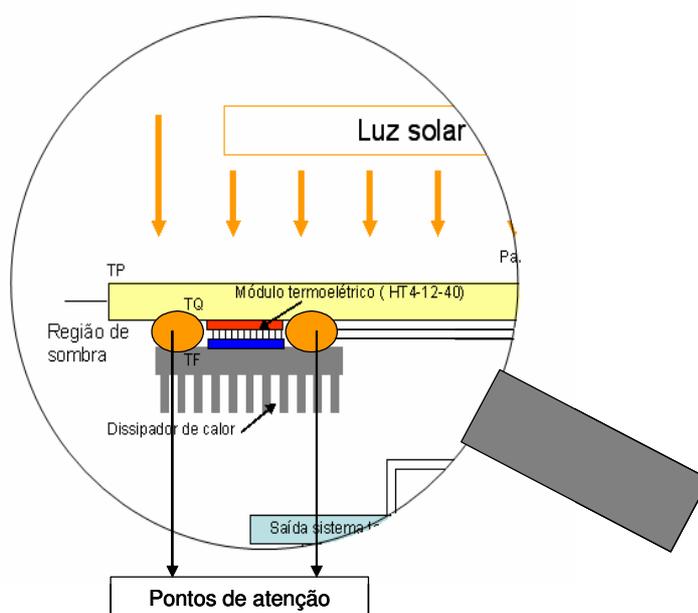


Figura 5.16 – Análise do problema da propagação de calor

Em consequência a redução do  $\Delta t_i$ , a Figura 5.17 ilustra a redução da tensão de saída. Isto comprova a relação matemática encontrada na Equação (3.7).

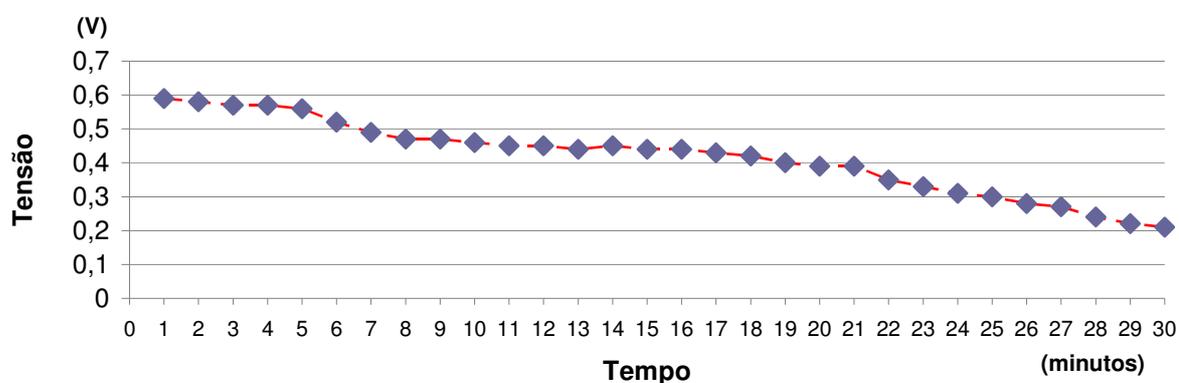


Figura 5.17 – Medição 1, tensão na carga módulo termoeletrico X tempo de ensaio

A Figura 5.18 ilustra a redução da corrente de saída para uma determinada carga em função da redução do  $\Delta t_i$  do módulo termoeletrico.

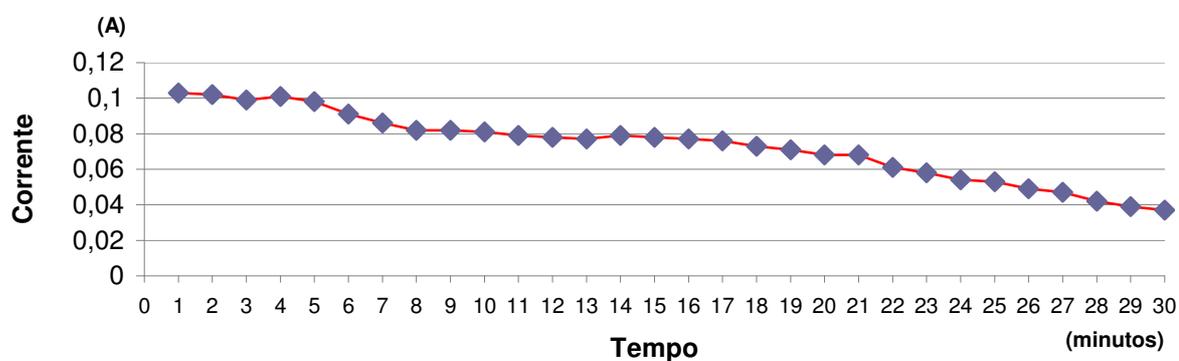


Figura 5.18 – Medição 1, corrente na carga do módulo termoeletrico X tempo de ensaio

A Figura 5.19 ilustra a redução da potência de saída para uma determinada carga em função da redução do  $\Delta t_i$  do módulo termoeletrico.

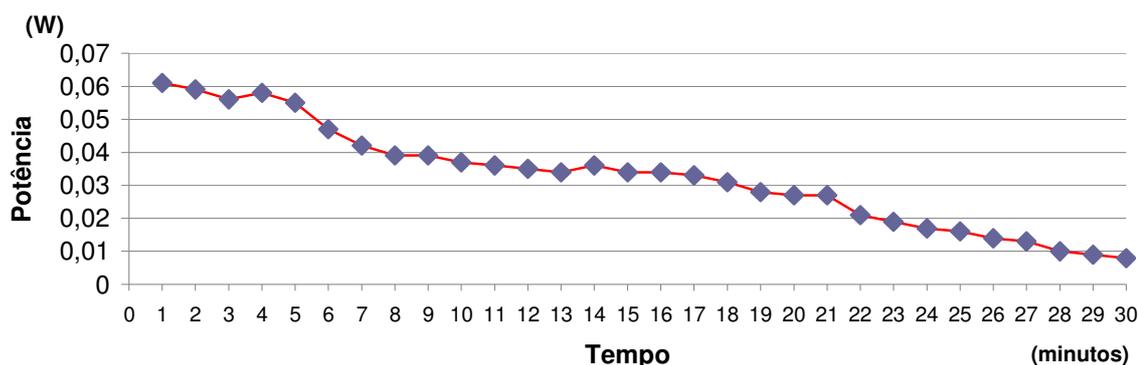


Figura 5.19 – Medição 1, potência na carga do módulo termoeletrico X tempo de ensaio

Os três gráficos: tensão, corrente e potência na carga demonstram a consequência imediata da elevação descontrolada da temperatura no lado frio. Todos esses gráficos mostram reduções dos seus níveis. Dessa forma é comprovada a necessidade de atuação sobre a variável – temperatura do lado frio (TF). Em função disto, foi utilizado manta de poliuretano como isolante térmico para ser empregado nos pontos considerados de atenção ilustrados na Figura (5.16).

## 5.2.2 SEGUNDO ENSAIO EXPERIMENTAL (MEDIÇÃO 2)

Após atuação sobre o problema identificado na medição 1 com o módulo termoeletrico, novas medições foram realizadas. O início das medições foi realizado após um período de estabilização das temperaturas do lado quente e frio do módulo termoeletrico, de forma a observar a ação do isolante térmico empregado. A medição 2, também foi importante para uma melhor compreensão da influência da temperatura no módulo fotovoltaico.

### 5.2.2.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO - MEDIÇÃO 2

Novas medições, das variáveis envolvidas, foram realizadas para o sistema fotovoltaico, variando a resistência de carga de  $2,2\Omega$  a  $1500\Omega$ . A Tabela 5.3 ilustra os dados coletados durante o ensaio. Observou-se um aumento da temperatura do painel fotovoltaico em função da temperatura ambiente maior no dia do ensaio.

Tabela 5.3 – Medição 2, dados do ensaio do sistema fotovoltaico

Módulo fotovoltaico						
Resistência		Tensão (Vf)	Corrente (Af)	Potência (PLf)	Temperatura ambiente (TA)	Temperatura do painel (TP)
curto circuito	0	0	0,67	0	35,1	64
R1	2,5	1,63	0,65	1,0595	35	64
R2	4,9	3,44	0,64	2,2016	35,2	64,1
R3	5,7	3,99	0,63	2,5137	35,1	64,2
R4	10,3	6,88	0,61	4,1968	35,1	64,3
R5	12,9	8,61	0,6	5,166	35,2	64,1
R6	15,2	9,95	0,56	5,572	35,1	64,3
R7	22,2	11,83	0,48	5,6784	35,2	64,1
R8	33,2	14,2	0,44	6,248	35,2	64,2
R9	39,5	14,6	0,35	5,11	35,2	64,3
R10	100,4	16	0,15	2,4	35,3	64,2
R11	150	16,09	0,1	1,609	35,3	64,1
R12	220	16,12	0,07	1,1284	35,2	64,2
R13	330	16,2	0,04	0,648	35,3	64,1
R14	470	16,26	0,03	0,4878	35,3	64,1
R15	1500	16,64	0,01	0,1664	35,2	64,2
circuito aberto	$\infty$	16,83	0	0	35,2	64,1

Observa-se claramente uma redução da potência de saída frente aos dados coletados na medição 1, que se dá em função do aumento da temperatura do sistema.

A Figura 5.20 e a Figura 5.21 ilustram respectivamente a potência X resistência de carga e a potência X a tensão na carga, observa-se em comparação com as Figuras 5.10 e 5.12 relativas a medição 1, uma redução do nível de potência na carga.

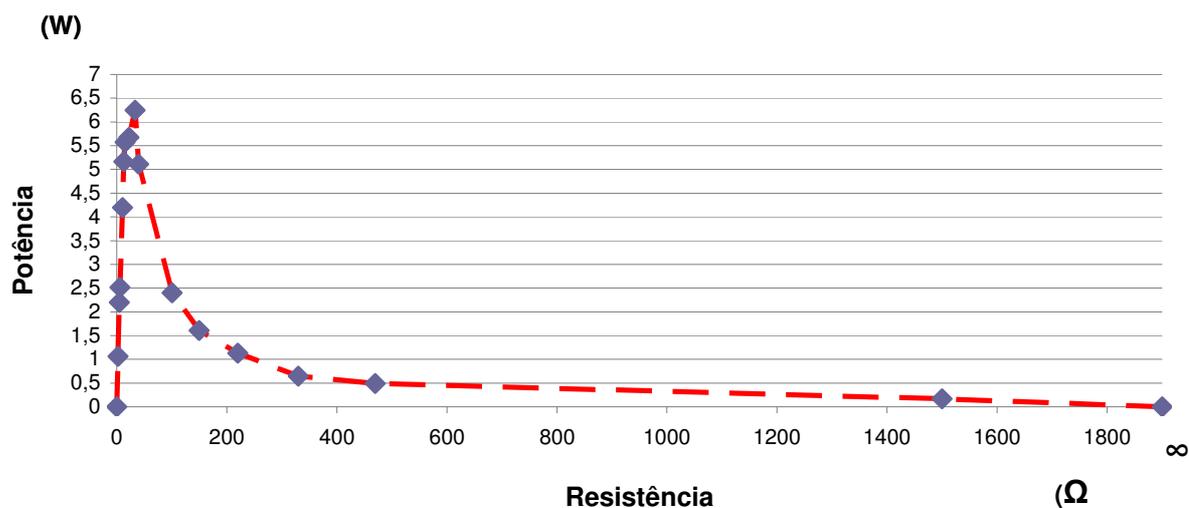


Figura 5.20 – Medição 2, potência X resistência de carga no sistema fotovoltaico

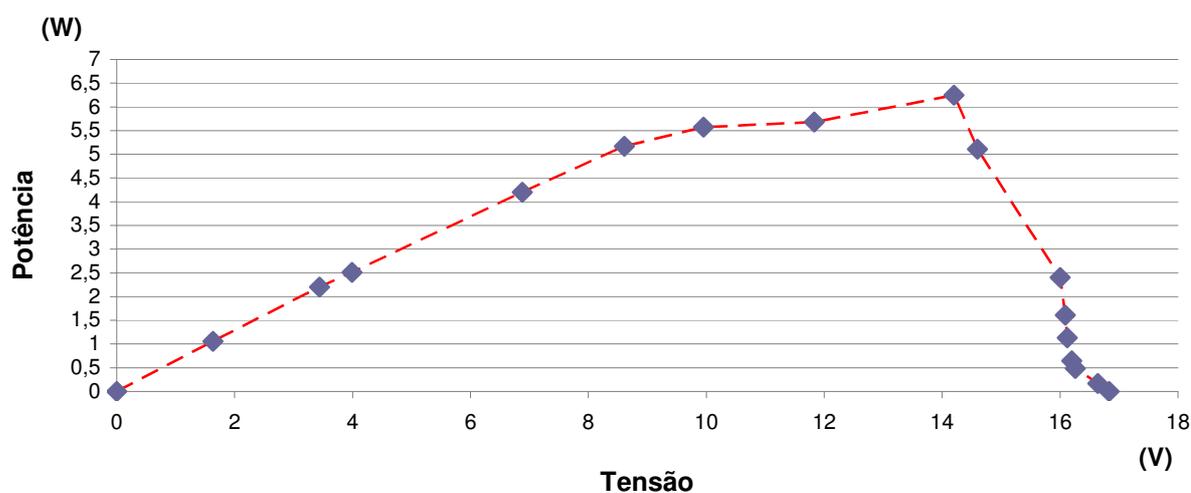


Figura 5.21 – Medição 2, potência X tensão na carga no sistema fotovoltaico

A curva característica do módulo fotovoltaico durante o ensaio na medição, conforme ilustra a Figura 5.22, têm seu valor de tensão de circuito aberto reduzida em relação a medição 1.

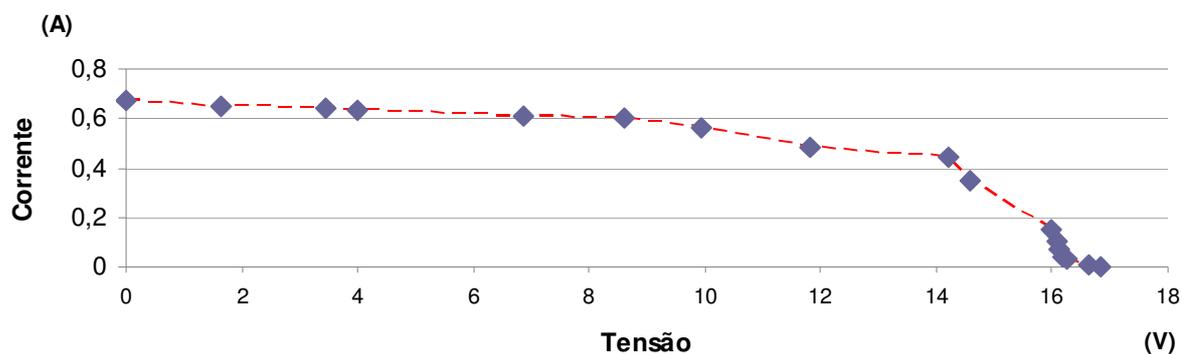


Figura 5.22 – Medição 2, Corrente X tensão na carga no sistema fotovoltaico

Sob uma análise geral a Tabela 5.3, referente a medição 2 em comparação com a Tabela 5.1 referente a medição 1, evidencia uma redução nos níveis de tensão de saída e consequente redução nos níveis de potência de saída em função do aumento da temperatura do módulo fotovoltaico.

#### 5.2.2.2 SISTEMA TERMOELÉTRICO - MEDIÇÃO 2

Após instalação de isolante térmico para tratamento do problema encontrado conforme evidenciado na Figura 5.16 da medição 1, novas medições foram tomadas. A Tabela 5.4 ilustra os dados coletados para o ensaio do sistema termoelétrico.

Tabela 5.4 – Medição 2, dados do ensaio do sistema termoeletrico

Módulo termoeletrico								
Tempo (min)	Temperatura lado quente (TQ )	Temperatura lado frio (TF )	$\Delta T$	Temperatura ambiente (TA)	Temperatura do painel (TP)	Tensão na carga (Vt)	Corrente na carga ( At)	Potência na carga
1	64,1	47,1	17	38,2	64,14	0,402	0,071	0,029
2	64,2	47,5	16,7	38,4	64,24	0,395	0,069	0,027
3	64,3	47,3	17	38,3	64,34	0,402	0,071	0,029
4	64,1	47,6	16,5	38,5	64,14	0,39	0,068	0,027
5	64,1	47,3	16,8	38,4	64,14	0,397	0,07	0,028
6	64	47,2	16,8	38,5	64,04	0,397	0,07	0,028
7	64,1	47,3	16,8	38,5	64,14	0,397	0,07	0,028
8	64,2	47,4	16,8	38,6	64,24	0,397	0,07	0,028
9	64,2	47,7	16,5	38,5	64,24	0,39	0,068	0,027
10	64,1	47,6	16,5	38,4	64,14	0,39	0,068	0,027
11	64,3	47,7	16,6	38,1	64,34	0,393	0,069	0,027
12	64,1	47,6	16,5	38,3	64,14	0,39	0,068	0,027
13	64,2	47,7	16,5	38,2	64,24	0,39	0,068	0,027
14	64,1	47,8	16,3	38,8	64,14	0,386	0,068	0,026
15	64,2	47,9	16,3	38,9	64,24	0,386	0,068	0,026
16	64	47,9	16,1	38,9	64,04	0,381	0,067	0,026
17	64,3	47,8	16,5	38,8	64,34	0,39	0,068	0,027
18	64,1	47,7	16,4	38,9	64,14	0,388	0,068	0,026
19	64,2	48,1	16,1	39	64,24	0,381	0,067	0,026
20	64,3	48,1	16,2	39,2	64,34	0,383	0,067	0,026
21	64,1	48,4	15,7	39,1	64,14	0,371	0,065	0,024
22	64,2	48,5	15,7	39,3	64,24	0,371	0,065	0,024
23	64,1	48,4	15,7	39,2	64,14	0,371	0,065	0,024
24	64,3	48,5	15,8	39	64,34	0,374	0,066	0,025
25	64,2	48,3	15,9	39,3	64,24	0,376	0,066	0,025
26	64,3	48,4	15,9	39,3	64,34	0,376	0,066	0,025
27	64,2	48,2	16	39,3	64,24	0,378	0,066	0,025
28	64,2	48,3	15,9	39,2	64,24	0,376	0,066	0,025
29	64,2	48,4	15,8	39,1	64,24	0,374	0,066	0,025
30	64,1	48,3	15,8	39	55,5	0,374	0,066	0,025

Observa-se na Tabela 5.4 da medição 2 em comparação com as cinco últimas medições da Tabela 5.2 da medição 1, um aumento no nível do  $\Delta t$ . Este aumento foi aproximadamente de 6,9°C, saltando de aproximadamente 8,9°C no final da medição 1 para 15,8°C na medição 2 no trigésimo minuto do ensaio.

A Figura 5.23 ilustra o  $\Delta t$  X tempo de ensaio e demonstra a estabilidade da variável. Como o  $\Delta t$  é a diferença entre a temperatura do lado quente e o lado frio do módulo termoeletrico, a Figura 5.24 ilustra o comportamento das variáveis temperatura do lado quente e lado frio. Observa-se uma estabilização na temperatura do lado frio, que na medição 1 não houve, este avanço se deu em função da instalação de isolante térmico nos pontos de atenção descritos na Figura 5.16.

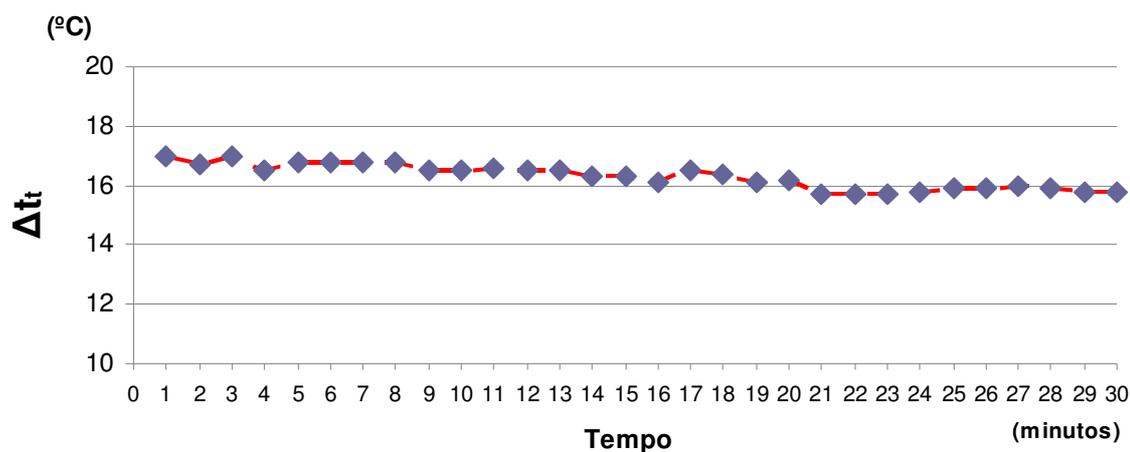


Figura 5.23 – Medição 2,  $\Delta t$  do módulo termoeletrico X tempo de ensaio

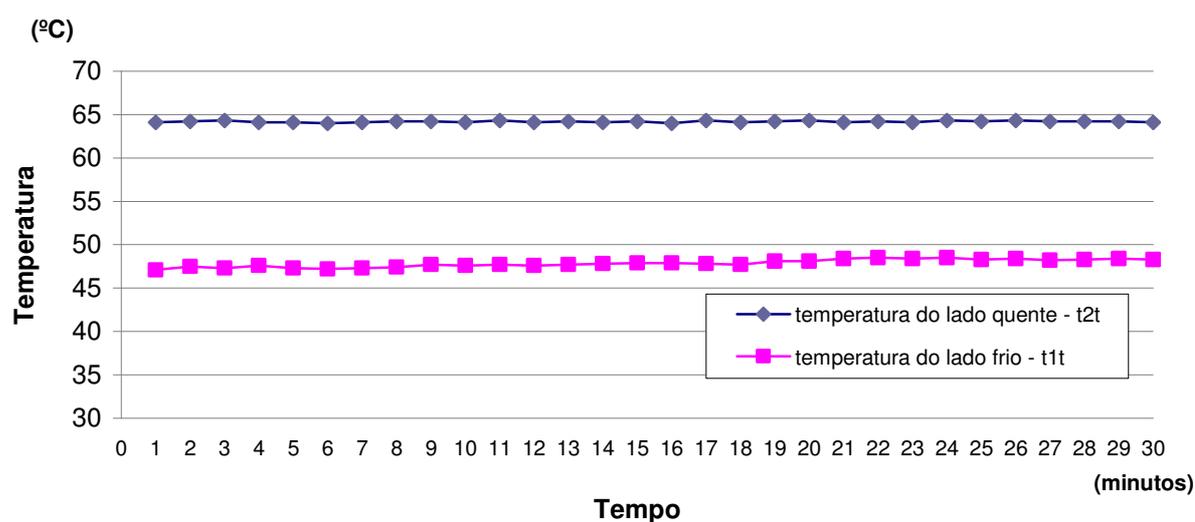


Figura 5.24 – Medição 2, temperatura do lado quente e lado frio do módulo termoeletrico X tempo de ensaio

A Figura 5.25 ilustra a potência na carga X tempo do ensaio, observa-se que a potência se manteve estável durante o ensaio. O que não aconteceu na medição 1.

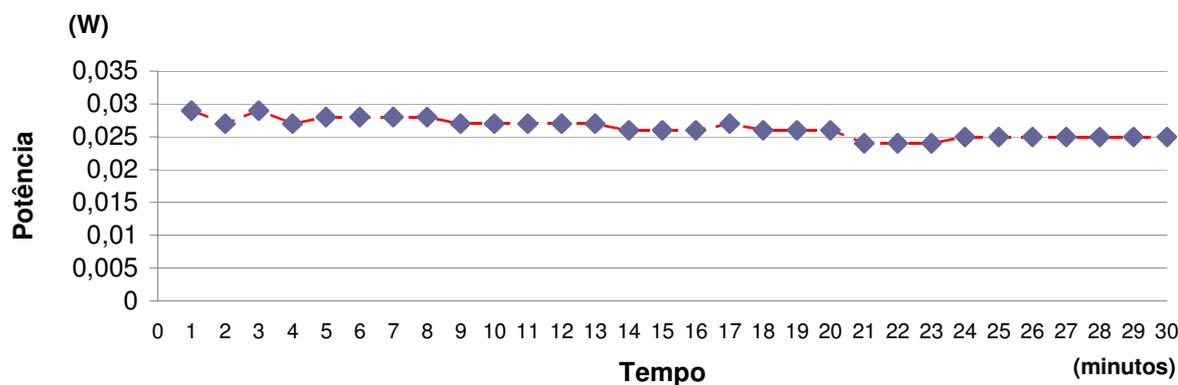


Figura 5.25– Medição 2, potência na carga do módulo termoeletrico X tempo de ensaio

Como a medição 2 apresentou estabilidade em relação ao  $\Delta t$ , e dessa forma têm-se maior estabilidade na geração de energia elétrica é interessante a realização de um novo teste, porém agora o interessante é variar a resistência de carga de forma a medir a tensão e corrente na carga e calcular a potência. Na Tabela 5.5 é ilustrado os dados obtidos após medições para o sistema termoeletrico.

Tabela 5.5 - Medição 2, ensaio com variação da resistência de carga do sistema termoeletrico

Resistência de carga		$\Delta t$	Tensão na carga (Vt)	Corrente na carga (At)	Potência na carga (PLt)
R1	2,5	15,8	0,287	0,116	0,033
R2	4,9	16	0,406	0,084	0,034
R3	5,7	15,3	0,412	0,073	0,03
R4	10,3	16	0,519	0,051	0,026
R5	12,9	15,8	0,54	0,042	0,023
R6	15,2	15,9	0,562	0,037	0,021
R7	22,2	15,8	0,593	0,027	0,016
R8	33,2	15,9	0,625	0,019	0,012

A Figura 5.26 mostra o comportamento da tensão e corrente de carga através do gráfico. Com o aumento da resistência de carga, há um aumento da tensão e uma redução na corrente de carga, dessa forma o produto entre os dois que é a potência na carga apresenta um ponto de máximo e logo após sofre redução em seu nível.

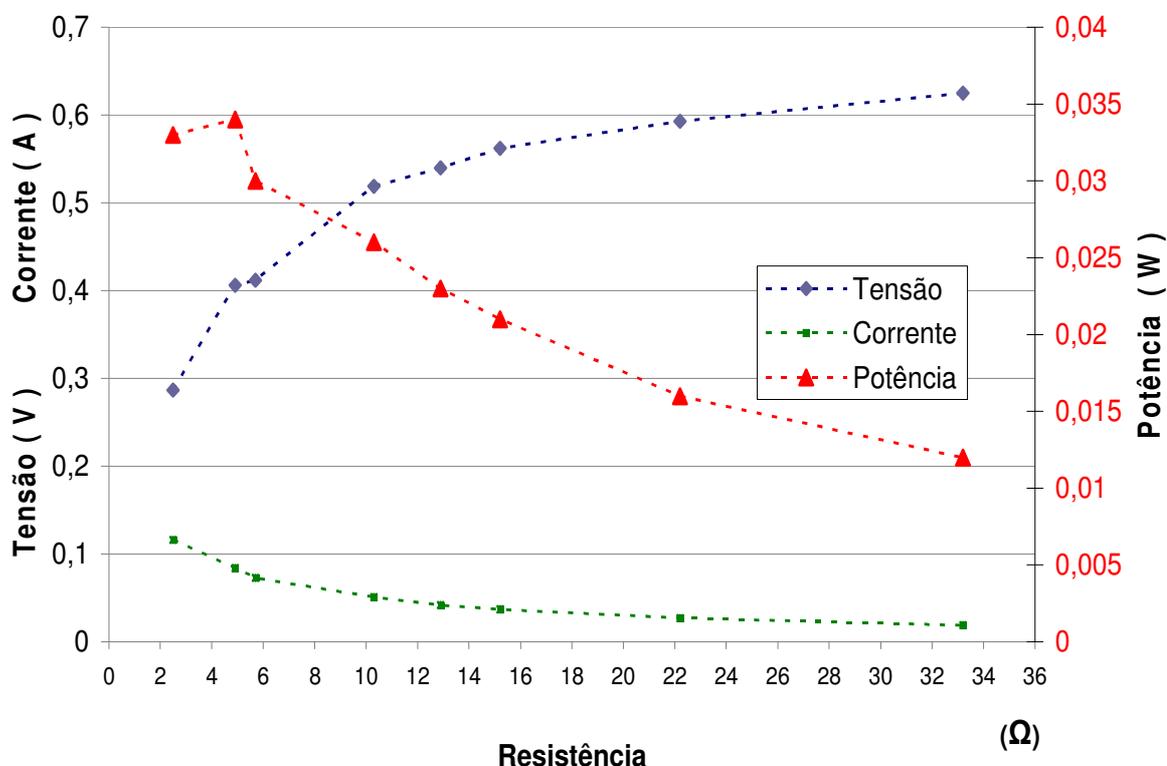


Figura 5.26– Medição 2, tensão, corrente e potência X resistência de carga do módulo termoeletrico

### 5.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS SIMULAÇÕES E OS ENSAIOS

#### 5.3.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO

A Figura 5.27 ilustra a simulação do modelo matemático frente às medições obtidas no ensaio da medição 1, para a simulação foi considerado uma temperatura do módulo aproximadamente igual a encontrada no ensaio conforme Tabela 5.1 referente a medição 1, dessa forma a temperatura utilizada foi a de 54°C para a simulação, é possível observar uma semelhança entre a curva de corrente simulada e os pontos de medição de corrente provenientes do ensaio. O mesmo acontece com a curva da potência simulada frente aos pontos de potência calculada, que nada mais é que o produto da tensão pela corrente, ambas obtidas no ensaio. O código para esta simulação pode ser consultado no ANEXO H.

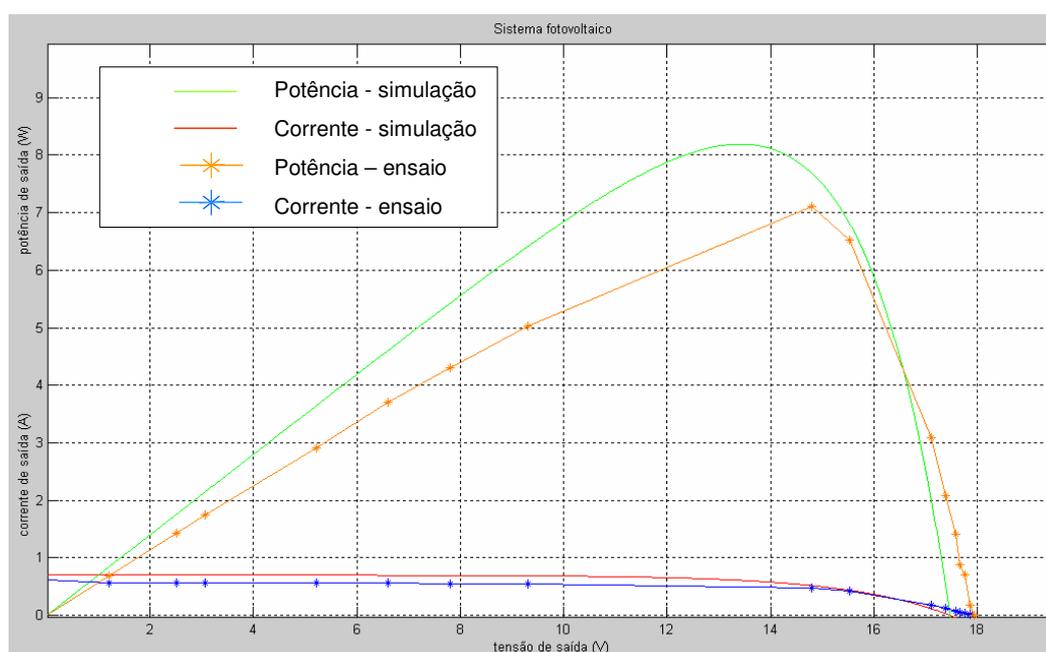


Figura 5.27– Simulação e ensaio do sistema fotovoltaico

A Figura 5.28 apresenta o resultado das medições 1 e 2 contidos respectivamente nas Tabelas 5.1 e 5.3 para o sistema fotovoltaico. Claramente através dos gráficos é possível observar dois pontos importantes: a potência máxima atingida na medição 2 é menor do que na medição 1 e o mesmo acontece com a tensão de circuito aberto. Com base na teoria apresentada pode-se atribuir estes fatos a elevação de temperatura da célula fotovoltaica da medição 1 para a medição 2, de fato consultando as Tabelas 5.1 e 5.3 verifica-se que a temperatura média do painel durante o ensaio na medição 1 foi de 54,3°C já durante a medição 2, a temperatura média foi de 64,1°C. Comportamento idêntico foi desenvolvido na simulação e ilustrado através da Figura 5.4.

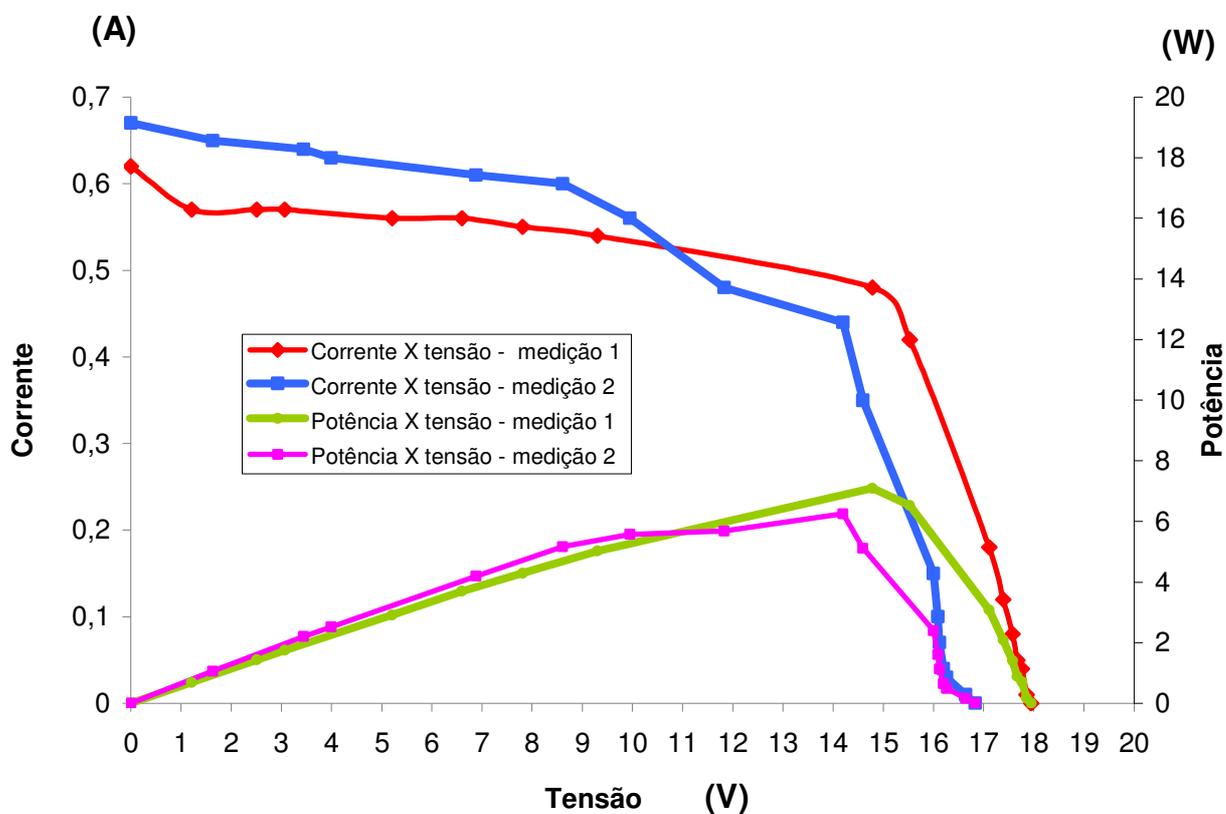


Figura 5.28 – Comparação entre as medições 1 e 2 do módulo fotovoltaico

### 5.3.2 SISTEMA TERMOELÉTRICO

A Figura 5.29 ilustra a simulação do modelo matemático frente as medições obtidas nos ensaios, é possível observar uma semelhança entre a curva de tensão X resistência de carga simulada e os pontos medidos durante o ensaio. A corrente tem comportamento idêntico, pois analisando graficamente observa-se uma semelhança entre as curvas simulada e os pontos medidos durante o ensaio. A potência, até porque representa o produto das duas variáveis anteriores tem comportamento semelhante. O código para esta simulação pode ser consultado no ANEXO I.

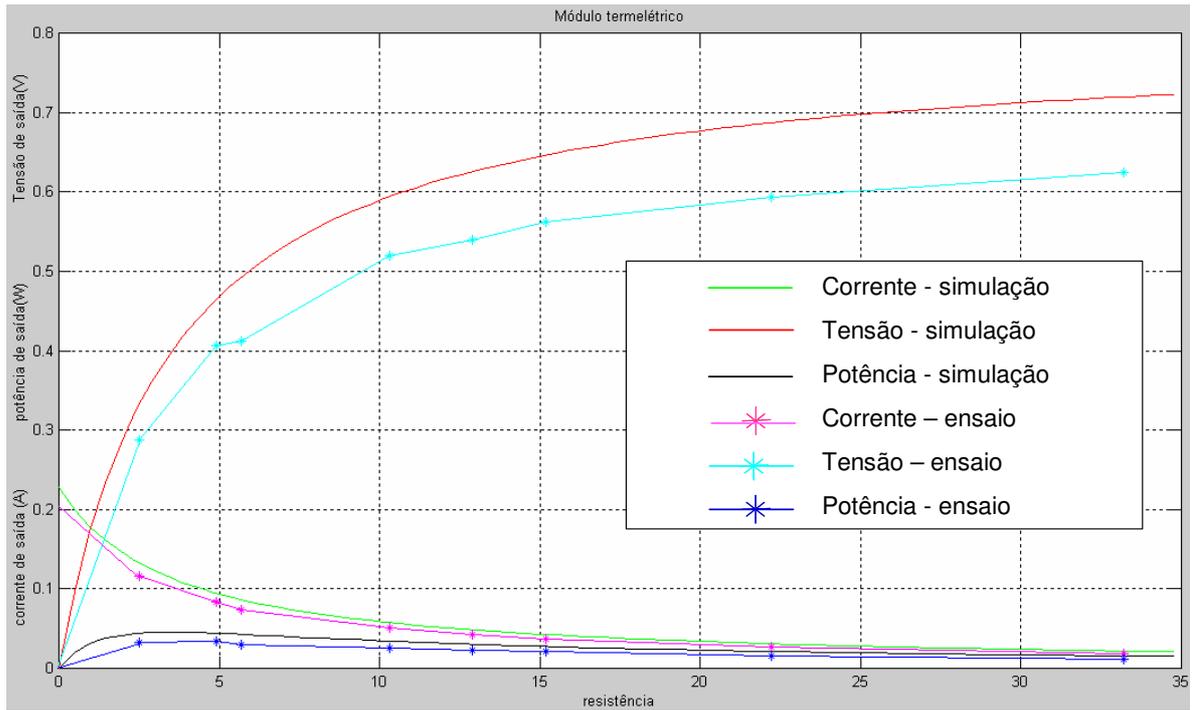


Figura 5.29 – Simulação e ensaio do sistema termelétrico

## 6 CONCLUSÃO

Tanto a energia solar, que hoje é uma das fontes alternativas que tem merecido muita atenção, quanto o desenvolvimento dos semicondutores, estão proporcionando avanços significativos tanto na geração de energia elétrica pelo efeito fotovoltaico quanto pelo efeito termoelétrico.

Através dos modelos matemáticos apresentados neste trabalho para os sistemas fotovoltaico e termoelétrico, foi possível observar a influência da temperatura nos dois sistemas. As simulações no MATLAB<sup>®</sup> 5.3 com base nos modelos matemáticos apresentados, mostraram graficamente a influência da temperatura na redução da tensão de saída gerada para o módulo fotovoltaico, já para o módulo termoelétrico foi possível verificar esta influência através da diferença de temperatura entre os lados quente e frio, onde foi observada a relação direta entre a diferença de temperatura e a tensão gerada pelo efeito Seebeck. Como a potência na carga para ambos os sistemas é uma relação direta com a tensão gerada, a mesma foi conseqüentemente influenciada.

Os resultados obtidos nos ensaios quando comparados com os resultados simulados, não mostraram grandes desvios, desta forma foi validado o uso dos modelos matemáticos apresentados como base de análise. Durante os ensaios foi observado a necessidade de maior controle da temperatura do lado frio, pois no primeiro ensaio não foi conseguida uma boa estabilização desta temperatura, já no segundo ensaio através de análise do problema observado de propagação de calor para o lado frio do módulo termoelétrico, foi conseguida uma melhor estabilização após instalação de isolante térmico entre as laterais do painel fotovoltaico e do módulo termoelétrico.

De uma maneira geral o objetivo foi atingido, pois a energia térmica que reduziu a potência entregue a uma determinada carga no sistema fotovoltaico, foi aproveitada pelo sistema termoelétrico para geração de energia elétrica, a partir do momento que foi conseguida uma estabilidade na temperatura do lado frio do módulo com a ajuda de isolante térmico, dessa forma a diferença de temperatura entre os lados quente e frio ficou mais elevada gerando por consequência do efeito Seebeck mais energia elétrica. Para o módulo termoelétrico o módulo fotovoltaico é utilizado como meio de propagação da energia térmica proveniente do Sol.

Foi observado que para um melhor aproveitamento da potência gerada pelos sistemas apresentados, é importante a análise e a determinação do valor da resistência de carga, pois desta forma pode-se maximizar a potência entregue pelo sistema na carga.

O módulo termoelétrico que foi aplicado é especificado para refrigeração, apesar do mesmo ter se comportado de maneira satisfatória durante os ensaios, comprovando assim a relação de inversão entre os efeitos Peltier e Seebeck, a teoria mostra que existe diferença construtiva entre os modelos especificados para refrigeração e geração termoelétrica, desta forma para ensaios futuros sugere-se o emprego de módulos termoelétricos especificados para geração de energia elétrica.

Após instalação de isolante térmico entre as laterais dos módulos fotovoltaico e termoelétrico, foi observado no ensaio um melhor controle da temperatura do lado frio, porém foi observado que o dissipador está sofrendo elevação de temperatura através da troca de calor com o ambiente, influenciando assim na elevação da temperatura do lado frio. É necessário um foco maior para o sistema de dissipação de calor do sistema termoelétrico.

Sugere-se a continuidade da pesquisa para trabalhos futuros, com foco no sistema de isolamento térmico do lado frio do módulo termoelétrico com desenvolvimento e estudo de sistema de dissipação de calor.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, Edvaldo de Oliveira. **Propriedades físicas do semicondutor Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>**. Natal. 131p. Dissertação ( Mestrado em física ), Universidade federal do Rio Grande do Norte, Departamento de física teórica e experimental. 2007.
- CABRAL, C.V.T.; FILHO, D.O.; NETO, L.V.B.M.; DINIZ, A.S.A.C. **Gerador fotovoltaico: Modelagem e simulação**. REVENG. Engenharia na agricultura. Viçosa. p. 262 – 268. 2009.
- CAMARGO, J.R.; SANTOS, L.P.; SILVA, J.M.; SILVA, R.E. **Analysis and optimization of a thermoelectric cooling air system** – JP Journal of Heat and Mass Transfers, vol.3, No 1, p. 59-72, 2009.
- CAMARGO, J.R.; SANTOS, J.H.; CHAVES, C.A. **Experimental performance of thermoelectric modules applied to power generation**. 12<sup>th</sup> Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences. Belo Horizonte. 2008;
- CAMPBELL, Ryan C., **A circuit based photovoltaic array model for power system studies**. Washington. Estados Unidos. 2007.
- CASTRO, Rui M.G. **Introdução à energias renováveis**. Energias renováveis e produção descentralizada. Lisboa. 2009.
- CHEN, L.; GONG, J.; SUN, F.; WU, C. **Effect of heat transfer on the performance of thermoelectric generators**, Int. J. Therm. Sci., No 41, pp 95 – 99. 2001.
- CHEN, L.; LI, J.; SUN, F.; WU, C. **Performance optimization of a two-stage semiconductor thermoelectric generator**. Applied energy. Science direct. Elsevier. China. 2004.
- CHEN, L.; SUN, F.; WU, C. **Thermoelectric-generator with linear phenomenological heat-transfer law**, Applied Energy No 81, pp 358 – 364. 2005.
- CRESESB e CEPEL, **Energia solar princípios e aplicações**, Rio de Janeiro. 28p. 2001.
- CRESESB e CEPEL; **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**, Coleção Grupo de trabalho de energia solar; Rio de Janeiro, 193p. 1999.
- CIOBATARU, M.; HEREKES, T.; TEODORESCU, R.; BOUSCAYROL, A. **PV inverter simulation using MATLAB/Simulink graphical environment and PLECS blockset**. Dinamarca. 2007.
- DUARTE, G.F.R.; CARLSON, B.V. **Geradores termoelétricos radiosotópicos**. São Paulo. 2005.
- DENHERDER, Tyson. **Design and simulation of photovoltaic super system using matlab**. Electrical engineering department. California, Estados Unidos. 67 p. 2006.

FREIRE, C.A.S.; CARVALHO, P.C.M. **Comparação de dois modelos de células fotovoltaicas usando dados reais: modelo de dois diodos versus modelo de um diodo e quatro parâmetros.** Universidade Federal do Ceará. Ceará. 2001.

GNOATTO, E.; DALLACORT, R.; RICIERI, R.P.; SILVA, S.L.; FERRUZI, Y. **Determinação da curva característica de um painel fotovoltaico em condições reais de trabalho.** Maringá. P. 191 – 196. 2005.

HECKTEUER, Lúcio Almeida. **Análise de associação de módulos fotovoltaicos.** Porto Alegre. 135p. Tese (Doutorado em engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de pós graduação em engenharia mecânica. 2001.

HT4-12-40. **Folha de especificações do módulo termoeétrico.** Modelo HT4-12-40, fabricante MELCOR <http://www.melcor.com/HT%20SERIES/HT4-12-40.PDF>. Acessado em 11 nov. 2009, 20h30min.

KHATTAB, N.M.; SHENAWY, E.T. El. **Optimal operation of thermoelectric cooler driven by solar thermoelectric generator,** Energy Conversion and Management. Science direct. Elsevier. Cairo – Egito. 2006.

LONGAT, Francisco M. González. **Model of photovoltaic module in matlab.** 2<sup>do</sup> congreso iberoamericano de estudantes de ingeniería eléctrica, electrónica y computación. Venezuela. 2005.

MALVINO, Albert Paul. **Eletrônica Volume 1.** São Paulo: McGraw-Hill. 520p. 1987.

NOGUEIRA, Edson. **Análise de desempenho e proposta de controle de um sistema termoeétrico para condicionamento de ar.** Taubaté. 88p. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica), Universidade federal de Taubaté, 2005.

PAGHI, C. E.; GÜTHS, S. - **Um estudo sobre o circuito de detecção do efeito Seebeck no anemômetro a efeito Peltier.** 2001.

PROCLIRA, Clima e ambiente. **Radiação solar e terrestre.** Módulo 3. 44p. 2010.

Q10P, **Folha de especificações do módulo fotovoltaico.** Modelo Q10P, fabricante: CONERGY. <http://technosy.com/proionta/fotovolt/aytonoma/conergy/q10p.pdf>. Acessado em 04 nov. 2009, 22h00min.

SOUZA, Diego Henrique Cunha. **Otimização do uso de refrigeradores termoeétricos em processos de refrigeração.** Brasília. 2007.

TESSARO, Alcione Rodrigo. **Desempenho de um painel fotovoltaico acoplado a um rastreador solar.** Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Paraná. 2005.

TONINI, A.M.; SCHETTINO, D.N. **Matlab para a engenharia.** Centro Universitário de Belo Horizonte. Belo Horizonte. 50p. 2002.

VACHTSEVANOS, G. **A hybrid photovoltaic simulator for utility interactive studies.** Power Generation Committee of the IEEE Power Engineering Society. México. 1986.

WAGNER, Jorge Alberto. **Simulação de sistemas fotovoltaicos autônomos**. Porto Alegre. Dissertação ( Mestrado em engenharia ). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de pós graduação em engenharia mecânica. 1991.

WU, Chi. **Analysis of waste-heat thermoelectric power generators**. Department of Mechanical Engineering. Applied Thermal Engineering. Estados Unidos. 1996.

## ANEXO A – CÓDIGO NO MATLAB® 5.3 PARA UM MÓDULO FOTOVOLTAICO A UMA TEMPERATURA DE 25 °C.

```

%Dados iniciais
%constantes
K=1.38*10^-23;%constante de boltzman
q=1.6*10^-19;%carga de 1 eletron
e=1.12%hiato do silicio
%Dados do módulo Q10P - informados pelo fabricante
Iccf=0.7;
Imaxf=0.6;
Vcaf=20;
Vmaxf=16.5;
ncs=36;
%Temperatura de referência = 25°C
%-----
tr=25
%temperatura em Kelvin
Tr=273.15+tr
%-----
%potencial térmico nas condições de referência
Vtr=(K*Tr)/q
%para uma temperatura t =25°C
%-----
tf=25
%temperatura em Kelvin
Tf=273.15+tf
%-----
%calculo de m e m'=m1
m=(Vmaxf-Vcaf)/(Vtr*log(1-(Imaxf/Iccf)));
m1=m/ncs
%Calculo da corrente de saturação reversa para as condicoes de referencia
Ior=Iccf/((exp(Vcaf/(m*Vtr)))-1)
%Variação da Tensão de saída de 0v até a tensão de circuito aberto (Vca)
Vlf=0:0.01:20;
%Para o cálculo do potencial térmico na temperatura de 25°C desejada
Vt=K*Tf/q;
%Para o calculo da corrente máxima de saturação inversa
Io=(Ior*(Tf/Tr)^3)*exp((e/m1)*((1/(Vtr))-(1/Vt)))
%Para o calculo da corrente de saída ou carga
Ilf = Iccf-(Io)*((exp(Vlf/(m*Vt)))-1);
%Calculo da potencia de carga
Plf=Vlf.*Ilf;
%Curva de Corrente X tensão na carga e potência X tensão na carga
Ax=plotyy(Vlf,Ilf,Vlf,Plf), grid, title('Sistema fotovoltaico');
hold;
%-----
xlabel('tensão de saída (V)');
ylabel('corrente de saída (A) potência de saída (W)');
legend('corrente X tensão','potência');

```

## ANEXO B – CÓDIGO NO MATLAB® 5.3 PARA PARA UM MÓDULO FOTOVOLTAICO A UMA TEMPERATURA DE 50 °C.

```

%Dados iniciais
%constantes
K=1.38*10^-23;%constante de boltzman
q=1.6*10^-19;%carga de 1 eletron
e=1.12%hiato do silicio
%Dados do módulo Q10P - informados pelo fabricante
Iccf=0.7;
Imaxf=0.6;
Vcaf=20;
Vmaxf=16.5;
ncs=36;
%Temperatura de referência = 25°C
%-----
tr=25
%temperatura em Kelvin
Tr=273.15+tr
%-----
%potencial térmico nas condições de referência
Vtr=(K*Tr)/q
%para uma temperatura t =50°C
%-----
tf=50
%temperatura em Kelvin
Tf=273.15+tf
%-----
%calculo de m e m'=m1
m=(Vmaxf-Vcaf)/(Vtr*log(1-(Imaxf/Iccf)));
m1=m/ncs
%Calculo da corrente de saturação reversa para as condicoes de referencia
Ior=Iccf/((exp(Vcaf/(m*Vtr)))-1)
%Variação da Tensão de saída de 0v até a tensão de circuito aberto (Vca)
Vlf=0:0.01:20;
%Para o cálculo do potencial térmico na temperatura de 50°C desejada
Vt=K*Tf/q;
%Para o calculo da corrente máxima de saturação inversa
Io=(Ior*(Tf/Tr)^3)*exp((e/m1)*((1/(Vtr))-(1/Vt)))
%Para o calculo da corrente de saída ou carga
Ilf = Iccf-(Io)*((exp(Vlf/(m*Vt)))-1);
%Calculo da potencia de carga
Plf=Vlf.*Ilf;
%Curva de Corrente X tensão na carga e potência X tensão na carga
plotyy(Vlf,Ilf,Vlf,Plf), grid, title('Sistema fotovoltaico');
hold;
%-----
xlabel('tensão de saída (V)');
ylabel('corrente de saída (A) potência de saída (W)');
legend('corrente X tensão','potência');

```

## ANEXO C – CÓDIGO NO MATLAB® 5.3 PARA UM MÓDULO FOTOVOLTAICO A UMA TEMPERATURA DE 75 °C.

```

%Dados iniciais
%contantes
K=1.38*10^-23;%constante de boltzman
q=1.6*10^-19;%carga de 1 eletron
e=1.12%hiato do silicio
%Dados do módulo Q10P - informados pelo fabricante
Iccf=0.7;
Imaxf=0.6;
Vcaf=20;
Vmaxf=16.5;
ncs=36;
%Temperatura de referência = 25°C
%-----
tr=25
%temperatura em Kelvin
Tr=273.15+tr
%-----
%potencial térmico nas condições de referência
Vtr=(K*Tr)/q
%para uma temperatura t =75°C
%-----
tf=75
%temperatura em Kelvin
Tf=273.15+tf
%-----
%calculo de m e m'=m1
m=(Vmaxf-Vcaf)/(Vtr*log(1-(Imaxf/Iccf)));
m1=m/ncs
%Calculo da corrente de saturação reversa para as condicoes de referencia
Ior=Iccf/((exp(Vcaf/(m*Vtr)))-1)
%Variação da Tensão de saída de 0v até a tensão de circuito aberto (Vca)
Vlf=0:0.01:20;
%Para o cálculo do potencial térmico na temperatura de 75°C desejada
Vt=K*Tf/q;
%Para o calculo da corrente máxima de saturação inversa
Io=(Ior*(Tf/Tr)^3)*exp((e/m1)*((1/(Vtr))-(1/Vt)))
%Para o calculo da corrente de saída ou carga
Ilf = Iccf-(Io)*((exp(Vlf/(m*Vt)))-1);
%Calculo da potencia de carga
Plf=Vlf.*Ilf;
%Curva de Corrente X tensão na carga e potência X tensão na carga
plotyy(Vlf,Ilf,Vlf,Plf), grid, title('Sistema fotovoltaico');
hold;
%-----
xlabel('tensão de saída (V)');
ylabel('corrente de saída (A)  potência de saída (W)');
legend('corrente X tensão','potência');

```

## ANEXO D – CÓDIGO NO MATLAB® 5.3 PARA UM MÓDULO FOTOVOLTAICO CONSIDERANDO AS TEMPERATURAS DE 25 °C, 50 °C E 75 °C.

```

%Dados iniciais
%contantes
K=1.38*10^-23;%constante de boltzman
q=1.6*10^-19;%carga de 1 eletron
e=1.12%hiato do silicio
%Dados do módulo Q10P - informados pelo fabricante
Iccf=0.7;
Imaxf=0.6;
Vcaf=20;
Vmaxf=16.5;
ncs=36;
%Temperatura de referência = 25°C
%-----
tr=25
%temperatura em Kelvin
Tr=273.15+tr
%-----
%potencial térmico nas condições de referência
Vtr=(K*Tr)/q
%para uma temperatura t =25°C
%-----
tf=25
%temperatura em Kelvin
Tf=273.15+tf
%-----
%calculo de m e m'=m1
m=(Vmaxf-Vcaf)/(Vtr*log(1-(Imaxf/Iccf)));
m1=m/ncs
%Calculo da corrente de saturação reversa para as condicoes de referencia
Ior=Iccf/((exp(Vcaf/(m*Vtr)))-1)
%Variação da Tensão de saída de 0v até a tensão de circuito aberto (Vca)
Vlf=0:0.01:20;
%Para o cálculo do potencial térmico na temperatura de 25°C desejada
Vt=K*Tf/q;
%Para o calculo da corrente máxima de saturação inversa
Io=(Ior*(Tf/Tr)^3)*exp((e/m1)*((1/(Vtr))-(1/Vt)))
%Para o calculo da corrente de saída ou carga
Ilf = Iccf-(Io)*((exp(Vlf/(m*Vt)))-1);
%Calculo da potencia de carga
Plf=Vlf.*Ilf;
%Curva de Corrente X tensão na carga e potência X tensão na carga
plot(Vlf,Ilf,Vlf,Plf), grid, title('Sistema fotovoltaico');
hold
%-----
xlabel('tensão de saída (V)');
ylabel('corrente de saída (A)  potência de saída (W)');
legend('tensão X corrente','potência');%-----

```

```

%para uma temperatura t =50°C
%-----
tf=50
%temperatura em Kelvin
Tf=273.15+tf
%-----
%Para o cálculo do potencial térmico na temperatura de 50°C desejada
Vt=K*Tf/q;
%Variação da Tensão de saída de 0v até a tensão de circuito aberto (Vca)
Vlf1=0:0.01:20;
%Para o calculo da corrente máxima de saturação inversa
Io=(Ior*(Tf/Tr)^3)*exp((e/m1)*((1/(Vtr))-(1/Vt)))
%Para o calculo da corrente de saída ou carga
If1 = Iccf-(Io)*((exp(Vlf1/(m*Vt)))-1);
%Calculo da potencia de carga
Plf1=Vlf1.*If1;
%Curva de Corrente X tensão na carga e potência X tensão na carga
plot(Vlf1,If1,Vlf1,Plf1);
hold
%-----
%para uma temperatura t =75°C
%-----
tf=75
%temperatura em Kelvin
Tf=273.15+tf
%-----
%Para o cálculo do potencial térmico na temperatura de 75°C desejada
Vt=K*Tf/q;
%Variação da Tensão de saída de 0v até a tensão de circuito aberto (Vca)
Vlf2=0:0.01:20;
%Para o calculo da corrente máxima de saturação inversa
Io=(Ior*(Tf/Tr)^3)*exp((e/m1)*((1/(Vtr))-(1/Vt)))
%Para o calculo da corrente de saída ou carga
If2 = Iccf-(Io)*((exp(Vlf2/(m*Vt)))-1);
%Calculo da potencia de carga
Plf2=Vlf2.*If2;
%Curva de Corrente X tensão na carga e potência X tensão na carga
%plotyy(Vlf1,If1,Vlf1,Plf1);
line(Vlf2,If2);
line(Vlf2,Plf2);

```

**ANEXO E – CÓDIGO NO MATLAB® 5.3 DE UM MÓDULO TERMOELÉTRICO,  
PARA UMA VARIAÇÃO DE CARGA DE 0 A 35 Ω.**

```

%coeficiente de Seebeck
alfa=0.053;
%Variação da resistência - de 0 a 35 ohm
RLt=0:0.483:35;
%Resistencia interna do móulo
Rit=3.49;
%Temperatura lado quente
t2t=80;
%Temperatura lado frio
t1t=30;
%Calculo do delta t
deltaT=t2t-t1t;
% Cálculo da Corrente de carga
ILt=(alfa*(deltaT))./(RLt+Rit);
% Cálculo da tensão de carga
VLt=ILt.*RLt;
% Cálculo da potência de carga
PLt=VLt.*ILt;
%Curva de Corrente X resistência de carga, potência X resistência de carga e
%tensão X resistência de carga
plot(RLt,ILt,'g',RLt,PLt,'k',RLt,VLt,'r'), grid, title('Módulo termoelétrico');
hold;
xlabel('resistência');
ylabel('corrente de saída (A)  potência de saída(W)  Tensão de saída(V)');
legend('Corrente','potência','tensão');
%-----

```

**ANEXO F – CÓDIGO NO MATLAB® 5.3 DE UM MÓDULO TERMOELÉTRICO, PARA UMA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO LADO QUENTE DE 30 °C A 80 °C.**

```

%coeficiente de Seebeck
alfa=0.053
%variação da temperatura de 30°C a 80°C
t2t=30:1:80;
%resistência interna do módulo
Rit=3.49;
%temperatura do lado frio
t1t=30;
%resistência de carga
RLt=3.49
%Calculo do delta t
deltaT=t2t-t1t
%Calculo da corrente de carga
ILt=(alfa*(deltaT))./(RLt+Rit);
%calculo da tensão de carga
VLt=ILt.*RLt
%calculo da potência de carga
PLt=VLt.*ILt
% Curva da corrente de carga X delta t, potência de carga X delta t e
% tensão de carga X delta t
plot(deltaT,ILt,'g',deltaT,PLt,'r',deltaT,VLt,'k'), grid, title('Módulo termoelétrico');
hold;
xlabel('Delta t(°C)');
ylabel('corrente de saída (A)  potência de saída(W)  Tensão de saída(V)');
legend('Corrente','potência','tensão');
%-----

```

**ANEXO G – CÓDIGO NO MATLAB® 5.3 DE UM MÓDULO TERMOELÉTRICO, PARA UMA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO LADO QUENTE DE 80 °C A 30°C.**

```

%coeficiente de Seebeck
alfa=0.053
%variação da temperatura do lado quente de 80 a 30 graus celsius
t2t=linspace(80,30,50)
%t2=80:-1:30;
%temperatura do lado frio
t1t=30;
%resistência interna do módulo
Rit=3.49;
%resistência de carga
RLt=3.49;
%Calculo do delta t
deltaT=t2t-t1t
%Calculo da corrente de carga
ILt=(alfa*(deltaT))./(Rit+RLt);
%calculo da tensão de carga
VLt=ILt.*RLt;
%calculo da potência de carga
PLt=VLt.*ILt
%Curva da corrente de carga X delta t, potência de carga X delta t
%tensão de carga X delta t
plot(deltaT,ILt,'g',deltaT,PLt,'r',deltaT,VLt,'k'), grid, title('Módulo termoeletrico');
hold;
xlabel('Delta t(°C)');
ylabel('corrente de saída (A)  potência de saída(W)  Tensão de saída(V)');
legend('Corrente','potência','tensão');
%-----

```

## ANEXO H – CÓDIGO NO MATLAB® 5.3 PARA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SIMULAÇÃO EM ENSAIO REALIZADO NO MÓDULO FOTOVOLTAICO PARA A TEMPERATURA DE 54°C.

```

%Dados iniciais
%constantes
K=1.38*10^-23;%constante de boltzman
q=1.6*10^-19;%carga de 1 eletron
e=1.12%hiato do silicio
%Dados do módulo Q10P - informados pelo fabricante
Iccf=0.7;
Imaxf=0.6;
Vcaf=20;
Vmaxf=16.5;
ncs=36;
%Temperatura de referência = 25°C
%-----
tr=25
%temperatura em Kelvin
Tr=273.15+tr
%-----
%potencial térmico nas condições de referência
Vtr=(K*Tr)/q
%para uma temperatura t =54°C
%-----
tf=54
%temperatura em Kelvin
Tf=273.15+tf
%-----
%calculo de m e m'=m1
m=(Vmaxf-Vcaf)/(Vtr*log(1-(Imaxf/Iccf)));
m1=m/ncs
%Calculo da corrente de saturação reversa para as condicoes de referencia
Ior=Iccf/((exp(Vcaf/(m*Vtr)))-1)
%Variação da Tensão de saída de 0v até a tensão de circuito aberto (Vca)
Vlf=0:0.01:20;
%Para o cálculo do potencial térmico na temperatura de 25°C desejada
Vt=K*Tf/q;
%Para o calculo da corrente máxima de saturação inversa
Io=(Ior*(Tf/Tr)^3)*exp((e/m1)*((1/(Vtr))-(1/Vt)))
%Para o calculo da corrente de saída ou carga
Ilf = Iccf-(Io)*((exp(Vlf/(m*Vt)))-1);
%Calculo da potencia de carga
Plf=Vlf.*Ilf;
%Curva de Corrente X tensão na carga e potência X tensão na carga
plot(Vlf,Ilf,'r',Vlf,Plf,'g'), grid, title('Sistema fotovoltaico');
hold;
%-----
xlabel('tensão de saída (V)');
ylabel('corrente de saída (A) potência de saída (W)');

```

```
legend('corrente X tensão','potência');  
%dados obtidos durante ensaio  
Vmfe=[0 1.21 2.51 3.07 5.21 6.6 7.81 9.3 14.79 15.53 17.11 17.39 17.58  
17.67 17.76 17.86 17.95]  
Imfe=[0.62 0.57 0.57 0.57 0.56 0.56 0.55 0.54 0.48 0.42 0.18  
0.12 0.08 0.05 0.04 0.01 0]  
Pmfe=[0 0.6897 1.4307 1.7499 2.9176 3.696 4.2955 5.022 7.0992 6.5226 3.0798 2.0868  
1.4064 0.8835 0.7104 0.1786 0]  
% plotagem dos dados obtidos durante ensaio  
plot(Vmfe,Imfe,'*k',Vmfe,Pmfe,'*b')
```

## ANEXO I – CÓDIGO NO MATLAB® 5.3 PARA ANÁLISE ENTRE O MODELO SIMULADO E OS DADOS MEDIDOS DURANTE ENSAIO, DE UM MÓDULO TERMOELÉTRICO.

```

%coeficiente de Seebeck
alfa=0.053;
%Variação da resistência - de 0 a 35 ohm
RLt=0:0.483:35;
%Resistencia interna do móulo
Rit=3.49;
%Temperatura lado quente
t2t=45;
%Temperatura lado frio
t1t=30;
%Calculo do delta t
deltaT=t2t-t1t;
% Cálculo da Corrente de carga
ILt=(alfa*(deltaT))./(RLt+Rit);
% Cálculo da tensão de carga
VLt=ILt.*RLt;
% Cálculo da potência de carga
PLt=VLt.*ILt;
%Curva de Corrente X resistência de carga, potência X resistência de carga e
%tensão X resistência de carga
plot(RLt,ILt,'g',RLt,PLt,'k',RLt,VLt,'r'), grid, title('Módulo termoeletrico');
hold;
xlabel('resistência');
ylabel('corrente de saída (A)  potência de saída(W)  Tensão de saída(V)');
legend('Corrente','potência','tensão');
%-----
% dados medidos durante ensaio
deltate=[15.8 16 15.3 16 15.8 15.9 15.8 15.9]
VLte=[0.287 0.406 0.412 0.519 0.54 0.562 0.593 0.625]
ILte=[0.116 0.084 0.073 0.051 0.042 0.037 0.027 0.019]
PLte=[0.033 0.034 0.03 0.026 0.023 0.021 0.016 0.012]
RLte=[2.5 4.9 5.7 10.3 12.9 15.2 22.2 33.2]
% plotagem dos dados medidos durante ensaio
plot(RLte,ILte,'*g',RLte,PLte,'*k',RLte,VLte,'*r'),legend('Corrente','potência','tensão');
hold

```

## ANEXO J – FOLHA DE ESPECIFICAÇÕES DO MÓDULO FOTOVOLTAICO. FABRICANTE CONERGY. MODELO Q10P.

Photovoltaic modules | Specifications

### Conergy Q 10P



#### Optimised efficiency

- | Improved UV transmission by using solar glass
- | Reduced reflection because of optimised anti-reflective coating
- | High module efficiency of 10.5 %
- | Better and consistent apparition of the cells

#### Resistivity and robustness

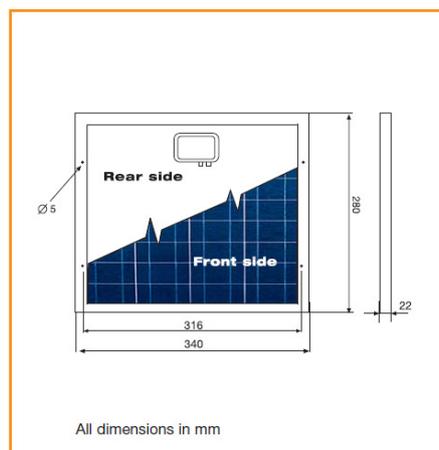
- | Sturdy, screwed aluminium frame
- | Cells embedded in EVA (ethylene vinyl acetate), thereby high UV resistance and good isolation

#### Simple installation

- | Fast screwing with 4 fixing holes
- | Comfortable connection of cables up to 2 mm<sup>2</sup>

#### Warranties and certificates

- | 10 year warranty on 90 % of the nominal power<sup>1</sup>
- | 25 year warranty on 80 % of the nominal power<sup>1</sup>
- | Product warranty: 5 years<sup>1</sup>



#### Electrical specifications

Nom. power rating ( $P_{\text{NOM}}$ ) as per STC <sup>2</sup>	10 W
Tolerance of the nominal power ( $P_{\text{NOM}}$ )	$\pm 5\%$
MPP voltage ( $V_{\text{MPP}}$ )	16.5 V
MPP current ( $I_{\text{MPP}}$ )	0.6 A
Open circuit voltage ( $V_{\text{OC}}$ )	20.0
Short circuit current ( $I_{\text{SC}}$ )	0.7 A
Temperature coefficient ( $P_{\text{MPP}}$ )	$-0.46\%/^{\circ}\text{C}$
Temperature coefficient ( $V_{\text{OC}}$ )	$-0.072\text{ V}/^{\circ}\text{C}$
Temperatur coefficient ( $I_{\text{SC}}$ )	$0.89\text{ mA}/^{\circ}\text{C}$
Maximum system voltage	600 V

#### Cell specifications

Cells	polycrystalline
Number of cells	36
Cell dimensions	78 x 24 mm

#### Module dimensions

Dimensions (L x W x H)	280 x 340 x 22 mm
Weight	1.1 kg

Available from:

<sup>1</sup> According to current Conergy warranty conditions  
<sup>2</sup> Standard Test Conditions: Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>, air mass 1.5 (ASTM E 892) and cell temperature 25°C.

For further information: [www.conergy.com](http://www.conergy.com)  
 Subject to technical modifications without notice  
 2007 © Conergy

**ANEXO L – FOLHA DE ESPECIFICAÇÕES DO MÓDULO TERMOELÉTRICO. FABRICANTE MELCOR. MODELO HT4-12-40.**

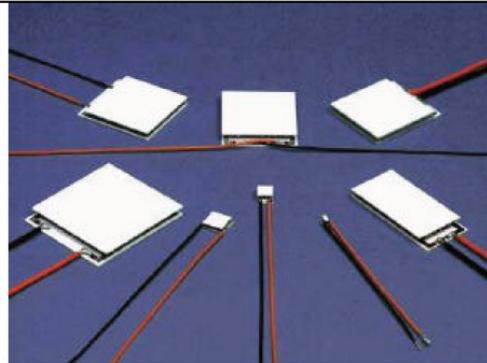


**Thermoelectric Cooler**

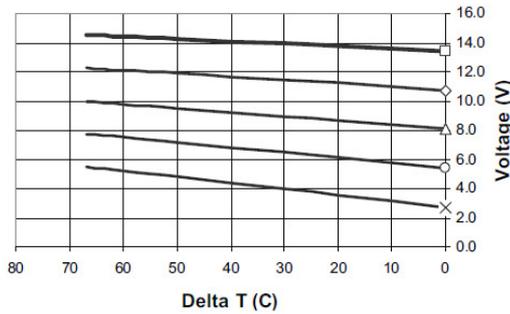
**HT4-12-40**

**Performance Specifications**

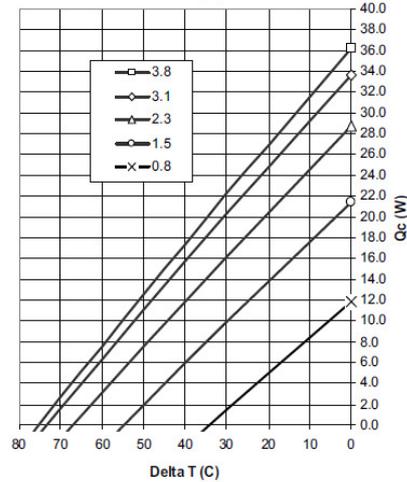
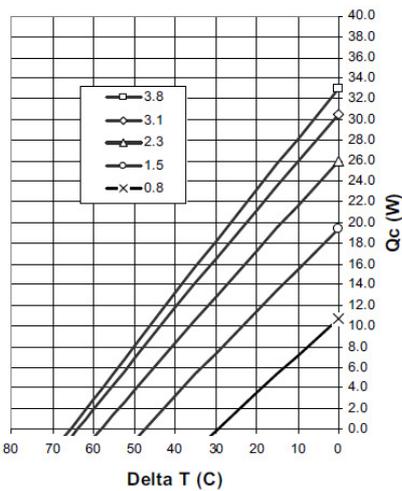
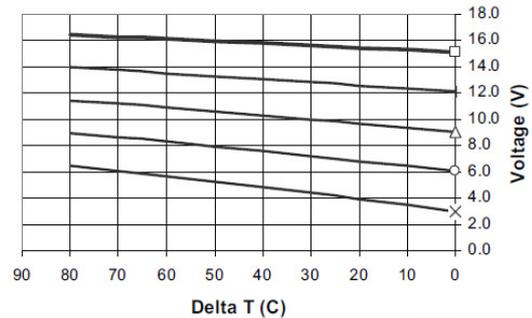
Hot Side Temperature (°C)	25 °C	50 °C
Qmax (Watts)	32	36.2
DeltaTmax (°C)	67	75
I <sub>max</sub> (Amps)	3.7	3.85
V <sub>max</sub> (Volts)	14.4	15.13
Module Resistance (Ohms)	3.49	3.93



**Performance Curves – Th = 25°C**



**Performance Curves – Th = 50°C**



# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)