



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUACAO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Messias Anain Almeida Faria

CONEXÃO ELÉTRICA DE PLANTA DE GERAÇÃO TERMOELÉTRICA BASEADA NO EFEITO SEEBECK

Goiânia, 2016.

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUACAO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Messias Anain Almeida Faria

CONEXÃO ELÉTRICA DE PLANTA DE GERAÇÃO TERMOELÉTRICA BASEADA NO EFEITO SEEBECK

Programa de Pós-Graduação *stricto sensu* em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG (PPG-TPS- IFG) - Dissertação de Mestrado Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Energias Renováveis e Engenharia Econômica Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Aylton José Alves

Coorientador: Prof. Dr. Elder Geraldo Domingues.

Goiânia, 2016.

F224c Faria, Messias Anain Almeida.
Conexão elétrica de planta de geração termoeétrica baseada no efeito seebeck / Messias Anain Almeida. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2016.
128 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Aylton José Alves
Co-orientador: Prof. Dr. Elder Geraldo Domingues

Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Coordenação do Programa de Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Inclui anexo.

1. Termogeradores (TEG) – geração de energia elétrica. 2. Ponto de Geração de Máxima Potência (MPPT). 3. Efeito Seebeck. I. Alves, Aylton José (orientador). II. Domingues, Elder Geraldo (co-orientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

CDD 621.483

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecário Alisson de Sousa Belthodo Santos CRB1/ 2.266
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

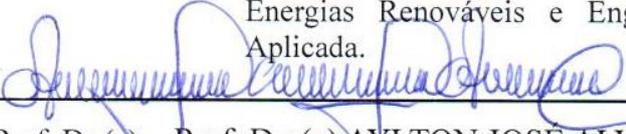


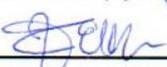
SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Nome

**“CONEXÃO ELÉTRICA DE PLANTA DE GERAÇÃO
TERMOELÉTRICA BASEADA NO EFEITO SEEBECK ”**

Programa de Pós-Graduação stricto sensu em
Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG
(PPGTPS - IFG) - Dissertação de Mestrado
Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de
Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa:
Energias Renováveis e Engenharia Econômica
Aplicada.


Prof. Dr (a). - Prof. Dra(a) AYLTON JOSÉ ALVES (orientador IFG)


Prof(a). Dr(a). ELDER GERALDO DOMINGUES (avaliador IFG)


Prof(a). Dr(a). ENES GONÇALVES MARRA (avaliador UFG)


Prof(a) Dr. WESLEY PACHECO CALIXTO (suplente IFG)

Aprovado em: 29/01/2016

DEDICATÓRIA

À minha esposa Camila. Seu apoio e compreensão foram valiosos no decorrer deste trabalho e indispensáveis para concretização do mesmo.

Aos meus pais e a minha irmã pessoas que me apoiam e transmitem confiança para superar desafios.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar ao Senhor Jesus Cristo, que me dá força, dedicação, paciência, aptidão e discernimento para transpor as etapas da vida. A tua luz ilumina e supri aos que em ti crê e vive.

À minha esposa Camila, que a meu lado superou as dificuldades impostas para o alcance dos objetivos propostos.

Aos meus pais, Joaquim e Maria Inês (saudades), que mesmo com a simplicidade e as dificuldades que a vida os impôs, não mediram esforços para incentivar e apoiar os meus desafios pessoais e acadêmicos.

À minha irmã, que nos meus momentos da ausência familiar conduziu com sabedoria os cuidados que um filho retribui aos seus pais. Obrigado pela compreensão.

Ao amigo João Marcos Tomé que não mediu esforços para apresentar soluções valiosas e engrandecedoras à pesquisa.

Ao orientador, professor Aylton José Alves, e ao coorientador Elder Geraldo Domingues, que direcionaram a pesquisa com o intuito de obter os melhores resultados. Suas contribuições foram relevantes e significativas para o resultado final desta pesquisa de mestrado.

A todos os professores membros do programa de mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, que ministraram as disciplinas apresentando os conhecimentos e as experiências necessárias para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos professores, pesquisadores e colegas que integram o Núcleo de Estudos Experimentais e Tecnológicos do IFG – NExT, em especial, ao professor Wesley Pacheco Calixto pelos valiosos ensinamentos.

Ao professor Enes Gonçalves Marra, que aceitou o convite para ser membro da banca examinadora, apresentando contribuições de grande valor para a revisão final e aperfeiçoamento do trabalho.

Aos mestrandos Priscila Araújo Juá Stecanella, Jonatas Madaleno Rodrigues e Pedro Henrique Garcia Gomes, que no decorrer do período de estudos contribuíram para o engrandecimento da pesquisa.

À secretária do programa de mestrado, Leila Ninon de Souza, por sua prontidão e simpatia no atendimento às solicitações apresentadas no decorrer do curso.

Título: Conexão Elétrica de Planta de Geração Termoelétrica Baseada no Efeito Seebeck

Autor: Messias Anain Almeida Faria

Orientador: Prof. Dr. Aylton José Alves

Coorientador: Prof. Dr. Elder Geraldo Domingues

RESUMO

Uma planta de geração termoelétrica pode gerar energia elétrica através do aproveitamento da energia térmica proveniente dos gases de exaustão de um grupo motor-gerador. Para que haja a máxima transferência potência dessa planta para a carga é necessário o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT). Neste trabalho é realizada a conexão da energia elétrica gerada pela planta termoelétrica a uma carga resistiva, utilizando o sistema de MPPT. O arranjo elétrico, série e paralelo, dos termogeradores (TEG) da planta de geração é feito. O sistema de controle da geração desenvolvido, em síntese, é composto por um conversor cc-cc boost e controle com algoritmo de MPPT P&O (perturbar e observar). Modelagens e simulações computacionais são realizadas para: conversão termoelétrica de energia, circuitos básicos do TEG e circuitos básicos do TEG e MPPT. Os resultados das duas primeiras simulações são confrontados com os do catálogo do fabricante, tendo resultados expressivos. A simulação do sistema de MPPT apresenta uma concordância superior a 98%. Um protótipo para o controle do sistema de geração é projetado, dimensionado e construído. Os testes realizados apontam para uma concordância de aproximadamente 95% para o sistema de MPPT. O conversor utilizado apresentou um rendimento superior a 90% e entregou à carga uma ondulação máxima de 1,71% para tensão e corrente. No estudo de viabilidade econômica preliminar simplificada utilizaram-se os indicadores VPL, TIR e PAYBACK. Os resultados iniciais apontam para a inviabilidade econômica do projeto. Foi realizada a análise de sensibilidade de alguns parâmetros que afetam a viabilidade econômica do projeto. Para um cenário futuro otimista, ao variar alguns parâmetros, obtém-se a viabilidade do mesmo.

Palavras-Chave: TEG, MPPT, conversor cc-cc, boost, efeito Seebeck.

Title: Electrical Connection of Thermoelectric Generation Plant Based on the Seebeck Effect
Author: Messias Anain Almeida Faria
Adviser: Prof. Dr. Aylton José Alves
Co-Adviser: Prof. Dr. Elder Geraldo Domingues

ABSTRACT

A thermoelectric generation plant can generate power by harnessing the thermal energy from the exhaust gases of an engine-generator set. It is necessary tracking the maximum power point (MPPT) to obtain the maximum power transfer from the plant to the load. In this work, it is carried out the connection of a thermoelectric generation plant to a resistive load, using the MPPT system. It is done the electrical assembly, series and parallel, of thermoelectric-generator modules (TEG) of the generating plant. The generation control system developed, in synthesis, consists of a dc-dc boost converter and control with P&O MPPT algorithm (perturb and observe). Modeling and computer simulations are performed to: thermoelectric energy conversion, basic circuits of TEG and basic circuits of TEG and MPPT. The results of the first two simulations are faced with the manufacturer's catalog, with impressive results. The MPPT simulation of the system shows a concordance higher than 98%. A prototype for the control of the generation system is designed, sized and constructed. The tests indicate a concordance of approximately 95% for the system MPPT. The converter used presented an efficiency higher than 90% and delivered to the load a maximum ripple of 1.71% for voltage and current. In a simplified preliminary economic feasibility study it was used the indicators NPV, IRR and PAYBACK. Initial results point to the economic infeasibility of the project. It was carried out the sensitivity analysis of some parameters that affect the economic viability of the project. For an optimistic future scenario, through the variation of these parameters, the system viability it is obtained.

Keywords: TEG, MPPT, dc-dc converter, boost, Seebeck effect.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas do Projeto CNPQ nº 8485 - Produção de aparato tecnológico e de software para estudos de recuperação de perdas de energia em motor-gerador termoelétrico. ...	20
Figura 2 – Ilustração esquemática do efeito Seebeck.....	24
Figura 3 - Ilustração esquemática do efeito Peltier.	24
Figura 4 - Ilustração esquemática de dispositivos termoelétricos típicos. (a) Refrigerador (ou aquecedor) por efeito Peltier. (b) Gerador elétrico por efeito Seebeck. (c) Arranjo típico dos dispositivos.....	26
Figura 5 - Módulo Peltier comercial, constituído por elementos termoelétricos entre duas placas de cerâmica.	27
Figura 6 - Medição de temperatura com termopar.	28
Figura 7 - Junção P-N de um gerador termoelétrico	28
Figura 8 - Composição de um gerador termoelétrico e detalhes da ligação térmica e elétrica de uma junção P-N	29
Figura 9 - (a) Gerador termoelétrico típico e (b) Circuito elétrico equivalente	30
Figura 10 – Fonte de energia elétrica com resistência interna e carga variável	31
Figura 11 - Circuito elétrico equivalente do TEG com a inclusão de uma carga externa (RL).....	32
Figura 12 – Geração de potência elétrica do TEG Ferrotec 9505/127/2508 para diferentes ΔT	33
Figura 13 – Circuito elétrico com interligação de conversor cc-cc.....	34
Figura 14 - Conversor cc-cc boost (elevador)	35
Figura 15 – Primeira etapa de funcionamento do conversor cc-cc boost.....	35
Figura 16 – Segunda etapa de funcionamento do conversor cc-cc boost.....	36
Figura 17 - Ganho de tensão do conversor cc-cc boost.....	37
Figura 18 - Fluxograma básico do método de P&O.....	38
Figura 19 - Fluxograma básico do método de condutância incremental.....	40
Figura 20 – TEG TELBP1-12656-0.45	42
Figura 21 - Gráficos de V_{xI} e P_{xI} do TEG TELBP1-12656-0.45, $T_h=350^\circ\text{C}$ e $T_c=30^\circ\text{C}$	43
Figura 22 – Grupo motor-gerador utilizado	44
Figura 23 - Distribuição média de produção e perda de energia de usina a motor a óleo diesel	45
Figura 24 – Dispositivo trocador de calor para o lado quente dos TEG	47
Figura 25 – Dispositivo trocador de calor para o lado frio dos TEG	47
Figura 26 – Planta de geração termoelétrica proposta e implementada por Stecanella et al. (2015) e Gomes et al. (2015).	48
Figura 27 - Modelagem do módulo termoelétrico – TEG.....	50
Figura 28 - Fluxograma simplificado para conexão da planta termoelétrica a uma carga resistiva.....	51
Figura 29 - Modelagem da planta de geração termoelétrica e conversor cc-cc boost com MPPT.....	52
Figura 30 – Arranjo elétrico de interligação da planta termoelétrica, incluso diodo.	56
Figura 31 - Conversor cc-cc boost, incluso capacitor de entrada (Ci)	59

Figura 32 – Comparação entre chaves eletrônicas	66
Figura 33 – Microcontrolador PIC 18F452	69
Figura 34 – Divisor de tensão em V_s	70
Figura 35 – Divisor de tensão em V_o	70
Figura 36 – Amplificador de instrumentação	71
Figura 37 - Divisor de tensão em V_s e R_{shunt} em I_s	73
Figura 38 - Divisor de tensão em V_o e R_{shunt} em I_o	73
Figura 39 – Fluxograma básico do programa embarcado	75
Figura 40 – Circuito final	78
Figura 41 – Protótipo Final.....	79
Figura 42 - Gráfico com V_{xI} (azul) e V_{xP} (verde), com $T_h=350^\circ\text{C}$ e $T_c=30^\circ\text{C}$ – TEG TELBP1-12656-0.45	81
Figura 43 - MPPT (P&O) nos gráficos V_{xI} e V_{xP} , com $T_h=350^\circ\text{C}$ e $T_c=30^\circ\text{C}$	82
Figura 44 - Circuito equivalente do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 com geração em circuito aberto.	83
Figura 45 - Circuito equivalente do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 com RL de 20Ω	83
Figura 46 - Circuito equivalente do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 com RL de $0,97\Omega$...	84
Figura 47 – Um ramo da planta de geração termoeétrica com sistema de MPPT.....	85
Figura 48 – Gráfico de potência para um ramo da planta termoeétrica com RL de 10Ω	85
Figura 49 – Razão cíclica no MPPT em um ramo da planta termoeétrica com RL de 10Ω ...	86
Figura 50 - Gráfico de potência para um ramo da planta termoeétrica com RL de 30Ω	87
Figura 51 – Razão cíclica no MPPT em um ramo da planta termoeétrica com RL de 30Ω ...	87
Figura 52 - Planta de geração termoeétrica completa com sistema de MPPT	88
Figura 53 - Gráfico de potência da planta termoeétrica completa com RL de 10Ω	89
Figura 54 - Razão cíclica no MPPT da planta termoeétrica completa com RL de 10Ω	89
Figura 55 - Gráfico de potência da planta termoeétrica completa com RL de 30Ω	90
Figura 56 - Razão cíclica no MPPT da planta termoeétrica completa com RL de 30Ω	91
Figura 57 – Gráfico de potência do ramo 1 (um) da planta termoeétrica com RL de 10Ω ...	93
Figura 58 - Razão cíclica no MPPT do ramo 1 (um) da planta termoeétrica com RL de 10Ω	94
Figura 59– Gráfico de potência do ramo 1 (um) da planta termoeétrica com RL de 30Ω	95
Figura 60 - Razão cíclica no MPPT do ramo 1 (um) da planta termoeétrica com RL de 30Ω	96
Figura 61 - Gráfico de potência da planta termoeétrica completa com RL de 10Ω	98
Figura 62 - Razão cíclica no MPPT da planta termoeétrica completa com RL de 10Ω	99
Figura 63- Gráfico de potência da planta termoeétrica completa com carga de 30Ω	100
Figura 64 - Razão cíclica no MPPT da planta termoeétrica completa com carga de 30Ω ...	101
Figura 65 – Tensão de saída do conversor cc-cc boost com RL de 30Ω	102
Figura 66 – Corrente de saída do conversor cc-cc boost com RL de 30Ω	103
Figura 67 – Gráfico do fluxo de caixa simplificado.....	108
Figura 68 – VPL com a variação do investimento inicial	110
Figura 69 - VPL com a variação da taxa anual de reajuste da tarifa de energia.....	111
Figura 70 - VPL com a variação da quantidade de energia gerada pela planta termoeétrica.	112
Figura 71 - VPL com a variação da eficiência do TEG.....	113

Figura 72 – Potência gerada pela planta termoelétrica com a variação da eficiência do TEG	114
Figura 73 – Gráfico do fluxo de caixa simplificado para o cenário otimista	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de Seebeck de alguns materiais, à temperatura de 0 °C, medido relativamente à platina	27
Tabela 2 - Parâmetros do TEG TELBP1-12656-0.45	42
Tabela 3 – Dados do grupo motor-gerador.....	44
Tabela 4 – Características técnicas do TEG com $T_h=287^\circ\text{C}$ e $T_c=50^\circ\text{C}$	53
Tabela 5 - Características técnicas dos arranjos termoelétricos propostos.....	53
Tabela 6 – Valores de geração de energia elétrica da planta termoelétrica.....	55
Tabela 7 - Características elétricas da planta termoelétrica - por ramo (face)	57
Tabela 8 – Características elétricas da planta termoelétrica.....	57
Tabela 9 - Características elétricas do MOSFET IRF 540N	67
Tabela 10 - Características elétricas do diodo MBR20100CT	68
Tabela 11 – Investimento inicial	104
Tabela 12 – Parâmetros para elaborar o fluxo de caixa.....	106
Tabela 13 – Fluxo de caixa simplificado.....	107
Tabela 14 – Resultados dos métodos de análise.....	108
Tabela 15 – Parâmetros do cenário otimista.....	115
Tabela 16 - Fluxo de caixa simplificado para o cenário otimista.....	116
Tabela 17 – Resultados dos métodos de análise para o cenário otimista	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
C	Capacitor
CC	Corrente Contínua
Ci	Capacitor de entrada
cj	Conjunto
CLP	Controlador Lógico Programável
cv	Cavalo-vapor
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
D	Razão cíclica (<i>Duty cycle</i>)
DSP	Digital Signal Processor
GEE	Gases de efeito estufa
GLP	Gás liquefeito de petróleo
I	Corrente elétrica
I _{cc}	Corrente de curto circuito
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFG	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
IGBT	Insulated gate bipolar transistor
I _{mpp}	Corrente na máxima potência
L	Indutor
MEC	Ministério da Educação
MOSFET	Metal-oxide field effect transistor
MPP	<i>Maximum Power Point</i> (Ponto de Máxima Potência)
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência)
NExT	Núcleo de Estudos Experimentais e Tecnológicos do IFG
O&M	Operação e manutenção
P	Potência
P _{e.e.}	Potência da energia elétrica disponível para utilização

$P_{g.e.}$	Potência das perdas de exaustão do gerador elétrico
$P_{t_{TEG}}$	Fluxo de calor necessário para o TEG gere sua potência elétrica máxima
PWM	Pulse width modulation (modulação por largura de pulso).
P&O	Perturbar e observar
Q	Calor
Qtde	Quantidade
R _{cc}	Resistência de entrada do conversor cc-cc
r _L	Resistência série do indutor L
RL	Resistência da carga
RSE	Resistência série equivalente
R_{TEG}	Resistência interna do TEG
SETEC	Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica
Sb	Chave eletrônica do conversor cc-cc boost
T	Temperatura
Ta	Período de amostragem
Tc	<i>Cold side</i> (temperatura do lado frio do TEG)
TE	Termoelétrico
TEG	Gerador termoelétrico (termogerador)
Th	<i>Hot side</i> (temperatura do lado quente do TEG)
Und	Unidade
V_{mpp}	Tensão na máxima potência
V_o	Tensão de saída do conversor cc-cc (entregue à carga)
V_{out}	Tensão de circuito aberto
VPL	Valor presente líquido
V_s	Tensão fornecida pelo TEG (entrada do conversor cc-cc)
V_{TEG}	Tensão (interna) gerada pelo TEG
TIR	Taxa interna de retorno
TMA	Taxa mínima de atratividade
Z	Figura de mérito
ZT	Figura de mérito adimensional

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampère
°C	graus Celsius
cal	Calorias
cm	Centímetros
Hz	Hertz
J	Joule
K	Kelvin
kg	Quilograma
kgf	Quilograma força
kVA	Quilovolt-ampère
kW	Quilowatts
l	litro
l/h	litro por hora
m	mili
m ²	metros quadrado
RPM	Rotações por minuto
s	segundo
S	Seebeck
ΔT	Diferença de temperatura
V	Volt
W	Watts
α	Coefficiente de <i>Seebeck</i> do material
λ	Condutividade térmica
σ	Condutividade elétrica
Φ	Fluxo de calor
\emptyset	Diâmetro
μ	Micro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVO GERAL	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
2. TECNOLOGIAS APLICADAS AOS CONVERSORES TERMOELÉTRICOS....	23
2.1 EFEITOS TERMOELÉTRICOS	23
2.1.1 <i>Efeito Seebeck</i>	23
2.1.2 <i>Efeito Peltier</i>	24
2.2 MATERIAIS TERMOELÉTRICOS	25
2.3 DISPOSITIVOS TERMOELÉTRICOS	25
2.3.1 <i>Dispositivo de efeito Peltier</i>	26
2.3.2 <i>Termopar</i>	27
2.3.3 <i>Gerador termoelétrico do efeito Seebeck - TEG</i>	28
2.4 TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA DA FONTE GERADORA PARA A CARGA	30
2.5 CONVERSORES CC-CC	34
2.5.1 <i>Conversor cc-cc boost ou elevador de tensão</i>	35
2.6 MPPT EM CONVERSOR CC-CC BOOST	37
2.7 TÉCNICAS DE MPPT.....	37
2.7.1 <i>Método de P&O (perturbar e observar) para o MPPT</i>	38
2.7.2 <i>Método da Condutância Incremental para o MPPT</i>	39
3. METODOLOGIA.....	41
3.1 PLANTA DE GERAÇÃO TERMOELÉTRICA	41
3.1.1 <i>TEG</i>	41
3.1.2 <i>Gerador elétrico</i>	43
3.1.3 <i>Sistema de retenção térmica dos gases e sistema de resfriamento</i>	46
3.2 MODELAGEM DIGITAL, ELÉTRICA E TÉRMICA DO SISTEMA DE GERAÇÃO	48
3.2.1 <i>Modelagem da conversão termoelétrica de energia</i>	49
3.2.2 <i>Modelagem dos circuitos básicos do TEG</i>	49
3.2.3 <i>Modelagem dos circuitos básicos do TEG e MPPT</i>	50
3.3 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MPPT	53
3.3.1 <i>Arranjo elétrico de interligação da planta termoelétrica</i>	56
3.3.2 <i>Testes experimentais a serem realizados</i>	57
3.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	58
4. PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE DA GERAÇÃO.....	59
4.1 DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR CC-CC BOOST	59
4.1.1 <i>Determinação do indutor - L</i>	62
4.1.2 <i>Determinação do capacitor de entrada - Ci</i>	63
4.1.3 <i>Determinação do capacitor - Co</i>	64
4.1.4 <i>Determinação da chave eletrônica</i>	65
4.1.5 <i>Determinação do diodo</i>	67
4.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE	68
4.2.1 <i>Microcontrolador</i>	68

4.2.2	<i>Condicionamento do sinal de tensão</i>	69
4.2.3	<i>Condicionamento do sinal de corrente</i>	72
4.2.4	<i>Sistema de MPPT</i>	74
4.3	PROTÓTIPO CONSTRUÍDO.....	77
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
5.1	SIMULAÇÃO	80
5.1.1	<i>Simulação da conversão termoelétrica de energia</i>	80
5.1.2	<i>Simulação dos circuitos básicos do TEG</i>	82
5.1.3	<i>Simulação dos circuitos básicos do TEG e MPPT</i>	84
5.2	TESTES EXPERIMENTAIS	92
5.2.1	<i>Um ramo da planta de geração termoelétrica - 7 (sete) TEG em série</i>	92
5.2.2	<i>Planta de geração termoelétrica completa – 42 (quarenta e dois) TEG</i>	97
5.3	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	104
5.3.1	<i>Análise de sensibilidade</i>	109
5.3.2	<i>Cenário otimista</i>	114
6.	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
6.1	PUBLICAÇÕES OBTIDAS.....	121
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	122
	REFERÊNCIAS	123
	ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO DO MÓDULO TERMOELÉTRICO MODELO TELBP1-12656-0.45.	127
	RESUMO DO CURRÍCULO LATTES	129

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica é recurso essencial para a o ser humano e de caráter primordial para o desenvolvimento das nações. Com o seu crescente consumo, a cada dia necessita-se de expansão da geração. A matriz energética mundial ainda é predominantemente poluidora, ou seja, utilizam combustíveis fósseis ou minerais. Para atender a esta expansão, é necessário a diversificação da matriz energética com o uso das fontes de energias alternativas.

A assinatura do Protocolo de Quioto (1997) foi um marco para as fontes alternativas de energia. Este tratado internacional prevê metas para a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) pelos países participantes. Aliado à necessidade de substituição das fontes poluidoras e ao crescimento da demanda mundial, iniciou-se uma série de grandes investimentos destinados ao desenvolvimento e aplicação das fontes alternativas de energia, de modo a tornar a geração de energia mais sustentável (SIMAS e PACCA, 2013).

Segundo Rodrigues (2015), no Brasil, os governos (Federal, Estadual e Municipal) ganharam instrumentos que os possibilitam realizar suas aquisições e obras pautadas em condições sustentáveis, não ficando mais estritamente apegado ao valor. Isso se deve à alteração promovida na lei 8.666/1993, com a inclusão de novo objetivo ao procedimento licitatório, “a promoção do desenvolvimento nacional sustentável”. Altounian (2012) relata que a partir desta alteração os gestores podem promover ações com diretrizes que assegurem não apenas o menor preço, mas a aquisição da proposta mais vantajosa e aquela que assegure os parâmetros da sustentabilidade em todos os seus aspectos.

Neste contexto, a busca por fontes limpas de energia está em alta e se torna necessária para a preservação do meio ambiente. Neste contexto a geração de energia elétrica através de fontes térmicas é mais uma opção.

O Brasil é um país privilegiado com relação à sua matriz de geração de energia elétrica, com predominância de fontes hidráulicas. No entanto, geradores térmicos entram em operação sempre que as condições hidrológicas são desfavoráveis. O despacho de usinas termelétricas acarreta em aumento dos preços praticados no mercado à vista de eletricidade, aumentando os riscos presentes no mercado de eletricidade Brasileiro. Além do mais, a maioria dos grandes consumidores de energia elétrica (indústrias, *Shopping Center*, dentre outros) gera

parte da energia que consomem, principalmente nos horários onde a sua compra é onerosa e nos momentos de falta no fornecimento de energia por parte da concessionária.

A energia gerada por esses consumidores utiliza em sua maioria máquinas de combustão, ou seja, os conhecidos geradores elétricos e como fonte de energia utilizam, principalmente, os combustíveis fósseis. Essas máquinas têm baixos rendimentos, onde grande parte da energia do combustível é dissipada na forma de calor (FARIAS, 2009).

Uma forma de melhorar o rendimento de qualquer tipo de máquina de combustão é o aproveitamento de parte da energia que é dissipada na forma de calor que, nesse caso, é um resíduo térmico que é descartado na atmosfera. Nas máquinas de combustão os resíduos térmicos são descartados de duas maneiras, no arrefecimento e na tubulação de escape. Um método de aproveitamento, de parte, desses resíduos é a sua transformação termoelétrica, com utilização de termogeradores (TEG).

Na geração termoelétrica é necessário que um gradiente de temperatura seja aplicada no TEG, sendo que para o “lado quente” poderá ser utilizada a temperatura do escapamento do gerador e para o “lado frio” a temperatura ambiente ou algum método de resfriamento. Esta conversão é realizada com base no efeito Seebeck, o qual descreve que quando as junções de dois materiais diferentes são expostas a diferentes temperaturas, uma força eletromotriz é gerada, assim temos uma energia elétrica disponível em corrente contínua (FARIAS, 2009).

Para maximizar a transferência de potência gerada pelos TEG à carga é necessário rastrear constantemente o seu ponto de geração de máxima potência, em inglês, Maximum Power Point Tracking (MPPT). O rastreamento pode ser realizado com a utilização de conversores cc-cc, alterando a sua razão cíclica, manualmente ou automaticamente com auxílios de técnicas de algoritmos de rastreamento.

Recentemente, alguns artigos estudaram a geração de energia elétrica através de termogeradores com a realização de MPPT. Dentre esses, os mais relevantes para esta pesquisa são citados a seguir:

- *Design of improved controller for thermoelectric generator used in distributed generation*: apresenta uma análise da aplicação de geradores termoelétricos como uma inovadora alternativa tecnológica de geração distribuída com conexão à rede. Um

novo esquema de controle para o TEG foi proposto, onde um MPPT é incorporado à sua estrutura para melhor aproveitamento dos recursos térmicos [MOLINA, 2010 et al.].

- *Maximum power point tracking controller for thermoelectric generators with peak gain control of boost DC-DC converters*: apresenta um estudo de um circuito com MPPT para geradores termoelétricos. Relata que no MPPT a razão cíclica do pulso de entrada do conversor se desloca em direção ao ponto de potência máxima do TEG. Também apresenta uma solução análoga de MPPT que não depende do uso de microcontroladores digitais [PARK e KIM, 2012].
- *High efficiency boost converter with variable output voltage using a self-reference comparator*: apresenta uma proposta de geração termoelétrica para utilização na biomedicina. O circuito desenvolvido é capaz de coletar e trabalhar com níveis de tensão a partir de 40 mV fornecidos por um TEG. Realiza o MPPT para melhorar a eficiência do sistema. A estrutura é capaz de fornecer tensões de saída de 1 a 3 V e a potência máxima fornecida pelo conversor é de 138 μ W, com uma eficiência de 52% [ASHRAF e MASOUMI, 2014].
- *Uninterrupted thermoelectric energy harvesting using temperature-sensor-based maximum power point tracking system*: apresenta o projeto de um sistema de coleta de energia de geradores termoelétricos com MPPT baseado em sensor de temperatura. Diferentemente dos convencionais, o sistema proposto pode rastrear a variação do ponto de potência máxima através de um circuito baseado em sensores de temperatura, que apresenta uma simples arquitetura e um baixo custo. Esse sistema utiliza a tensão de circuito aberto do TEG com os respectivos gradientes de temperatura para gerar um sinal de tensão de referência apropriado. O MPPT apresentado pode ser implementado sem a necessidade de um hardware ou software complexo. Além disso, o sistema é inerentemente estável porque ele não possui realimentação de medições instantâneas de potência e pode ser facilmente utilizado com qualquer tipo de conversor de energia [PARK, LEE E BOND 2014].

Este trabalho é parte integrante de um projeto de pesquisa aprovado na Chamada MEC/SETEC/CNPq N° 94/2013, através do Processo CNPQ n° 8485, com o título “Produção

de aparato tecnológico e de software para estudos de recuperação de perdas de energia em motor-gerador termoelétrico”. O projeto contempla o estudo do aproveitamento da energia térmica dissipada nos gases de exaustão de um motor-gerador para a geração de energia elétrica através de termogeradores (TEG), de forma a aumentar a eficiência do processo e torná-lo mais sustentável.

A Figura 1 apresenta as etapas desse projeto de pesquisa.

A etapa “Obtenção da geometria ótima da tubulação dos gases” compreende os estudos para construir um aparato que ofereça a melhor retenção térmica dos gases e também a equalização da temperatura superficial, onde serão instalados os TEG.

A etapa “Planta de geração termoelétrica” engloba o projeto, a construção e a montagem de uma planta de termogeradores (TEG), incluindo a parte mecânica, o circuito hidráulico e o controle e monitoramento da temperatura, para obtenção de dados experimentais.

A etapa “Conexão de energia gerada à carga” compreende a simulação, o projeto e a construção do sistema de rastreamento da máxima potência (MPPT) gerada pelos TEG e a conexão da planta de geração termoelétrica à carga.

A etapa “Estudo de viabilidade econômica” compreende o estudo de viabilidade econômica da planta de geração termoelétrica.

A etapa “Desenvolvimento de software” compreende a elaboração de software de simulação da capacidade de recuperação de energia a partir de resíduos térmicos.

Este trabalho contribui para o projeto de pesquisa nas etapas “Conexão de energia gerada à carga” e “Estudo de viabilidade econômica”.

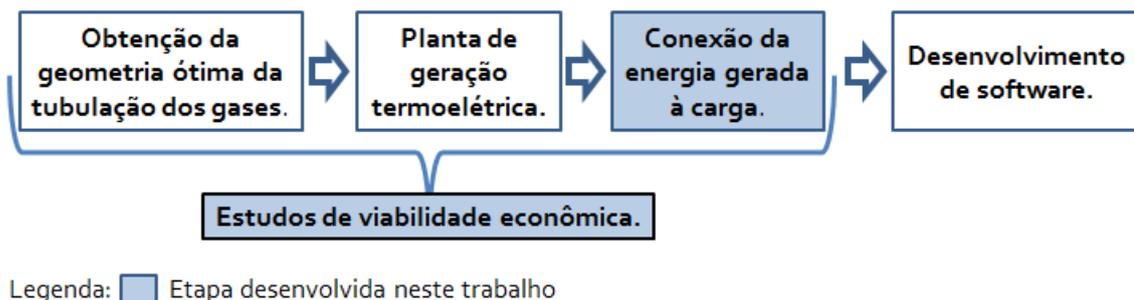


Figura 1 - Etapas do Projeto CNPQ nº 8485 - Produção de aparato tecnológico e de software para estudos de recuperação de perdas de energia em motor-gerador termoelétrico.

1.1 OBJETIVO GERAL

Pesquisar, simular, projetar, implementar e testar estruturas de conversores e controladores para a conexão da energia gerada, através de termogeradores, à carga.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar e simular a conversão termoelétrica de energia;
- Pesquisar, selecionar e simular: o conversor cc-cc, controladores de chave, modulador PWM, para realizar o controle da potência gerada em uma estrutura de termogeradores (TEG);
- Pesquisar, selecionar, desenvolver e simular um algoritmo para rastreamento e operação de uma estrutura de termogeradores em seu ponto de máxima potência (MPPT);
- Desenvolver estudos e implementar os arranjos, para a conexão elétrica (série/paralelo), dos conjuntos parciais e de toda a planta termoelétrica;
- Projetar e construir o sistema de MPPT, incluindo o conversor cc-cc, controle do sistema e algoritmo de rastreamento, para conexão elétrica da planta de geração à carga;
- Realizar testes experimentais com o projeto desenvolvido do conversor e dispositivo de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT);
- Desenvolver estudos, preliminares, de viabilidade técnica e econômica, para implementação de plantas de geração termoelétrica que utilize resíduos de energia térmica e conjunto motor-gerador.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo (Introdução) traz uma apresentação básica sobre termogeradores – TEG, aproveitamento da energia térmica dos gases de exaustão, MPPT, conversores, dentre outros temas importantes para nortear o leitor. Um breve estado da arte é transcrito. Também

são listados os objetivos deste estudo. Cita que este trabalho é parte integrante de um projeto de pesquisa, demonstrando suas principais etapas.

No capítulo 2 (Tecnologias Aplicadas a Conversores Termoelétricos) é realizada uma revisão bibliográfica dos principais conceitos e temas utilizados neste trabalho, tendo o intuito de balizar o desenvolvimento da pesquisa. São discutidos: efeitos termoelétricos (Seebeck e Peltier), materiais termoelétricos, dispositivos termoelétricos, termogeradores – TEG, transferência de potência da fonte geradora para a carga, conversor cc-cc boost e técnicas de MPPT.

No capítulo 3 (Metodologia) detalha-se a planta de geração termoelétrica utilizada: TEG, gerador elétrico, sistema de retenção térmica dos gases de exaustão e sistema de arrefecimento. Em seguida são apresentadas as diretrizes e condições utilizadas para realizar cada uma das atividades do projeto, sendo: modelagens computacionais e simulações, implementação do sistema de MPPT e análise de viabilidade econômica.

No capítulo 4 é realizado o projeto do sistema de MPPT a ser implementado em protótipo. São dimensionados todos os componentes que compõem o conversor cc-cc boost, selecionando produtos comerciais. É apresentado o sistema de controle, desde a aquisição de dados. Posteriormente é mostrada a imagem do protótipo final.

O capítulo 5 (Resultados e Discussão) traz os resultados obtidos com as simulações e testes experimentais realizados, no intuito de validar proposta determinada no capítulo de metodologia. Também é desenvolvida a análise de viabilidade econômica, incluindo a análise de sensibilidade.

O capítulo 6 (Conclusão e Considerações Finais) apresenta as conclusões, as publicações obtidas por esta dissertação e as obtidas com o projeto de pesquisa, além de sugestões para trabalhos futuros.

2. TECNOLOGIAS APLICADAS AOS CONVERSORES TERMOELÉTRICOS

2.1 EFEITOS TERMOELÉTRICOS

2.1.1 Efeito Seebeck

O efeito Seebeck foi descoberto em 1921 pelo físico russo-alemão Thomas Johann Seebeck quando este realizava um de seus experimentos. Naquela ocasião uniu as pontas de dois materiais diferentes (bismuto e cobre) fazendo um circuito fechado, e aqueceu uma das junções. Ao aproximar-se uma agulha de bússola ao circuito, constatou que a mesma defletia. A conclusão errônea deste experimento foi o fato de Seebeck tentar relacioná-lo ao fenômeno magnético (ROWE, 1995; JUNIOR, 2013).

Quando ocorre a junção de dois condutores elétricos distintos e havendo uma diferença de temperatura entre ambas as junções ocorre uma diferença de potencial elétrica, ou seja, uma tensão elétrica. Tal fenômeno se deve ao fato de um fluxo de portadoras (elétrons e lacunas), gerando uma corrente elétrica quando existe um caminho fechado (ROWE, 1995; JUNIOR, 2013).

A tensão gerada por cada par de condutores ainda é da ordem de milivolts, necessitando assim de uma grande quantidade de pares para ter uma geração da ordem de alguns volts. Alguns materiais condutores ou semicondutores têm melhores propriedades físicas para tal finalidade, sendo considerados materiais termoelétricos (ROWE, 1995; JUNIOR, 2013).

O coeficiente Seebeck (S) é dado em V/K, sendo a razão entre a diferença de tensão gerada (ΔV) pela diferença de temperatura (ΔT) que a ocasionou, conforme (1). (JUNIOR, 2013).

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (1)$$

A Figura 2 ilustra o efeito Seebeck, onde os elétrons da extremidade quente, que são mais energéticos, difundem para a extremidade fria numa taxa maior que a dos elétrons da extremidade fria, gerando uma diferença de potencial (JUNIOR, 2013).

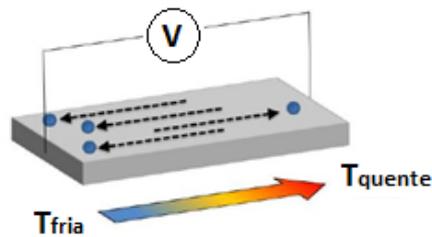


Figura 2 – Ilustração esquemática do efeito Seebeck.
Fonte: Junior, 2013.

2.1.2 Efeito Peltier

O físico francês Jean-Charles Peltier, em 1834, constatou o efeito contrário ao efeito Seebeck. Observou que ao percorrer uma corrente elétrica em um circuito fechado composto por dois materiais diferentes (bismuto e cobre), nas junções deste ocorria o aquecimento de uma e o resfriamento da outra. Porém, não concluiu que se tratava de um novo fenômeno ao relacionar a constatação ao efeito de Seebeck, o qual foi explicado por Lenz em 1838 (ROWE, 1995; JUNIOR, 2013).

Apesar de Peltier não concluir a sua descoberta, o novo fenômeno leva seu nome, sendo conhecido como efeito Peltier. A explicação para o efeito se deve ao fato de que portadoras de carga carregam diferentes quantidades de calor em cada tipo de material. Com isso, nas junções terão mais ou menos calor dependendo dos materiais envolvidos, gerando assim um gradiente de temperatura entre ambas as junções (ROWE, 1995; JUNIOR, 2013).

A Figura 3 ilustra o efeito Peltier. Ao passar pelas junções, os portadores passam a carregar mais ou menos calor, esfriando ou esquentando a respectiva junção (JUNIOR, 2013).

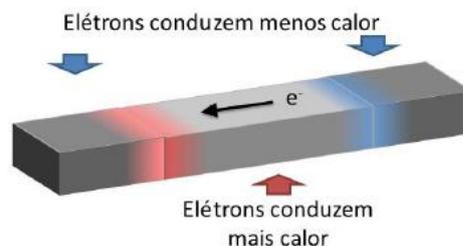


Figura 3 - Ilustração esquemática do efeito Peltier.
Fonte: Junior, 2013.

2.2 MATERIAIS TERMOELÉTRICOS

Os materiais termoelétricos são os componentes principais na fabricação dos dispositivos termoelétricos. Esses possuem propriedades físicas particulares, pois é necessário que tenham uma alta condutividade elétrica e uma baixa condutividade térmica, além de elevado coeficiente de Seebeck. O empecilho se deve ao fato das propriedades exigidas serem apostas. Geralmente um material com alta condutividade elétrica, por exemplo, os metais, também possuem alta condutividade térmica (GONÇALVES, 2008).

A eficiência de um material termoelétrico é definida por sua figura de mérito ZT , sendo uma grandeza adimensional. A expressão (2) expressa tal eficiência (JUNIOR, 2013):

$$ZT = \frac{S^2 \cdot \sigma \cdot T}{K} \quad (2)$$

Sendo:

S : o coeficiente Seebeck ($V.K^{-1}$);

σ : a condutividade elétrica ($\Omega^{-1}.m^{-1}$);

K : a condutividade térmica ($W.K^{-1}.m^{-1}$) e;

T : a temperatura absoluta (K).

A figura de mérito ZT também pode determinar a eficiência de uma liga, junção P-N ou até de um dispositivo termoelétrico. Quanto maior ZT , mais eficiente.

À temperatura ambiente (250-350 K) é difícil obter materiais e/ou ligas com ZT próximos da unidade. Na condição citada, os compostos de telúrio (Te), bismuto (Bi), antimônio (Sb) e Selênio (Se) apresentam as maiores figuras de mérito (GONÇALVES, 2008).

2.3 DISPOSITIVOS TERMOELÉTRICOS

Os dispositivos termoelétricos mais conhecidos e utilizados são o refrigerador ou aquecedor por efeito Peltier e o gerador elétrico por efeito Seebeck. Esses dispositivos são construídos por pares de segmentos de semicondutores do tipo n e do tipo p, onde os portadores (elétrons para tipo n e lacunas para tipo p) se deslocam conduzindo calor. A Figura 4 apre-

senta exemplos de dispositivos de efeito Peltier (A) e de efeito Seebeck (B) e um arranjo típico dos dispositivos (C) (JUNIOR, 2013).

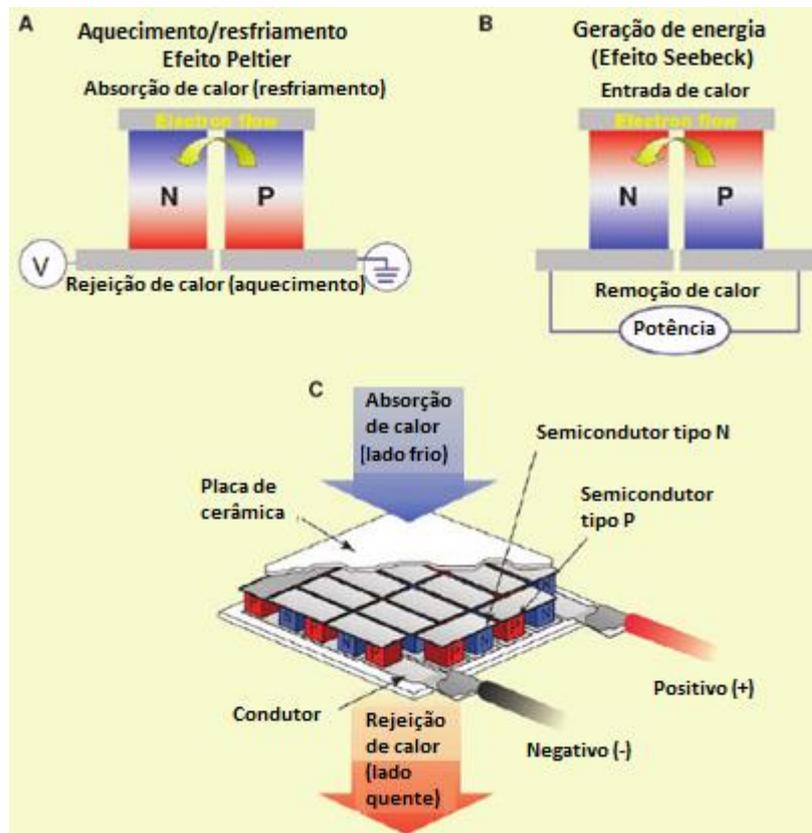


Figura 4 - Ilustração esquemática de dispositivos termoelétricos típicos. (a) Refrigerador (ou aquecedor) por efeito Peltier. (b) Gerador elétrico por efeito Seebeck. (c) Arranjo típico dos dispositivos.

Fonte: Junior, 2013.

2.3.1 Dispositivo de efeito Peltier

Os dispositivos termoelétricos de efeito Peltier são geralmente utilizados em aplicações de refrigeração, especialmente em equipamento portáteis. Apesar do baixo rendimento, possuem vantagens como manutenção reduzida (não tem partes móveis) e as reduzidas dimensões (GONÇALVES, 2008).

A Figura 5 ilustra um módulo de efeito Peltier comercial.

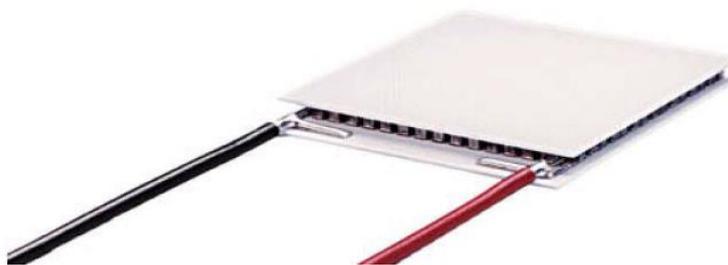


Figura 5 - Módulo Peltier comercial, constituído por elementos termoeletricos entre duas placas de cerâmica.
Fonte: Gonçalves, 2008.

2.3.2 Termopar

Os termopares são sensores de temperatura, relativamente simples, utilizados amplamente em medições desta natureza, sendo fabricado por dois tipos de materiais. O funcionamento deste medidor é baseado no efeito Seebeck, ou seja, existe uma tensão gerada proporcional à diferença de temperatura entre as junções dos lados “quente” e “frio” (ROWE, 1995).

A Tabela 1 traz a relação do coeficiente Seebeck de alguns materiais em relação à platina. A Figura 6 apresenta um exemplo de medição utilizando o termopar, onde a temperatura de referência é obtida por um banho de água com gelo (0 °C) (GONÇALVES, 2008).

Tabela 1 – Coeficientes de Seebeck de alguns materiais, à temperatura de 0 °C, medido relativamente à platina

Material	Coef. Seebeck (μVK^{-1})	Material	Coef. Seebeck (μVK^{-1})	Material	Coef. Seebeck (μVK^{-1})
Alumínio	3,5	Cobre	6,5	Platina	0
Antimônio	47	Ferro	19	Prata	6,5
Bismuto	-72	Germânio	300	Selênio	900
Carbono	3,0	Níquel	-15	Silício	440
Chumbo	4,0	Níquel-crômio	25	Telúrio	500
Constantan	-35	Ouro	6,5	Tungstênio	7,5

Fonte: Gonçalves, 2008.

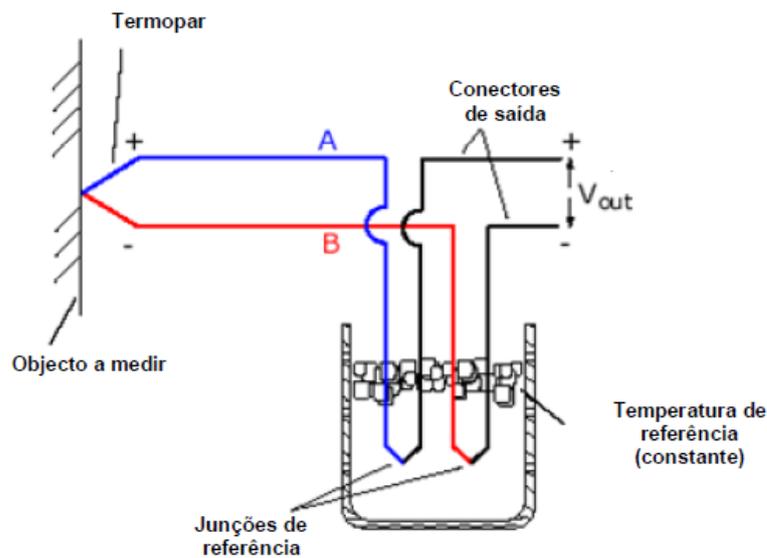


Figura 6 - Medição de temperatura com termopar.
Fonte: Gonçalves, 2008.

2.3.3 Gerador termoelétrico do efeito Seebeck - TEG

Utilizando-se do efeito Seebeck é possível gerar energia elétrica através da diferença de temperatura entre as junções de diferentes materiais semicondutores, onde essas junções formam polos do tipo N e P. Com o calor aplicado em uma das junções os elétrons adquirem energia cinética e percorrem até a outra extremidade, junção do lado frio, concentrando carga neste local. A junção do “lado frio” do elemento N adquire polaridade negativa e a junção do “lado quente” do elemento P adquire polaridade positiva (FARIAS, 2009).

A Figura 7 mostra as junções P-N de um gerador termoelétrico.

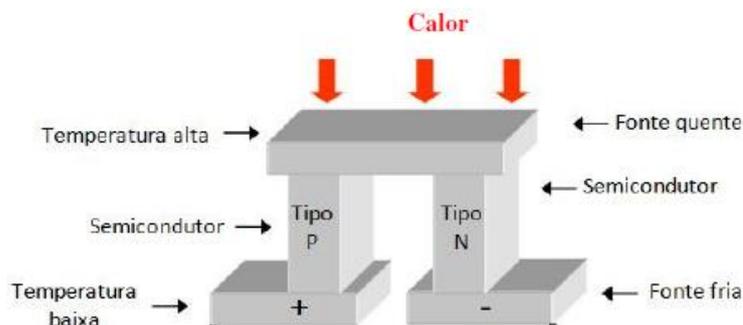


Figura 7 - Junção P-N de um gerador termoelétrico
Fonte: Adaptado de FARIAS, 2009.

O gerador termoelétrico (TEG) é formado pela somatória desses elementos P-N, ligados eletricamente em série e termicamente em paralelo. Os elementos P-N são interligados através de condutores elétricos. Placas de cerâmica recobrem os dois lados do TEG (quente e frio), conseqüentemente gerando uma resistência mecânica para o módulo, também é responsável pelo isolamento elétrico e condução de calor (FARIAS, 2009; GONÇALVES, 2008; HENDRICKS e CHOATE, 2006).

A Figura 8 apresenta a composição de um TEG e detalhes da ligação térmica e elétrica da junção P-N.

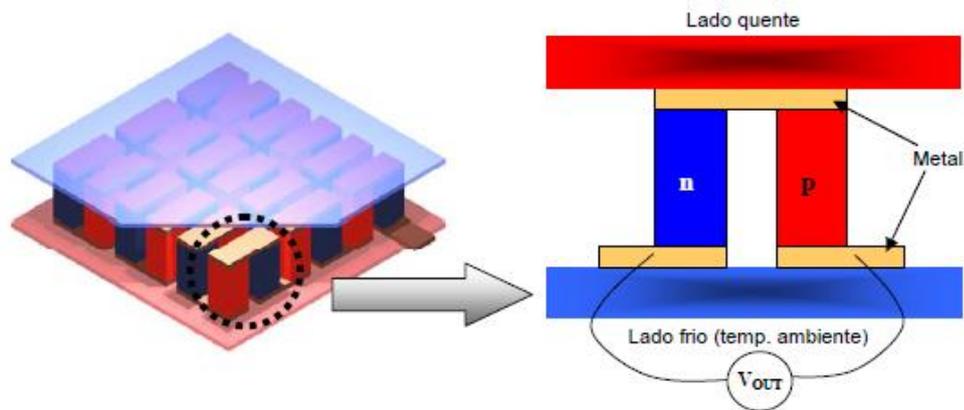


Figura 8 - Composição de um gerador termoelétrico e detalhes da ligação térmica e elétrica de uma junção P-N
Fonte: Gonçalves, 2008.

Ashraf e Masoumi (2014) apresentam que a tensão de circuito aberto gerada pelo TEG (V_{out}) está relacionada com o coeficiente Seebeck (S) do módulo e com a diferença de temperatura aplicada (ΔT) entre as junções, conforme consta em (3).

$$V_{out} = S \cdot \Delta T \quad (3)$$

A Figura 9 mostra um TEG típico (a) e o seu circuito elétrico equivalente (b).

Com base na Figura 9 (b), eletricamente, relaciona-se o TEG a uma fonte de tensão variável com sua resistência interna.

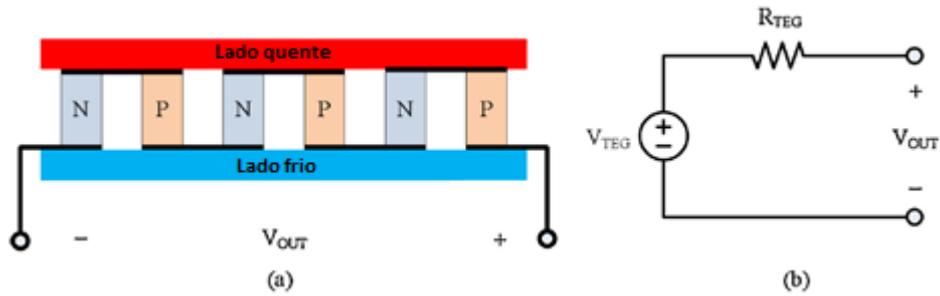


Figura 9 - (a) Gerador termoelétrico típico e (b) Circuito elétrico equivalente
Fonte: Ashraf e Masoumi, 2014.

Os TEG são compactos, silenciosos, estáveis e muito confiáveis, além do mais não utilizam partes móveis. Estes sistemas têm sua eficiência diretamente ligada à diferença de temperatura aplicada entre as junções dos componentes e do tipo de material TE utilizado em sua composição. Com isso além de aplicar calor de um lado da junção é vantajoso que esfrie o outro lado da junção (HENDRICKS e CHOATE, 2006; FARIAS, 2009).

Atualmente os materiais TE disponíveis e utilizados na fabricação dos TEG têm uma eficiência de conversão (calor em eletricidade) em torno de 5%, porém recentes avanços científicos na área quântica e efeitos da nanoestrutura e nas propriedades materiais demonstram a possibilidade de se obter materiais TE com eficiência de conversão de mais de 15% (HENDRICKS e CHOATE, 2006; FARIAS, 2009).

Segundo Hendricks e Choate (2006) novos estudos são necessários para aperfeiçoar a geração termelétrica, dentre esses, os que visem simular e projetar estruturas que eficientizem as trocas de calor entre o lado quente, resíduo térmico, e os geradores termoelétricos (TEG), bem como as trocas de calor entre os TEG e o lado frio.

Outro fator de melhora nos geradores é concepção da arquitetura do sistema, controlando a troca de calor e maximizando o desempenho de conversão (HENDRICKS e CHOATE, 2006; FARIAS, 2009).

2.4 TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA DA FONTE GERADORA PARA A CARGA

Todas as fontes de energia elétrica (bateria, geradores, TEG, etc) possuem uma resistência interna que dependem de seu método construtivo e das condições em que está submetida quando da geração de energia elétrica. No circuito elétrico esta resistência é colocada em

série com a fonte geradora, tendo influência direta no fornecimento da energia gerada para a carga.

A Figura 10 ilustra uma fonte de energia elétrica e sua resistência interna com uma carga variável (RL).

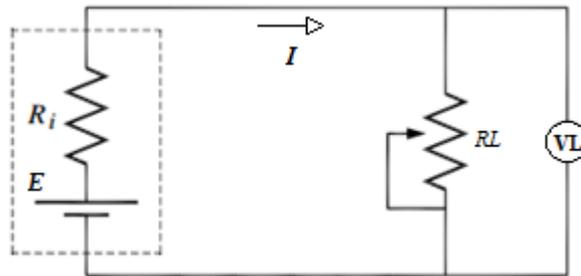


Figura 10 – Fonte de energia elétrica com resistência interna e carga variável
Fonte: Adaptado de USP, 2015.

Para compreender o comportamento deste sistema, transcrevem-se as equações a seguir. A expressão (4) é referente à corrente elétrica (I) que percorre o circuito, em (5) expressa demonstra-se a potência consumida pela carga (RL) e em (6) a potência dissipada na resistência interna R_i da fonte geradora.

$$I = \frac{E}{R_i + RL} \quad (4)$$

$$PL = RL \cdot I^2 = RL \cdot \left(\frac{E}{R_i + RL} \right)^2 \quad (5)$$

$$P_i = R_i \cdot I^2 = R_i \cdot \left(\frac{E}{R_i + RL} \right)^2 \quad (6)$$

A resistência interna da fonte é um componente indesejável ao sistema, visto que consome parte da energia gerada. Porém, as fontes não são ideais e sempre existirão estas perdas internas.

Como a resistência interna se torna uma parte do sistema elétrico é necessário adequar-se para minimizar as perdas e transferir a máxima potência gerada para a carga. Para encontrar esta condição é necessário derivar PL em relação à RL e igualar a zero, conforme (7) (USP, 2015).

$$\frac{dPL}{dRL} = \left(\frac{E}{R_i + RL} \right)^2 - \frac{2RL \cdot E^2}{(R_i + RL)^3} = 0 \Rightarrow RL = Ri \quad (7)$$

Conforme demonstrado em (7) a máxima transferência de potência da fonte para a carga ocorre quando a resistência (ou impedância) interna da fonte é igual à resistência (ou impedância) da carga (USP, 2015).

O TEG é considerado uma fonte de tensão variável e, como as demais fontes, também possui uma resistência interna.

A Figura 11 apresenta o circuito elétrico equivalente do TEG com a inclusão de uma carga (RL).

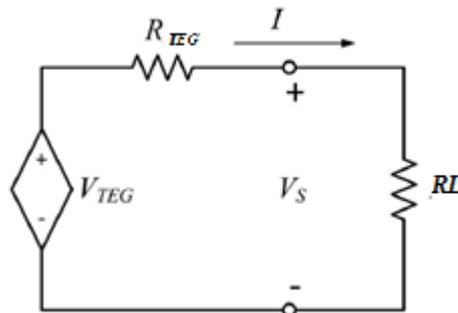


Figura 11 - Circuito elétrico equivalente do TEG com a inclusão de uma carga externa (RL)
Fonte: Park, Lee e Bond, 2014.

Com base no circuito elétrico equivalente do TEG, (8) relaciona a potência dissipada pela carga.

$$PL = RL \cdot \left(\frac{V_{TEG}}{R_{TEG} + RL} \right)^2 \quad (8)$$

O TEG tem um gráfico característico para a sua geração de potência elétrica, onde sua amplitude é dependente de determinados fatores, em especial a diferença de temperatura apli-

cada (ΔT). Considerando que a eficiência do TEG é baixa torna-se necessário extrair o máximo da potência gerada.

Mesmo sabendo do conceito da máxima transferência de potência, por diversos fatores nem sempre é possível de se obter um circuito com as resistências interna e externa iguais. A resistência interna do TEG não é exatamente constante para toda a sua faixa de operação, está relacionada principalmente às mudanças nas condições de temperatura as quais está submetido. Ademais, a carga devido as suas condições, nem sempre tem uma impedância constante. Assim para cada condição de (ΔT , R_{TEG} , RL), existe uma curva de potência diferente e consequentemente um diferente ponto de máxima potência, ou Maximum Power Point – (MPP) (RAGHAVENDRAN E ASOKAN, 2014).

A Figura 12 apresenta curvas de potência para diferentes ΔT .

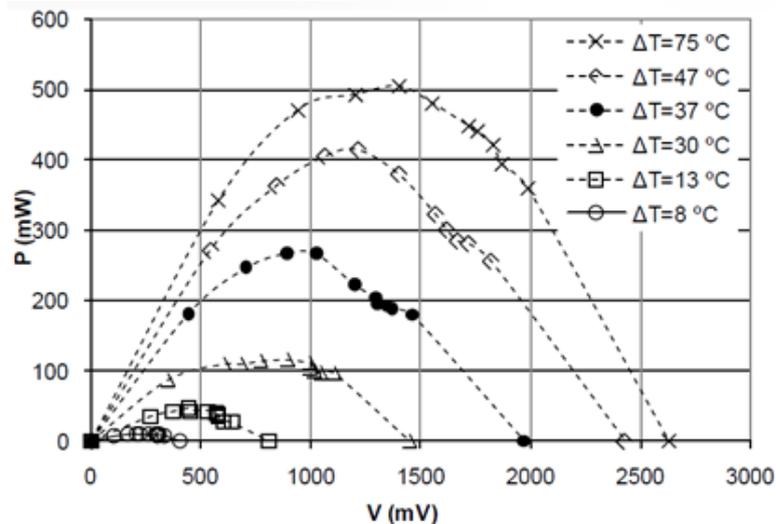


Figura 12 – Geração de potência elétrica do TEG Ferrotec 9505/127/2508 para diferentes ΔT
Fonte: Goncalves et. al. (2010)

Para solucionar tal situação há conversores cc-cc que “modificam” a resistência externa “vista” pelo TEG, de modo a aproximá-la da resistência interna e com isso extrair a máxima potência para inúmeras cargas e condições de entrada ou saída (ΔT , R_{TEG} , RL) (RIBEIRO, 2011; PARK, LEE E BOND 2014).

2.5 CONVERSORES CC-CC

Os conversores cc-cc são dispositivos utilizados para alterar a tensão contínua de um determinado circuito, elevando ou abaixando, funcionam como um transformador para a corrente contínua.

Estes conversores podem ser divididos em dois grandes grupos: os isolados e os não isolados. A diferença básica entre os grupos está no fato dos isolados utilizarem um transformador de alta frequência em sua estrutura. Dentre os não isolados, os mais utilizados são o buck, o boost e o buck-boost. Quanto aos isolados cita-se: o flyback, o forward, o meia ponte e o ponte completa (BATSCHAUER, NETO E PETRY, 2000).

Os citados conversores podem ser utilizados para realizar o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) de uma fonte de energia, através do “casamento de impedâncias” entre a resistência interna da fonte e a resistência de carga que está sendo alimentada.

A Figura 13 ilustra um circuito elétrico com a interligação de um conversor cc-cc. A alteração da razão cíclica da chave eletrônica do conversor faz com que a fonte “veja” a resistência de carga “modificada”, desse modo o MPPT busca aproximar os valores da resistência interna da fonte e da resistência da carga “vista” pela fonte. (RIBEIRO, 2011; PARK, LEE E BOND 2014).

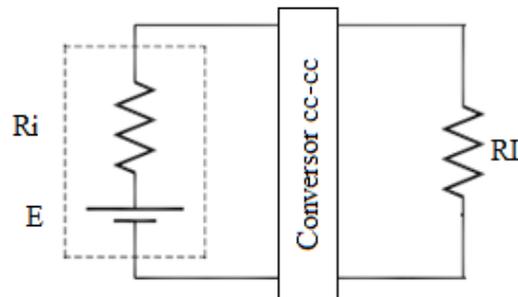


Figura 13 – Circuito elétrico com interligação de conversor cc-cc

Como a tensão gerada pelo TEG é consideravelmente baixa, a grande maioria dos trabalhos utiliza o conversor cc-cc do boost para tal função, visto que este conversor eleva a tensão de saída em relação à de entrada (PARK, LEE e BOND, 2014; ASHRAF e MASOUMI, 2014; PARK e KIM, 2012).

Neste trabalho também é utilizado um conversor cc-cc boost (elevador de tensão) devido à baixa tensão gerada pelo TEG e pela simplicidade de implementação do mesmo.

2.5.1 Conversor cc-cc boost ou elevador de tensão

O conversor cc-cc boost é capaz de elevar a tensão de saída em relação à tensão de entrada, por isso é considerado um elevador de tensão.

A Figura 14 ilustra o conversor cc-cc boost.

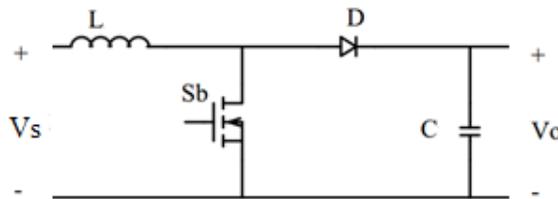


Figura 14 - Conversor cc-cc boost (elevador)
Fonte: Adaptado de Batschauer, Neto e Petry, 2000.

Basicamente os componentes utilizados no conversor boost são o indutor (L), diodo (D), capacitor (C) e a chave eletrônica (Sb) (RIBEIRO, 2011).

O conversor tem como princípio básico o armazenamento e descarga da energia no indutor (L), tendo seu comportamento controlado pela alteração da razão cíclica (D) da chave eletrônica, geralmente através de sinal PWM (Pulse Width Modulation). De uma forma geral tem seu funcionamento dividido em duas etapas (ANICETO, 2010; RIBEIRO, 2011).

A Figura 15 apresenta a primeira etapa de funcionamento, relacionada ao período em que a chave eletrônica está fechada (T_{on}), nesta condição a corrente circula pelo indutor carregando-o e o capacitor alimenta a carga (ANICETO, 2010).

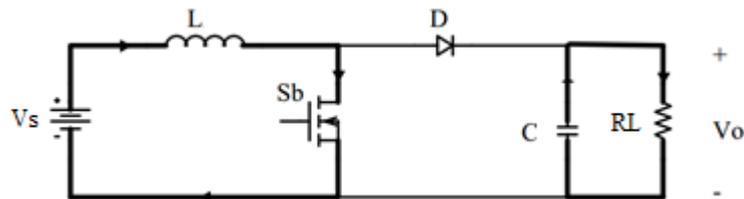


Figura 15 – Primeira etapa de funcionamento do conversor cc-cc boost
Fonte: Batschauer, Neto e Petry, 2000.

A Figura 16 apresenta a segunda etapa, que compreende o período que a chave eletrônica está aberta (T_{off}), nesta a fonte (V_s) e o indutor (que ao final é descarregado) fornecem energia para a carga, com isso há um aumento no valor da tensão de saída. O capacitor também é carregado. (ANICETO, 2010).

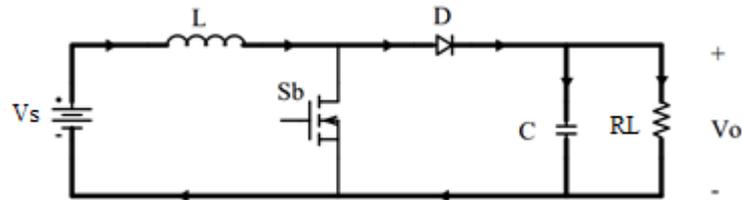


Figura 16 – Segunda etapa de funcionamento do conversor cc-cc boost
Fonte: Batschauer, Neto e Petry, 2000.

Em (9) é apresentado a relação da tensão de saída do conversor cc-cc boost, para o modo de operação contínua.

$$V_o = \frac{V_s}{1 - D} \quad (9)$$

Das equações anteriores compreende-se que D representa a porcentagem do período em que a chave está em seu nível alto, ou seja, fechada. Também se verifica que a elevação de tensão é proporcional ao valor da razão cíclica (D), ou seja, quanto maior a razão cíclica maior será a tensão de saída.

A Figura 17 demonstra ganho de tensão do conversor cc-cc boost, para o modo de operação contínua. Destaca-se que para um bom comportamento do conversor, usualmente utiliza valores de D entre 0,1 e 0,9.

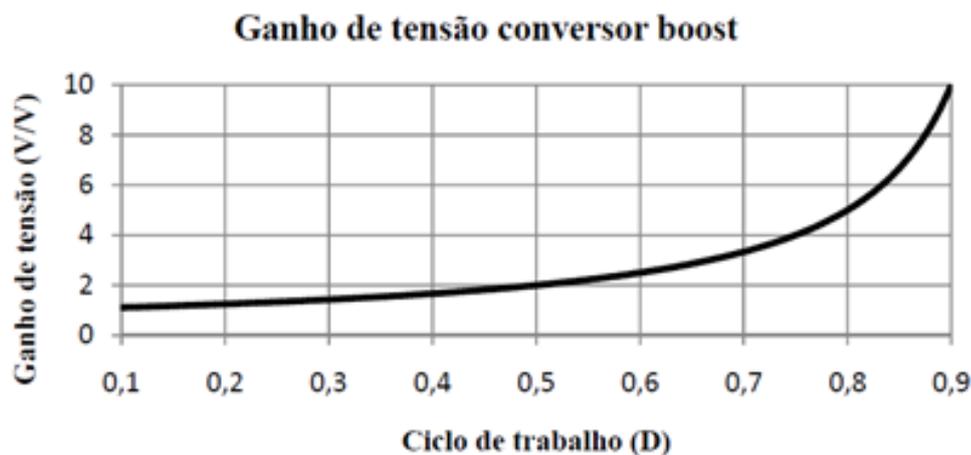


Figura 17 - Ganho de tensão do conversor cc-cc boost
Fonte: Ribeiro, 2011.

2.6 MPPT EM CONVERSOR CC-CC BOOST

Para realizar o MPPT utilizam-se os conversores cc-cc com a alteração de sua razão cíclica.

Com a alteração da razão cíclica do conversor cc-cc boost, a impedância externa vista pela fonte é modificada de modo que possa realizar o casamento ideal das impedâncias (interna e externa), no intuito de obter a máxima transferência de potência (RIBEIRO, 2011).

Considerando que para cada razão cíclica uma diferente impedância externa é vista pelo TEG e conseqüentemente uma determinada potência é disponibilizada, conclui-se que em uma específica razão cíclica é realizada a máxima transferência de potência. O MPPT é encontrado através da utilização de algoritmos desenvolvidos, os quais atuam na razão cíclica do conversor (RIBEIRO, 2011).

2.7 TÉCNICAS DE MPPT

Segundo Raghavendran e Asokan (2014) existe uma série de métodos disponíveis para rastrear o ponto de potência máxima (MPPT). Dentre esses, destaca-se o “Perturbar e Observar” e a “Condutância Incremental”.

2.7.1 Método de P&O (perturbar e observar) para o MPPT

O método de perturbar e observar (P&O) utiliza um algoritmo de MPPT para rastrear a potência máxima que pode ser extraída do gerador termoeletrico (RAGHAVENDRAN E ASOKAN, 2014).

A Figura 18 ilustra o diagrama de fluxo deste método.

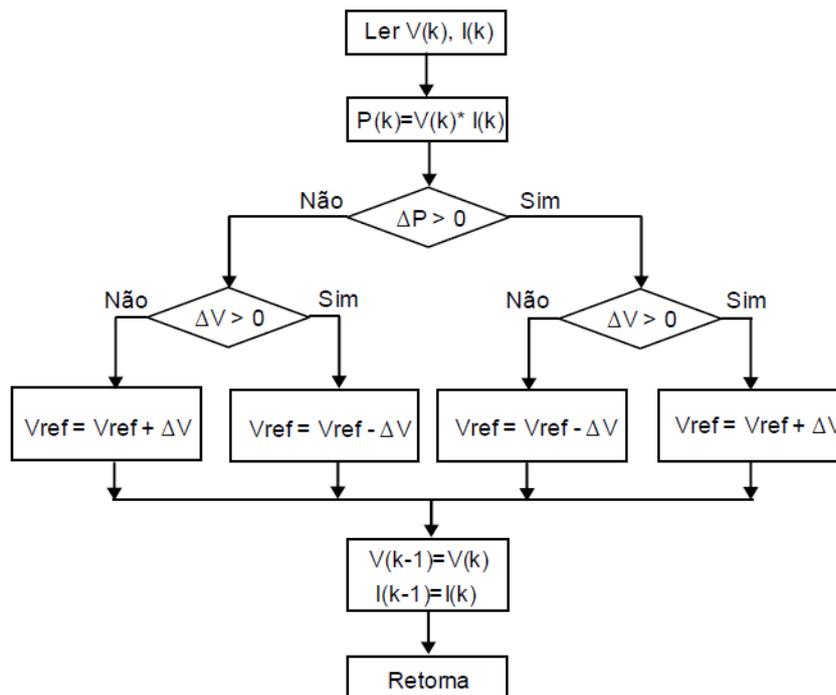


Figura 18 - Fluxograma básico do método de P&O
Fonte: Seguel, 2009.

Inicialmente, $K = 1$, faz a medição de corrente e tensão instantâneas, destas calcula-se a potência instantânea - $P(I)$. Em seguida, a tensão de referência é modificada, com a alteração da razão cíclica do conversor cc-cc. Posteriormente, faz nova medição de corrente e tensão instantâneas, $K = 2$, e tem-se uma nova potência instantânea - $P(2)$. Com essas informações, o algoritmo calcula o $\Delta P = P(2) - P(1)$.

Caso o ΔP seja positivo a perturbação na tensão (aumentando ou diminuindo) deverá ser repetida. Porém, se o ΔP for negativo, a perturbação na tensão deverá ser contrária à anterior. Uma situação constatada em diversos trabalhos é relacionada ao algoritmo perturbar constantemente, por não encontrar o ponto exato em que ΔV seja 0 (zero), nestes casos deve

prever um “erro” na busca do MPPT para que o algoritmo pare de perturbar o sistema desnecessariamente, ou seja, sem ganhos consideráveis de potência (SEGUEL, 2009).

As perturbações na tensão são conseguidas com auxílio de conversores cc-cc, ao modificar-se a sua razão cíclica (RAGHAVENDRAN E ASOKAN, 2014).

Basicamente dois parâmetros devem ser definidos, o período de amostragem (T_a) e tamanho da perturbação (ΔV). O período de amostragem corresponde ao intervalo de tempo em que serão efetivamente medidas as correntes e tensões instantâneas para posterior perturbação. O valor de T_a não pode ser menor que o tempo de estabilização do sistema que está sendo utilizado. O tamanho da perturbação ΔV , efetivamente, está relacionada ao tamanho da variação da razão cíclica a ser aplicada ao conversor cc-cc (SEGUEL, 2009).

Diversos autores concordam que técnica do P&O é a mais utilizada para o MPPT e relacionam tal feito à facilidade de implementação e a eficiência (RAGHAVENDRAN E ASOKAN, 2014; SEGUEL, 2009).

2.7.2 Método da Condutância Incremental para o MPPT

O método da condutância incremental também utiliza um algoritmo de MPPT para extrair a máxima potência da fonte geradora. Para a busca da máxima potência são efetuadas medições periódicas e instantâneas de tensão e corrente do arranjo.

A Figura 19 ilustra o diagrama de fluxo do método da condutância incremental (SEGUEL, 2009).

Este método utiliza como referência a inclinação da curva da potência pela tensão e se baseia na condutância instantânea do arranjo da fonte. Realiza a soma da condutância instantânea (I/V) e da condutância incremental (dI/dV). Com isso, a técnica avalia em que “lado” da curva da potência o arranjo está operando naquele instante ou se já está no MPP, condição onde $I/V + dI/dV=0$ (SEGUEL, 2009; RIBEIRO, 2011).

Semelhante ao método de P&O, os incrementos ou decrementos são realizados efetivamente na razão cíclica do conversor cc-cc. Os parâmetros de período de amostragem (T_a) e tamanho da perturbação (ΔV) devem ser definidos. Também deverá ser previsto um “erro” para que o algoritmo cesse o MPPT, quando o ganho de potência é desprezível (SEGUEL, 2009; RIBEIRO, 2011).

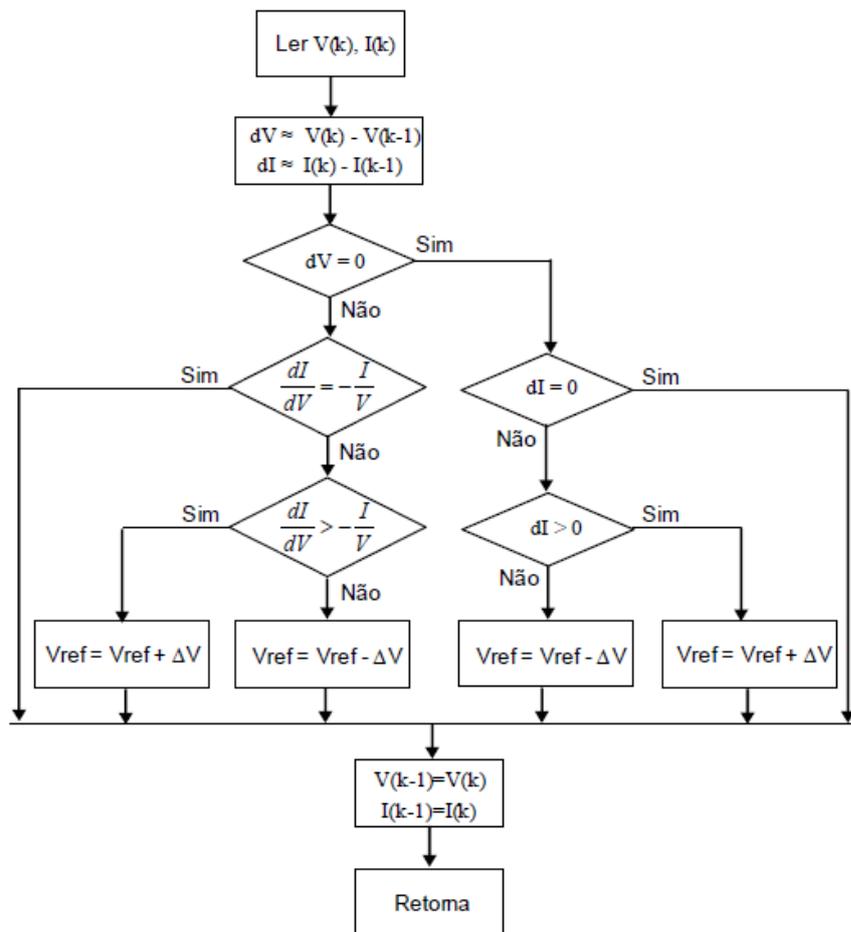


Figura 19 - Fluxograma básico do método de condutância incremental
 Fonte: Seguel, 2009.

3. METODOLOGIA

Este capítulo trata dos desenvolvimentos metodológicos para atingir os objetivos propostos neste trabalho. O mesmo é subdividido em:

- Apresentação da planta de geração termoelétrica proposta e implementada por Stecanella et al. (2015) e Gomes et al. (2015);
- Modelagem da conversão termoelétrica de energia;
- Modelagem dos circuitos básicos do TEG;
- Modelagem dos circuitos básicos do TEG e MPPT;
- Implementação do sistema de MPPT;
- Análise de viabilidade econômica.

3.1 PLANTA DE GERAÇÃO TERMOELÉTRICA

Conforme citado na introdução, este trabalho é parte integrante do projeto de pesquisa “Processo CNPQ nº 8485”, o qual teve suas etapas apresentadas na Figura 1. Uma das etapas que este trabalho contribui é a “Conexão da energia gerada à carga”. No entanto, para desenvolver a citada etapa é necessário conhecer as etapas anteriores, denominadas “Obtenção da geometria ótima da tubulação dos gases” e “Planta de geração termoelétrica”, propostas e implementadas por Stecanella et al. (2015) e Gomes et al. (2015). Essas etapas englobam os estudos para construção de um aparato que possibilite uma condição otimizada de transferência de calor dos gases de exaustão de um grupo motor-gerador, a construção e a montagem de uma planta de termogeradores (TEG), incluindo a parte mecânica, o circuito hidráulico, a automação do sistema e o controle e monitoramento da temperatura.

3.1.1 TEG

A Figura 20 ilustra o TEG utilizado, modelo TELBP1-1256-0.45 Termonamic.

Os dados de catálogo do TEG se encontram no Anexo A. Esse apresenta uma série de dados técnicos para compreender e facilitar a utilização do mesmo.

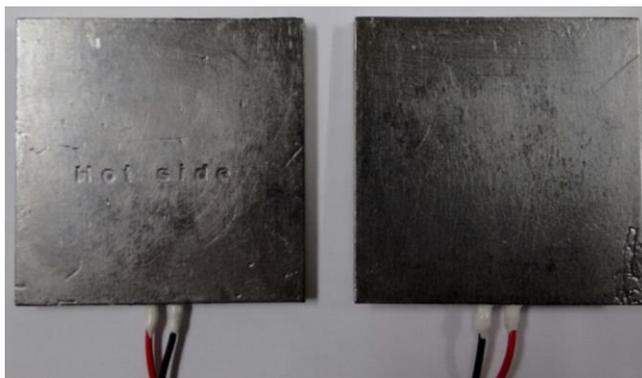


Figura 20 – TEG TELBP1-12656-0.45

A Tabela 2 apresenta as informações técnicas considerando a operação do mesmo na condição de máxima eficiência, ou seja, com uma temperatura de 350 °C no lado quente e 30 °C no lado frio.

Tabela 2 - Parâmetros do TEG TELBP1-12656-0.45

Temperatura lado quente/ Th (°C)	350
Temperatura lado frio/ Tc (°C)	30
Tensão de circuito aberto (V)	9,2
Resistência interna (ohms)	0,97
Tensão na máxima potência (V)	4,6
Corrente na máxima potência (A)	4,7
Potência máxima de saída (W)	21,7
Fluxo de calor através do módulo (W)	≈ 247
Densidade do fluxo de calor (W cm ⁻²)	≈ 7,9
Resistência AC (ohms), medido em 27 °C e 1000 Hz	0,42 ~ 0,52
Eficiência (%)	≈ 6,875
Coefficiente de Seebeck (VK ⁻¹)	0,02875
Figura de Mérito	0,713875
Dimensões (mm)	56 x 56 (± 0,5)

Fonte: Thermonamic, 2014.

Este TEG é construído com uma mistura de telúrio de chumbo com telúrio de bismuto, o que o possibilita suportar em seu lado quente 360 °C contínuos e 400 °C intermitentes. Aplicando 350 °C no lado quente e 30 °C no lado frio o referido TEG gera 21,7 W e produz uma tensão de circuito aberto de 9,2 V.

A Figura 21 apresenta os gráficos de V_{xI} e P_{xI} para o TEG nas condições de operações apresentadas na Tabela 2 (TERMONAMIC, 2014).

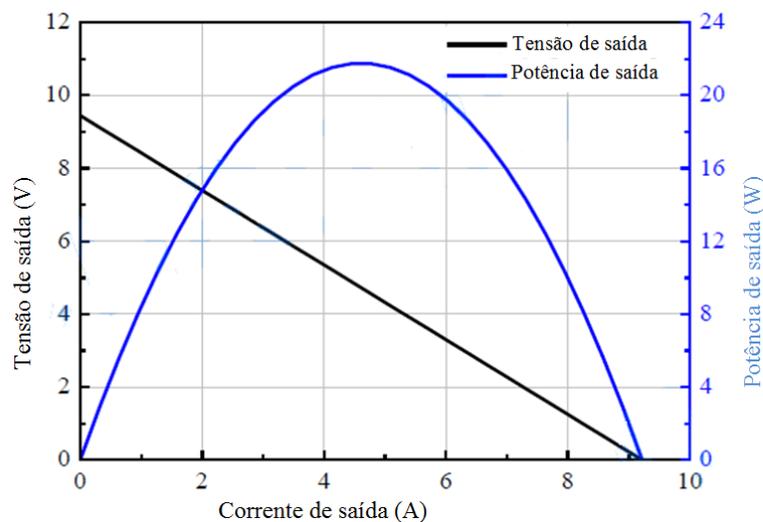


Figura 21 - Gráficos de $V_{\lambda I}$ e $P_{\lambda I}$ do TEG TELBP1-12656-0.45, $T_h=350^{\circ}\text{C}$ e $T_c=30^{\circ}\text{C}$
 Fonte: Adaptado de Thermonamic, 2014.

Através da Figura 21 observa-se que no ponto de máxima potência do TEG a tensão disponibilizada pelo mesmo é de 4,6 V, ou seja, 50% da tensão de circuito aberto, neste ponto a potência elétrica gerada é de 21,7 W.

3.1.2 Gerador elétrico

A planta de geração termoelétrica proposta utiliza como fonte de calor os gases de exaustão de um gerador elétrico, através da instalação de aparato (a ser detalhado posteriormente) na tubulação de escape desses gases.

A Figura 22 apresenta o gerador elétrico utilizado, sendo um conjunto motor-gerador instalado no laboratório de geração do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), campus Goiânia.



Figura 22 – Grupo motor-gerador utilizado

A Tabela 3 apresenta os principais dados do grupo motor-gerador utilizado nessa etapa.

Tabela 3 – Dados do grupo motor-gerador

Modelo	Cramaco G2R. Síncrono, trifásico, sistema brushless, 4 polos, passo encurtado, ligação estrela com neutro acessível, isolamento classe H e regulador de tensão eletrônico.
Potência (Standby/Prime)	150 / 141 kVA 120 / 113 kW
Tensão	380 V
Corrente	214 A
Frequência	60 Hz
Cos φ	0,8
Rotação	1800 RPM
Combustível	Diesel
Consumo combustível (100% carga)	31,3 l/h
Fabricação	Jul/2010

Fonte: Placa de identificação do grupo motor-gerador.

A Figura 23 mostra a distribuição média de produção e perda de energia de usina a motor a óleo diesel. O funcionamento do motor Diesel compreende quatro fases: admissão, compressão, combustão e escape. No entanto, apenas a fase de combustão que se produz

energia. Dos 100% de óleo diesel utilizado, apenas 35% é convertido em energia elétrica e 23% são desperdiçados na tubulação dos gases de exaustão (MAMEDE FILHO, 2011).

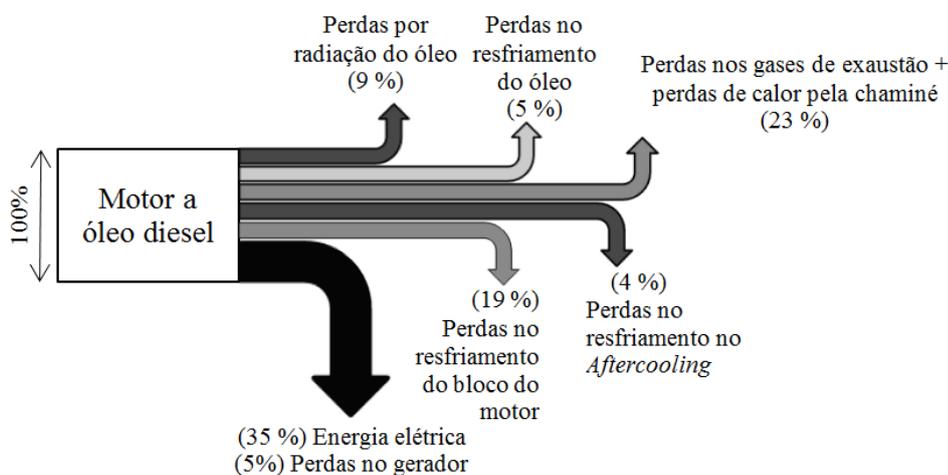


Figura 23 - Distribuição média de produção e perda de energia de usina a motor a óleo diesel
Fonte: Adaptado de Mamede Filho, 2011.

Com base nas informações de Mamede Filho (2011) e utilizando as informações técnicas da Tabela 3 pode-se calcular a energia desperdiçada através dos gases de exaustão, conforme (10). Onde: $P_{g.e.}$ é a potência das perdas de exaustão através da tubulação do escape do gerador (dado em kW) e $P_{e.e.}$ a potência energia elétrica disponível para utilização (dado em kW).

$$P_{g.e.} = \frac{P_{e.e.}}{0,35} \cdot 0,23 \quad (10)$$

Desse modo, quando o gerador elétrico estiver em funcionamento máximo (120 kW), os gases de exaustão têm uma potência dissipada de 78,9 kW.

Retomando as informações técnicas do TEG utilizado (Tabela 2), constata-se que para que cada módulo tenha a geração máxima de energia elétrica (21,7 W) é necessário um fluxo de calor de 247 W.

Utilizando o valor da potência dissipada nos gases de exaustão, quando o gerador está funcionamento máximo, e o valor do fluxo de calor necessário para que cada TEG gere sua potência máxima, pode-se verificar a quantidade de TEG necessária para extrair toda a potência dissipada nos gases de exaustão.

Desprezando as perdas do processo, em (11) é realizado o cálculo citado, onde $P_{g.e.}$ é a potência das perdas de exaustão através da tubulação do escapamento do gerador (em W) e Pt_{TEG} é valor do fluxo de calor necessário para que cada TEG gere sua potência elétrica máxima (em W).

$$Q_{tde_{TEG}} = \frac{P_{g.e.}}{Pt_{TEG}} \quad (11)$$

Com isso, considerando a máxima potência dissipada pelos gases de exaustão (78,9 kW) e o fluxo de calor (247 W), para que cada TEG gere a potência máxima, poderia instalar aproximadamente 320 (trezentos e vinte) TEG do modelo utilizado para extrair toda a potência dissipada, desconsiderando as perdas de processo. Porém é preciso ressaltar que essa seria uma condição de aproveitamento total do resíduo de energia, uma condição ideal, porém improvável, que na prática dependeria especialmente: das eficiências dos trocadores de calor e do isolamento perfeito das tubulações de exaustão.

3.1.3 Sistema de retenção térmica dos gases e sistema de resfriamento

Os termogeradores (TEG) geram energia elétrica através da diferença de temperatura aplicada entre suas junções. Assim no lado quente do TEG é necessário aplicar uma alta temperatura e no lado frio uma baixa temperatura, de modo a obter um bom rendimento do mesmo, sempre se atendo aos limites térmicos estabelecidos pelo fabricante do produto.

Para o lado quente, Stecanella et al. (2015) e Gomes et al. (2015) propuseram um aparato tecnológico para a retenção térmica dos gases de exaustão do gerador elétrico e também para a equalização da temperatura superficial.

A Figura 24 ilustra esse aparato, construído em aço, com comprimento de 462 mm, geometria hexagonal, possibilitando a acomodação de até 7 (sete) TEG em cada um desses lados (face) e 42 (quarenta e dois) TEG no total.

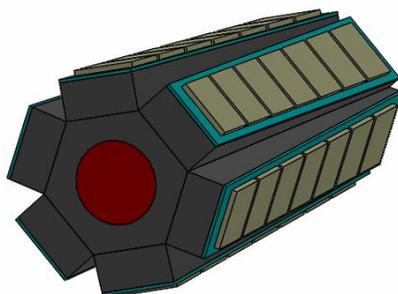


Figura 24 – Dispositivo trocador de calor para o lado quente dos TEG
Fonte: Gomes et al., 2015.

Para o lado frio, Stecanella et al. (2015) e Gomes et al. (2015) propuseram um sistema de resfriamento que utiliza como fluido de arrefecimento a água. Esse sistema contempla a instalação de uma caixa (trocadora de calor) em cada face do aparato de geometria hexagonal, de modo a controlar individualmente a temperatura do lado frio de cada face.

A Figura 25 apresenta esse dispositivo, construído em aço inoxidável 304, com comprimento de 515 mm, largura de 70 mm e altura de 30 mm (Figura 25).

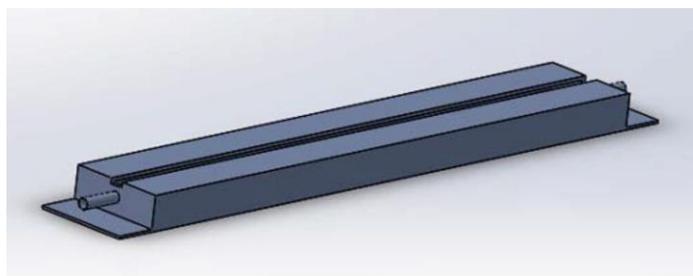


Figura 25 – Dispositivo trocador de calor para o lado frio dos TEG
Fonte: Stecanella et al., 2011.

O sistema de resfriamento também engloba a instalação de 2 (dois) tanques pulmão, onde cada um desses alimenta 3 (três) caixas trocadoras de calor e válvulas individuais (por face) para realizar o controle do fluxo de água.

As medições de temperatura do lado quente e do lado frio são realizadas através de termopares tipo K. No lado quente foram instalados 2 (dois) termopares em uma das faces do aparato, próximos as suas extremidades. No lado frio foi instalado um sensor dentro do dispositivo.

O sistema de controle é realizado por CLP (Controlador Lógico Programável).

A Figura 26 mostra a planta de conversão termoelétrica instalada e identifica suas principais partes. Nesta figura pode ser observado que parte das conexões elétricas ainda não foram finalizadas.

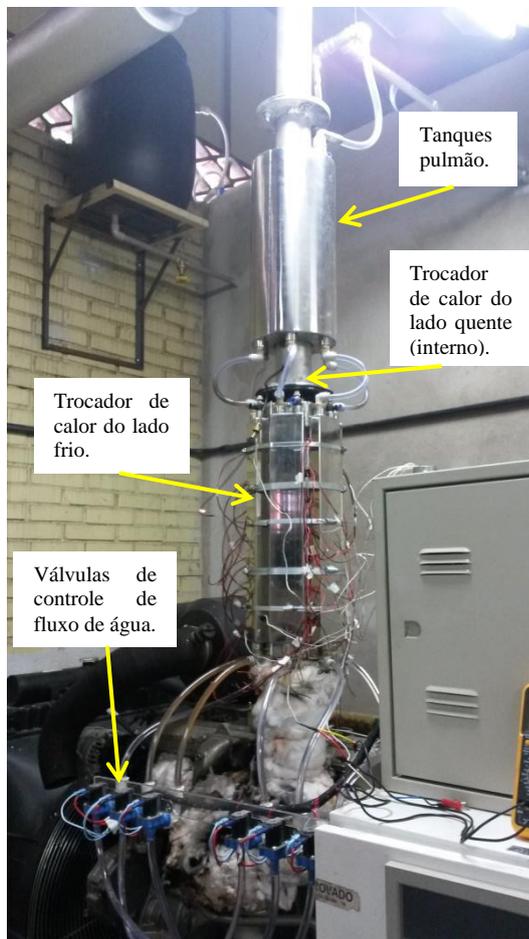


Figura 26 – Planta de geração termoelétrica proposta e implementada por Stecanella et al. (2015) e Gomes et al. (2015).

3.2 MODELAGEM DIGITAL, ELÉTRICA E TÉRMICA DO SISTEMA DE GERAÇÃO

Para compreender o funcionamento do sistema de geração termoelétrica são propostas as seguintes modelagens:

- Modelagem da conversão termoelétrica de energia;
- Modelagem dos circuitos básicos do TEG;
- Modelagem dos circuitos básicos do TEG e MPPT.

3.2.1 Modelagem da conversão termoelétrica de energia

A fim de levantar, através de simulação computacional, as curvas VxI e VxP da conversão termoelétrica de energia foi proposta uma simulação utilizando as equações básicas que regem o seu funcionamento: (1), (2), (3), (4), (5) e (6).

As curvas encontradas são confrontadas com as apresentadas na folha de dados do fabricante do módulo (Anexo A), considerando $T_h = 350$ °C e $T_c = 30$ °C.

Ainda, utilizando apenas equações, foi proposta uma nova modelagem com intuito de obter o ponto de máxima potência do termogerador, para as temperaturas anteriores. Utilizando os conceitos da técnica de P&O é realizado o MPPT “em cima” das curvas de VxI e VxP .

Os valores de MPP encontrados são confrontados com os apresentados no catálogo do fabricante do módulo (Anexo A).

Destaca-se que nas modelagens anteriores não são utilizados elementos (resistor, indutor, dentre outros), apenas as equações que regem o funcionamento da geração termoelétrica, com base no efeito Seebeck.

3.2.2 Modelagem dos circuitos básicos do TEG

Para simular o funcionamento do módulo termoelétrico - TEG e verificar os seus parâmetros de entrada e seus valores de saída foi proposto uma modelagem do mesmo, utilizando os conceitos apresentados em (3).

A Figura 27 apresenta a modelagem realizada através de software computacional específico. Os parâmetros de entrada são: T_h – temperatura no lado quente do TEG (° C), T_c – temperatura no lado frio do TEG (° C) e o coeficiente Seebeck do módulo (V / ° C).

Através dessa modelagem, para cada combinação de T_h , T_c e coeficiente Seebeck, verificam-se os valores de tensão de circuito aberto (retirando a resistência externa - RL) e a corrente de curto circuito (curto circuitando RL) do TEG específico. Também é possível constatar os valores de tensão, corrente e potência para uma RL inserida.

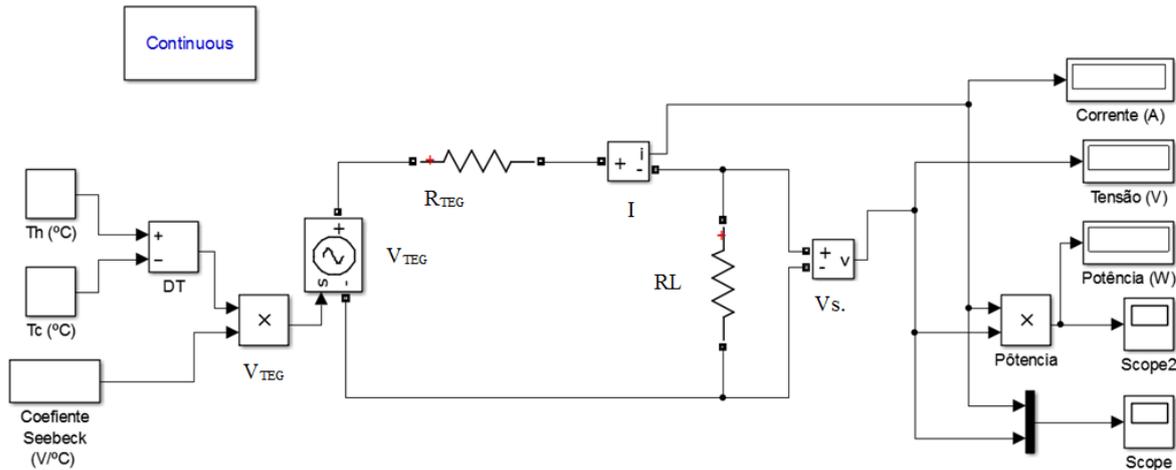


Figura 27 - Modelagem do módulo termoelétrico – TEG

Visando validar a modelagem proposta, utilizando $T_h = 350\text{ °C}$ e $T_c = 30\text{ °C}$ realizam-se as seguintes simulações:

- TEG em circuito aberto;
- TEG alimentando carga resistiva de $20\ \Omega$;
- TEG alimentando carga resistiva de $0,97\ \Omega$. Valor aproximado da resistência interna do TEG, para as condições de temperatura simuladas.

3.2.3 Modelagem dos circuitos básicos do TEG e MPPT

Conforme destacado pela literatura, para que haja a máxima transferência de potência do TEG (ou da planta termoelétrica) para a carga é necessário que a resistência interna da fonte e da carga sejam iguais. Esta condição é de difícil obtenção, devido à variação de resistência interna do TEG (pelas condições de temperatura) e a alteração da carga, conforme a necessidade.

Com isso é necessário implementar entre a fonte e a carga um conversor cc-cc, o qual “modifica” a resistência externa “vista” pelo TEG, de modo aproximá-la da resistência interna e com isso extrair a máxima potência para inúmeras cargas e condições de entrada ou saída (ΔT , R_{TEG} , RL). Essa procura pelo ponto de máxima transferência de potência é referenciada como MPPT.

Para realizar o MPPT foi escolhido o conversor cc-cc boost (elevador de tensão) devido à baixa tensão gerada pelo TEG, especialmente no MPP, e pela simplicidade de implementação do mesmo. Esse conversor, na mesma função, foi utilizado por Park, Lee e Bond (2014), Ashraf e Masoumi (2014), Park e Kim (2012), dentre outros.

A Figura 28 mostra o fluxograma simplificado para conexão da energia gerada pela planta termoeétrica a uma carga (neste exemplo, resistiva), com o MPPT.

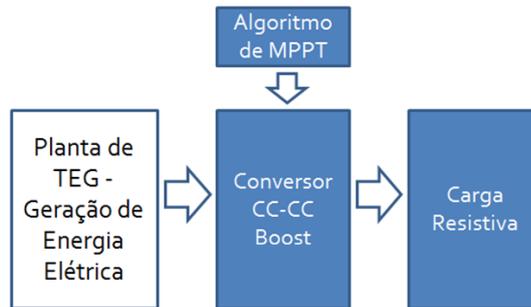


Figura 28 - Fluxograma simplificado para conexão da planta termoeétrica a uma carga resistiva

Tomando como referência o fluxograma apresentado na Figura 28 e a base da modelagem apresentada na Figura 27 é possível desenvolver a nova modelagem proposta. Para isso foi acrescido o bloco denominado de TEG, tendo como parâmetros de entrada: T_h – temperatura no lado quente do TEG (°C), T_c – temperatura no lado frio do TEG (°C), o coeficiente Seebeck do módulo (V/°C) e a quantidade de TEG em série ($Qtde$). Destaca-se que este bloco pode ser colocado em paralelo.

Também foi acrescido o conversor cc-cc boost, responsável pelo rastreamento do ponto de máxima potência, através da técnica de Perturbar e Observar (P&O). Essa técnica de MPPT foi escolhida por ser simples, ter bom rendimento e baixa complexidade de implementação (FARIA et al., 2015).

O algoritmo foi implementado no bloco MPPT, o qual alimenta o gate do MOSFET com a respectiva razão cíclica, até encontrar o ponto de máxima potência – MPP.

A Figura 29 apresenta o circuito de modelagem completo com a inclusão da planta de geração termoeétrica, conversor cc-cc boost com MPPT e carga resistiva. Ressalta-se que a simulação considera os componentes ideais.

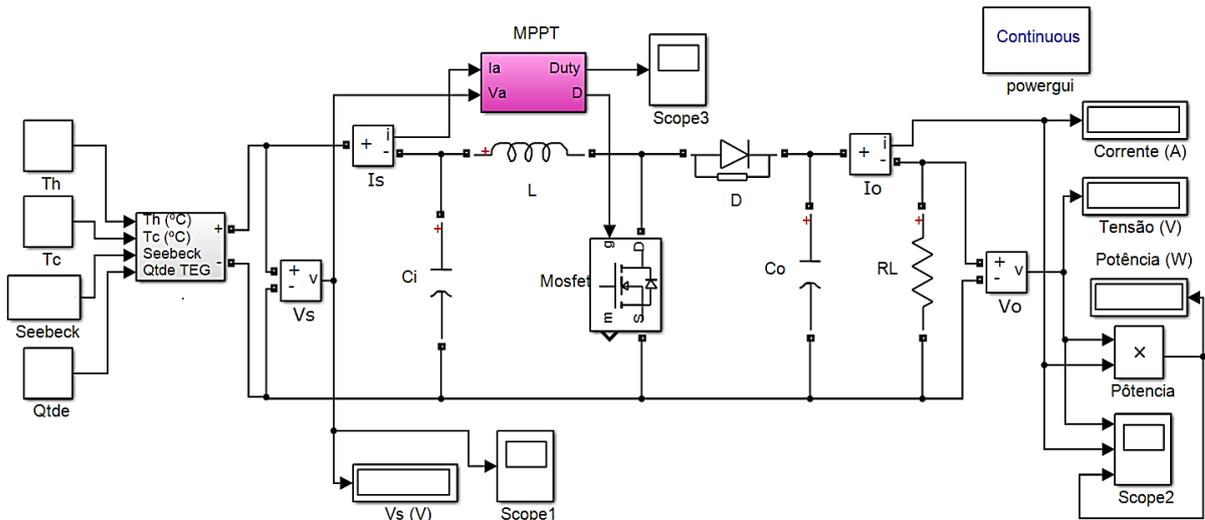


Figura 29 - Modelagem da planta de geração termoelétrica e conversor cc-cc boost com MPPT

A fim de validar a modelagem proposta e confrontá-la com os testes experimentais realizam-se algumas simulações. Nessas consideram os valores de temperatura utilizados nos testes experimentais: $T_c = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T_h = 287 \text{ }^\circ\text{C}$. O valor de T_h é uma média da temperatura na face do lado quente ($244 \text{ }^\circ\text{C}$ a $330 \text{ }^\circ\text{C}$), visto que não houve a equalização da mesma (maiores detalhes são transcritos nos subitens seguintes).

Desse modo, são realizadas simulações considerando as seguintes condições:

- Um ramo da planta de geração termoelétrica - 7 (sete) TEG em série - alimentando uma carga resistiva de $10 \text{ } \Omega$;
- Um ramo da planta de geração termoelétrica - 7 (sete) TEG em série - alimentando uma carga resistiva de $30 \text{ } \Omega$;
- Planta termoelétrica completa - 42 (quarenta e dois) TEG, sendo 6 (seis) ramos em paralelo, cada um com 7 (sete) TEG - alimentando uma carga resistiva de $10 \text{ } \Omega$;
- Planta termoelétrica completa - 42 (quarenta e dois) TEG, sendo 6 (seis) ramos em paralelo, cada um com 7 (sete) TEG - alimentando uma carga resistiva de $30 \text{ } \Omega$.

Para realizar as simulações propostas é necessário conhecer o coeficiente Seebeck para as condições de temperatura pré-estabelecidas anteriormente ($T_c = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T_h = 287 \text{ }^\circ\text{C}$). Utilizando as informações técnicas da folha de dados do TEG utilizado (Anexo A), em (12) tal coeficiente é obtido.

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{7}{(287 - 50)} = 0,02954 \text{ V/K} \quad (12)$$

A Tabela 4 apresentada as características técnicas do TEG, para as condições de temperatura estabelecidas, com base nas informações do catálogo do TEG (Anexo A). A Tabela 5 mostra as características técnicas dos arranjos a serem simulados.

Tabela 4 – Características técnicas do TEG com $T_h=287^\circ\text{C}$ e $T_c=50^\circ\text{C}$

V_{out} (V)	V_{mp} (V)	I_{mp} (A)	P_{mp} (W)	R_{TEG} (Ω)	S (V/K)
7,0	3,5	3,78	13,23	0,926	0,02954

Tabela 5 - Características técnicas dos arranjos termoeletricos propostos

Arranjo	V_{out} (V)	V_{mp} (V)	I_{mp} (A)	P_{max} (W)
Uma face do aparato - 7 TEG em série	49,0	24,5	3,78	92,61
Planta termoeletrica completa - 42 TEG	49,0	24,5	22,68	555,66

3.3 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MPPT

O sistema de MPPT (incluso conversor cc-cc boost) é projetado e construído para realizar a conexão da energia elétrica gerada pela planta termoeletrica a uma carga resistiva. Essa planta é composta por 42 (quarenta e dois) TEG, distribuídos em 6 (seis) faces, sendo 7 (sete) por face.

No projeto do sistema de MPPT é utilizado o conversor cc-cc boost, responsável pelo rastreamento do ponto de máxima potência, através da técnica de Perturbar e Observar (P&O).

Para desenvolver o projeto é necessário conhecer os valores de tensão e corrente gerados pela citada planta. Para isso foi realizado teste experimental com a planta de geração em pleno funcionamento.

O grupo motor-gerador foi acionado, tendo como carga a rede de distribuição de energia elétrica, fornecendo uma potência de 110 kW. Nestas condições, a temperatura na face do aparato do lado quente dos TEG foi aumentando gradativamente, após 40 minutos estabilizou.

No entanto, não houve a equalização da temperatura em toda superfície do aparato, essa variou de 330 °C (nos pontos próximos a entrada dos gases) a 244 °C (nos pontos próximos a saída dos gases do dispositivo).

O sistema de controle de água da parte fria manteve a temperatura da água entre 47 °C e 50 °C. Quando atingia 50 °C, a válvula correspondente era aberta, escoando a água do trocador de calor individual da face. Após o escoamento, ao atingir 47 °C a válvula era fechada. Destaca-se que devido à inércia do escoamento da água e ao tempo de resposta dos termopares, em algumas situações a temperatura chegava a valores inferiores a 47 °C.

A Tabela 6 apresenta os valores das medições de tensão de circuito aberto (V_{out}) e corrente de curto circuito (I_{cc}) de cada TEG, após a estabilização da temperatura do lado quente. A potência máxima (P_{max}) é calculada em (13), os valores de tensão e corrente correspondem, respectivamente, à metade dos valores da tensão de circuito aberto (V_{out}) e da corrente de curto circuito (I_{cc}).

$$P_{max} = \left(\frac{V_{out}}{2}\right) \cdot \left(\frac{I_{cc}}{2}\right) \quad (13)$$

Devido a não equalização da superfície do lado quente, verifica-se uma discrepância entre os valores de geração dos TEG. Menciona-se os TEG 1.1, 2.1, 3.1, 4.1, 5.1 e 6.1 estão localizados no topo dispositivo trocador de calor (região com 244 °C) e os TEG 1.7, 2.7, 3.7, 4.7, 5.7 e 6.7 localizados próximas à base do dispositivo (região com 330 °C). O conjunto de TEG (1.1 a 6.1 ou 1.7 a 6.7) deveriam gerar valores semelhantes de tensão e corrente. No entanto, a pressão imposta pelas abraçadeiras sobre os mesmos é diferente, ocasionando nessa geração diferenciada.

Tendo como objetivo o desenvolvimento de circuitos e dispositivos capazes de realizar a conexão da energia gerada, nas condições medidas, o projeto do sistema proposto toma como referência os valores apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores de geração de energia elétrica da planta termoelétrica

TEG	V_{out} (V)	I_{cc} (A)	P_{max} (W)
1.1	2,530	2,460	1,5560
1.2	2,570	2,700	1,7348
1.3	2,500	2,430	1,5188
1.4	2,405	3,010	1,8098
1.5	2,328	2,400	1,3968
1.6	3,020	2,920	2,2046
1.7	3,880	3,340	3,2398
2.1	2,260	2,500	1,4125
2.2	1,880	2,140	1,0058
2.3	2,040	1,610	0,8211
2.4	1,830	2,250	1,0294
2.5	2,450	2,860	1,7518
2.6	3,280	3,200	2,6240
2.7	4,100	3,780	3,8745
3.1	2,110	2,130	1,1236
3.2	2,170	1,950	1,0579
3.3	2,740	2,690	1,8427
3.4	2,780	2,550	1,7723
3.5	3,110	3,370	2,6202
3.6	4,090	3,530	3,6094
3.7	4,750	3,570	4,2394
4.1	2,830	2,800	1,9810
4.2	2,950	2,790	2,0576
4.3	2,660	2,550	1,6958
4.4	2,610	2,500	1,6313
4.5	3,760	3,300	3,1020
4.6	3,720	2,870	2,6691
4.7	4,170	3,670	3,8260
5.1	2,802	2,820	1,9754
5.2	2,830	2,720	1,9244
5.3	2,780	2,960	2,0572
5.4	3,165	3,010	2,3817
5.5	3,000	2,600	1,9500
5.6	3,846	3,210	3,0864
5.7	3,261	3,261	2,6585
6.1	2,082	2,500	1,3013
6.2	2,242	2,900	1,6255
6.3	2,550	2,960	1,8870
6.4	2,964	2,910	2,1563
6.5	3,670	3,730	3,4223
6.6	4,560	4,070	4,6398
6.7	4,650	3,390	3,9409

3.3.1 Arranjo elétrico de interligação da planta termoeétrica

Para a elaboração do projeto do sistema de MPPT (incluso o conversor cc-cc) é necessário conhecer os valores de tensão e corrente de trabalho, para isso é essencial definir o arranjo elétrico da planta termoeétrica.

A Figura 30 apresenta o arranjo elétrico definido, com 6 (seis) ramos em paralelos, sendo que cada ramo contém 7 (sete) TEG em série (uma face do dispositivo). Tal configuração se mostra viável pelo fato de elevar a tensão da planta, além de manter uma segurança de funcionamento do sistema, onde a falta de 1 (um) TEG apenas um ramo sai de operação e os demais mantêm a alimentação da carga.

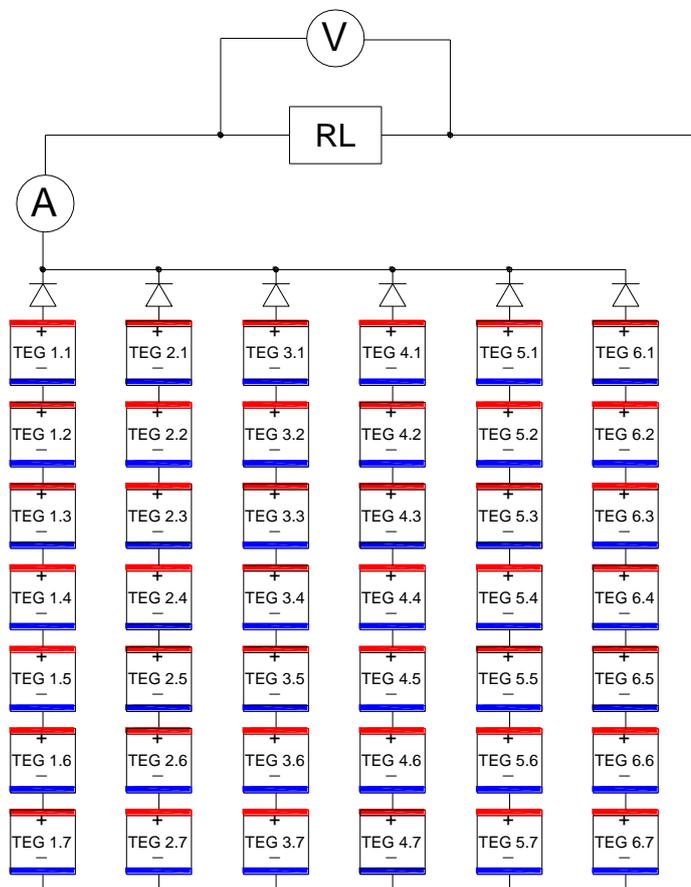


Figura 30 – Arranjo elétrico de interligação da planta termoeétrica, incluso diodo.

A fim de verificar os valores de tensão e correntes totais da planta, inicialmente avalia-se apenas um ramo paralelo, correspondente a uma face do dispositivo, com 7 (sete) TEG em

série. A tensão de saída é a soma das tensões de cada módulo. No entanto, para a corrente de saída prevalece a menor corrente fornecida por 1 (um) TEG daquele ramo (HECKTHEUER, 2001).

Com relação à interligação dos 6 (seis) ramos em paralelo, a corrente total da planta termoeétrica será a somatória das correntes individuais de cada ramo. Com relação à tensão total, prevalece a menor tensão dos ramos (HECKTHEUER, 2001).

A Tabela 7 apresenta os valores de geração, por ramo e a Tabela 8 os valores totais desta geração.

Tabela 7 - Características elétricas da planta termoeétrica - por ramo (face)

Ramo/face	V_{out} (V)	I_{cc} (A)
1	19,233	2,400
2	17,840	1,610
3	21,750	1,950
4	22,700	2,500
5	21,684	2,600
6	22,718	2,500

Tabela 8 – Características elétricas da planta termoeétrica

V_{out} (V)	I_{cc} (A)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)	P_{max} (W)
17,84	13,56	8,92	6,78	60,48

Na elaboração do projeto do sistema de MPPT (incluso o conversor cc-cc) são utilizados como referência os valores mostrados na Tabela 8.

3.3.2 Testes experimentais a serem realizados

Para validar o sistema projetado e construído serão realizados alguns testes experimentais. Para isso, a planta termoeétrica será colocada sobre a influência dos mesmos valores de temperatura ($T_c = 50$ °C e $T_h = 244$ a 330 °C), de modo que possa reproduzir valores semelhantes de geração elétrica (Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8).

São apresentados os resultados do teste de geração, com MPPT, nas seguintes condições:

- Um ramo da planta de geração termoeétrica - 7 (sete) TEG em série - alimentando uma carga resistiva de 10Ω ;

- Um ramo da planta de geração termoeétrica - 7 (sete) TEG em série - alimentando uma carga resistiva de 30Ω ;
- Planta termoeétrica completa - 42 (quarenta e dois) TEG, sendo 6 (seis) ramos em paralelo, cada um com 7 (sete) TEG - alimentando uma carga resistiva de 10Ω .
- Planta termoeétrica completa - 42 (quarenta e dois) TEG, sendo 6 (seis) ramos em paralelo, cada um com 7 (sete) TEG - alimentando uma carga resistiva de 30Ω .

No dimensionamento dos componentes do conversor cc-cc leva-se em consideração que a carga resistiva poderá variar de 10 a 30Ω .

3.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A análise de viabilidade econômica é realizada utilizando-se dos métodos determinísticos, sendo: método do valor presente líquido (VPL), método da taxa interna de retorno (TIR) e método do tempo de recuperação do investimento (PAYBACK).

Será elaborado um fluxo de caixa simplificado de maneira a considerar as despesas relacionadas à construção, manutenção e operação da planta termoeétrica proposta e como entrada economia de energia elétrica, através da energia gerada.

Na análise de sensibilidade considera-se a simulação de cenários de incerteza, verificando como a variação de alguns parâmetros irá afetar os indicadores de viabilidade econômica do projeto original. Os parâmetros escolhidos para realizar a citada análise são: valor do investimento inicial, geração de energia elétrica da planta termoeétrica, índice de reajuste tarifário anual e eficiência do TEG.

Também é realizada uma análise considerando um cenário otimista, onde se utiliza valores possíveis de ocorrer no futuro.

4. PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE DA GERAÇÃO

Neste capítulo realiza-se o dimensionamento e projeto do sistema de MPPT desenvolvido, o qual é composto das seguintes partes:

- Conversor cc-cc boost: compreende o dimensionamento dos elementos da parte de potência do circuito do conversor: capacitor, indutor, chave eletrônica, dentre outros;
- Controle do sistema: compreende o dimensionamento de toda a parte de controle do sistema: microcontrolador, sistema de aquisição de dados, algoritmo/técnica de MPPT, dentre outros;
- Protótipo final: compreende a apresentação de imagem do protótipo final construído e o circuito elétrico e de controle.

4.1 DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR CC-CC BOOST

No projeto do conversor cc-cc boost é necessário a definição de alguns parâmetros e equacionamentos. Inicialmente cabe destacar que o conversor irá trabalhar no modo de condução contínua (MCC), ou seja, a corrente que percorre o indutor em nenhum momento deverá se anular. A escolha evita perdas e visa manter a estabilidade do conversor.

A Figura 31 apresenta o conversor cc-cc boost com a inclusão do capacitor de entrada (C_i).

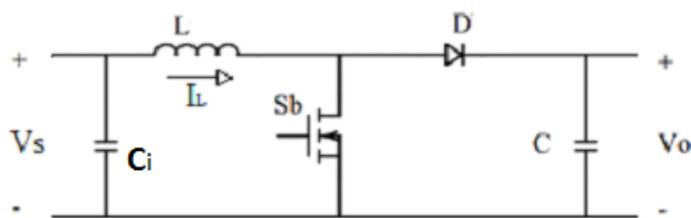


Figura 31 - Conversor cc-cc boost, incluso capacitor de entrada (C_i)

Desse modo, os componentes a serem dimensionados são: capacitor de entrada (C_i), indutor (L), diodo (D), capacitor (C) e a chave eletrônica (S_b).

Para o dimensionamento do conversor cc-cc boost são utilizadas as condições técnicas apresentadas na Tabela 8, sendo:

- $V_s = 8,92$ V (no MPP);
- $I_L = 6,78$ A (no MPP);
- V_s (máximo) = 17,84 V (tensão de circuito aberto);
- I_L (máxima) = 13,56 A (corrente de curto);
- $P_{max} = 60,48$ W;

Outras condições foram impostas para o dimensionamento dos componentes do conversor:

- $f_s = 21$ kHz (frequência de operação da chave eletrônica do conversor boost);
- $\Delta V_o = 2\%$ de V_o (ondulação máxima na tensão de saída);
- $\Delta V_s = 2\%$ de V_s (ondulação máxima na tensão de entrada);
- $\Delta I_L = 2\%$ de I_L (ondulação máxima na corrente do indutor);
- $\Delta I_o = 2\%$ de I_s (ondulação máxima na corrente de saída);
- $RL = 10$ a 30Ω .

A escolha do valor da frequência de operação da chave eletrônica do boost ($f_s = 21$ kHz) foi feita levando-se em consideração uma frequência acima da audível (20 Hz a 20 kHz) para evitar poluição sonora e que não fosse excessivamente alta, para evitar perdas adicionais de chaveamento.

Os valores indicados para a ondulação máxima na tensão de saída (ΔV_o) e para ondulação máxima na corrente do indutor (ΔI_L) são utilizados no dimensionamento dos componentes, quando esses estão em funcionamento de regime do circuito, ou seja, quando estiver no MPP. No entanto, durante todo o funcionamento do sistema, inclusive quando o conversor estiver executando o MPPT, o mesmo deverá estar operando no MCC.

O dimensionamento dos componentes do conversor cc-cc leva em consideração que a carga resistiva poderá variar de 10 a 30 Ω . Desse modo, é realizado o dimensionamento utilizando os valores extremos 10 Ω (mínimo) e 30 Ω (máximo), sempre optando pelo componente que atender os dois valores de resistência.

O equacionamento apresentado para realizar o dimensionamento dos componentes leva em consideração um conversor cc-cc ideal.

Segundo Li (2011) a potência fornecida para a entrada do conversor cc-cc (P_{cc} – em W) é dada por (14).

$$P_{cc} = \frac{V_{TEG}^2 \cdot R_{cc}}{(R_{TEG} + R_{cc})^2} \quad (14)$$

Onde: V_{TEG} (V) é a tensão gerada pelo TEG, R_{TEG} (Ω) a resistência interna do TEG e R_{cc} (Ω) a resistência de entrada do conversor cc-cc.

Li (2011) relata que a resistência de entrada do conversor cc-cc boost, aproximada, vista pelo TEG é dada por (15).

$$R_{cc} \cong rL + (1 - D)^2 \cdot RL \quad (15)$$

Onde: rL (Ω) a resistência série do indutor L , D a razão cíclica do conversor e RL (Ω) a resistência da carga a ser alimentada.

Destaca-se que a resistência interna de outros componentes (capacitor, chave eletrônica e diodo) também interfere na resistência de entrada equivalente vista pelo TEG, no entanto, o efeito conjunto dessas é muito pequeno se comparado com a influência de RL (LI, 2011).

A partir de (15) pode-se calcular o valor de D para cada condição de MPP (16), ou seja, quando R_{TEG} for igual a R_{cc} (vista pelo TEG). Não se tem precisamente o valor da resistência do indutor, no entanto essa resistência é bem inferior aos valores de RL considerados. Assim, nesta determinação será considerado um indutor ideal ($rL = 0$).

Para iniciar o dimensionamento dos componentes do conversor, em (16) pode-se verificar a razão cíclica que o conversor cc-cc terá quando o sistema estiver trabalhando no MPP.

$$D = 1 - \sqrt{R_{TEG}/RL} \quad (16)$$

Quando a carga for de 10 Ω , o valor de D é 0,64 (64%). No entanto, se a carga estiver com 30 Ω , a razão cíclica é de 0,79 (79%). Para obtenção desses resultados considerou-se R_{TEG} no valor de 1,32 Ω , utilizando as informações técnicas da Tabela 8.

4.1.1 Determinação do indutor - L

Segundo Hart (2012) a corrente no indutor é determinada por (17).

$$I_L = \frac{P_{max}}{V_S} = \frac{60,48}{8,92} = 6,78 \text{ A} \quad (17)$$

Por se tratar de um sistema de geração termoelétrica, os valores de I_L , P_{max} e V_S são variáveis e dependem das condições de geração de energia elétrica (T_c e T_h) e da carga ligada ao referido sistema.

Com estabelecido, o indutor será dimensionado para a condição de $\Delta I_L = 2\%$ quando o sistema estiver operando no MPP.

Ainda utilizando os conhecimentos de Hart (2012), tem-se a equação para dimensionamento do indutor em (18):

$$L = \frac{V_S \cdot D}{\Delta I_L \cdot f_S} \quad (18)$$

Para $D = 0,64$, o indutor dever ser de 2 mH. No entanto, se D valer 0,79, o indutor dever ser 2,48 mH.

Opta-se pelo indutor de 2,48 mH, pois esse atende à condição limite de maior restrição.

Uma exigência é que na faixa da razão cíclica considerada para o chaveamento, $0,1 < D < 0,9$, e nos limites da carga considerada, RL entre 10 e 30 Ω , o sistema deverá permanecer no modo de condução contínua, para verificar essa condição calcula-se o indutor mínimo necessário através de (19).

$$L = \frac{D \cdot (1 - D)^2 \cdot RL}{2 \cdot f_S} \quad (19)$$

Utilizando os limites relatados, na situação onde se exige um indutor de maior capacidade é com $D = 0,10$ e $RL = 30 \Omega$. No entanto, o valor exigido é de 57 μH . Com isso, o indu-

tor de 2,48 mH atende às imposições do projeto e mantém o circuito sempre funcionando dentro do MCC.

Segundo Seguel (2009) o material do núcleo do indutor mais indicado para altas frequências é o ferrite. As demais referências utilizadas concordam com a utilização do núcleo de ferrite para trabalhar nessa faixa de frequência (21 kHz).

Desse modo, o indutor deverá atender, no mínimo, aos seguintes critérios:

- Indutância $\geq 2,48$ mH;
- $I_{Lmax} = 6,92$ A;
- Núcleo de material ferrite.

4.1.2 Determinação do capacitor de entrada - Ci

O capacitor de entrada - Ci não faz parte do circuito tradicional do conversor cc-cc boost. No entanto, a sua inclusão é de suma importância para manter mais estáveis os valores dos parâmetros de geração, evitando grandes oscilações. Essa inclusão melhora a aquisição de dados a serem utilizados pelo sistema de controle do MPPT. Segundo Li (2011) esse capacitor é dimensionado conforme (20).

$$C_i = \frac{I_L \cdot D \cdot (1 - D)}{f_s \cdot \Delta V_s} \quad (20)$$

Para $D = 0,64$, o capacitor de entrada deve ser de 431,48 μF . No entanto, para $D = 0,79$, o capacitor de entrada deve ser 310,68 μF .

Outro quesito importante no dimensionamento de capacitores é relacionado à sua resistência serie equivalente - RSE (ou ERS). Segundo Seguel (2009) este é um importante parâmetro a ser considerado, visto que também influencia na ondulação de tensão. Com equivalência à equação utilizada pelo citado autor e com base em demais literaturas utiliza-se (21).

$$RSE \leq \frac{\Delta V_s}{\Delta I_L} \quad (21)$$

Antes de efetuar o cálculo de RSE é necessário conhecer o valor de ΔI_L para $D = 0,64$ ($RL = 10 \Omega$), visto que o indutor escolhido (2,48 mH) provoca variações menores que 2% na corrente do indutor, quando essa resistência de carga for a utilizada. Em (22) o novo valor é obtido

$$\Delta I_L = \frac{V_s \cdot D}{L \cdot f_s} \quad (22)$$

Nas condições apresentadas, para $D = 0,64$ o valor de ΔI_L será de 0,11 A (1,62%).

Desse modo, retomando em (21) tem-se $RSE = 1,32 \Omega$ para $D = 0,79$. Já para $D = 0,64$ o valor de RSE é de $1,62 \Omega$.

Com base nos resultados encontrados o capacitor de entrada (C_i) deverá ter uma capacitância mínima de $431,48 \mu\text{F}$ com uma RSE máxima de $1,32 \Omega$. Também deverá suportar a tensão máxima do sistema, ou seja, a tensão de circuito aberto máxima $17,84 \text{ V}$.

Para atender a todas as especificações anteriores será utilizado um capacitor eletrolítico da fabricante EPCOS, $470 \mu\text{F}$, tensão 100V . Esse é um capacitor comercial que atende às especificações.

4.1.3 Determinação do capacitor - C_o

Segundo (HART, 2012) o capacitor de saída do boost (C_o) deve ser dimensionado conforme (23).

$$C_o = \frac{D}{RL \cdot \frac{\Delta V_o}{V_o} \cdot f_s} \quad (23)$$

Desse modo, utilizando a razão cíclica (D) de $0,64$ e a resistência de carga no valor de 10Ω é necessário um capacitor de $152,38 \mu\text{F}$. Se utilizar a razão cíclica (D) de $0,79$ e a resistência de carga no valor de 30Ω , o valor do capacitor é de $62,70 \mu\text{F}$.

Semelhante ao ocorrido para o capacitor de entrada (C_i), no dimensionamento do capacitor C_o também é necessário verificar a RSE correta para manter os preceitos solicitados.

Utilizando os ensinamentos de Hart (2012) pode-se dimensionar o valor máximo da resistência serie equivalente – RSE conforme (24).

$$RSE \leq \frac{\Delta V_o}{I_{Lmax}} \quad (24)$$

Antes de efetuar os cálculos para dimensionar o RSE é necessário obter os valores de ΔV_o para as situações em estudo, conforme (25) (HART, 2012).

$$V_o = \frac{V_s}{(1 - D)} \quad (25)$$

Para $D = 0,64$, $V_o = 24,78$ V. No entanto, para $D = 0,79$, V_o tem valor de 42,48 V.

Desse modo, retomando em (24) tem-se $RSE = 71,93$ m Ω para $D = 0,64$. Já para $D = 0,79$ o valor de RSE é de 122,85 m Ω .

Com base nos resultados encontrados o capacitor (C_o) deverá ter uma capacitância mínima de 152,38 μ F com uma RSE máxima de 71,93 m Ω . Também deverá suportar a tensão máxima do sistema, ou seja, a tensão máxima de saída (42,48 V).

Para atender a todas as especificações anteriores será utilizado um capacitor eletrolítico da fabricante EPCOS, 1.000 μ F, tensão 100V. Esse é um capacitor comercial que atende às especificações.

4.1.4 Determinação da chave eletrônica

A Figura 32 ilustra uma comparação entre as chaves eletrônicas, tomando como parâmetros a frequência de operação e a potência em que está submetida. Relata-se que o MOSFET (Metal-Oxide Field Effect Transistor) pode operar em altas frequências, sendo interessante em termos de velocidades de chaveamento e facilidade de acionamento.

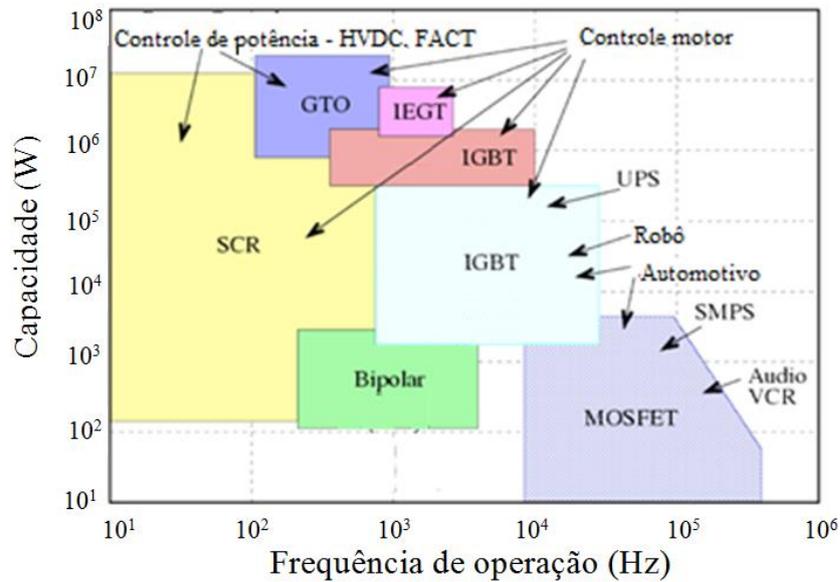


Figura 32 – Comparação entre chaves eletrônicas
Fonte: Petry, 2013.

Ribeiro (2011) acrescenta que o MOSFET é a melhor escolha quando a tensão de operação é menor que 250 V e o IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) é o mais apropriado para tensões acima de 1000 V. Complementa relatando que o MOSFET tem velocidade de comutação mais rápida que o IGBT, o qual apresenta perdas significativas para frequências acima de 20 kHz.

A escolha do MOSFET deve levar em consideração tensão e a corrente máximas.

Tendo em vista que a tensão máxima é de 42,48 V e a corrente máxima de funcionamento é de 6,92 A. Em casos extremos, no curto circuito, a corrente máxima chega a 13,56 A.

Considerando a revisão bibliográfica, com base nas necessidades do circuito projetado e observando a disponibilidade de componentes comerciais, a chave eletrônica escolhida é o MOSFET IRF 540N da fabricante International Rectifier (IR).

A Tabela 9 apresenta os principais parâmetros do citado componente.

Tabela 9 - Características elétricas do MOSFET IRF 540N

Símbolo	Descrição	Valor
V_{DSS}	Tensão máxima dreno-source	100 V
$I_D (max)$	Corrente máxima de dreno	28 A
$R_{DS} (on)$	Resistência do interruptor em condução	77 m Ω
t_r	Tempo de entrada em condução	44 ns
t_f	Tempo de abertura	43 ns

Fonte: International Rectifier, 2016.

4.1.4.1 Driver para o gate do MOSFET

O microcontrolador escolhido deve ter uma saída que forneça um sinal PWM que possa alimentar o gate do MOSFET do conversor cc-cc boost. Esse sinal pode ser configurado quanto à frequência e à razão cíclica. A frequência configurada é de 21 kHz, sendo o valor de operação do citado conversor. Já a razão cíclica varia de acordo com a necessidade do MPPT.

No entanto, a saída do microcontrolador fornece uma tensão máxima de 5 V e os MOSFET, em geral, necessitam de uma tensão no gate com valor superior a essa, para entrarem em saturação. Ademais a potência fornecida pelo microcontrolador não é suficiente para acionar o gate.

Para solucionar tal situação, entre a saída do microcontrolador e a entrada do gate do MOSFET é utilizado o driver IR2110 da fabricante International Rectifier (IR).

4.1.5 Determinação do diodo

Na especificação de diodo do conversor cc-cc boost deve levar-se em consideração a máxima corrente de operação e a máxima tensão reversa à qual ficará submetido (V_o).

Os diodos tipo Schottky são constituídos de uma junção metal-semicondutor tipo N, apresentando reduzido tempo de recuperação e baixa queda de tensão quando polarizados diretamente (Ribeiro, 2011).

A partir dos dados de projeto o diodo deverá suportar uma corrente média de 6,92 A (em casos extremos a corrente de curto de 13,56 A) e uma tensão reversa máxima de 42,48 V.

Considerando as necessidades do circuito projetado foi selecionado o modelo MBR20100CT da fabricante ON Semiconductor.

A Tabela 10 mostra os principais parâmetros do diodo.

Tabela 10 - Características elétricas do diodo MBR20100CT

Símbolo	Descrição	Valor
$I_F (AV)$	Máxima corrente média admissível	20 A
V_R	Máxima tensão reversa admissível	100 V
V_f	Máxima tensão de condução direta	0,95V

Fonte: ON Semiconductor, 2016.

4.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE

Nesta etapa será realizado o dimensionamento e escolha dos componentes responsáveis pelo sistema de controle do MPPT, sendo subdividido em:

- Microcontrolador;
- Condicionamento do sinal de tensão
- Condicionamento do sinal de corrente;
- Sistema de MPPT;

4.2.1 Microcontrolador

Para implementação o sistema de MPPT é necessário a utilização de componente capaz de realizar as funções solicitadas por este projeto. Em síntese, receber/ler os sinais analógicos de tensão e corrente, efetuar cálculo de potência, trabalhar com o algoritmo/técnica de MPPT, alimentar o gate do MOSFET (com técnica PWM) e realizar a comunicação com elementos externos para extração de dados.

O componente amplamente utilizado na bibliografia estudada é o microcontrolador. Existem inúmeros desses componentes para as mais amplas aplicações e diferentes recursos embarcados.

A Figura 33 ilustra o microcontrolador escolhido, sendo o PIC18F452, família PIC da fabricante Microchip. As suas principais características são (MICROCHIP, 2015):

- 8 conversores analógico-digital (ADC) de 10 bits;
- saída com sinal PWM;

- saída de comunicação;
- memória de programa Flash de 32 Kbytes;
- memória EEPROM de 256 bytes;
- memória RAM de 1536 bytes;
- processamento de até 10 milhões de instruções por segundo (MIPS);
- multiplicação por hardware;
- fornecimento de até 25 mA por pino;
- fornecimento de até 200 mA por porta;

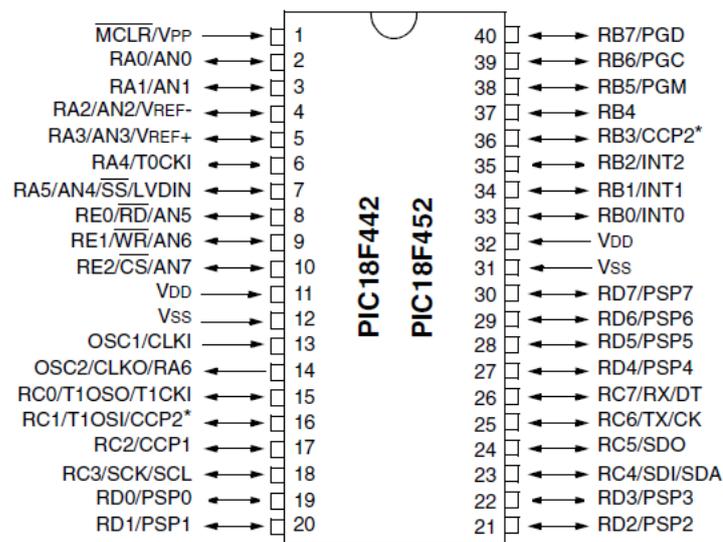


Figura 33 – Microcontrolador PIC 18F452

Fonte: Microchip, 2015.

O sistema embarcado no citado microcontrolador foi desenvolvido na linguagem assembly.

4.2.2 Condicionamento do sinal de tensão

Para realizar a medição das tensões do circuito, a fornecida pela planta termoeétrica (V_s) e a consumida pela carga (V_o), é necessário implementar sensores de tensão no circuito.

Para realizar a função foi utilizado um divisor de tensão. A escolha foi motivada por ser um método barato, de simples implementação e com boa confiabilidade para os valores a serem medidos.

A Figura 34 ilustra o sensor de tensão para V_s e a Figura 35 o sensor de tensão para V_o .

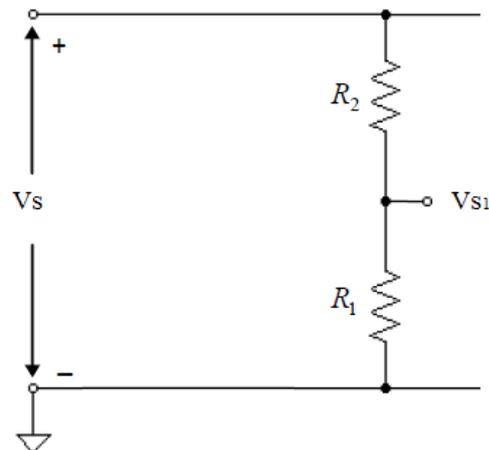


Figura 34 – Divisor de tensão em V_s

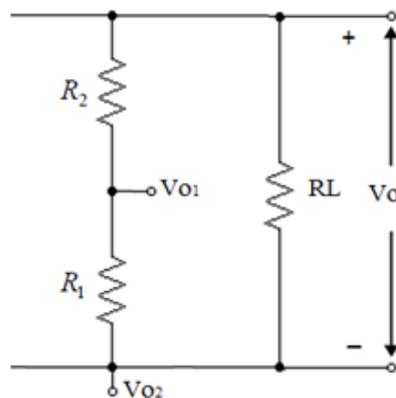


Figura 35 – Divisor de tensão em V_o

Com base nas informações técnicas do circuito projetado, define uma faixa de 0 a 20 V para a tensão de entrada (V_s) e 0 a 50 V para a tensão de saída (V_o).

As entradas analógicas do microcontrolador leem sinais de tensão de 0 a 5 V. Nas configurações anteriores, a tensão de R_1 será a referência de medição para as tensões do circuito.

Com isso, o resistor $R1$ deve fornecer, no máximo, 5 V à entrada analógica quando a máxima tensão da faixa definida estiver no divisor de tensão.

Para a medição de V_s são utilizados os resistores: $R1 = 22 \text{ k}\Omega$ e $R2 = 68 \text{ k}\Omega$. Destaca-se que nessa combinação a faixa de tensão de entrada (V_s) é redefinido para 0 a 20,46 V, atendendo as necessidades do circuito.

A medição de V_s (V_{s1}) (Figura 34) foi interligada diretamente à entrada analógica do microcontrolador.

Para a medição de V_o são utilizados os resistores: $R1 = 102 \text{ k}\Omega$ (resistor de precisão) e $R2 = 11,3 \text{ k}\Omega$ (originalmente de 12 k Ω , porém 11,3 k Ω medidos). Destaca-se que com essa combinação a faixa de tensão de saída (V_o) é redefinida para 0 a 50,13 V, atendendo as necessidades do circuito.

A medição de V_o não pode ser interligada diretamente à entrada analógica do microcontrolador, visto que se trata de uma queda de tensão sem a referência de 0 (zero), ou seja, é necessário um circuito que receba esses valores de tensão (V_{o1} e V_{o2}), faça a subtração e aliemente a entrada analógica do microcontrolador.

A Figura 36 apresenta o amplificador de instrumentação, escolhido para realizar a citada função. No entanto, nessa situação o ganho é de 1, sendo utilizado basicamente para realizar a subtração entre V_{o1} e V_{o2} .

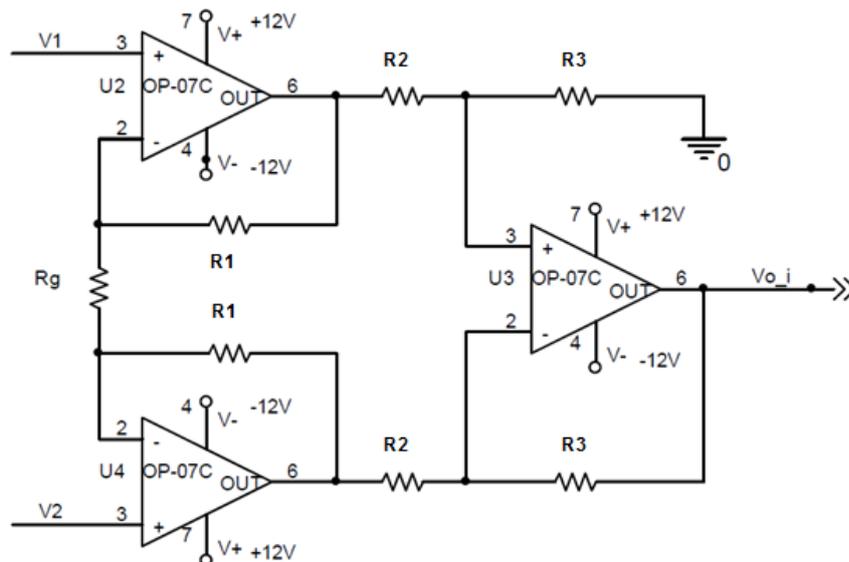


Figura 36 – Amplificador de instrumentação
Fonte: Nunes, 2009.

Com base na nomenclatura utilizada para os componentes da Figura 36, em (26) é relacionado o ganho do citado amplificador (G_A).

$$G_A = \left(1 + \frac{2 \cdot R1}{Rg}\right) \cdot \left(\frac{R3}{R2}\right) \quad (26)$$

Para realizar o ganho igual a 1 são utilizados os seguintes resistores: $R1 = 33 \text{ k}\Omega$, $Rg = 68 \text{ k}\Omega$, $R2 = 68 \text{ k}\Omega$ e $R3 = 33 \text{ k}\Omega$. Destaca-se que esta combinação gera um ganho de 0,956. O ajuste necessário é realizado via programação (software), com isso sendo aceitável para as necessidades do projeto.

4.2.3 Condicionamento do sinal de corrente

Para realizar a medição das correntes do circuito, a fornecida pela planta termoeétrica (I_s) e a consumida pela carga (I_o), é necessário implementar sensores de corrente no circuito. Destaca-se que as entradas analógicas do microcontrolador não leem sinais de corrente, apenas sinais de tensão. Desse modo o sensor a ser utilizado deve fornecer uma tensão proporcional à corrente medida.

Para realizar a função foi utilizado resistor shunt de pequeno valor. A escolha foi motivada por ser um método barato e simples de condicionar a corrente de um circuito, aliado à aquisição de componentes com baixa resistência (SEGUEL, 2009; BATSCHAUER, NETO E PETRY, 2000; BRITO, 2009).

Para a medição da corrente de entrada foram utilizados 3 (três) resistores de $5 \text{ m}\Omega$ em paralelo, com valor equivalente de $1,667 \text{ m}\Omega$. Para a corrente de saída foram utilizados 2 (dois) resistores de $5 \text{ m}\Omega$ em paralelo, com valor equivalente de $2,50 \text{ m}\Omega$.

A Figura 37 ilustra a instalação do sensor de corrente para I_s e a Figura 38 apresenta a instalação do sensor de corrente para I_o .

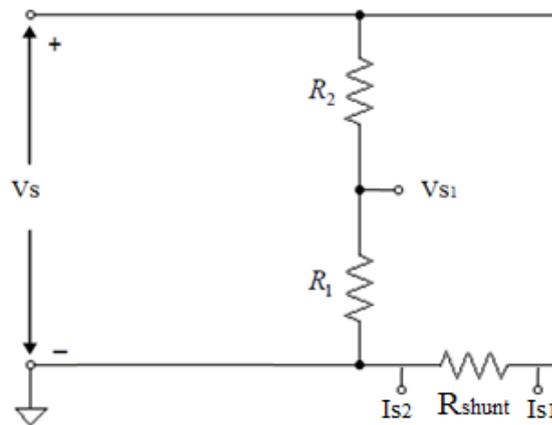


Figura 37 - Divisor de tensão em V_s e R_{shunt} em I_s .

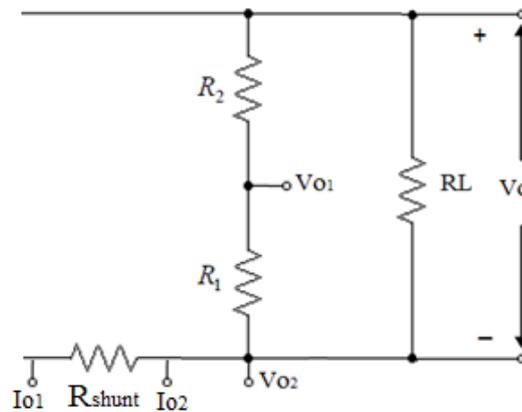


Figura 38 - Divisor de tensão em V_o e R_{shunt} em I_o .

As entradas analógicas do microcontrolador leem sinais de tensão de 0 a 5 V. Os valores medidos nos sensores de corrente são extremamente baixos (ordem de mV), com isso é necessário promover um ganho neste sinal. Antes de conhecer esse ganho é válido verificar a faixa de corrente que o circuito pode operar.

Com base nas informações técnicas do circuito projetado, define uma faixa de 0 a 20 A para a corrente de entrada (I_s) e 0 a 10 A para a corrente de saída (I_o). Em (27) verifica-se a necessidade de um ganho máximo de 150 para I_s . Já em (28) constata-se um ganho máximo de 200 para I_o .

$$G_{Is} = \frac{V_{micro}}{V_{shunt}} = \frac{5}{\left(\frac{0,005}{3} \cdot 20\right)} = 150 \quad (27)$$

$$G_{Io} = \frac{V_{micro}}{V_{shunt}} = \frac{5}{\left(\frac{0,005}{2} \cdot 10\right)} = 200 \quad (28)$$

Onde:

V_{micro} é a tensão máxima suportada pela entrada analógica do microcontrolador;

V_{shunt} o valor da maior tensão que é dissipada no resistor shunt (sensor de corrente).

Para realizar o ganho necessário é utilizado um sistema de amplificação baseado em amplificadores operacionais, especificadamente o amplificador de instrumentação, mostrado na Figura 36.

Com base em (26) e considerando que para I_s é necessário um ganho máximo de 150, os resistores utilizados são: $R1 = 20 \text{ k}\Omega$, $Rg = 5,6 \text{ k}\Omega$, $R2 = 5,6 \text{ k}\Omega$ e $R3 = 100 \text{ k}\Omega$. Destaca-se que essa combinação gera um ganho de 145, com isso a faixa de I_s é redefinida para 0 a 20,69 A, atendendo as necessidades do circuito.

Para I_o é necessário um ganho máximo de 200, os resistores utilizados são: $R1 = 22 \text{ k}\Omega$, $Rg = 5,6 \text{ k}\Omega$, $R2 = 6,8 \text{ k}\Omega$ e $R3 = 150 \text{ k}\Omega$. Destaca-se que esta combinação gera um ganho de 195, com isso a faixa de I_o é redefinida para 0 a 10,26 A, atendendo as necessidades do circuito.

4.2.4 Sistema de MPPT

A Figura 39 apresenta o fluxograma básico de funcionamento do programa embarcado no microcontrolador, tendo por objetivo principal o MPPT da planta termoeétrica. O sistema de MPPT é baseado no algoritmo/técnica de P&O, conforme relatado no capítulo de metodologia.

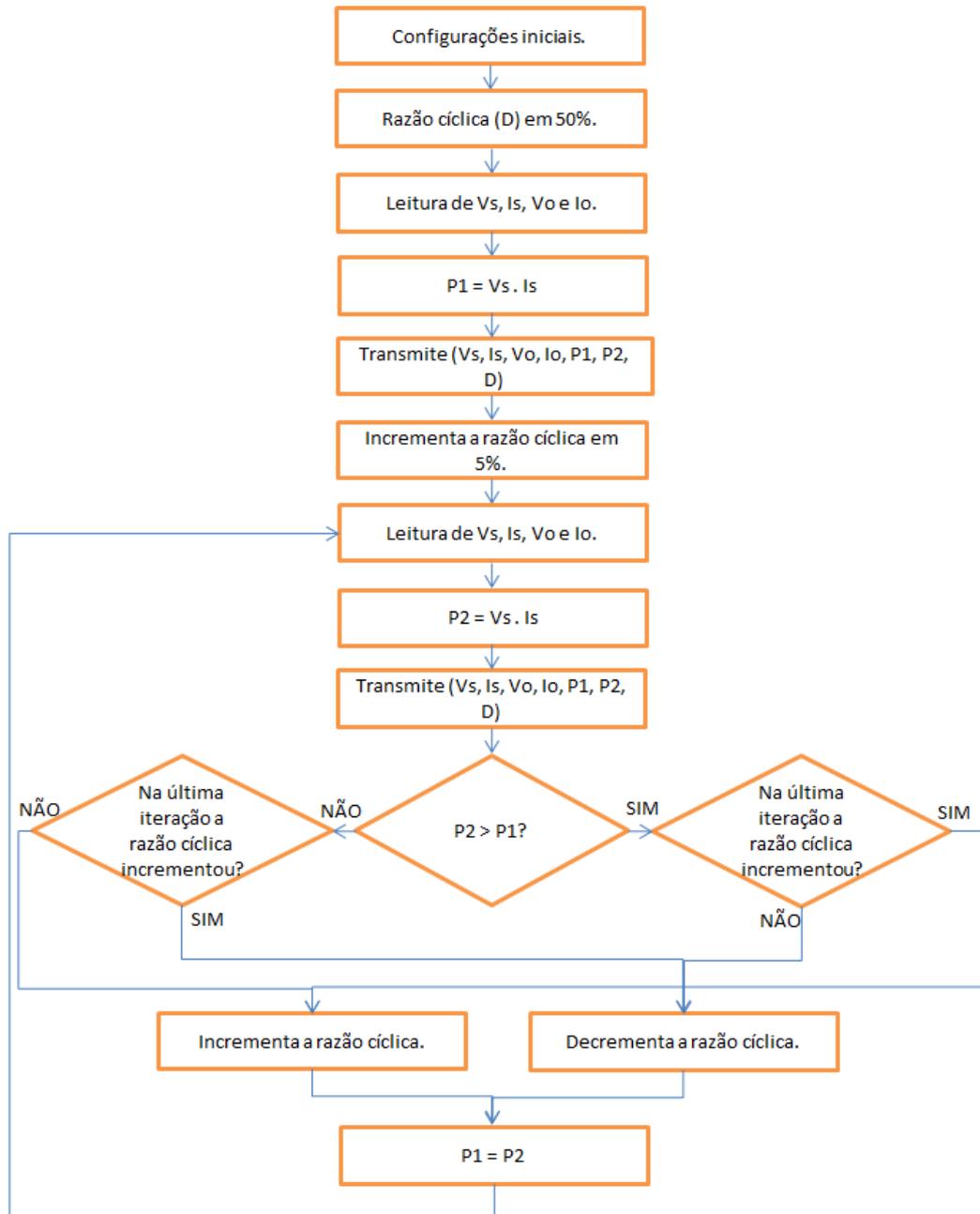


Figura 39 – Fluxograma básico do programa embarcado

Inicialmente são realizadas apenas as configurações iniciais do microcontrolador, sendo: portas de entrada e saída, ajustes para o display e portas serial de comunicação, saída do sinal PWM, dentre outros.

Após os ajustes iniciais, para efetivamente iniciar o programa, o microcontrolador envia ao gate do MOSFET um comando de razão cíclica no valor de 50%. A escolha desse valor

é justificada por estar no meio da tabela, com isso aumenta a probabilidade de localizar o MPP de maneira mais rápida. No entanto nada impede de iniciar com outros valores, respeitando o valor máximo 90%, conforme explicado no dimensionamento da chave eletrônica.

Posteriormente são realizadas as primeiras leituras de tensão e corrente do sistema: as fornecidas pela planta termoelétrica (V_s e I_s) e as consumidas pela carga (V_o e I_o).

A fim de obter um valor mais fiel ao real, os valores das leituras utilizadas pelo programa é fruto da média de 8 (oito) medições durante o ciclo/período. Visto que o sistema utiliza uma frequência de 21 kHz, uma medição é realizada a aproximadamente cada 6 μ s.

Destaca-se que os valores de V_o e I_o não são utilizados para realizar numa atividade dentro do programa proposto, são colhidas a fim de obter dados para estudos de performance. Já os valores de V_s e I_s são as principais informações do sistema, sendo utilizadas durante todo o funcionamento do mesmo. Tendo lido esses valores é calculada potência ($P1$) fornecida pela planta de geração termoelétrica, tendo a razão cíclica valor de 50%.

O microcontrolador realiza o envio dos dados colhidos e calculados (V_s , I_s , V_o , I_o , $P1$, $P2$, D) para os sistemas externos, sendo: o display e as portas serial RS-232 e RS-485. Nessa primeira transmissão o valor de $P2$ é zero. O display é utilizado para a verificação imediata dos valores. A porta serial RS-232 fica disponível para conexão de elemento externo com o qual se deseje colher os dados enviados, na situação prática deste trabalho é utilizada para conectar um notebook.

Para obter outro valor de potência, para efeito de comparação, a razão cíclica é incrementada em 5%. Esse valor foi escolhido para adequar-se ao funcionamento do laço principal do sistema.

Em seguida é realizada a segunda leitura (V_s , I_s , V_o e I_o) e calculado a nova potência, utilizando os valores de V_s e I_s colhidos. Ressalta-se que essa potência é denominada de $P2$.

Os novos valores de V_s , I_s , V_o , I_o , $P1$, $P2$ e razão cíclica são transmitidos para os sistemas externos.

De posse dos valores de potência $P1$ e $P2$ verifica-se e inicia-se efetivamente o sistema de MPPT. É realizado o primeiro questionamento/comparação, ' $P2 > P1$?', independente da resposta é realizado o segundo questionamento 'Na última iteração a razão cíclica incre-

mentou?’. Para facilitar a compreensão da lógica, lembre-se que, inicialmente, $P1$ é correspondente à razão cíclica de 50% e $P2$ a 55%.

Se $P2 > P1$, temos uma situação onde o incremento da razão cíclica (50 para 55%) aumentou o valor da potência, assim é viável manter esse incremento no valor da razão cíclica. As duas respostas aos questionamentos são “SIM”, com isso, mantém-se incremento no valor da razão cíclica.

Se $P2 < P1$, a condição é contrária, ou seja, o incremento da razão cíclica (50 para 55%) fez com que a potência diminuísse. Assim, na próxima iteração é necessário decrementar o valor da razão cíclica. As respostas aos questionamentos são “NÃO” e “SIM”. Observando o fluxograma da Figura 39 verifica-se que, com essas respostas, na próxima iteração o valor da razão cíclica será decrementado. Caso $P1$ seja igual a $P2$, o sistema incrementa.

Após a sequência de questionamentos e a obtenção da resposta desejada, o valor de $P2$ é transferido para $P1$, para manter a lógica do programa. Assim, o sistema inicia o seu laço sempre realizando o MPPT.

Com o objetivo de acelerar a localização do primeiro MPP, com o menor número de iterações, são propostos valores diferenciados nos incrementos e decrementos da razão cíclica. Como verificado, o programa inicia com 50%, posteriormente incrementa em 5%, passando para 55%. O incremento de 5% é mantido até o sistema ter a primeira solicitação de decremento, que será de 2,1%, mantendo este valor até necessitar de novo incremento, que agora será de 0,79%, mantendo o referido valor até necessitar do novo decremento que será de 0,26%.

Após realizar essa busca com valores diferenciados, o sistema manterá o valor de 0,26% para incrementos e decrementos na razão cíclica. Destaca-se que o mencionado valor é o menor possível, devido a restrições de software, no entanto atende as necessidades do projeto.

4.3 PROTÓTIPO CONSTRUÍDO

A Figura 40 apresenta o circuito final, após o dimensionamento do conversor cc-cc boost, do sistema de aquisição de dados e do acionamento da razão cíclica do MOSFET. Onde: VS representa a planta de geração termoelétrica, $R1$ e $R2$ são os sensores de tensão (divisor

de tensão), RSH o resistor shunt equivalente, CI o capacitor de entrada, CO o capacitor do conversor, SB o MOSFET, D o diodo utilizado e RL a carga resistiva. O valor dos resistores é dado em ohms (Ω), dos capacitores em Faraday (F) e do indutor em Henry (H).

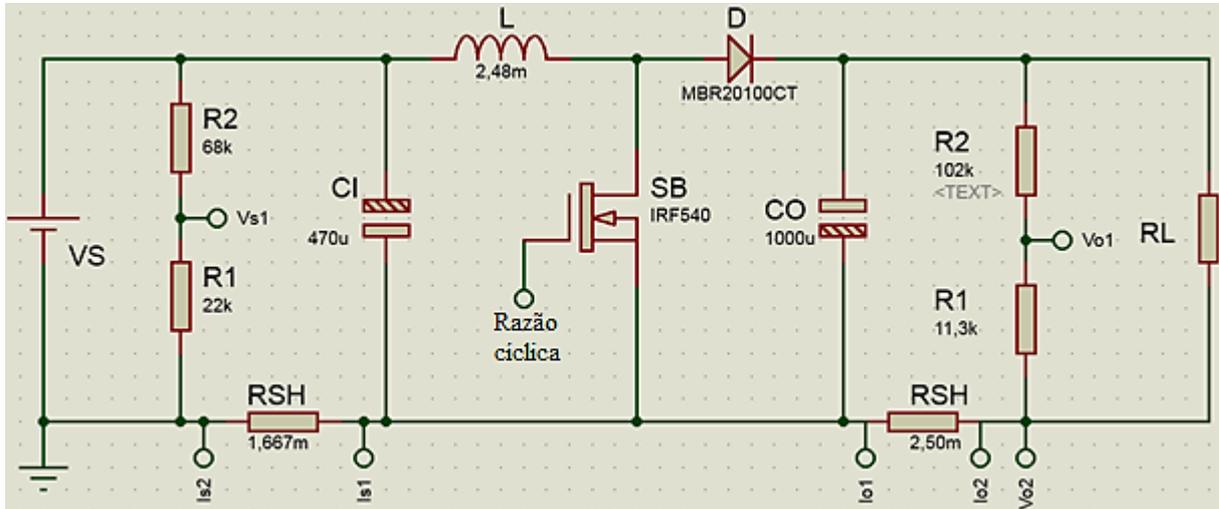


Figura 40 – Circuito final

A Figura 41 mostra o protótipo construído, incluindo o conversor cc-cc boost, sensores de corrente e tensão, amplificadores de instrumentação, driver do MOSFET, microcontrolador, display, sistema de comunicação, entrada para gravação do microcontrolador e entrada das fontes de alimentação do sistema.

Quanto à alimentação do sistema têm-se os seguintes valores:

- + 5 V: microcontrolador, display, porta serial;
- + 12 V: driver do gate do MOSFET;
- + 12 V e - 12 V: amplificadores operacionais.

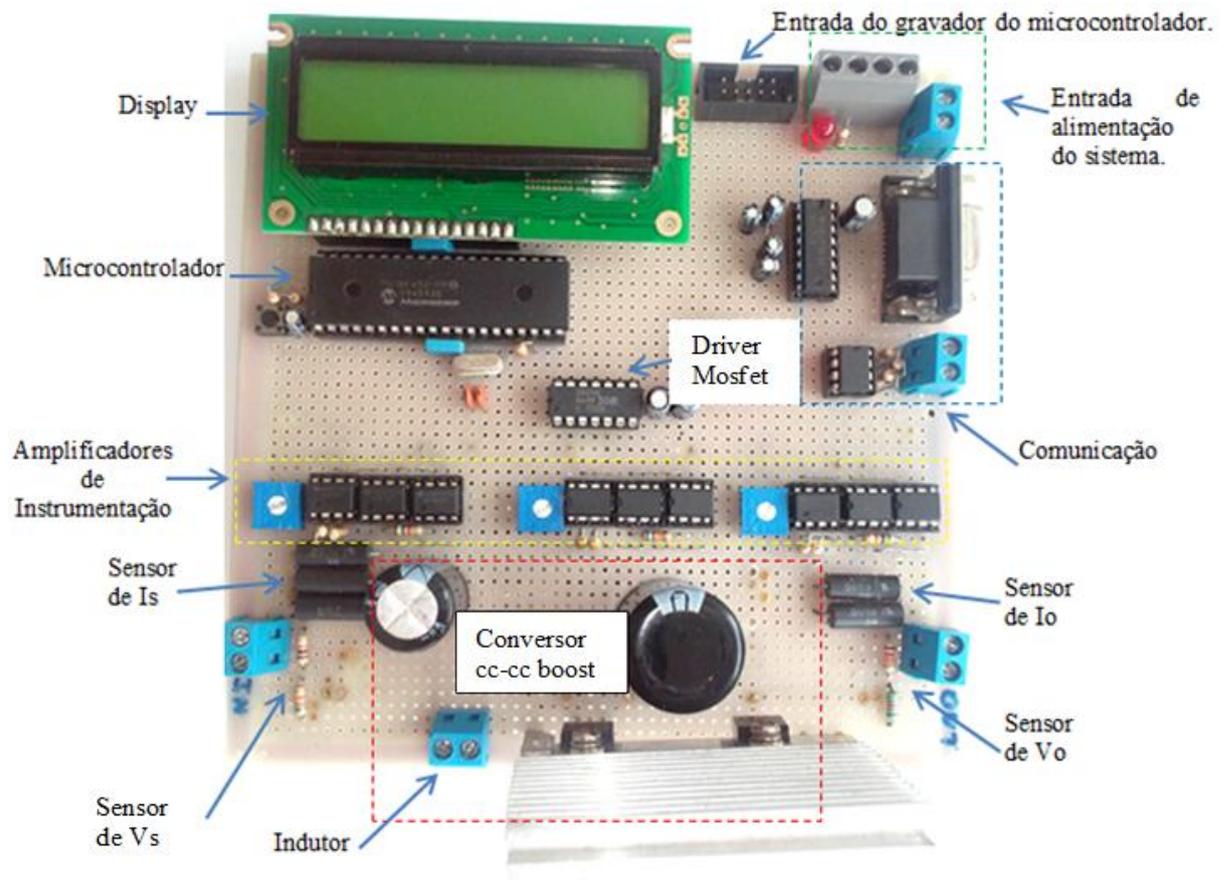


Figura 41 – Protótipo Final.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos. Com base na organização do capítulo de metodologia e para facilitar a compreensão, os resultados serão subdivididos em:

- Simulação;
- Testes experimentais;
- Análise de viabilidade econômica.

5.1 SIMULAÇÃO

São apresentados os resultados da simulação, considerando as premissas e modelagens apresentadas no capítulo de metodologia. Destaca-se que todas as simulações foram realizadas utilizando o software computacional específico.

5.1.1 Simulação da conversão termoeétrica de energia

Nessas simulações não são utilizados elementos (resistor, indutor, dentre outros), apenas as equações básicas que regem a geração termoeétrica: (1), (2), (3), (4), (5) e (6).

5.1.1.1 Curvas produzidas pelas equações que modelam um termogerador

A Figura 42 apresenta as curvas da geração (VxI e VxP) do termogerador, considerando $T_h = 350$ °C e $T_c = 30$ °C).

Comparando os resultados apresentados na Figura 42 com os transcritos pelo fabricante (Figura 21 e Anexo A), pode-se afirmar que a simulação foi eficiente e retratou as características do produto.

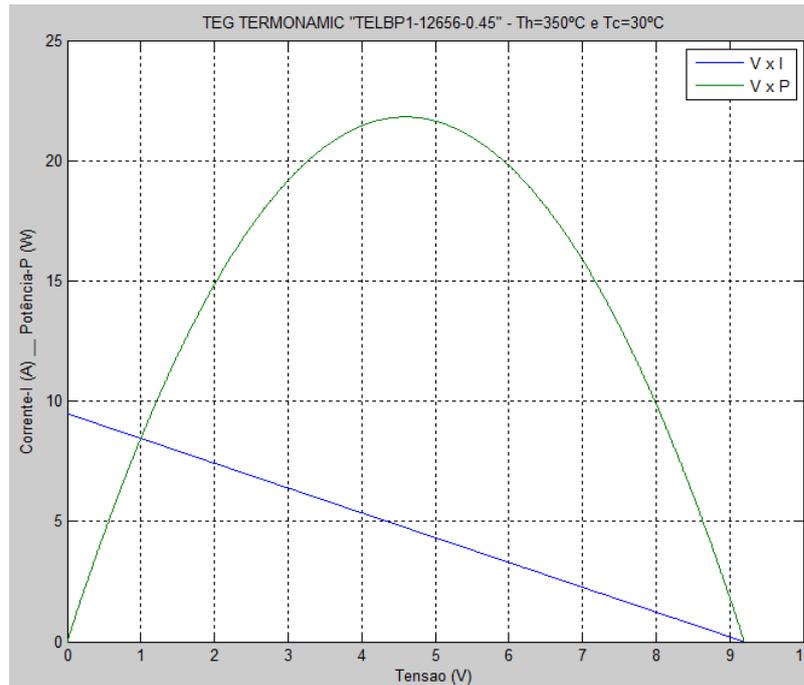


Figura 42 - Gráfico com $V \times I$ (azul) e $V \times P$ (verde), com $T_h=350^\circ\text{C}$ e $T_c=30^\circ\text{C}$ – TEG TELBP1-12656-0.45

5.1.1.2 MPPT nas curvas produzidas pelas equações que modelam um termogerador

Nesta simulação utilizam-se as mesmas equações da simulação anterior, com $T_h = 350^\circ\text{C}$ e $T_c = 30^\circ\text{C}$.

Inicialmente é realizada uma escolha aleatória do um ponto de tensão e de corrente correspondentes para iniciar a simulação, posteriormente é desenvolvido o MPPT utilizando os conceitos da técnica de P&O.

A Figura 43 apresenta os resultados dos gráficos da simulação do algoritmo proposto para a determinação do MPPT aplicadas às curvas da Figura 42.

Os resultados obtidos na simulação são utilizados para validar a técnica de MPPT P&O para a geração termoelétrica, visto que encontra o ponto de máxima potência para os valores de temperatura especificados, como pode ser confrontado com os dados de catálogo do produto (Figura 21 e Anexo A).

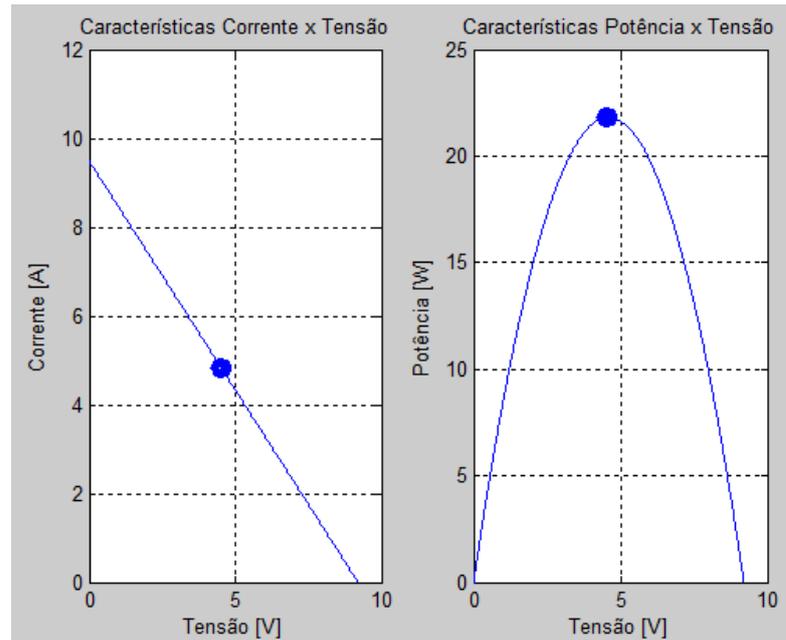


Figura 43 - MPPT (P&O) nos gráficos V_{xI} e V_{xP} , com $T_h=350^\circ\text{C}$ e $T_c=30^\circ\text{C}$.

5.1.2 Simulação dos circuitos básicos do TEG

Nestas simulações são utilizados: $T_h = 350^\circ\text{C}$ e $T_c = 30^\circ\text{C}$, perfazendo $\Delta T = 320^\circ\text{C}$. Com base nas informações da Tabela 2 e retomando em (3), obtém-se um coeficiente Seebeck, $S = 0,02875\text{ V}/^\circ\text{C}$, para as condições apresentadas.

5.1.2.1 TEG em circuito aberto

A Figura 44 mostra os resultados da simulação do circuito equivalente do TEG para o circuito aberto.

O circuito de simulação se mostrou viável para a geração termoelétrica, neste caso para circuito aberto, encontrando o valor de $V_s = 9,2\text{ V}$. Deste modo, simulações posteriores podem ser realizadas para melhorar a compreensão de demais quesitos.

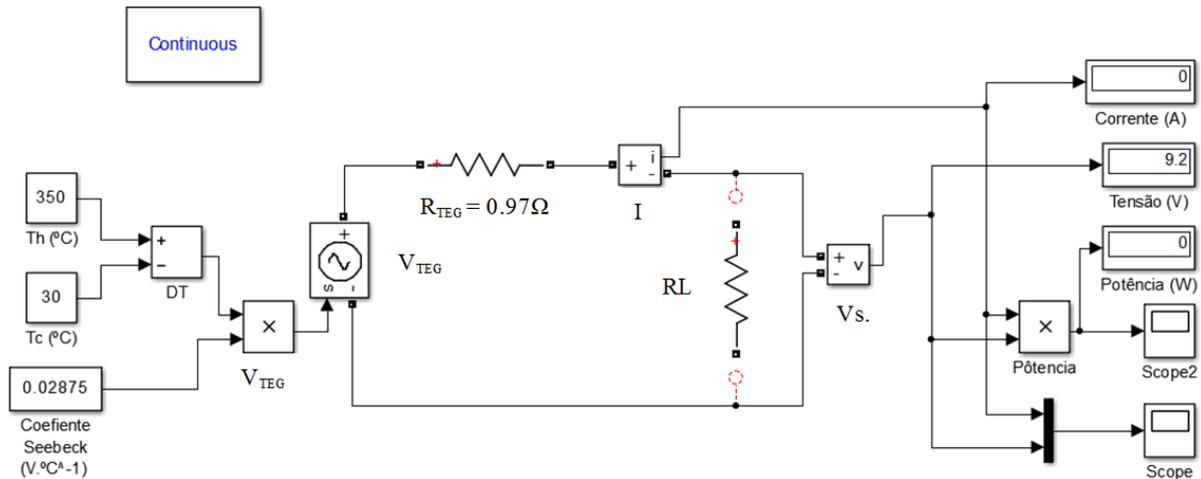


Figura 44 - Circuito equivalente do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 com geração em circuito aberto.

5.1.2.2 TEG alimentando uma carga resistiva de 20 Ω

A Figura 45 apresenta os resultados da simulação para uma carga resistiva 20 Ω.

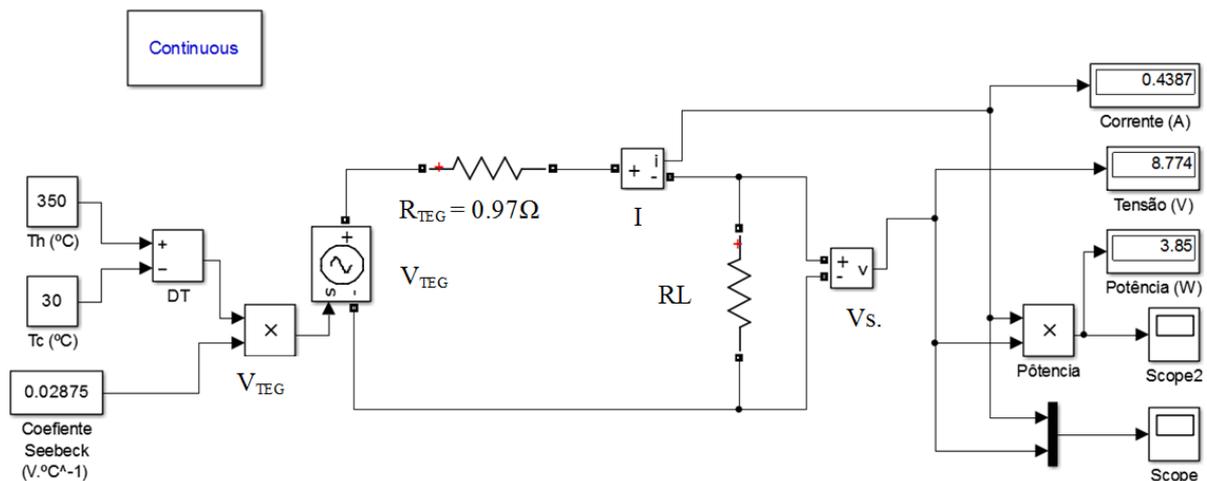


Figura 45 - Circuito equivalente do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 com RL de 20Ω.

Considerando que, nas condições da simulação, o referido TEG pode gerar até 21,7 W, o resultado demonstrou que uma resistência externa de 20 Ω extrai apenas 3,85 W da planta de geração, ou seja, menos de 18% do possível.

5.1.2.3 TEG alimentando uma carga resistiva de $0,97 \Omega$

Utilizando-se dos conceitos referentes à extração de máxima potência, pode-se simular a condição em seja forçado a máxima transferência de potência, sem contudo, utilizar um algoritmo para isso. Essa condição é simulada quando a resistência interna é igual à resistência externa.

A Figura 46 demonstra os resultados para uma resistência externa de $0,97 \Omega$, sendo $R_L = R_{TEG}$.

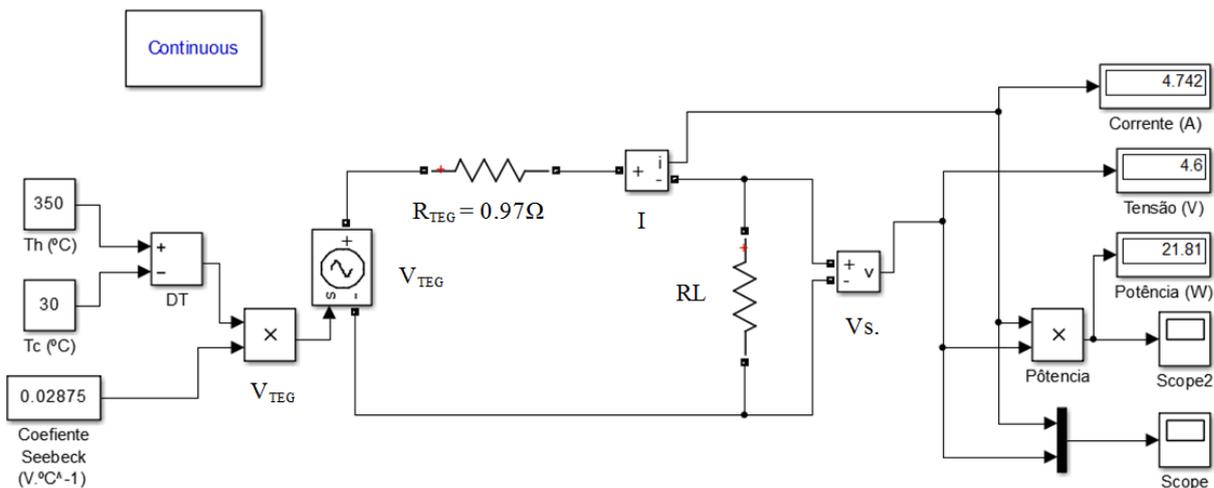


Figura 46 - Circuito equivalente do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 com R_L de $0,97\Omega$.

Desconsiderando as aproximações do circuito simulador, pode-se observar que a máxima potência é extraída quando a resistência interna e a externa são iguais. Os resultados de tensão e corrente apresentados são compatíveis com os da Tabela 2.

5.1.3 Simulação dos circuitos básicos do TEG e MPPT

Ressalta-se que os valores de resistência interna e de coeficiente Seebeck foram referenciados na Tabela 5. O tempo de tempo de amostragem foi de 70 ms. A tolerância ($P1 - P2$) do sistema é de 0,5 W.

5.1.3.1 Um ramo da planta de geração termoelétrica - 7 (sete) TEG em série

Nesta simulação é considerada apenas uma face/lado do aparato, a qual contém 7 (sete) TEG, sendo que esses estão ligados eletricamente em série.

A Figura 47 apresenta o resultado do circuito de simulação proposto.

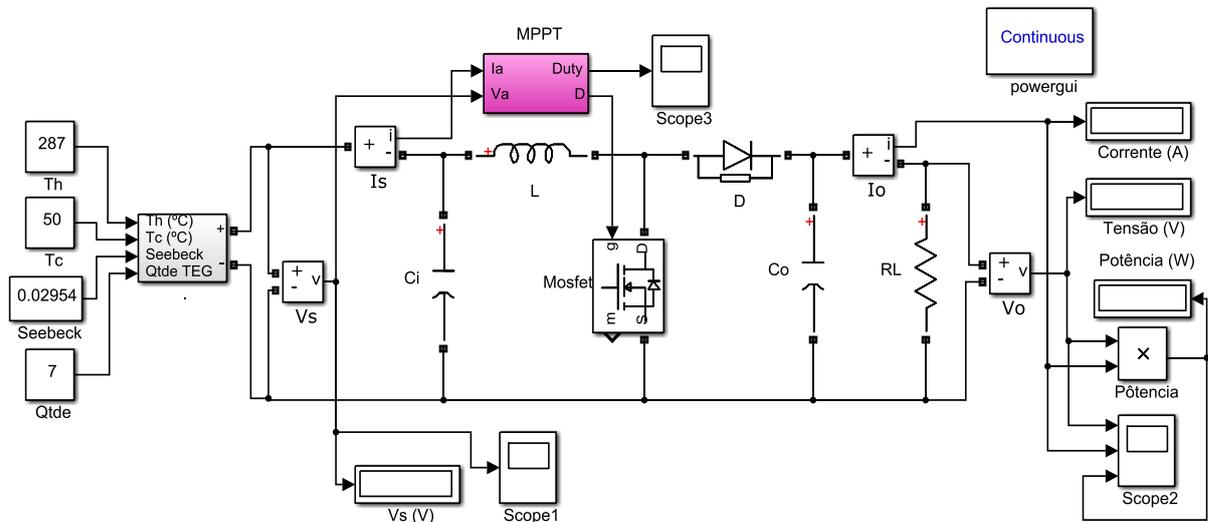


Figura 47 – Um ramo da planta de geração termoelétrica com sistema de MPPT

A Figura 48 apresenta os resultados de potência. Essa simulação foi realizada considerando uma carga (RL) de 10Ω .

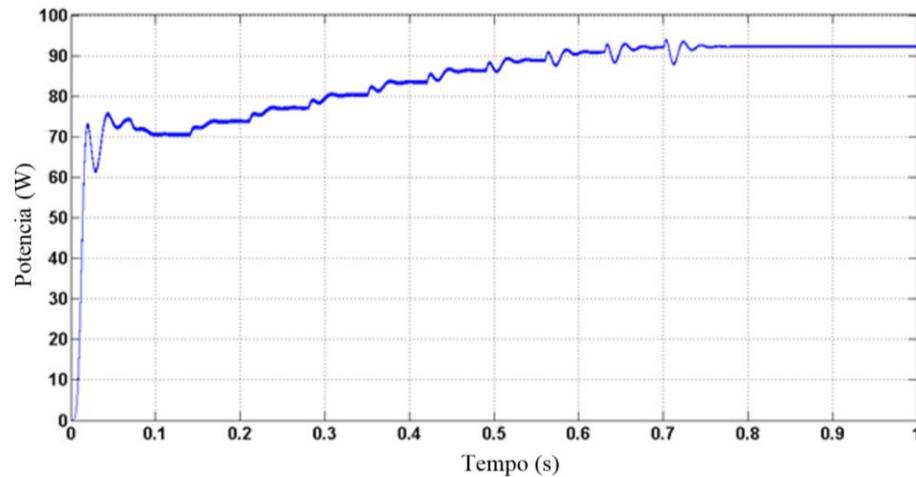


Figura 48 – Gráfico de potência para um ramo da planta termoelétrica com RL de 10Ω

Durante a fase transitória, onde a razão cíclica está em movimento, a potência foi se elevando até se estabilizar em aproximadamente em $91,5 \text{ W}$. A Tabela 5 informa que a potência máxima deste circuito simulado seria de $92,61 \text{ W}$. Nesta simulação houve uma concordância de $98,8\%$.

A Figura 49 mostra o comportamento da razão cíclica no MPPT.

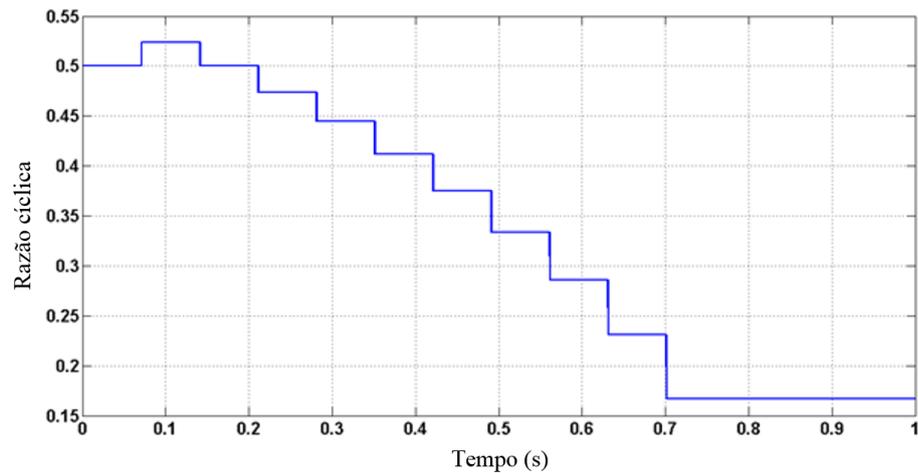


Figura 49 – Razão cíclica no MPPT em um ramo da planta termoelétrica com RL de 10Ω .

O comportamento da razão cíclica durante o MPPT é o esperado. Iniciou-se em 50%, fez o primeiro incremento e posteriormente foi decrementando até encontrar o valor correspondente ao MPP. A visualização deste gráfico, por si só, não confirma o resultado esperado, para isso é necessário apreciar o comportamento da potência, conforme realizado anteriormente.

O controle do conversor encontrou a razão cíclica correspondente ao MPP em aproximadamente 16%. Esse baixo valor é motivado pela proximidade nos valores das resistências, sendo a resistência da carga – RL de 10Ω e a resistência interna da fonte de $6,48 \Omega$, com base na Tabela 4.

Para verificar o comportamento do sistema de MPPT outro valor de RL , na simulação a seguir esse valor passa a ser de 30Ω .

A Figura 50 apresenta os resultados de potência e a Figura 51 ilustra o comportamento da razão cíclica no MPPT.

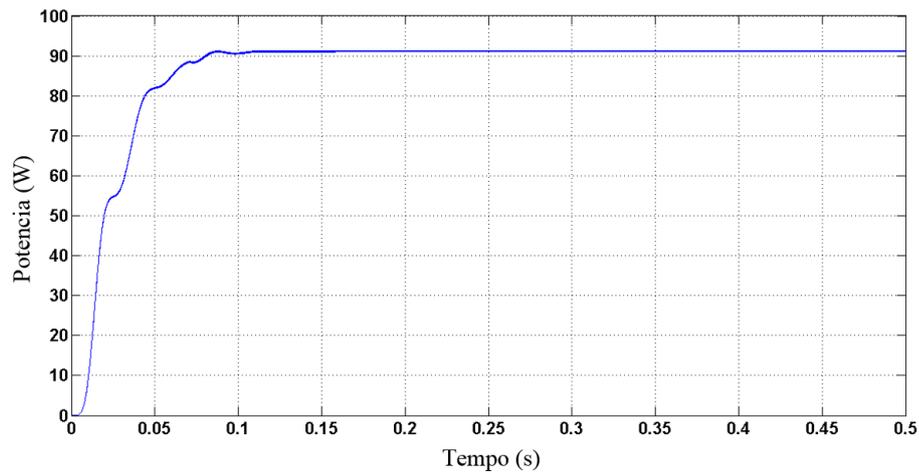


Figura 50 - Gráfico de potência para um ramo da planta termoelétrica com RL de 30Ω

Como no gráfico de potência da simulação, neste a potência inicia-se em 0 W (zero) se eleva, através das alterações na razão cíclica, até entrar em regime estável em aproximadamente em 91,5 W, dos 92,61 W da tabela, tendo uma concordância de 98,8%.

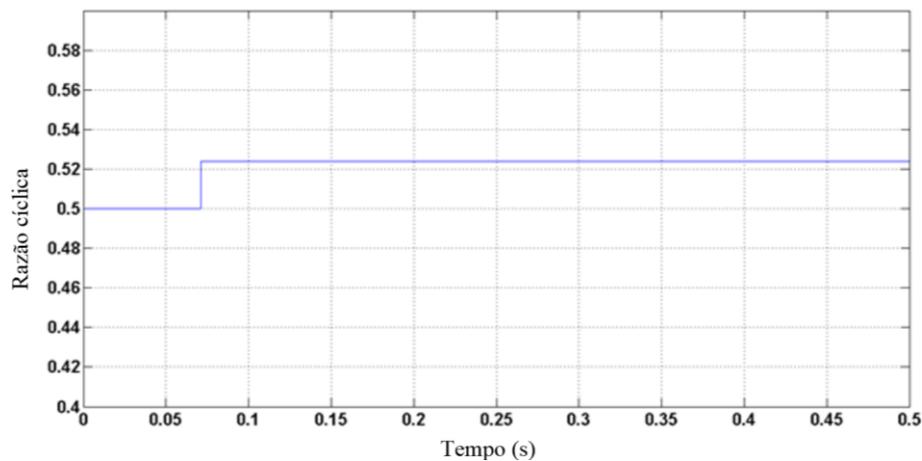


Figura 51 – Razão cíclica no MPPT em um ramo da planta termoelétrica com RL de 30Ω .

Verifica-se que a razão cíclica apresenta um comportamento diferenciado, no entanto de maneira correta. Após iniciar-se em 50% foi necessário apenas um incremento no valor da razão cíclica para que atingisse sua meta, o MPP.

O controle do conversor encontrou a razão cíclica correspondente ao MPP em aproximadamente 52%. Esse valor é bem superior ao encontrado na simulação anterior (16%).

Mantendo a mesma fonte de alimentação, pode-se constatar que o acréscimo no valor da resistência da carga, faz com que a razão cíclica correspondente ao MPP daquela situação se eleve. Esse comportamento confirma o estabelecido em (16).

5.1.3.2 Planta de geração termoelétrica completa – 42 (quarenta e dois) TEG

Na simulação a seguir é utilizada a planta de geração termoelétrica completa, com 42 (quarenta e dois) TEG, sendo 6 (seis) ramos em paralelo, cada um com 7 (sete) TEG (planta termoelétrica completa). Estas simulações utilizam a interligação elétrica apresentada na Figura 30, desconsiderando os diodos.

A Figura 52 apresenta o resultado do circuito de simulação proposto.

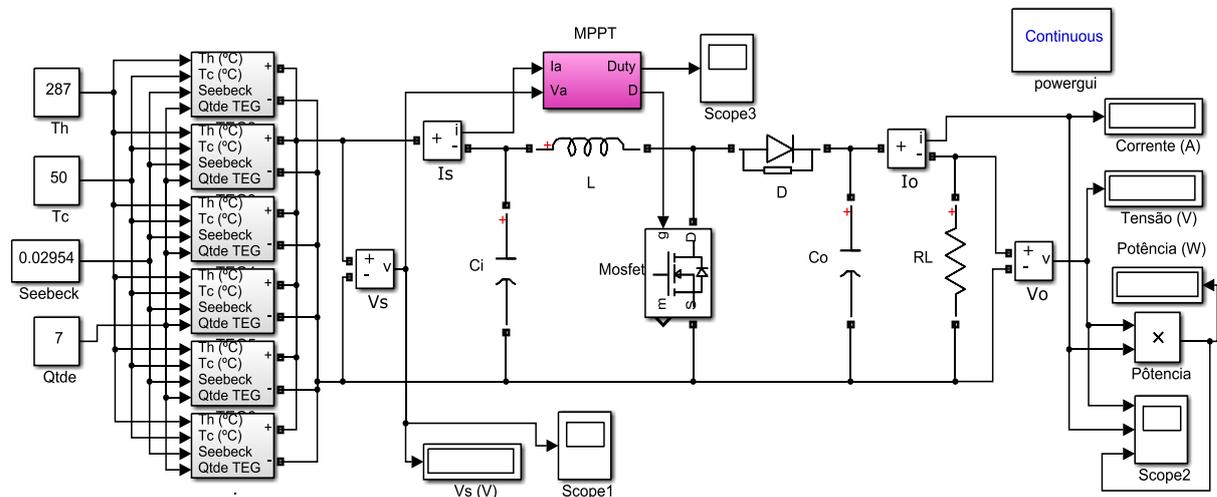


Figura 52 - Planta de geração termoelétrica completa com sistema de MPPT

Para formar os arranjos em paralelo foram utilizados 6 (seis) blocos, onde cada um têm como parâmetro de entrada os 7 (sete) TEG em série, além das informações de temperatura e coeficiente Seebeck.

Semelhante ao realizado para um ramo da planta, nesta simulação completa, inicialmente será inserida uma resistência de carga - RL de 10Ω e posteriormente substituída por 30Ω .

A Figura 53 mostra o resultado da potência e a Figura 54 ilustra o comportamento da razão cíclica durante o MPPT, utilizando uma RL de 10Ω .

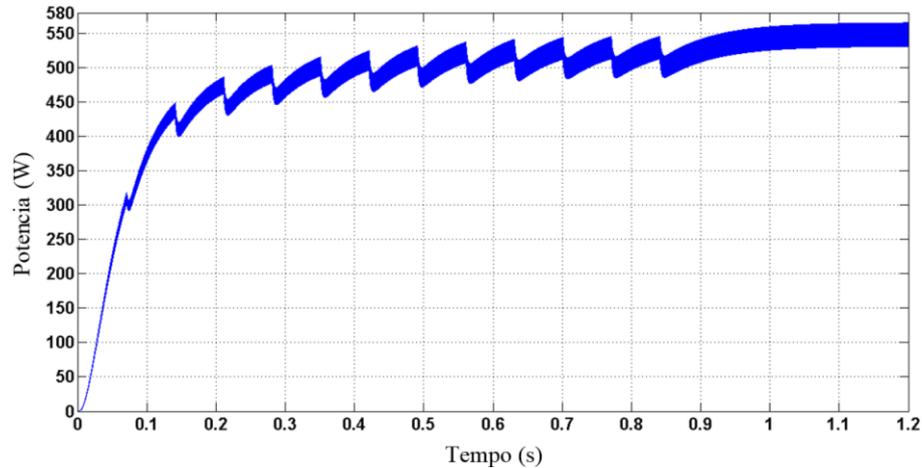


Figura 53 - Gráfico de potência da planta termoeétrica completa com RL de 10Ω

Verifica-se que durante o período transitório o valor da potência vai aumentando. As alterações no valor da razão cíclica provocam picos instantâneos de potência, tendo a mesma se estabilizado após as citadas alterações.

Conforme a Tabela 5, a máxima potência a ser disponibilizada pela planta termoeétrica é de $555,66 \text{ W}$. Com base nos resultados do gráfico, pode-se afirmar que a potência média encontrada no MPPT foi de 545 W . Nesta simulação o sistema de MPPT apresenta uma concordância de $98,2\%$.

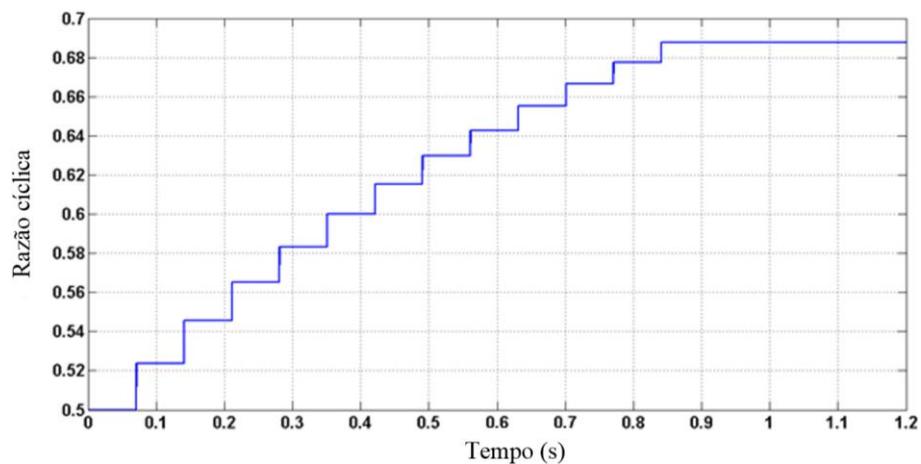


Figura 54 - Razão cíclica no MPPT da planta termoeétrica completa com RL de 10Ω

Durante o MPPT a razão cíclica comporta-se conforme estipulado, inicia em 50% e realiza incrementos em seu valor até atingir o ponto esperado, o MPP. A confirmação do su-

cesso deste resultado deve ser balizada no comportamento da potência do circuito, que na simulação foi satisfatória, ou seja, com os incrementos na razão cíclica a potência tinha seu valor aumentado, até atingir o seu MPP.

O controle do conversor encontrou a razão cíclica correspondente ao MPP em aproximadamente 69%. Esse valor é elevado se comparado com os 16% verificados na simulação de um ramo da planta termoeétrica com o mesmo valor RL (Figura 49). Destaca-se que na simulação a resistência interna equivalente da fonte é de $1,08 \Omega$, com base na Tabela 4, e naquela ocasião era de $6,48 \Omega$.

Nesta simulação o sistema de MPPT efetuou o “casamento de impedâncias” entre 10Ω (RL) com $1,08 \Omega$ (fonte), necessitando para isso uma razão cíclica de 69% (aproximadamente). Naquela situação os valores de resistências eram bem próximos, $6,48 \Omega$ da fonte e 10Ω de RL .

Para verificar o comportamento do sistema de MPPT com outro valor de RL , na simulação a seguir esse valor passa a ser de 30Ω .

A Figura 55 mostra os resultados de potência e a Figura 56 apresenta o comportamento da razão cíclica no MPPT.

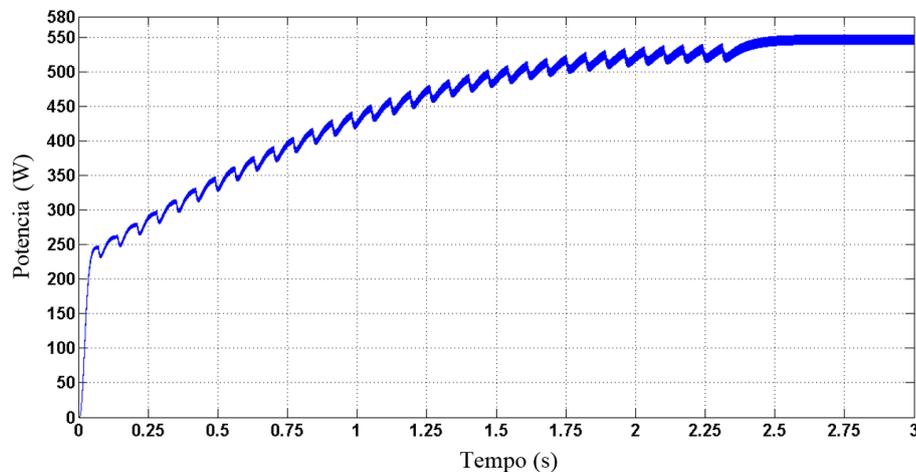


Figura 55 - Gráfico de potência da planta termoeétrica completa com RL de 30Ω

A alteração do valor de RL não impossibilitou o sistema de encontrar o MPP, apenas leva-se um tempo maior para a localização. Novamente é possível constatar o aumento no valor da potência durante a fase transitória, motivado pelas alterações no valor da razão cíclica.

Após sua estabilização verifica-se uma potência média de aproximadamente 545 W. Com isso o sistema de MPPT atinge uma concordância de 98,2%, se comparado com a potência máxima que poderia ser fornecida pela planta termoeétrica, 555,66 W, conforme Tabela 5.

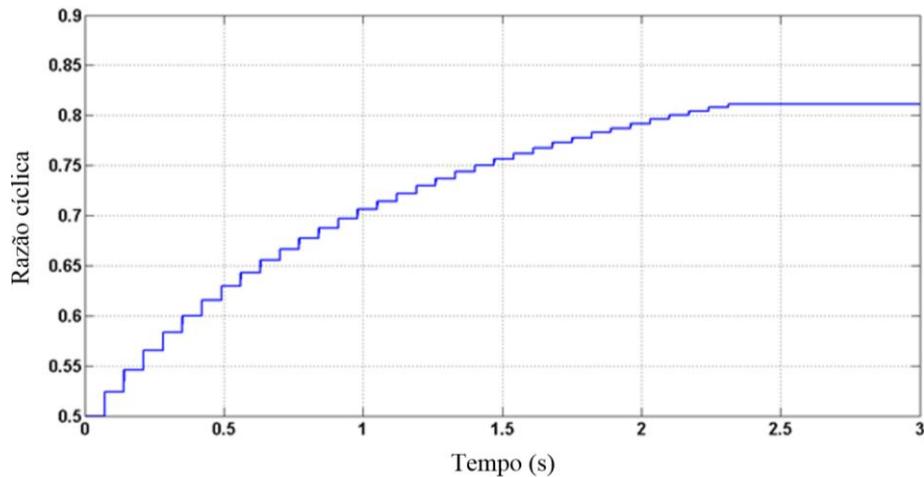


Figura 56 - Razão cíclica no MPPT da planta termoeétrica completa com RL de 30Ω

Semelhante às demais simulações, nesta a razão cíclica tem seu funcionamento adequado, encontrando o MPP. Iniciou-se 50% e posteriormente realizou incrementos em seu valor até atingir o ponto desejado, como pode ser constatado pelo comportamento da potência (Figura 55).

O controle do conversor encontrou a razão cíclica correspondente ao MPP em aproximadamente 81%. Valor superior ao da simulação da planta completa com RL de 10Ω e da simulação de um ramo da planta termoeétrica com o mesmo RL da atual (30Ω).

Referente às simulações da planta completa, para RL de 10Ω obteve-se uma razão cíclica de 69% e para RL de 30Ω , 81%. Esses valores vão de encontro com o apresentado pelas referências utilizadas, especialmente o transcrito em (16). Com isso, se utilizar um valor de RL menor que 10Ω , certamente a razão cíclica será menor que 69%. Análogo, se RL for maior que 30Ω , a razão cíclica será maior que 81% e estando o valor de RL entre 10 e 30Ω , a razão cíclica também estará entre 69 e 81%.

5.2 TESTES EXPERIMENTAIS

Para validar o sistema de MPPT, projetado e construído, foram realizados testes experimentais na planta de geração termoelétrica.

A temperatura do lado quente dos TEG (face do aparato), após um período de aumento gradativo, se estabilizou em torno de 330 °C (região mais próxima à saída dos gases de exaustão) a 244 °C (região do topo do aparato, mais distante da saída dos gases de exaustão). Destaca-se que durante todo o funcionamento esses valores sofrem variações para mais e para menos, desse modo, as temperaturas citadas são utilizadas como parâmetros referenciais.

A temperatura do lado frio dos TEG (sistema de arrefecimento) foi projetada para variar entre 47 °C e 50 °C, através do sistema sensores e válvulas. No entanto, em determinadas situações, quando a válvula era aberta, devido à inércia do escoamento da água e ao tempo de resposta dos termopares, a temperatura chegava a 38 °C.

Devido às variações de temperatura, a planta de geração termoelétrica não gera tensão, corrente e potência constantes, ou seja, a geração de energia é dinâmica.

O sistema de MPPT foi dimensionado para atender a planta de geração termoelétrica completa, com 42 (quarenta e dois) TEG, sendo 6 (seis) ramos em paralelo, cada um com 7 (sete) TEG em série, alimentando uma carga resistiva de 10 a 30 Ω . No entanto, também são realizados testes com apenas um ramo desta planta (7 TEG em série), para fins de verificação quanto ao MPPT.

O tempo de amostragem do sistema é de 70 ms, ou seja, a cada período citado o sistema colhe as medições, realiza um novo ciclo de comparação de potências e estipula o novo valor da razão cíclica. Esse foi o menor tempo obtido com os componentes e programa utilizado.

5.2.1 Um ramo da planta de geração termoelétrica - 7 (sete) TEG em série

Para realizar estes testes experimentais foi utilizado o ramo 1 (um) da planta de geração. Os TEG desse ramo foram interligados em série e posteriormente conectados à entrada do protótipo do sistema de MPPT. Antes de efetivamente ligar o sistema foram realizadas

medições de V_{out} e I_{cc} , respectivamente, 16,9 V e 2,73 A. Com base em (13) tem-se que, nessas condições, a potência máxima a ser fornecida pelo ramo é de 11,53 W.

A Figura 57 apresenta o gráfico do comportamento da potência durante o MPPT. Nessa ocasião o ramo 1 (um) da planta termoeétrica está alimentando uma carga resistiva de 10 Ω .

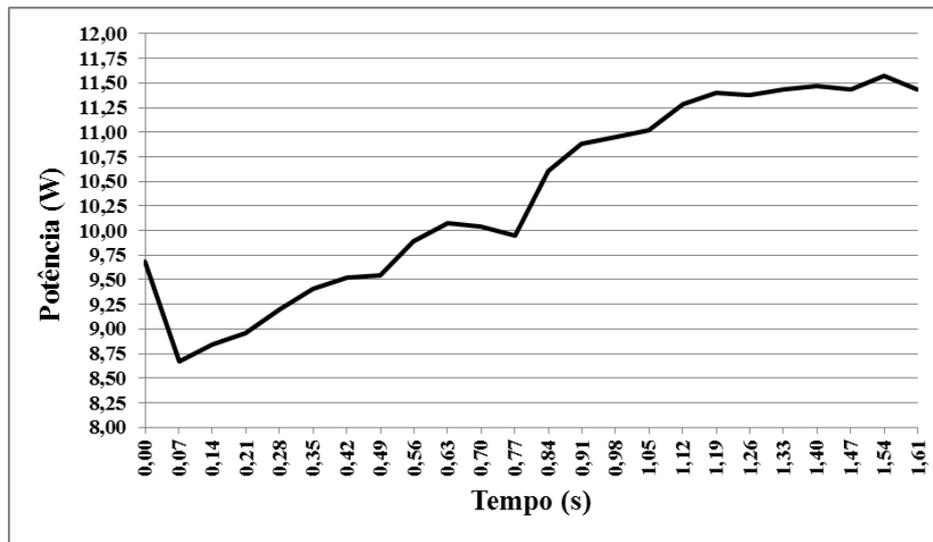


Figura 57 – Gráfico de potência do ramo 1 (um) da planta termoeétrica com RL de 10 Ω .

Com base na Figura 57, constata-se que o protótipo construído atende às necessidades propostas neste trabalho, realizando o MPPT de uma planta com termogeradores – TEG.

O sistema inicia as medições com aproximadamente 9,6 W, em seguida decresce para 8,7 W e posteriormente faz seguidos acréscimos no valor da potência até alcançar um faixa de estabilidade ou faixa da máxima potência, com valor médio aproximado de 11,40 W.

Utilizando como referência as medições anteriores à ligação do protótipo, a potência máxima a ser extraída era de 11,53 W. Desse modo, o sistema de MPPT apresenta uma concordância de 98,8%. A de se destacar que a geração de energia elétrica dos termogeradores é dinâmica, ou seja, está sempre alterando seus valores, devido à variação de temperatura do lado quente e frio, conforme citado anteriormente. Assim, o valor da concordância é estimado.

A Figura 58 apresenta o comportamento da razão cíclica no MPPT.

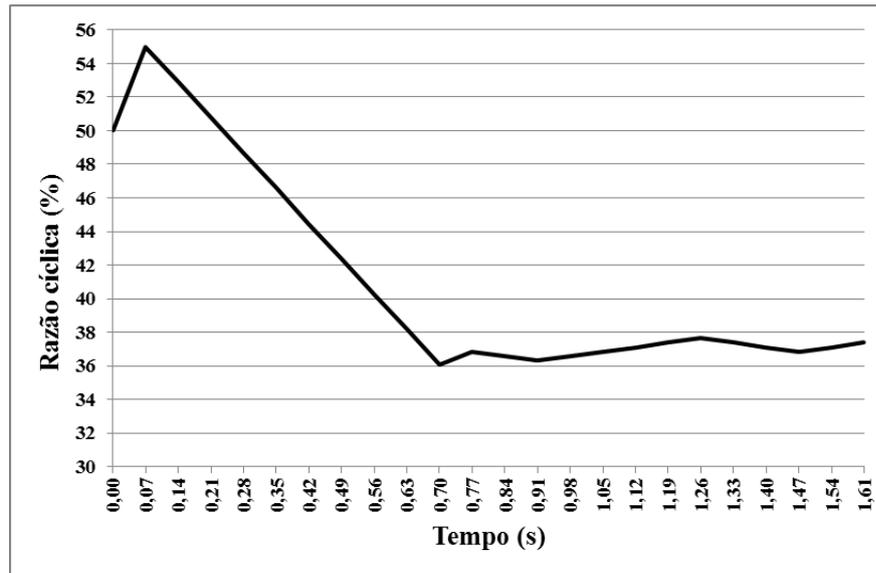


Figura 58 - Razão cíclica no MPPT do ramo 1 (um) da planta termoeétrica com RL de 10Ω

A razão cíclica comporta-se como programado, inicia-se com 50% e posteriormente vai a 55% de modo que o sistema possa obter 2 (dois) valores de potência para efetivamente iniciar o MPPT. Nessa situação verifica-se que ao incrementar a razão cíclica para 55% a potência fornecida diminuiu, com isso, o sistema iniciou uma série de decrementos de 2,1% até atingir 36%.

Em seguida continuou a oscilação dentro de uma faixa de estabilização, com um valor médio aproximado de 37%.

O valor da razão cíclica é constantemente alterado, realizando o “casamento das impedâncias” de fonte e carga para condições momentânea, visto que a geração termoeétrica é dinâmica e sensível aos valores de temperatura aplicados nos termogeradores.

A visualização deste gráfico, por si só, não confirma o resultado esperado, para isso é necessário apreciar o comportamento da potência, como já realizado anteriormente.

Para verificar o comportamento do protótipo com outro valor de carga, a seguir é utilizado 30Ω . Antes de efetivamente ligar o sistema foram realizadas medições de V_{out} e I_{cc} , respectivamente, 17,72 V e 2,73 A. Com base em (13) tem-se que, nessas condições, a potência máxima a ser fornecida pelo ramo é de 12,09 W.

A Figura 59 ilustra o comportamento da potência.

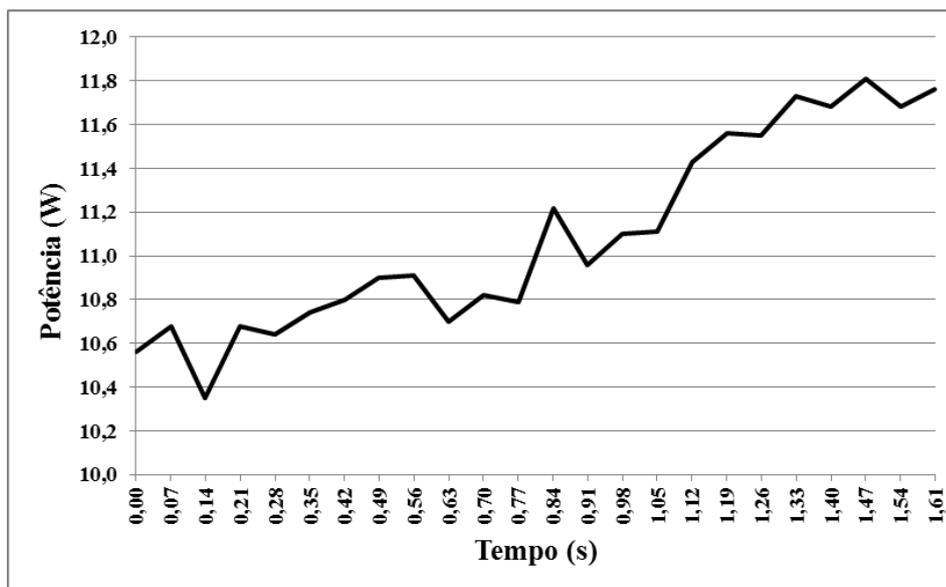


Figura 59– Gráfico de potência do ramo 1 (um) da planta termoelétrica com RL de 30Ω .

Neste teste a potência iniciou-se em aproximadamente $10,6 \text{ W}$, valor superior ao apresentado no teste anterior ($9,6 \text{ W}$). Isso se deve ao fato da razão cíclica correspondente ao “casamento de impedâncias” deste teste está mais próximo do inicial (50%), do que no teste anterior.

Se compararmos aos gráficos de potência (Figura 57 e Figura 59) percebe-se que o atual apresenta maiores oscilações em seus valores, sendo que durante o MPPT houve alguns acréscimos e decréscimos de potência até atingir a faixa de estabilidade. Certamente essas alterações foram provocadas pela variação de temperatura aplicada nos TEG, modificando resistência interna e valores de geração. Esses resultados indicam que durante o teste ocorreu a abertura da válvula que controla a água de arrefecimento, situação em que a temperatura do lado frio sai de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ para valores extremos de $38 \text{ }^\circ\text{C}$.

Esta situação valoriza o protótipo construído, reafirmando a sua função para com o sistema, onde independente das condições de entrada e saída (considerando as dimensionadas) o mesmo busca sempre colocar a geração no MPP.

O sistema alcançou a faixa de estabilidade, com valor médio de aproximadamente $11,70 \text{ W}$. Utilizando como referência as medições anteriores à ligação do protótipo, onde a potência máxima a ser extraída era de $12,09 \text{ W}$, o sistema de MPPT obteve uma concordância

de 96,8%. Como citado anteriormente, essa concordância é estimada, devido as constantes variações da geração termoeétrica.

A Figura 60 ilustra o comportamento da razão cíclica no MPPT.

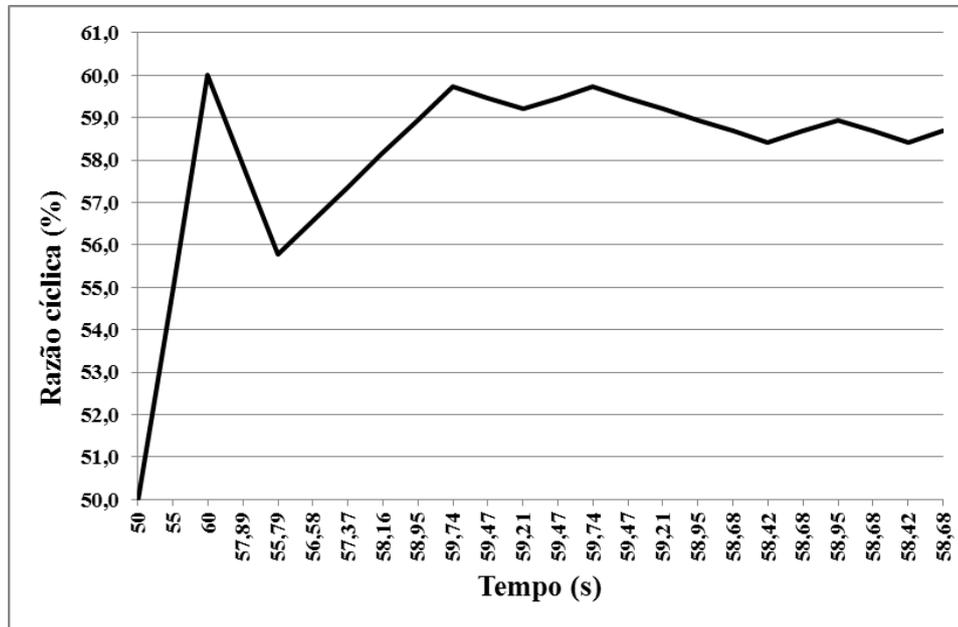


Figura 60 - Razão cíclica no MPPT do ramo 1 (um) da planta termoeétrica com RL de 30Ω .

Durante o MPPT a razão cíclica comporta-se conforme estipulado, inicia em 50% e realiza incrementos de 5%, atingindo 60%, posteriormente detectando um decréscimo na potência, realiza decrementos de 2,1% até aproximadamente 56%, verificando nova diminuição no valor da potência, passa a realizar incrementos de 0,79% e após nova redução na potência realiza decrementos de 0,26%, mantendo este valor de oscilação até o fim.

Como citado anteriormente, durante a realização deste teste houve oscilações nos valores geradores, isso motivou a alterações consideráveis no valor da razão cíclica, até atingir uma faixa de estabilização, com um valor médio aproximado de 57%.

Neste teste o valor da razão cíclica (57%) é superior ao do teste anterior (37%). Essa superioridade se deve ao acréscimo no valor da resistência de carga de 10Ω para 30Ω . Assim, verifica-se que caso houvesse novo acréscimo na resistência de carga, certamente o valor da razão cíclica correspondente seria superior a 57%.

5.2.2 Planta de geração termoeétrica completa – 42 (quarenta e dois) TEG

Após realizar os testes experimentais com apenas um ramo da planta de geração termoeétrica, a seguir novos testes são realizados considerando a planta completa, com 42 (quarenta e dois) TEG, sendo 6 (seis) ramos em paralelo, cada um com 7 (sete) TEG em série.

Para realizar os citados testes, os 7 (sete) TEG de cada ramo foram interligados eletricamente em série e com esses um diodo, também em série. A instalação desse diodo é necessária para evitar que correntes reversas “entrem” nos ramos, visto que esses geram tensões diferentes uns dos outros. Desse modo, as correntes geradas têm somente o da carga.

Posteriormente os ramos foram interligados eletricamente em paralelo e por fim conectados à entrada do protótipo do sistema de MPPT.

Antes de efetivamente ligar o sistema e realizar os primeiros testes, foram feitas medições de V_{out} e I_{cc} da planta de geração termoeétrica completa, respectivamente, 16,2 V e 13,95 A. Com base em (13) tem-se que, nessas condições, a potência máxima a ser fornecida é de 56,50 W.

Nos testes anteriores utilizando apenas um ramo era possível gerar de 11,4 W a 12,09 W. Tomando como referência o menor desses valores, 11,4 W, a planta completa (6 ramos) devia gerar uma potência máxima de 68,40 W, no entanto pode gerar apenas 56,50 W.

Esse problema se deve ao fato dos ramos paralelos possuírem tensões diferentes entre si e certamente pela queda nos diodos. O MPPT também fica prejudicado, pois terá um menor valor para realizar a busca.

Levando em consideração apenas o valor da potência extraída imagina-se ser interessante construir um protótipo para realizar o MPPT de cada TEG, desse modo evitaria as perdas causadas com as interligações série e paralelo entre eles. No entanto, quando se leva em consideração o custo benefício não é interessante a proposta anterior, visto que cada TEG gera pouca potência e tem baixo valor de tensão.

Pelos motivos expostos no capítulo de metodologia foi adotado o arranjo elétrico apresentado na Figura 30.

A Figura 61 apresenta o gráfico de comportamento da potência durante o MPPT. Nesse teste a planta termoeétrica está alimentando uma carga resistiva de 10 Ω

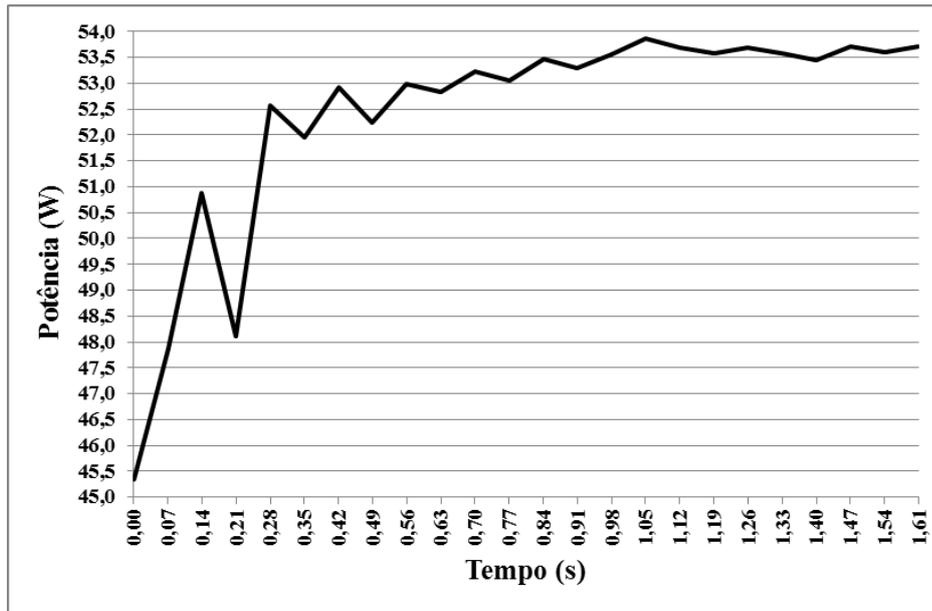


Figura 61 - Gráfico de potência da planta termoeétrica completa com RL de 10Ω .

O comportamento da potência demonstrado na Figura 61 valida a utilização do protótipo construído para realizar o MPPT de uma planta de geração termoeétrica.

A potência no início do rastreamento é de aproximadamente 45,5 W, em seguida é acrescida até 51 W, posteriormente tem uma queda até 48 W e por fim mantém uma série de acréscimos (e alguns decréscimos) até atingir uma faixa de estabilidade, com valor médio aproximado de 53,60 W.

Utilizando como referência as medições anteriores à ligação do protótipo, a potência máxima a ser extraída era de 56,50 W. Desse modo, o sistema de MPPT apresentou uma concordância de 94,9%.

A Figura 62 ilustra o comportamento da razão cíclica no MPPT.

Como programado a razão cíclica inicia-se em 50%, realiza incrementos de 5% em seu valor, atingindo 65%. Em seguida decrementa numa taxa de 2,1%, depois incrementa em 0,79% e posteriormente realiza oscilações de 0,26% em seu valor. Esses valores diferentes nas oscilações (passos) da razão cíclica possibilitam o encontro da faixa de máxima potência em menor tempo e maior precisão do que se fosse realizada com passos fixos.

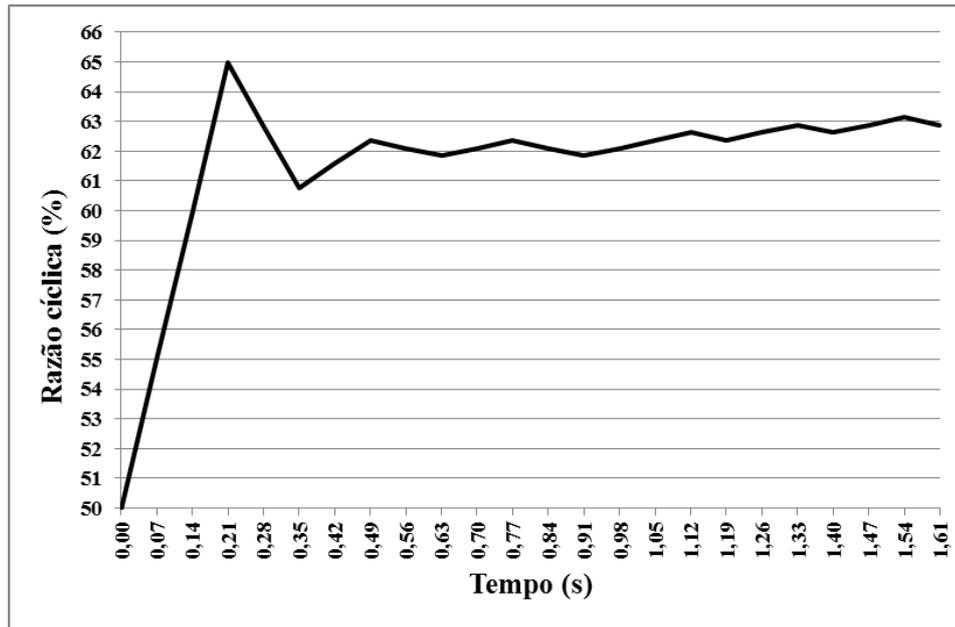


Figura 62 - Razão cíclica no MPPT da planta termoeétrica completa com RL de 10Ω .

A faixa de máxima potência tem um valor de razão cíclica média aproximada de 63%. No dimensionamento do conversor cc-cc boost foi obtido o valor da razão cíclica de 64% para uma carga resistiva de 10Ω . Ressalta-se que o valor encontrado no experimento prático é condizente com o valor teórico.

Para o mesmo valor de carga (10Ω), o valor da razão cíclica corresponde ao “casamento das impedâncias” foi de 63% para a planta completa e de apenas 37% para um ramo dessa mesma planta. Essa divergência de valor é justificada pelo valor de resistência interna das fontes, que no caso do ramo é aproximadamente 6 (seis) vezes maior que a da planta completa. Mantendo o valor da carga constante, quando menor a resistência da fonte maior será a razão cíclica corresponde.

As constantes e pequenas oscilações da razão cíclica (0,26%) mantém a extração de potência dentro da faixa de máxima potência, adequando-se às alterações da geração, especialmente as ocasionadas pelas variações de temperatura.

Para verificar o comportamento do protótipo com outro valor de carga, a seguir é utilizado 30Ω . Antes de efetivamente ligar o sistema foram realizadas medições de V_{out} e I_{cc} , respectivamente, 16,05 V e 14,01 A. Com base em (13) tem-se que, nessas condições, a potência máxima a ser fornecida é de 56,21W.

A Figura 63 ilustra o comportamento da potência.

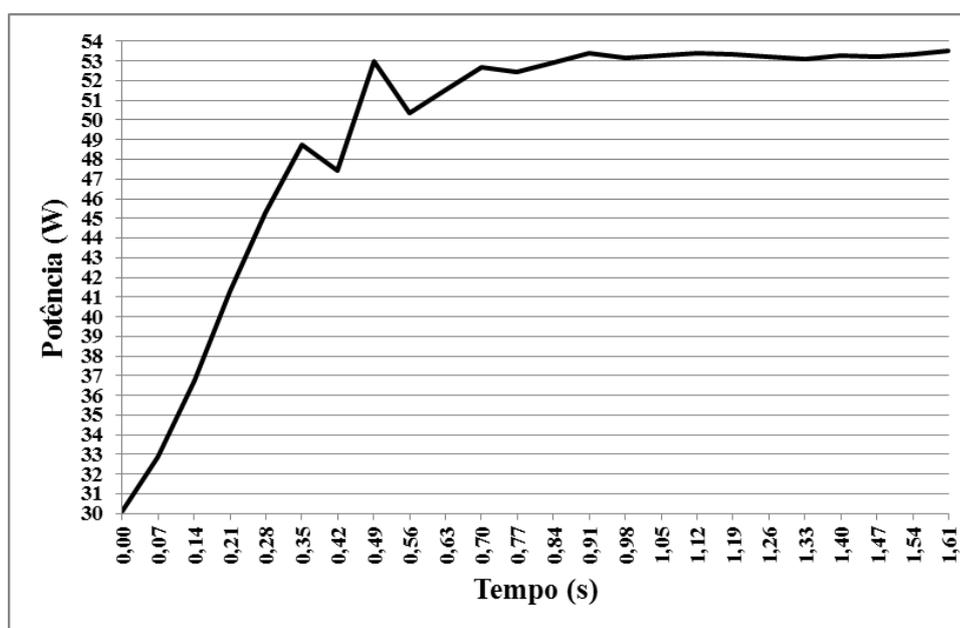


Figura 63- Gráfico de potência da planta termoeétrica completa com carga de 30 Ω .

Neste teste a potência iniciou-se em aproximadamente 30 W, elevou-se constantemente até próximo de 49 W, teve uma leve redução a 47,5 W, retomou o crescimento até 53 W, reduziu, tornou-se a elevar e posteriormente entrou na faixa de estabilização/máxima de potência com valor médio aproximado de 53,3 W.

Utilizando como referência as medições anteriores à ligação do protótipo, a potência máxima a ser extraída era de 56,21 W. Desse modo, o sistema de MPPT atingiu uma concordância de 94,8%.

Se compararmos aos gráficos de potência (Figura 61 e Figura 63) percebe-se que o atual apresenta um comportamento mais constante, sem grandes alterações de decréscimos e acréscimo até atingir a faixa de estabilização. Durante a realização deste teste certamente houve poucas alterações nas condições de geração.

Devido às poucas alterações de geração e consequentemente nas inversões da razão cíclica, neste teste a faixa de estabilidade foi alcançada em menor tempo, quando comparado com o teste anterior.

A Figura 64 ilustra o comportamento da razão cíclica no MPPT.

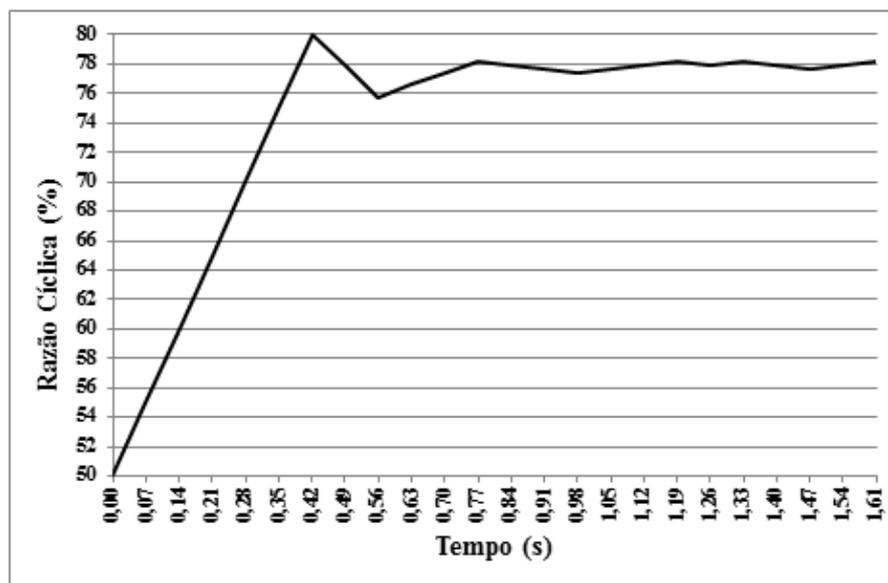


Figura 64 - Razão cíclica no MPPT da planta termoeétrica completa com carga de 30 Ω .

Como de rotina, o valor da razão cíclica inicia-se em 50% e realiza incrementos de 5%, no teste atual atingindo 80%, posteriormente detectando um decréscimo na potência, realiza decrementos de 2,1% até aproximadamente 76%, verificando nova diminuição no valor da potência, passa a realizar incrementos de 0,79% e após nova redução na potência realiza oscilações com valor 0,26%, mantendo esse valor até o fim do teste. A faixa de estabilização encontrada tem um valor médio aproximado de 78%.

Destaca-se que, dentre todos os testes realizados, neste ocorreu os maiores valores de razão cíclica, sendo um pico de 80% e a estabilidade média em torno de 78%. Esses valores elevados são condicionados à discrepância entre os valores de resistência da fonte e da carga no teste atual, respectivamente, 1,15 Ω (com base nos dados da medição anterior aos testes) e 30 Ω . No teste anterior a resistência da fonte era aproximadamente a mesma, no entanto, a resistência da carga era bem menor, 10 Ω . Tanto que o valor da razão cíclica foi de 63%.

Quando do dimensionamento do conversor cc-cc boost foi obtido o valor da razão cíclica de 79% para uma carga resistiva de 30 Ω . Como pode ser verificado o valor obtido no experimento prático é condizente com o valor teórico calculado.

Além das condições de MPPT avaliadas e validadas anteriormente, a qualidade da energia (tensão e corrente) entregue à carga também deve ser apreciada. Durante o dimensio-

namento do conversor cc-cc boost foi estabelecido uma ondulação máxima de 2% para tensão e corrente de saída, ou seja, as entregues à carga.

Utilizando os valores do último teste realizado são colhidas amostras da tensão e corrente de saída. Para isso, no instante 1,61 s (das Figura 63 e Figura 64) a razão cíclica foi travada (em 78,15%) e os valores foram obtidos utilizando um osciloscópio. Com o travamento da razão cíclica não haverá distorções provadas por seu incremento ou decréscimo, assim as ondulações (*ripple*) dos sinais são provocadas apenas pelo funcionamento do próprio conversor.

Durante o período de amostragem foram obtidos os seguintes valores no conversor:

- $V_s = 8,01$ V (tensão de entrada);
- $I_s = 6,68$ A (corrente de entrada);
- $V_o = 35$ V (tensão de saída);
- $I_o = 1,38$ A (corrente de saída).

A Figura 65 apresenta o comportamento da tensão (V_o) entregue à carga de 30Ω .

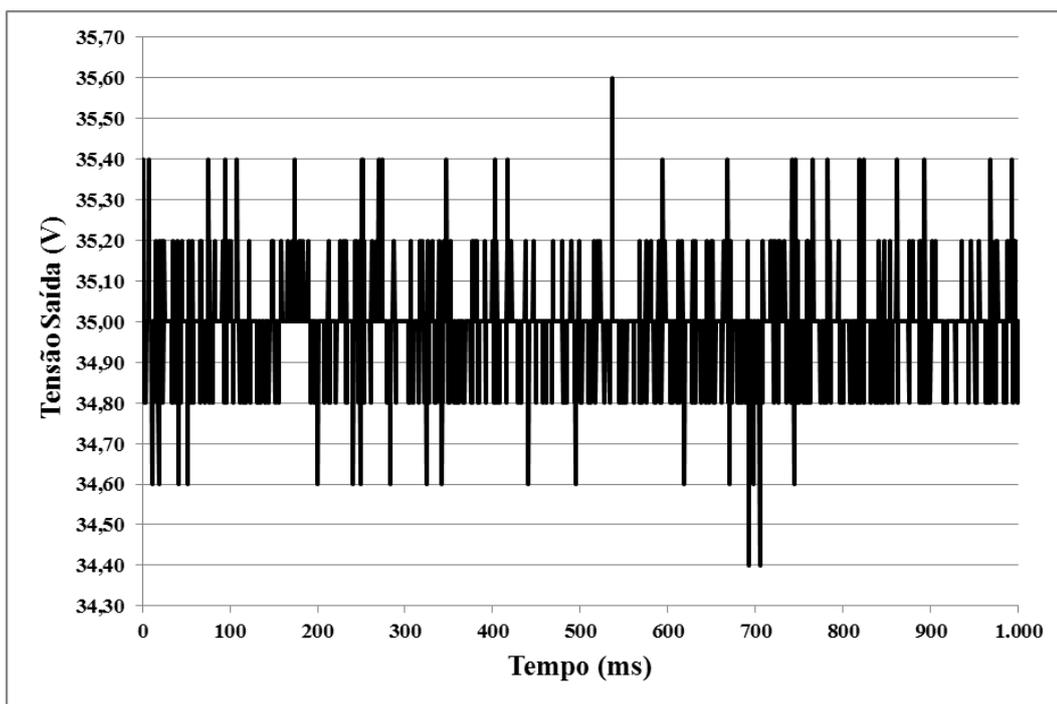


Figura 65 – Tensão de saída do conversor cc-cc boost com RL de 30Ω .

No gráfico apresentado é possível verificar um valor máximo de 35,60 V e um valor mínimo de 34,40 V, com isso o valor médio é de 35 V. Com base nesses valores verifica-se uma ondulação (*ripple*) de 1,71%.

Esse valor de ondulação valida o protótipo construído, pois apresenta uma ondulação menor que a projetada – 2%.

Ainda com relação à tensão é possível verificar o funcionamento do conversor quanto à elevação da tensão de saída em relação à de entrada. Nesta ocasião tem-se uma razão cíclica de 78,15% e uma tensão de entrada de 8,01 V. Com base em (9) um conversor cc-cc boost ideal, sem perdas, teria uma tensão de saída de 36,65 V. O valor obtido no teste experimental foi de 35 V, sendo um valor aceitável, considerando as perdas no sistema. Esse parâmetro também auxilia na validação do funcionamento do conversor construído.

A Figura 66 apresenta comportamento da corrente (I_o) entregue à carga de 30 Ω .

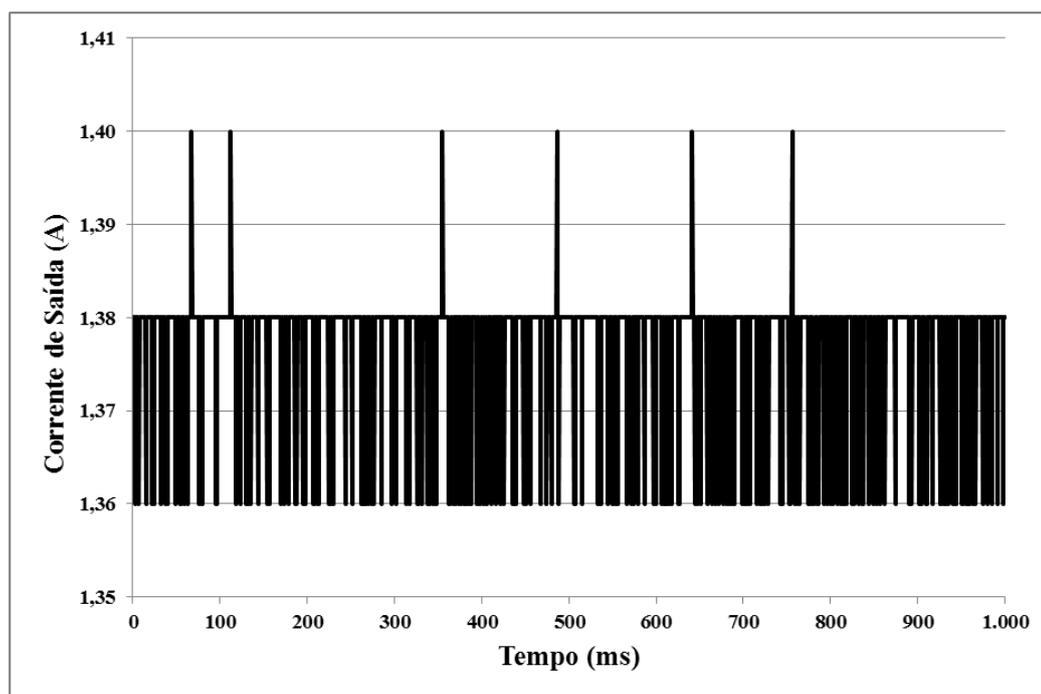


Figura 66 – Corrente de saída do conversor cc-cc boost com RL de 30 Ω .

No gráfico apresentado é possível verificar um valor máximo de 1,4 A e um valor mínimo de 1,36 A, tendo um valor médio entre essas de 1,38 A. Com base nesses valores verifica-se uma ondulação (*ripple*) de 1,45%.

Esse valor de ondulação valida o protótipo construído, pois apresenta uma ondulação menor que a projetada (2%).

Utilizando os valores das amostras anteriores é possível verificar o rendimento do conversor em (29).

$$\eta = \frac{P_o}{P_s} = \frac{V_o \cdot I_o}{V_s \cdot I_s} \quad (29)$$

Com base em (29) verifica-se um rendimento de 90,27% para o conversor cc-cc boost. Destaca-se que o valor encontrado está condizente com a faixa de valores (90% a 92%) utilizada por Ribeiro (2011), Garcia (2010), dentre outros.

5.3 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Neste trabalho é realizada uma análise de viabilidade econômica preliminar simplificada, tendo como dados de entrada do fluxo de caixa: o investimento inicial, que corresponde aos gastos necessários para a instalação da planta termoelétrica, gastos relacionados ao consumo de água e a economia de energia obtida com a instalação do sistema termoelétrico.

A Tabela 11 apresenta os itens que compõem o investimento inicial da planta de geração termoelétrica completa, com 42 (quarenta e dois) TEG, que individualmente podem gerar até 21,7 W quando submetido à $T_h = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T_c = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Nessas condições a planta poderá ter uma geração máxima de até 911,4 W.

Tabela 11 – Investimento inicial

Item	Descrição	Unidade	Qtde	Preço Unitário (R\$)	Preço Total (R\$)
1	Termogerador - TEG	und	42	280,00	11.760,00
2	Dispositivo trocador de calor para o lado quente	cj	1	2.133,00	2.133,00
3	Sistema trocador de calor para o lado frio	cj	1	1.300,00	1.300,00
4	Sistema de Automação e Controle	cj	1	10.000,00	10.000,00
5	Micro inversor – 250 W	und	1	1.500,00	1.500,00
6	Bomba submersa ½ cv	und	1	250,00	250,00
7	Serviços de instalação	cj	1	6.735,75	6.735,75
				Total	33.678,75

O item 1 relaciona os termogeradores – TEG modelo TELBP1-12656-0.45 da fabricante Termonamic, sendo que neste valor já está incluso os custos relacionados à importação e frete.

O item 2 refere-se ao dispositivo trocador de calor para o lado quente dos TEG, sendo um duto de geometria hexagonal instalado no escapamento dos gases de exaustão do grupo motor-gerador do IFG Campus Goiânia.

O item 3 refere-se ao sistema trocador de calor do lado fria, incluindo tanques pulmão, dispositivo trocador de calor, tubulação, válvulas, conexões e mangueiras.

O sistema de geração termoelétrica é controlado por um sistema de automação, cujo valor está relacionado no item 4.

A análise leva em consideração que a energia elétrica gerada será utilizada no consumo do próprio IFG, sendo necessária uma energia em corrente alternada. Por esse motivo não é utilizado o valor referente ao protótipo do sistema de MPPT, visto que a saída desse é em corrente contínua. Para fins didáticos e no intuito de solucionar tal situação foi utilizado um micro inversor comercial de 250 W, componente que converte a energia de corrente contínua para corrente alternada. O valor do mesmo foi obtido através de cotação no mercado local (item 5 da Tabela 11).

A água utilizada pela planta é proveniente de um sistema de reuso do IFG Campus Goiânia. Dessa forma, neste projeto, não será considerado o gasto com água potável, apenas com a energia elétrica para o funcionamento da bomba submersa de $\frac{1}{2}$ cv, que eleva a água dos tanques do sistema de reuso para o reservatório de água da planta de geração termoelétrica (item 6 da Tabela 11).

Nesta avaliação considerou-se que custos dos serviços de instalação do sistema correspondem a 20% do investimento total (item 7 da Tabela 11).

A planta de geração termoelétrica funciona no mesmo período que o grupo motor-gerador, o qual é ligado durante o horário de ponta (3 h diárias), período em que os valores cobrados pela concessionária de energia, para consumo e demanda, são elevados em comparação com os demais horários. Considera-se que o referido gerador será utilizado 20 (vinte) dias por mês durante os 12 (doze) meses do ano. Devido à baixa quantidade de energia gerada, nesta análise não é considerada a influência sobre a demanda, apenas sobre o consumo.

O valor do kWh utilizado foi obtido da fatura de energia elétrica do IFG Campus Goiânia, referente ao mês de novembro de 2015. O valor no horário de ponta é de 1,75344 R\$/kWh, já embutido os impostos. Também deve ser incluso nesse valor o custo referente à bandeira tarifária, que na atual condição é a de cor vermelha, no valor de 0,06946 R\$/kWh. Assim, tem-se um valor total de 1,8229 R\$/kWh.

O sistema trocador de calor do lado frio da planta de geração termoelétrica consome $0,222 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de água. Considerando o período de utilização da planta, durante um ano são gastos $159,84 \text{ m}^3$. A bomba submersa tem a capacidade de elevar $1,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de água, consumindo 32,66 kWh/ano. Desse modo, utilizando o valor do consumo anterior, no primeiro ano do projeto são gastos 59,54 R\$/ano com o bombeamento de água.

Para a economia de energia é utilizada a geração de máxima potência da planta termoelétrica, quando do teste de validação do protótipo do sistema de MPPT, sendo 56,50 W, conforme Tabela 8. Como citado anteriormente, na análise econômica considera-se que a planta será conectada ao micro inversor e desde ao consumo do IFG Campus Goiânia. Para efeitos práticos são desprezadas as perdas no micro inversor.

Considerando o período de funcionamento anual da planta termoelétrica gera-se 40,68 kW. Utilizando-se o valor 1,8229 R\$/kWh tem-se uma economia de energia de R\$ 74,16 para o primeiro ano.

A Tabela 12 apresenta os parâmetros para elaborar o fluxo de caixa e os cálculos dos indicadores econômicos.

Tabela 12 – Parâmetros para elaborar o fluxo de caixa

Descrição	Valor
Vida útil do projeto	10 anos
Valor residual	R\$ 0,00
Taxa Mínima de Atratividade - TMA	11,20%
Inflação	10,48%
Custos de operação e manutenção (% anual)	1% do investimento inicial
Taxa de reajuste da tarifa de energia	6,00% a.a.

A vida útil do projeto foi definida em 10 (dez) anos por ser a estimativa de vida útil do principal componente do sistema, os termogeradores – TEG. Considera-se que após esse período não existirá valor residual para mencionado projeto (Hi-Z TECHNOLOGY INC, 2014).

Para a taxa mínima de atratividade - TMA foi utilizada a taxa SELIC média líquida corresponde ao período de dezembro/2014 a novembro/2015 (BCB, 2016).

Atualmente o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) é o índice oficial de inflação no Brasil. Por esse motivo o citado índice será utilizado como indicador inflacionário deste projeto. O valor de 10,48% corresponde ao acumulado de dezembro/2014 a novembro/2015 (RODRIGUES, 2015; IPCA, 2016).

Foi admitido que os custos com operação e manutenção (O&M) correspondem a 1% do valor do investimento inicial (Tabela 11). Esse percentual é compatível com o utilizado para sistema de geração fotovoltaico (PERLOTTI, 2012; RODRIGUES, 2015).

A taxa anual de reajuste da tarifa de energia foi estimada em 6% ao ano, valor condizente com os estudos realizados por Ruther et al. (2008).

A Tabela 13 apresenta o fluxo de caixa simplificado para o projeto e a Figura 67 mostra o gráfico para o citado fluxo de caixa.

Tabela 13 – Fluxo de caixa simplificado

	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
ENTRADAS DE CAIXA											
(+) Economia de energia		74,16	78,60	83,32	88,32	93,62	99,24	105,19	111,50	118,19	125,28
SAÍDAS DE CAIXA											
(-) Implantação do Sistema	33.678,75										
(-) Custos com O&M		336,79	372,08	411,08	454,16	501,75	554,34	612,43	676,62	747,52	825,86
(-) Custos com água		59,54	65,78	72,67	80,29	88,70	98,00	108,27	119,61	132,15	146,00
(=) FLUXO DE CAIXA	-33.678,75	-322,17	-359,25	-400,43	-446,12	-496,83	-553,10	-615,51	-684,72	-761,48	-846,58

Nos anos posteriores ao primeiro, para adequar o item economia de energia utilizou-se o índice de reajuste tarifário e para corrigir os custos de O&M e gastos com bombeamento de água aplicou-se o índice inflacionário anual.

Apreciando o fluxo apresentado constata-se que durante toda a vida útil do projeto não houve nenhum ano em que as receitas superam as despesas, tornando o projeto inviável, do ponto de vista econômico nas condições de operação atual.

Referente à planta de geração termoelétrica há de se convir que a mesma não obteve um bom êxito com relação à potência gerada (56,50 W). No entanto esse resultado de geração apresentado pela usina, até o momento, ainda não é conclusivo a respeito do que se pode gerar, ajustes mecânicos, no sistema de transferência de calor, em andamento, apontam para

uma melhoria substancial na potência a ser gerada pelo conjunto de 42 TEG. Dentre esses ajustes, a colocação da pressão mecânica adequada nos TEG apresentará resultados expressivos.

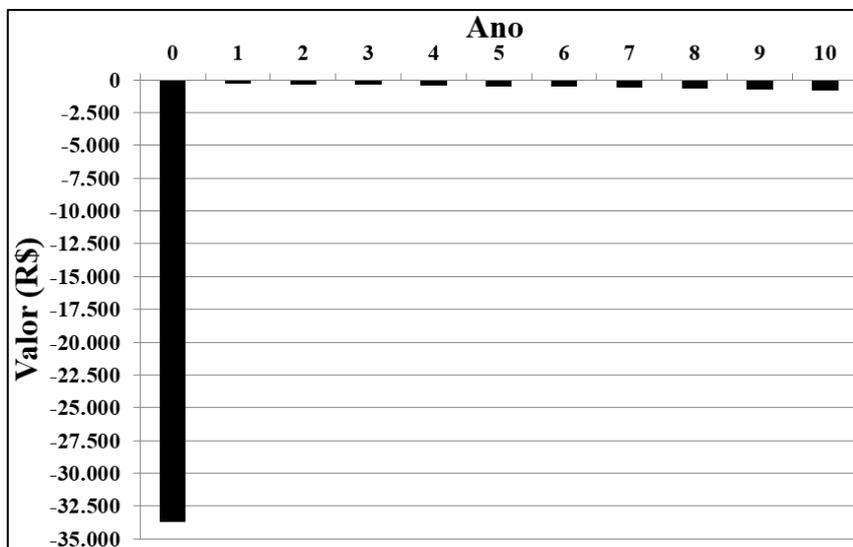


Figura 67 – Gráfico do fluxo de caixa simplificado.

A Tabela 14 apresenta os indicadores econômicos de desempenho obtidos através do fluxo de caixa simplificado.

Tabela 14 – Resultados dos métodos de análise

Método de Análise	Resultado
VPL	- R\$ 36.598,07
TIR	Não existe para o projeto
PAYBACK	Não ocorre ao longo da vida útil

Utilizando os dados do fluxo de caixa apresentado (Tabela 13) e as demais premissas iniciais, o VPL do projeto indica um valor negativo de R\$ 36.598,07.

Nesta análise não é possível calcular a TIR, visto que não houve inversão de valores (positivos e negativos) durante o decorrer da vida útil do projeto, critério indispensável para obtenção da citada taxa.

Também não existe PAYBACK para o projeto, situação que indica que o capital investido não é recuperado durante a vida útil.

Os resultados dos critérios da análise econômica confirmam a inviabilidade do projeto para as condições pré-estabelecidas.

5.3.1 Análise de sensibilidade

Na análise de sensibilidade considera-se a simulação de cenários de incerteza, onde são modificados alguns parâmetros do fluxo de caixa, com o intuito de verificar como essas alterações irão influenciar nos indicadores econômicos.

Na primeira análise considerou-se que todos os parâmetros definidos inicialmente permanecem fixos ao longo da vida útil do projeto. No entanto, parâmetros como o investimento inicial e a taxa anual de reajuste da tarifa de energia estão sujeitos à variação devido a diversos fatores externos como conjuntura econômica, políticas de incentivo, políticas energéticas, subsídios, política fiscal, etc. (RODRIGUES, 2015).

Outros parâmetros a serem averiguados pela análise de sensibilidade são referentes à quantidade de energia gerada pela planta termoeletrica e à eficiência do TEG.

Desse modo, os parâmetros citados são alterados individualmente, um por vez, mantendo os demais constantes. Para cada situação é verificado o comportamento do VPL, visto que a TIR e o PAYBACK não foram obtidos nessas condições.

5.3.1.1 Variação do valor do investimento

Como pode ser observado, para o porte deste projeto, o investimento inicial é vultoso, sendo viável e necessário seu ajuste. Por se tratar de um protótipo, certamente quando de sua replicação os custos serão diminuídos.

Desse modo, por se tratar de um item importante do projeto, é realizado um estudo dos indicadores econômicos citados anteriormente para variações do valor do investimento inicial, de 10% a 100% do valor original.

A Figura 68 mostra o comportamento do VLP para a variação do investimento inicial.

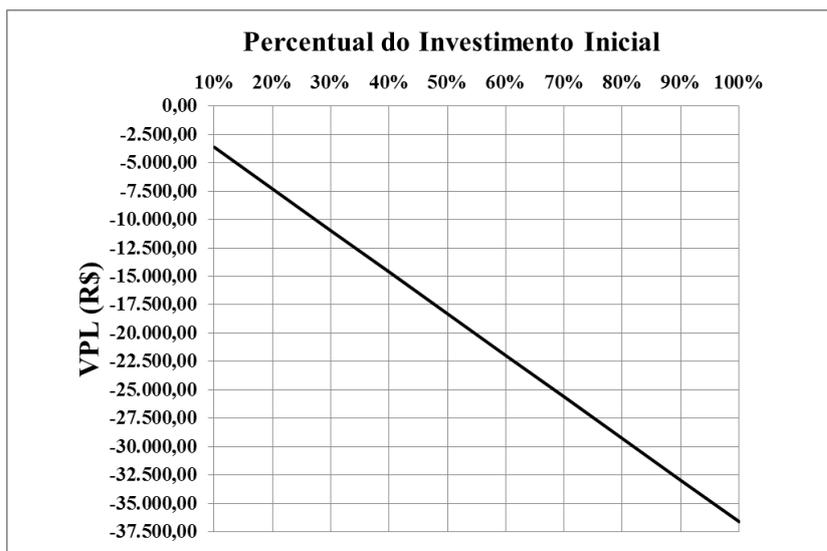


Figura 68 – VPL com a variação do investimento inicial

Como era esperado, ao reduzir o valor do investimento, o VPL do projeto é melhorado, no entanto, mesmo com apenas 10% do investimento inicial tem-se ainda um VPL negativo de aproximadamente R\$ 3.500,00.

Com a alteração do valor de investimento inicial, por consequência também houve a variação do valor absoluto dos custos de O&M, visto que esse é proporcional ao citado investimento. Porém, manteve-se o percentual de 1%.

Retomando a apreciação dos resultados, constata-se que apenas a variação do valor do investimento inicial, mesmo a 10%, não é capaz de promover um resultado financeiramente satisfatório para o projeto. No entanto, para que este tipo de geração se torne viável no futuro, certamente a redução do investimento será necessária.

5.3.1.2 Variação da taxa anual de reajuste da tarifa de energia

No projeto original foi definido um reajuste anual de 6%. No entanto diversos fatores podem influenciar neste índice que é definido pela ANEEL, dentre os quais se destacam: os custos operacionais, ampliação e expansão do sistema de energia elétrica, fatores climáticos e a alteração na política nacional de reajuste.

Considerando que este índice também é tido como um percentual incerto, ou seja, pode sofrer reajuste ou decréscimos ao longo do tempo, é realizada uma variação desse índice a fim de constatar o comportamento dos indicadores econômicos para o projeto.

A Figura 69 ilustra o comportamento do VPL para a variação da taxa anual de reajuste da tarifa de energia de 0% a 15%.

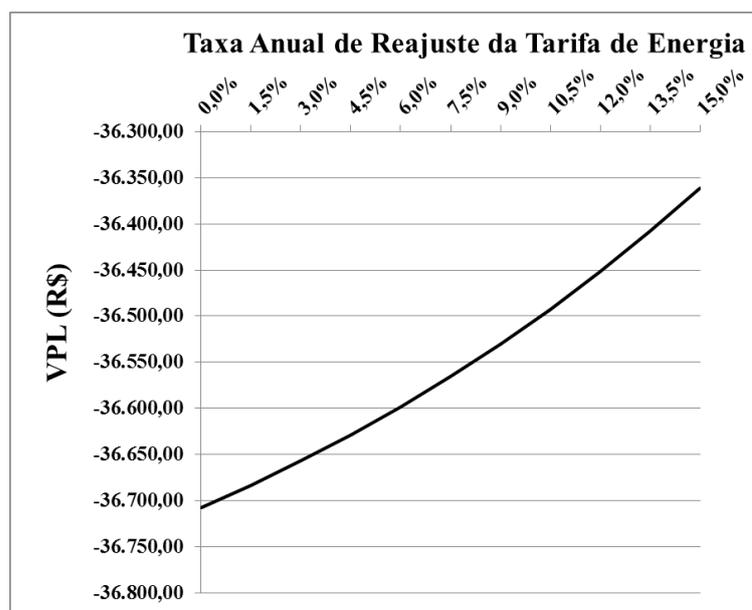


Figura 69 - VPL com a variação da taxa anual de reajuste da tarifa de energia.

Como era esperado, o acréscimo na taxa de reajuste tarifário o projeto tende a apresentar uma leve melhoria nos resultados. No entanto, devido à baixa quantidade de energia elétrica produzida pela planta termoeletrica, mesmo com a elevação do índice para valores improváveis, como 15%, não é obtido um VPL positivo.

Devido a pouca energia gerada, tem-se pequena alteração no resultado do VPL, entre a menor e maior taxa, sendo um valor negativo de aproximadamente R\$ 36.700,00 para 0% de reajuste e um valor negativo de aproximadamente R\$ 36.350,00 para 15% de reajuste.

Caso a geração de energia elétrica fosse maior, certamente a variação na taxa de reajuste anual provocaria maiores alterações no resultado do VPL.

5.3.1.3 Variação na quantidade de energia gerada pela planta termoelétrica.

Esse seguramente é o um dos principais fatores para a obtenção do fluxo de caixa tão inexpressivo, apenas com valores negativos durante toda a vida útil. Para a planta termoelétrica utilizada (TEG com eficiência de 6,875%), a variação da quantidade de energia elétrica produzida é de suma importância para melhorar os resultados de análise.

Por se tratar de um sistema até certo ponto inovador, diversos fatores dificultam a obtenção inicial de melhores resultados. No entanto, com o decorrer de seu desenvolvimento e aplicando melhorias na própria planta já testada, novos e promissores resultados surgirão.

Foi proposta uma variação da quantidade de energia gerada de 0 W a 911,4 W. Valor referente à máxima geração de potência para 42 (quarenta e dois) TEG, quando submetidos à $T_h = 350\text{ °C}$ e à $T_c = 30\text{ °C}$ (TERMONAMIC, 2014).

A Figura 70 apresenta o comportamento do VPL para a variação na quantidade de energia elétrica gerada pela planta termoelétrica.

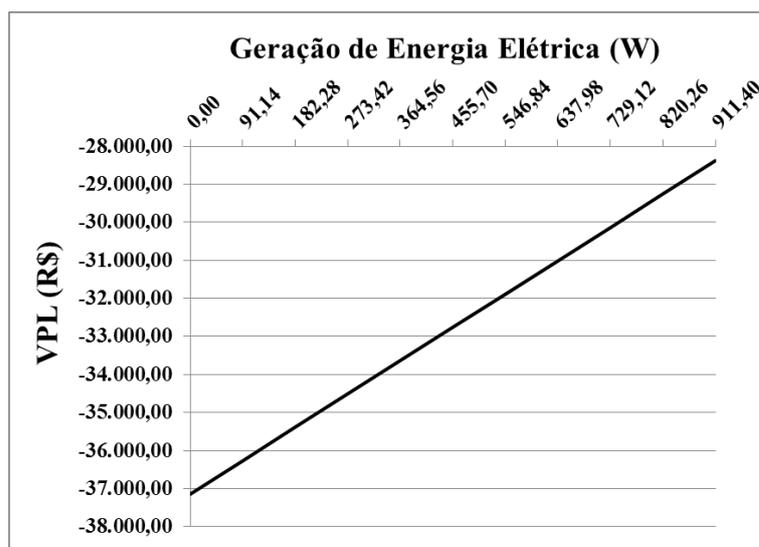


Figura 70 - VPL com a variação da quantidade de energia gerada pela planta termoelétrica.

Com o aumento na quantidade de energia gerada houve considerável melhora no resultado do VLP, chegando a um valor negativo de aproximadamente R\$ 28.500,00. A princípio um valor ainda longe do esperado para um projeto viável, no entanto, a melhora é significativa se comparada com o resultado do VPL do projeto original.

Apenas o acréscimo na energia gerada ainda não suficiente para se ter um projeto economicamente viável do ponto de vista de VPL, visto que todos os valores ainda permanecem negativos.

5.3.1.4 Variação na eficiência do TEG

A eficiência do TEG utilizado é de 6,875% conforme Tabela 2. No entanto, recentes avanços científicos possibilitaram a obtenção de materiais TE com eficiência de conversão de mais de 15% (HENDRICKS e CHOATE, 2006; FARIAS, 2009).

A produção de TEG com maior eficiência certamente ocorrerá nos anos futuros. Desse modo, foi proposta uma análise de sensibilidade com a variação de 5% a 25% na eficiência do TEG utilizado na planta termoeétrica.

A Figura 71 ilustra o comportamento do VPL com a variação da eficiência do TEG.

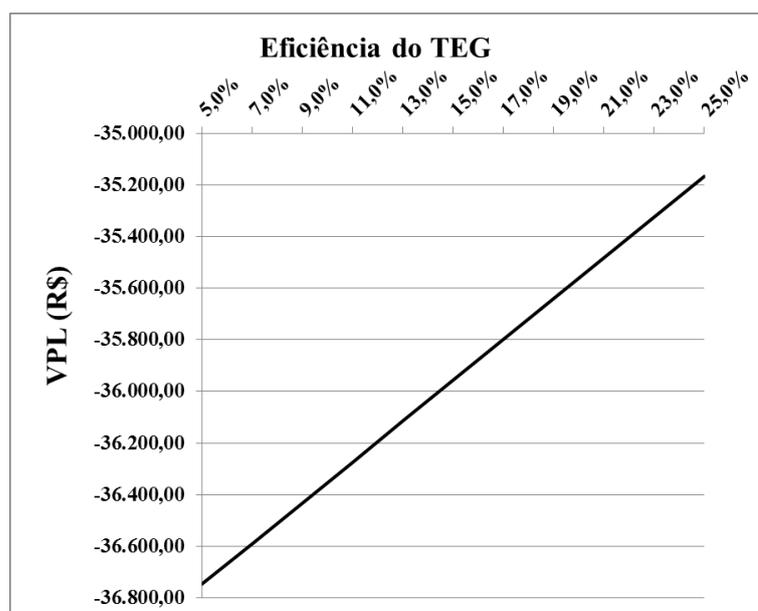


Figura 71 - VPL com a variação da eficiência do TEG

Uma maior eficiência do TEG apresenta melhores resultados ao VPL do projeto. Tendo um valor negativo de aproximadamente R\$ 35.200,00 para uma eficiência de 25%.

Os resultados não foram melhores devido à baixa potência gerada pela planta termoeétrica. Caso houvesse uma geração maior, o resultado do VPL seria mais expressivo.

Se a planta gerasse a energia elétrica máxima informada no catálogo dos TEG, certamente a influência do rendimento dos termogeradores teria um impacto considerável na avaliação econômica do projeto.

A Figura 72 apresenta os valores da potência gerada pela planta termoeletrica com a variação da eficiência do TEG, tomando como referência o valor máximo de geração informado no catálogo do fabricante.

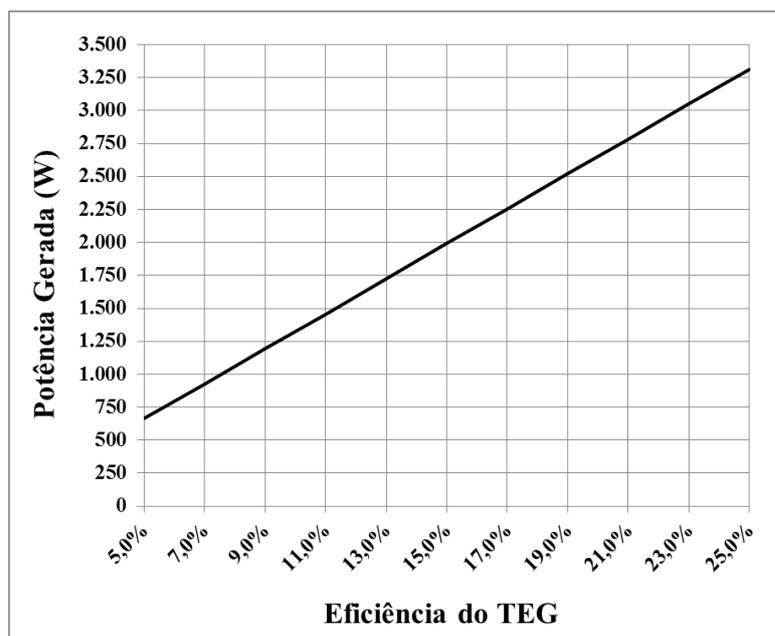


Figura 72 – Potência gerada pela planta termoeletrica com a variação da eficiência do TEG

O resultado confirma que a eficiência do TEG é de suma importância para melhorar a geração de energia elétrica. O TEG utilizado tem uma eficiência aproximada de 6,875%, tendo uma geração máxima de 911,4 W. Se a eficiência fosse de 11% tem-se uma geração aproximada de 1,5 kW.

Caso esse TEG alcance uma eficiência de 25%, a planta geraria uma potência de aproximadamente 3,3 kW, mais do que o triplo da geração atual.

5.3.2 Cenário otimista

Como foi apresentado anteriormente, realizando variações individuais nos valores do investimento inicial, da taxa anual de reajuste da tarifa de energia, da quantidade de energia

gerada pela planta termoeétrica e na eficiência do TEG, não foi possível obter um projeto viável economicamente do ponto de vista dos indicadores econômicos: VPL, TIR e PAYBACK.

As variações de alguns desses parâmetros trouxeram melhorias significativas aos resultados, porém sem apresentar viabilidade econômica.

Como transcrito, as variações foram realizadas individualmente, mantendo os demais parâmetros estáveis, como projeto original. Porém, considerando que esses parâmetros sofrem variações simultâneas é realizado um estudo com a variação conjunta dos mesmos, simulando um cenário otimista que possa vir a ocorrer nos anos futuros.

A Tabela 15 apresenta os parâmetros utilizados para calcular os indicadores econômicos desse cenário.

Tabela 15 – Parâmetros do cenário otimista

Descrição	Valor
Investimento inicial	R\$ 16.839,38
TMA	6%
Taxa anual de reajuste da tarifa de energia	7%
Energia gerada	80% da potência máxima
Eficiência do TEG	15%

Para o investimento inicial foi utilizado um valor correspondente a 50% do investimento realizado no projeto inicial, trata-se de valores estimados para um cenário possível de ocorrer. Para subsidiar a decisão verifica-se que o sistema de automação utilizado no projeto original é muito superior às necessidades da planta de geração termoeétrica, a qual solicita do sistema apenas a leitura de temperatura e o controle das válvulas. Esse sistema, considerado caro para este projeto, pode ser substituído por outro bem mais simples, utilizando pequenos controladores, cujo valor é irrisório quando comparado com o atual.

Ademais, pressupõe-se que a utilização de termogeradores será acrescida nos anos posteriores e que incentivos governamentais para fabricação possam ocorrer, ocasionando na redução dos valores unitários dos TEG. Semelhante ao ocorrido com as placas fotovoltaicas, que tiveram uma redução significativa de valor quando o seu uso foi intensificado e a escala produtiva aumentada.

A TMA definida é de 6%, considerando que financiamentos públicos poderão surgir para subsidiar esse tipo de geração de energia elétrica, como já ocorre nos dias atuais para

sistemas fotovoltaicos. Esse é um índice utilizado por diversos autores quando da realização de análise de viabilidade econômica de projetos fotovoltaicos (RODRIGUES, 2015).

A taxa anual de reajuste da tarifa de energia foi estimada em 7% ao ano, valor condizente com os estimados por Ruther et al. (2008).

A eficiência do TEG foi estimada em 15%, motivado pelos estudos apresentados recentemente. Essa melhoria é obtida com a utilização de matéria-prima de melhor qualidade na fabricação dos termogeradores. Para a obtenção dos valores máximos de geração do TEG, com a eficiência estimada, tomou-se como base o catálogo do TEG utilizado na planta termoelétrica (HENDRICKS e CHOATE, 2006; FARIAS, 2009; TERMONAMIC, 2014).

Para a quantidade de energia gerada pela planta termoelétrica, utilizou-se o valor corresponde a 80% da máxima potência gerada pelos 42 (quarenta e dois) TEG. Essa melhoria pode ser obtida com a realização de ajustes mecânicos e melhorias necessárias na planta termoelétrica atual.

A Tabela 16 apresenta o fluxo de caixa simplificado para o cenário otimista e a Figura 73 o gráfico desse fluxo.

Tabela 16 - Fluxo de caixa simplificado para o cenário otimista

	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
ENTRADAS DE CAIXA											
(+) Economia de energia		2.087,92	2.234,07	2.390,45	2.557,79	2.736,83	2.928,41	3.133,40	3.352,74	3.587,43	3.838,55
SAÍDAS DE CAIXA											
(-) Implantação do Sistema	16.839,38										
(-) Custos com O&M		168,39	186,04	205,54	227,08	250,88	277,17	306,22	338,31	373,76	412,93
(-) Custos com água		59,54	65,78	72,67	80,29	88,70	98,00	108,27	119,61	132,15	146,00
FLUXO DE CAIXA	-16.839,38	1.859,98	1.982,25	2.112,25	2.250,42	2.397,25	2.553,25	2.718,92	2.894,82	3.081,52	3.279,62

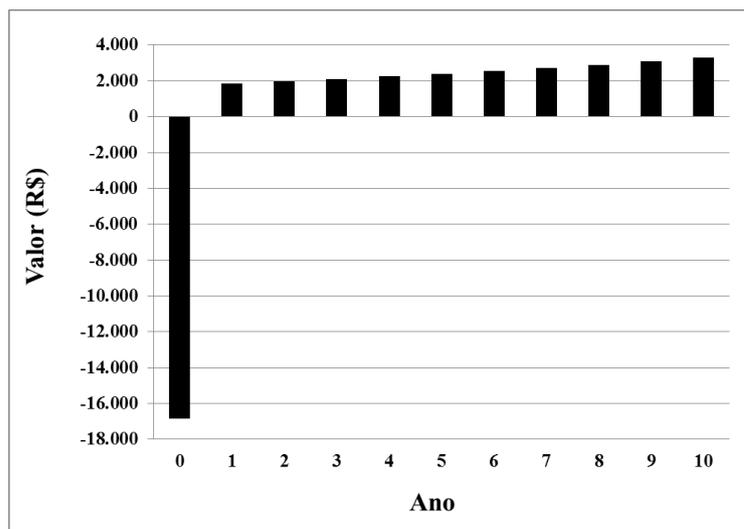


Figura 73 – Gráfico do fluxo de caixa simplificado para o cenário otimista

A Tabela 17 apresenta os resultados dos métodos de análise para o cenário otimista, tendo como base o projeto original e aplicando os novos parâmetros da Tabela 15.

Tabela 17 – Resultados dos métodos de análise para o cenário otimista

Método de Análise	Resultado
VPL	R\$ 1.106,60
TIR	7%
PAYBACK	7,33 anos

Nesta nova avaliação tem-se um VLP de R\$ 1.106,60. Esse valor demonstra que, nas condições impostas o projeto passa a ser viável, ou seja, o investidor terá no mínimo o retorno da TMA. Esse resultado abre um horizonte de avanços na geração termoelétrica, demonstrando que este tipo geração de energia poderá se tornar viável no futuro.

A TIR no valor de 7% é mais um indicador de que, nestas condições, o projeto é viável, visto que a mesma é superior à taxa mínima de atratividade, que é de 6%.

O período de retorno do investimento realizado – PAYBACK ocorre com 7,33 anos, aproximadamente 7 (sete) anos e 4 (quatro) meses. Isso demonstra que durante a vida útil do projeto (10 anos), o investidor terá o seu dinheiro recuperado. Esse indicador também aponta para a viabilidade do projeto.

Todos os parâmetros contribuíram para que o projeto apresentasse bons resultados, no entanto, o parâmetro que ocasionou as melhores contribuições foi a eficiência do TEG, sendo

um item essencial para tornar a utilização de plantas termoelétricas viáveis para essa aplicação.

Pelo exposto, fica demonstrado que, caso este cenário otimista (futuro) venha a se concretizar, com a redução do valor do investimento inicial, o financiamento/subsídio público para este tipo de geração de energia elétrica, a elevação da taxa anual de reajuste da tarifa de energia cobrada pela concessionária, com ajustes na planta de geração termoelétrica proposta, aliada a uma melhor eficiência do TEG, o projeto poderá se tornar viável aos investidores.

6. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Realizou-se a modelagem e a simulação da conversão termoelétrica de energia, utilizando-se apenas as equações que regem essa conversão. As curvas (VxI e VxP) foram comparadas com o catálogo do fabricante do TEG, apresentando resultados satisfatórios.

Em seguida foi desenvolvida a modelagem dos circuitos básicos do TEG, tendo como parâmetros de entrada T_c , T_h e coeficiente Seebeck, itens indispensáveis para detectar os valores gerados. Com essa modelagem foi realizada a simulação do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 da fabricante Termonamic, nas seguintes condições: circuito aberto e alimentando carga de 20Ω e de $0,97 \Omega$. Os valores encontrados foram confrontados com os do catálogo do fabricante, sendo considerados satisfatórios.

O sistema de controle da geração desenvolvido é composto, basicamente, por um conversor cc-cc boost (elevador de tensão) e controle com algoritmo de P&O. Tanto o conversor quanto o algoritmo desenvolvidos foram condizentes com as necessidades do projeto e apresentaram os resultados esperados.

O arranjo elétrico da planta termoelétrica foi definido com 6 (seis) ramos em paralelos, tendo cada ramo 7 (sete) TEG em série. Tal configuração se mostrou viável por elevar a tensão da planta, além de manter uma segurança de funcionamento do sistema, visto que na falta de 1 (um) TEG apenas um ramo sai de operação e os demais mantém a alimentação da carga.

Com a definição do sistema de controle da geração e arranjo elétrico foi desenvolvida a modelagem dos circuitos básicos do TEG e MPPT. Nessa é possível informar T_c , T_h , coeficiente Seebeck e a quantidade de TEG interligados eletricamente em série e em paralelo, além de efetuar alterações no valor de carga a ser alimentada. Foram realizadas simulações utilizando a planta termoelétrica completa (42 TEG) e apenas um ramo dessa planta, ou seja, 7 (sete) TEG em série. Nas duas situações foram utilizadas cargas resistivas de 10Ω e 30Ω . Todos os resultados simulados apontaram uma concordância superior a 98% para o sistema de MPPT.

Para realizar os testes experimentais foi projetado e construído um sistema de MPPT, composto por um conversor cc-cc boost e toda a parte de controle necessária. No dimensio-

namento do referido conversor utilizou-se o equacionamento encontrado na teoria estudada. Quanto aos componentes empregaram-se dispositivos disponíveis comercialmente.

Com o protótipo foram realizados testes similares aos simulados, ou seja, com a planta termoelétrica completa (42 TEG) e com um ramo dessa planta (7 TEG). Nas duas situações foram utilizadas cargas resistivas de 10 Ω e 30 Ω . Os resultados com um ramo da planta termoelétrica obtiveram uma concordância mínima de 96,8% para o sistema de MPPT, para a planta completa a concordância foi de aproximadamente 95%.

Também foi observado o comportamento individual do conversor cc-cc boost, o qual teve um rendimento superior a 90%, valor condizente com a literatura estudada. A tensão e a corrente entregues à carga continham um *ripple* máximo 1,71%, atendendo aos parâmetros de projeto.

Os resultados da concordância obtida pelo sistema de MPPT e do conversor cc-cc boost puderam validar o protótipo dimensionamento, projetado e construído neste trabalho.

A análise de viabilidade econômica preliminar simplificada apresentou resultado de VLP negativo, não sendo possível obter valores de TIR e PAYBACK. O projeto foi considerado inviável do ponto de vista econômico, especialmente por apresentar uma baixa geração de energia elétrica. No entanto o resultado de geração apresentado pela usina, até o momento, ainda não é conclusivo a respeito do que se pode gerar. Ajustes mecânicos, no sistema de transferência de calor, em andamento, apontam para uma melhoria substancial na potência a ser gerada pelo conjunto de 42 TEG.

Para simular cenários de incerteza foi realizada uma análise de sensibilidade, onde os parâmetros de investimento inicial, taxa anual de reajuste da tarifa de energia, quantidade de energia gerada pela planta termoelétrica e eficiência do TEG foram modificadas, individualmente, para verificar o comportamento dos indicadores: VPL, TIR e PAYBACK. As variações de investimento inicial e quantidade de energia gerada melhoraram os resultados do projeto, no entanto, sem trazê-lo para a sua viabilidade econômica.

Foi realizada simulação considerando um cenário otimista, alterando simultaneamente todos os parâmetros, sendo considerado: investimento inicial de 50% do valor original, TMA de 6%, taxa de reajuste tarifário anual de 7%, eficiência do TEG de 15% e a geração de energia correspondente a 80% da máxima potência. Nessas condições, em anos futuros, o projeto

poderá se tornar viável aos investidores. Os índices econômicos apontaram para VPL de R\$ 1.106,60, TIR de 7% e PAYBACK de 7,33 anos.

6.1 PUBLICAÇÕES OBTIDAS

Artigos submetidos e aprovados na forma de apresentação oral na *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE 15th International Conference on*, com publicação na base de dados do IEEE:

- FARIA, M. A. A.; STECANELLA, P. A. J.; DOMINGUES, E. G.; GOMES, P. H. G.; CALIXTO, W. P.; ALVES, A. J. Modeling, simulation and control of a thermoelectric generator. In: **Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE 15th International Conference on**. IEEE, 2015. p. 1373-1378.
- STECANELLA, P. A. J.; FARIA, M. A. A.; DOMINGUES, E. G.; GOMES, P. H. G.; CALIXTO, W. P.; ALVES, A. J. Electricity generation using thermoelectric generator-TEG. In: **Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE 15th International Conference on**. IEEE, 2015. p. 2104-2108.
- GOMES, P. H. G.; CALIXTO, W. P.; FARIA, M. A. A.; STECANELLA, P. A. J.; ALVES, A. J.; DOMINGUES, E. G. Geometry optimization of exhaust ducts applied in thermoelectric cogeneration efficiency. In: **Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE 15th International Conference on**. IEEE, 2015. p. 1132-1136.

Artigo submetido e aprovado na forma de apresentação oral no *Congreso Internacional IEEE CHILECON 2015*:

- GOMES, P. H. G.; CALIXTO, W. P.; FARIA, M. A. A.; STECANELLA, P. A. J.; ALVES, A. J.; DOMINGUES, E. G. Waste heat recovery plant for exhaust ducts using thermoelectric generators. In: **Congreso Internacional IEEE CHILECON 2015**.

Artigo submetido e aprovado na forma de apresentação oral no *23rd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2015)*:

- GOMES, P. H. G.; CALIXTO, W. P.; FARIA, M. A. A.; STECANELLA, P. A. J.; ALVES, A. J.; DOMINGUES, E. G. Optimized exhaust duct applied in thermoelectric waste heat recovery system. In: **International Congress of Mechanical Engineering COBEM 2015**.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De forma a dar seguimento às pesquisas realizadas neste trabalho, ampliando o aprofundamento no tema, sugerem-se os seguintes trabalhos:

- a) Realizar estudo comparativo entre as principais técnicas de MPPT para aplicação em plantas termoelétricas, verificando as vantagens e as desvantagens;
- b) Utilizar outros conversores cc-cc para realizar o MPPT de plantas de geração termoelétrica;
- c) Realizar ajustes elétricos de interligação dos TEG que minimizem as perdas;
- d) Utilizar um micro inversor comercial de sistemas fotovoltaicos para interligar a energia gerada pelos termogeradores à rede de energia elétrica da concessionária;
- e) Desenvolver estudos específicos para realizar a conexão elétrica da planta de geração termoelétrica à rede de energia elétrica da concessionária;
- f) Projetar sistema de MPPT utilizando outros microprocessadores, especialmente os DSP;

REFERÊNCIAS

ALTOUNIAN, C. S. **Obras públicas: licitação, contratação, fiscalização e utilização**. 3. ed. Belo Horizonte: Fórum, 2012. 415 p.

ANICETO, J. M. A.; **Conversor DC-DC com Busca de Ponto de Potência Máxima (MPPT) para Painéis Solares**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Electrotécnica, Faculdades de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2010.

ASHRAF, M.; MOSOUMI, N. High efficiency boost converter with variable output voltage using a self-reference comparator. **International Journal of Electronics and Communications (AEÜ)** (2014), <<http://dx.doi.org/10.1016/j.aeue.2014.05.011>>.

BATSCHAUER, A. L.; NETO, A. C. C.; PETRY, C. A.; **Conversor Boost Operando em Condução Contínua Aplicado à Correção de Fator de Potência Empregando Controle da Corrente de Entrada por Valores Médios Instantâneos**. Instituto de Eletrônica de Potência, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2000.

BCB. Banco Central do Brasil. Consulta à Taxa Selic Diária. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/htms/selic/selicdia.asp>>. Acesso em: 07 jan. 2016.

BONIFÁCIO, P. J. S. **Seguidor Fotovoltaico: Uma Variação do P&O - Simulação e Prototipagem**. Dissertação (Mestrado). Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Departamento de Engenharia Electrotécnica. Lisboa, 2010.

BRASIL. Lei nº 8.666, de 21 de junho de 1993. Brasília, 1993.

BRITO, J. R. **Conversores cc-cc com Ampla Faixa de Conversão Aplicados em Iluminação de Estado Sólido**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Elétrica. Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Uberlândia, 2009.

FARIA, Messias A. A. et al. Modeling, simulation and control of a thermoelectric generator. In: **Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE 15th International Conference on**. IEEE, 2015. p. 1373-1378.

FARIAS, Sandro Ricardo Alves. **Protótipo de um microgerador termoelétrico de estado sólido: cogeração a gás**. 2009. Dissertação (Mestrado). UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE.

GARCIA, F. S.; **Conversores CC-CC elevadores de tensão, não isolados, com ganhos estáticos elevados**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de

Engenharia Elétrica e Computação. Departamento de Sistemas e Controle de Energia. Campinas, 2010.

GOMES, Pedro H. G. et al. Geometry optimization of exhaust ducts applied in thermoelectric cogeneration efficiency. In: **Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE 15th International Conference on**. IEEE, 2015. p. 1132-1136;

GOMES, Pedro H. G. et al. Waste heat recovery plant for exhaust ducts using thermoelectric generators. In: **Congresso Internacional IEEE CHILECON 2015**.

GOMES, Pedro H. G. et al. Optimized exhaust duct applied in thermoelectric waste heat recovery system. In: **International Congress of Mechanical Engineering COBEM 2015**.

GONCALVES, L. M.; et. al. Heat-pipe Assisted Thermoelectric Generators For Exhaust Gas Applications. **ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress & Exposition**. November, 12-18, 2010, Vancouver, British Columbia, Canada.

GONÇALVES, L. M. V.; **Microssistema Termoelectrico Baseado em Teluretos de Bismuto e Antimônio**. Tese Doutorado. Escola de Engenharia, Universidade do Minho. Lisboa, 2008.

HART, D. W. Eletrônica de Potência – Análises e Projetos de Circuitos. AMGH Editora Ltda. São Paulo, 2012.

HECKTHEUER, L. A.; **Análise de associação de módulos fotovoltaicos**. Tese (Doutorado). Ministério da Educação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Porto Alegre, 2001.

HENDRICKS, Terry; CHOATE, William T. **Engineering Scoping Study of Thermoelectric Generator Systems for Industrial Waste Heat Recovery**. US Department of Energy, 2006.

Hi-Z TECHNOLOGY INC. Thermoelectric Modules. Disponível em: <<http://www.hi-z.com/products.html>>. Acesso em: 25 nov. 2014.

IPCA. Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA). Portal Brasileiro de Dados Abertos. Disponível em: <<http://dados.gov.br/dataset/indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplo-ipca>>. Acesso em: 07 jan. 2016.

INTERNATIONAL RECTIFIER (IR). **Folha de dados do driver IR2110**. Disponível em: <<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2110.pdf>>. Acesso em: 21 jan. 2016.

INTERNATIONAL RECTIFIER (IR). **Folha de dados do MOSFET IRF540N**. Disponível em: <<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf540n.pdf>>. Acesso em: 21 jan. 2016.

JUNIOR, A. T. R.; **Efeitos Termoeletricos em Sistemas Nanoscópicos**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. Instituto de Física. São Paulo, 2013.

LI, M. Thermoelectric Generator Based DC- DC Conversion Network for Automotive Applications. **Master of Science Thesis Stockholm**, Sweden 2011. TRITA-ICT-EX-2011:58.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**. 8.ed. [Reimpr.]. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

MICROCHIP. **Catálogo do PIC18F2420/2520/4420/4520**. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39631E.pdf>>. Acesso em: 27 dez. 2015.

MOLINA, M.G.; JUANICÓ, L.E.; RINALDE, G.F.; TAGLIALAVORE, E.; GORTARI, S.; Design of improved controller for thermoelectric generator used in distributed generation. **International Journal of Hydrogen Energy** 35, p. 5968-5973, 2010.

NUNES, S. A. **Multimedidor Eletrônica para Medição e Monitoração de Grandezas Elétricas em Sistemas Elétricos Residenciais**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica. Departamento de Eletrônica e de Computação. Rio de Janeiro, 2009.

ON SEMICONDUCTOR. **Folha de dados do diodo MBR20100CT**. Disponível em: <http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MBR20100CT-D.PDF>. Acesso em: 21 jan. 2016.

PARK, J.; KIM, S.; Maximum Power Point Tracking Controller for Thermoelectric Generators with Peak Gain Control of Boost DC–DC Converters. **Journal of ELECTRONIC MATERIALS**, Vol. 41, No. 6, 2012. DOI: 10.1007/s11664-011-1884-6. 2012 TMS.

PARK, J.; LEE, H.; BOND, M. Uninterrupted thermoelectric energy harvesting using temperature-sensor-based maximum power point tracking system. **Energy Conversion and Management**, v. 86, p. 233-240, 2014.

PERLOTTI, E. et al. Proposta para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira: Estudo do grupo setorial de sistemas fotovoltaicos da ABINEE. 2012.

PETRY, C. A. **Componente Semicondutores II. Capítulo 3 - Semicondutores de potência: BJT, MOSFET e IGBT**. Eletrônica de Potência – Florianópolis, 2013.

RAGHAVENDRAN, P. S.; ASOKAN, R.; Teg Based Power System For Operation Of Health Monitoring Server In Industries. **International Journal of Engineering and Technology (IJET)**. ISSN : 0975-4024. Vol 5 No 6 Dec 2013-Jan 2014

RIBEIRO, R. V.; **Sistema Fotovoltaico Autônomo Baseado em Conversores CC-CC Boost**. Dissertação (Mestrado). Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

ROWE, D. M. (Ed). **CRC Handbook of Thermoelectrics**. USA: CRC Press, 1995

RUTHER, R. et al. Programa de telhados solares fotovoltaicos conectados à rede elétrica pública no Brasil. **XII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, v. 12, Fortaleza, 2008.

SEGUEL, J. I. L. **Projeto de um Sistema Fotovoltaico Autônomo de Suprimento de Energia Usando Técnica MPPT e Controle Digital**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.

SIMAS, M; PACCA, S. Energia Eólica, geração de emprego e desenvolvimento sustentável. **Estudos Avançados** 27 (77), 2013.

STECANELLA, Priscilla A. J. et al. Electricity generation using thermoelectric generator-TEG. In: **Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE 15th International Conference on**. IEEE, 2015. p. 2104-2108.

THERMONAMIC. **Specification of Thermoelectric Module TELBP1-12656-0.45**. Disponível em: <<http://www.thermonamic.com/TELBP1-12656-0.45-English.pdf>>. Acesso em: 21 fev. 2014

USP. **Transferência de Potência em Circuitos de Corrente Contínua**. Instituto de Física de São Carlos. Disponível em: <<http://www.ifsc.usp.br/~strontium/Teaching/Material2010-2%20FFI0106%20LabFisicaIII/06-MaximaTransferenciadePotencia.pdf>>. Acesso em 06 de fevereiro de 2015.

ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO DO MÓDULO TERMOELÉTRICO MODELO TELBP1-12656-0.45

Thermonamic Module

High Performance and Highly Reliable Solution for Cooling and Heating Applications

Specification of Thermoelectric Module

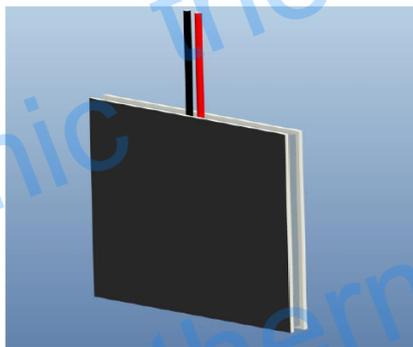
TELBP1-12656-0.45

Description

The power module is designed and manufactured by our unique technology for converting heat source directly into electricity. The module is constructed with the mixture of Lead Tin Tellurium and Bismuth Tellurium to tap the both advantage of two types materials for heat source of 200-360 °C. It can run in the temperature of as high as 360 °C (680 °F) heat source continuously and up to 400 °C (752 °F) intermittently. The thermoelectric module will generate DC electricity as long as there is a temperature difference across the module. The more power will be generated when the temperature difference across the module becomes larger, and the efficiency of converting heat energy into electricity will increase therefore. The module is stuck with the high thermal conductivity graphite sheet on its both sides ceramic plates to provide low contact thermal resistance, hence you do not need to apply thermal grease or other heat transfer compound when you install the module. The graphite sheet can work well in extremely high temperature.

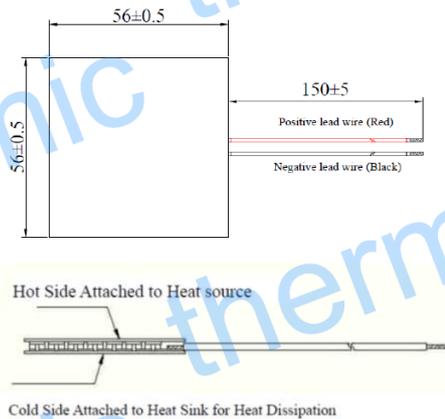
Patent NO.: ZL 2010 1 0193517.9

Specification of the Module

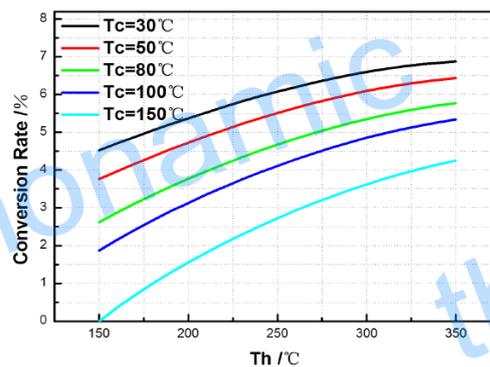


Hot Side Temperature / Th (°C)	350
Cold Side Temperature / Tc (°C)	30
Open Circuit Voltage (V)	9.2
Matched Load Resistance (ohms)	0.97
Matched load output voltage (V)	4.6
Matched load output current (A)	4.7
Matched load output power (W)	21.7
Heat flow across the module(W)	≈ 247
Heat flow density(W cm ⁻²)	≈ 7.9
AC Resistance (ohms) Measured under 27 °C at 1000 Hz	0.42 ~ 0.52

Geometric Characteristics Dimensions in millimeter



Conversion Rate of the modules Vs Th under various Tc

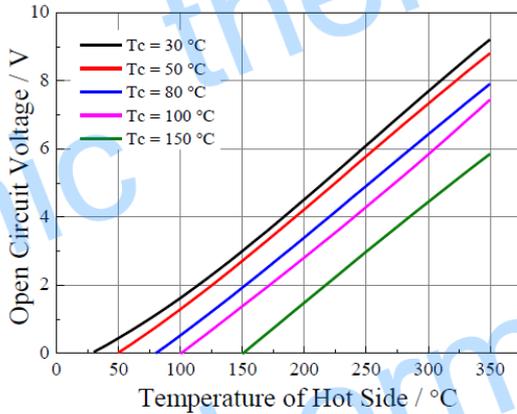


Noted: Conversion rate = Matched load output power/Heat flow through the module

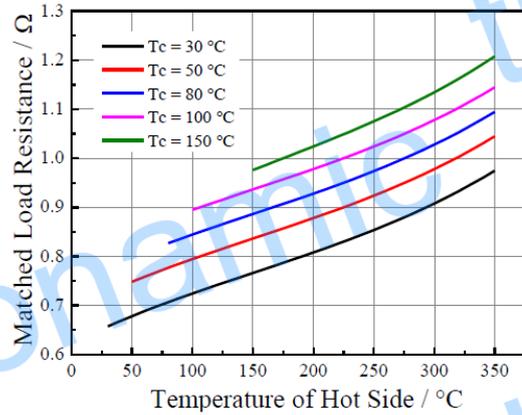
Creative technology with fine manufacturing processes provides you the reliable and quality products
 Tel: +86-791-88198288 Fax: +86-791-88198308 Email: info@thermonamic.com Web Site: www.thermonamic.com

Performance Curves of the Module

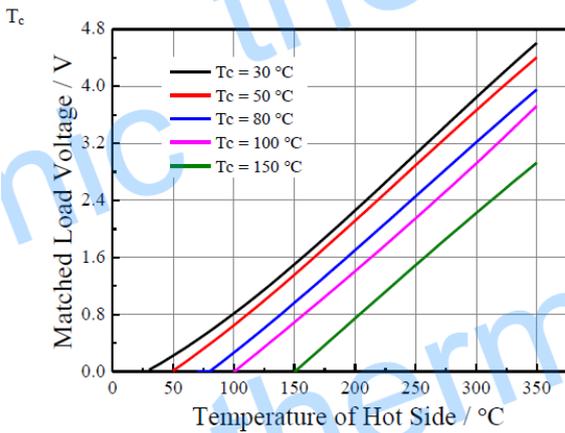
TELBP1-12656-0.45



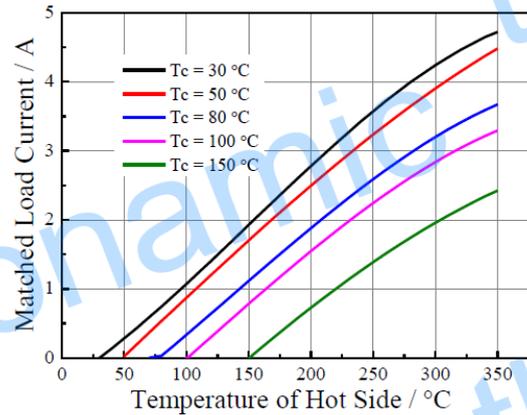
The chart for open circuit voltage Vs T_h under various T_c



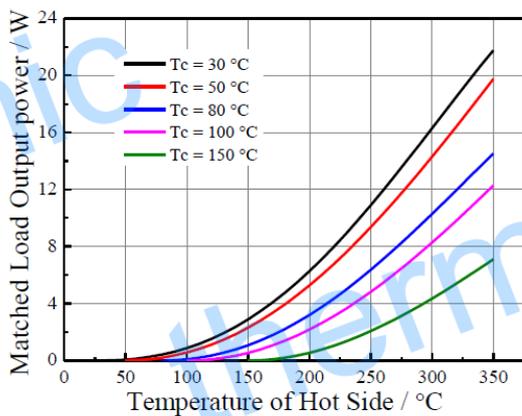
The chart for matched load resistance Vs T_h under various T_c



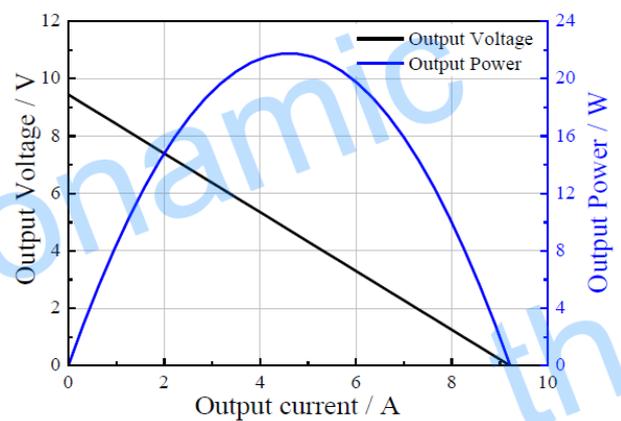
The chart for matched load voltage Vs T_h under various T_c



The chart for matched load current Vs T_h under various T_c



The chart for matched load output power Vs T_h under various T_c



The chart for output voltage and output power Vs output current under T_h=350 °C and T_c=30 °C

RESUMO DO CURRÍCULO LATTES

<http://lattes.cnpq.br/1852755459658037>

Mestrando em Tecnologia de Processos Sustentáveis pelo IFG Campus Goiânia, graduado em Engenharia Elétrica pelas Faculdades Objetivo (2009), pós-graduado em nível de especialização em MBA Executivo em Gestão de Projetos (2012), pela AVM Faculdade Integrada e MBA Executivo Empresarial em Gestão Pública e Responsabilidade Fiscal (2014), pela Escola Superior Aberta do Brasil, ESAB e curso técnico em Eletrotécnica (2003), pela Escola Estadual de Furnas – MG. Atualmente é servidor do Tribunal de Contas dos Municípios do Estado de GO e pesquisador no Projeto de Pesquisa Processo CNPQ nº 8485, com o título: Produção de aparato tecnológico e de software para estudos de recuperação de perdas de energia em motor-gerador termoelétrico. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, sendo a área de atuação em: Projeto e execução de rede aérea e subterrânea de distribuição de energia elétrica urbana e rural; Projeto de entrada de energia elétrica em BT e MT; Sistemas de auxílios de pouso e decolagem em aeroportos e; Projetos elétricos residenciais e comerciais.