



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

Priscilla Araújo Juá Stecanella

**ARRANJO TÉCNICO PARA DESENVOLVIMENTO DE UMA 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

Priscilla Araújo Juá Stecanella

**ARRANJO TÉCNICO PARA DESENVOLVIMENTO DE UMA 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

Orientador: Prof. Dr. Elder Geraldo Domingues

Coorientador: Prof. Dr. Aylton José Alves

Goiânia, 2016.

St317a Stecanella, Priscilla Araújo Juá.

Arranjo técnico para desenvolvimento de uma Planta de Geração Termoeétrica baseada no efeito Seebeck / Priscilla Araújo Juá Stecanella. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2016.

100 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Elder Geraldo Domingues.

Coorientador: Prof. Dr. Aylton José Alves.

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 apêndices e anexos.

1. Geração termoeétrica. 2. Termogeradores - conversão energética. 3. Cogeração. I. Domingues, Elder Geraldo (orientador). II. Alves, Aylton José (coorientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

CDD 661.31243

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

Priscilla Araújo Juá Stecanella

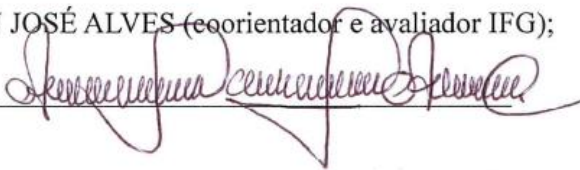
**“ARRANJO TÉCNICO PARA DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANTA
DE GERAÇÃO TERMOELÉTRICA BASEADA NO EFEITO SEEBECK”**

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.

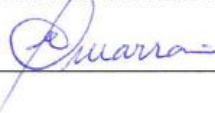
Prof(a). Dr.(a) ELDER GERALDO DOMINGUES (presidente e orientador IFG)

Assinatura  _____

Prof(a). Dr.(a) AYLTON JOSÉ ALVES (coorientador e avaliador IFG);

Assinatura  _____

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

Assinatura  _____

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

Assinatura  _____

Aprovado em: 05/02/2016

Ao meu esposo Luciano pelo incentivo,
orientação e paciência. Seus conselhos,
carinhos e orações foram cruciais
para a realização deste trabalho.
O apoio e o incentivo recebidos foram
os pilares resistentes que sustentaram
um período recheado de esperanças, mas
também de muitos obstáculos a vencer.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me abençoou e orientou imensamente ao longo desta caminhada. A Ti Senhor, toda honra e toda glória. Obrigada por Teu imenso amor e por Tua fidelidade.

Ao meu esposo Luciano, pela paciência e compreensão. Obrigada pelo companheirismo ao longo de todos os anos em que estamos juntos.

Aos meus pais, irmãs, cunhados, lindas e amáveis sobrinhas, avós e tios pelo amor, apoio e compreensão. Sei dos vários momentos em que estive ausente, mas vocês compreenderam e me incentivaram a continuar. Obrigada pela estrutura familiar, pela união, companheirismo e solidariedade.

Aos meus sogros, cunhados e cunhadas que mesmo à distância, sempre me apoiaram.

Aos irmãos da igreja pelas orações e palavras de sabedoria.

Ao orientador, professor Elder Geraldo Domingues, obrigada pela orientação, oportunidade e por sempre acreditar em mim. Já temos muitos anos de caminhada, desde o meu curso técnico. Que a nossa jornada juntos se estenda por muito tempo.

Ao coorientador Aylton José Alves e ao professor Wesley Pacheco Calixto, obrigada pelas orientações e por me conduzirem corretamente para que os resultados desta dissertação fossem alcançados. As suas disponibilidades foram de muita importância para vencer os inúmeros obstáculos inesperados.

Ao professor Enes Gonçalves Marra por aceitar o convite para ser membro da banca examinadora.

A todos os membros, professores e secretários, do mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, obrigada por me apresentarem os conhecimentos necessários para a condução e finalização desta pesquisa.

A todos os colegas do mesmo programa de mestrado, obrigada pelos momentos juntos. Em especial, agradeço aos colegas Jonatas Madaleno, Sueli Souza e Bruno Menita pelas grandes contribuições durante o tempo em que cursamos as disciplinas.

Agradeço imensamente aos companheiros de projeto de pesquisa, Messias Anain Almeida Faria e Pedro Henrique Garcia Gomes. Foram inúmeros os desafios, mas obrigada por sempre estarem dispostos a avançarmos.

Aos amigos Valgmar, Volme, Joel e Michel Anderson pelas infinitas ajudas e prestações.

A todos os professores, pesquisadores, estagiários, alunos de iniciação científica e colegas que integram o Núcleo de Estudos Experimentais e Tecnológicos do IFG – NEXT, por suas contribuições.

A todos os colegas do IF Goiano, campus Trindade, por me apoiarem sempre.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) e ao Instituto Federal de Goiás (IFG) pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa.

Título: Arranjo Técnico para Desenvolvimento de uma Planta de Geração Termoelétrica Baseada no Efeito Seebeck

Autor: Priscilla Araújo Juá Stecanella

Orientador: Prof. Dr. Elder Geraldo Domingues

Coorientador: Prof. Dr. Aylton José Alves

RESUMO

Grupos motogeradores a combustão interna geram grande quantidade de energia térmica residual proveniente dos gases de exaustão. Através de termogeradores (TEG), que são células fabricadas com materiais semicondutores, torna-se possível converter a energia térmica residual em energia elétrica através do efeito Seebeck. A eficiência das máquinas elétricas aumenta com a recuperação do calor perdido em dutos de escape utilizando-se os TEG. O sistema torna-se mais sustentável, pois com a mesma quantidade de entrada de combustível, gera-se mais energia elétrica ou, com menos combustível de entrada, tem-se a mesma quantidade de energia elétrica gerada e, conseqüentemente, menos poluição é emitida para a atmosférica. Nesse trabalho, uma Planta de Geração Termoelétrica com um arranjo de TEG foi montada no duto de escape de um gerador elétrico. A fonte de calor necessária para a conversão é oriunda dos gases de exaustão. Para a obtenção da fonte fria, foi construído um sistema de resfriamento com água de reuso, sendo a bomba elétrica e o sistema de automação os únicos a consumirem energia elétrica no sistema. Para melhor controle da vazão da água de resfriamento, termopares tipo K foram colocados em diferentes pontos e as temperaturas foram lidas por um Controlador Lógico Programável (CLP) próprio para ambiente industrial. O Sistema Supervisório é o responsável pela aquisição dos dados e geração dos relatórios. Um teste realizado no aparato quente (sem os TEG) comprovou que colocar uma mola para causar turbulência nos gases faz com que a temperatura na face do aparato aumente em 9 %. O teste realizado na Planta, considerando a face fria e a face quente igual a 50 °C e 330 °C, respectivamente, mostrou que a maior potência gerada por TEG foi de 4,6 W (26% do valor de catálogo) e que toda a planta gerou 60,48 W (12,6 % das condições do catálogo do fabricante do TEG). Para uma melhor geração termoelétrica, torna-se necessário equalizar a temperatura em toda a face quente e pressionar melhor o TEG entre as faces quente e fria.

Palavras-Chave: Termogerador. TEG. Sustentável. Conversão Energética. Seebeck. Efeito termoelétrico. Material termoelétrico. Cogeração.

Title: Technical arrangement for Development of a Thermal Power Generation Plant Based Seebeck Effect

Author: Priscilla Araújo Juá Stecanella

Adviser: Prof. Dr. Elder Geraldo Domingues

Co-Adviser: Prof. Dr. Aylton José Alves

ABSTRACT

Electrical Generators of Internal Combustion generate large amount of residual thermal energy from the exhaust gases. By using thermoelectric generators (TEG), which are cells manufactured using semiconductor materials, it is possible to convert the residual thermal energy in electricity from the Seebeck effect. The efficiency of electrical machines increases with the recovering of the lost heat in the exhaust ducts using TEG. The system becomes more sustainable due to the fact that with the same amount of fuel input more electrical energy is generated. On the other hand, with less input fuel, has the same amount the generated electrical energy, generating less air pollution. In this work, a Thermoelectric Generation Plant, with a TEG array, was set up on the exhaust duct of an electrical generator. The heat source, necessary to the conversion, comes from the exhaust gases. In order to obtain the cold source, it was set up a cooling system that uses the water of reuse, being an electric pump and the automation system the only ones that consume electricity in the system. For a better control of cooling water flow, type K thermocouples were placed at different points and the temperatures were read by a Programmable Logic Controller (PLC), suitable for industrial environments. A Supervisory System is responsible for data acquisition and generation of reports. A test performed in the hot apparatus (without the TEG) demonstrated that placing a spring to cause turbulence in the gases increases the temperature of the face in 9%. The test conducted in the plant, considering the cold side and the hot side equal to 50 °C and 330 °C, respectively, showed that the greater power per TEG was equal to 4.6 W (26% of the catalog value) and the whole plant generated 60.48 W (12.6% of TEG manufacturer's catalog conditions). For a better thermal generation, it becomes necessary equalize the temperature all over the hot side and to pressure better the TEG between the hot and cold sides.

Keywords: TEG. Sustainable. Energy conversion. Seebeck. Thermoelectric effect. Thermoelectric material. Co-generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Etapas do Projeto CNPq nº 8485 – Produção de aparato tecnológico e de <i>software</i> para estudos de recuperação de perdas de energia em motogerador termoelétrico.....	18
Figura 2.1 – Circuito básico termopar.....	20
Figura 2.2 – Deslocamento de elétrons de uma fonte quente para uma fonte fria	21
Figura 2.3 – Gerador termoelétrico de alto desempenho.....	23
Figura 2.4 – Modelo operacional de um TEG. Pares de semicondutores tipo P e N (ligados em série)	25
Figura 2.5 – Termogerador.....	25
Figura 2.6 – Circuito elétrico equivalente de termogeradores.....	27
Figura 2.7 – Curvas $P \times I$ e $V \times I$ do TEG	28
Figura 2.8 – Figura de mérito ZT dos materiais termoelétricos em função da temperatura e do ano de desenvolvimento	31
Figura 2.9 – Eficiência do TEG em função do ΔT	32
Figura 2.10 – Motogerador.....	34
Figura 2.11 – Distribuição média de produção e perda de energia de usina a motor a óleo diesel.....	35
Figura 2.12 – Geração e resíduos de calor de sistemas automotivos	40
Figura 2.13 – Termogeradores em escapamentos de automóveis	40
Figura 2.14 – Termogeradores em cozinha móvel	42
Figura 2.15 – Termogeradores na Sonda Voyager.....	43
Figura 2.16 – Janela de prédio com módulos termoelétricos	44
Figura 2.17 – Coletor solar e módulo termoelétrico.....	45
Figura 2.18 – Protótipo do microgerador termoelétrico	46
Figura 3.1 – (a) TEG TELBP1-12656-0.45; (b) Pares termoelétricos P e N	49
Figura 3.2 – Gerador elétrico utilizado.....	50
Figura 3.3 – Aparato quente proposto	53
Figura 3.4 – Gradiente de temperatura para uma simulação de temperatura a 1000 °C.....	53
Figura 3.5 – Dimensões do aparato quente	54
Figura 3.6 – Caixa de resfriamento	54
Figura 3.7 – Tanques pulmão	55
Figura 3.8 – Projeto da Planta de Geração Termoelétrica.....	56
Figura 3.9 – Superfície de contato do TEG se mal pressionado.....	57
Figura 3.10 – Simulação do perfil de velocidade no interior da tubulação dos gases de exaustão. (a) Fluxo linear do fluido (gás) sem mola; (b) Interferência no fluxo do fluido (gás) com mola.	58
Figura 3.11 – Fluxograma da Planta de Geração Termoelétrica	61
Figura 3.12 – Fluxograma da água de reuso.....	62
Figura 3.13 – Circuito equivalente do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 sem carga	63
Figura 3.14 – Circuito equivalente do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 com carga.....	64
Figura 4.1 – Esquema de montagem do teste de bancada de um TEG.....	65
Figura 4.2 – Teste de bancada de um TEG, com bico de Bunsen e gás GLP	66
Figura 4.3 – Imagem térmica do teste de bancada	66
Figura 4.4 – Curva de desempenho do TEG do teste em bancada com $T_h=297$ °C e $T_c=30$ °C	68
Figura 4.5 – Aparato quente montado na tubulação dos gases de exaustão.....	69

Figura 4.6 – (a) Imagem térmica do aparato quente sem TEG e sem mola; (b) Aparato quente sem os TEG	70
Figura 4.7 – (a) Imagem térmica do aparato quente sem TEG e com mola; (b) Aparato quente sem os TEG	70
Figura 4.8 – Painel elétrico com o CLP	72
Figura 4.9 – Sistema Supervisório – Tela de monitoração das variáveis do processo	73
Figura 4.10 – Sistema Supervisório – Tela de relatórios.....	73
Figura 4.11 – Numeração dos TEG no aparato quente.....	74
Figura 4.12 – Montagem dos TEG na caixa de resfriamento	74
Figura 4.13 – Condições da Planta de Geração Termoelétrica – 1° Teste.....	75
Figura 4.14 – Condições da Planta de Geração Termoelétrica – 2° Teste.....	76
Figura 4.15 – Imagem térmica da Planta de Geração Termoelétrica	81
Figura 4.16 – Circuito equivalente do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 sem carga, $T_h=350$ °C e $T_c=30$ °C.....	82
Figura 4.17 – Circuito equivalente do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 com carga, $T_h=350$ °C e $T_c=30$ °C.....	83
Figura 4.18 – Circuito equivalente do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 sem carga, $T_h=350$ °C e $T_c=50$ °C.....	83
Figura 4.19 – Circuito equivalente do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 com carga, $T_h=350$ °C e $T_c=50$ °C.....	84
Figura 4.20 – Curvas de desempenho do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 com $T_c=30$ °. (a) Curva Tensão x T_h ; (b) Curva Resistência interna x T_h ; (c) Curva Corrente x T_h ; (d) Curva Potência x T_h	84
Figura 4.21 – Curva de desempenho do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 com $T_h=350$ °C e $T_c=30$ °C.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tipos de Termopares e suas principais características	39
Tabela 3.1 – Materiais utilizados no aparato	47
Tabela 3.2 – Parâmetros do TEG TELBP1-12656-0.45.....	49
Tabela 3.3 – Dados gerador elétrico	50
Tabela 4.1 – Dados de tensão, corrente e potência gerada pelo TEG no teste de bancada	67
Tabela 4.2 – Dados de temperatura do aparato quente sem TEG e comparação sem mola e com mola	71
Tabela 4.3 – Dados da Planta de Geração Termoelétrica – 1º teste	75
Tabela 4.4 – Dados da Planta de Geração Termoelétrica – 2º teste	77
Tabela 4.5 – Características elétricas por face da Planta de Geração Termoelétrica	78
Tabela 4.6 – Características elétricas da Planta de Geração Termoelétrica	79
Tabela 4.7 – Dados de geração do fabricante do TEG para cada posição da Planta de Geração Termoelétrica.....	79
Tabela 4.8 – Características elétricas da Planta de Geração Termoelétrica com base nos dados do catálogo do fabricante do TEG.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CC	Corrente Contínua
CI	Circuitos Integrados
CLP	Controlador Lógico Programável
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
C_p	Calor específico
FEM	Força eletromotriz
FV	Válvula de vazão
GLP	Gás liquefeito de petróleo
HV	Válvula manual
I	Corrente elétrica do TEG
IEC	International Electrotechnical Commission
I_{TEG}	Corrente gerada pelo TEG
I_{cc}	Corrente de curto circuito
I_{mpp}	Corrente na máxima potência
JZ	Elemento de controle de Potência
MPP	<i>Maximum Power Point</i> (Ponto de Máxima Potência)
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência)
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
Q	Calor
R_{ext}	Resistência de carga
R_{int}	Resistência interna do TEG
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
T	Temperatura
TT	Transmissor de temperatura
TY	Transdutor de temperatura

T_c	<i>Cold side</i> (lado frio)
TE	Termoelétrico
TEG	Termogerador
T_h	<i>Hot side</i> (lado quente)
UC	Controlador de multivariáveis
V_{mpp}	Tensão na máxima potência
V_s	Tensão interna
V_0	Tensão de circuito aberto
V_{TEG}	Tensão gerada pelo TEG
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	Quilo volt-ampère
kW	Quilo watts
l	litro
l/h	litro por hora
m	metro
m ²	metros quadrados
RPM	Rotações por minuto
s	segundo
S	Siemens
ΔT	Diferença de temperatura
Δt	Diferença de tempo
V	Volt
W	Watts
α	Coefficiente de Seebeck do material
λ	Condutividade térmica
σ	Condutividade elétrica
Φ	Fluxo de calor
\emptyset	Diâmetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVO GERAL	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	EFEITOS TERMOELÉTRICOS	20
2.2	MATERIAIS TERMOELÉTRICOS	23
2.3	TERMOGERADORES	24
2.4	FIGURA DE MÉRITO	29
2.5	MOTOGERADOR	32
2.5.1	Motor a óleo diesel	34
2.6	CONTROLE E AUTOMAÇÃO	35
2.7	ESTADO DA ARTE	37
2.7.1	Termopares	38
2.7.2	Indústria automobilística	39
2.7.3	Uso doméstico	42
2.7.4	Indústria Aeroespacial	43
2.7.5	Instalações Prediais	44
2.7.6	Estudos recentes	45
2.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
3	METODOLOGIA	47
3.1	MATERIAIS	47
3.1.1	Termogerador TELBP1-12656-0.45	48
3.1.2	Gerador elétrico	50
3.1.3	Aparato quente	51
3.1.4	Sistema de resfriamento	54
3.2	PLANTA DE GERAÇÃO TERMOELÉTRICA	55
3.2.1	Sistema de controle e supervisão dos dados	58
3.2.2	Sistema completo da Planta de Geração Termoelétrica	60
3.3	CÁLCULO DA VAZÃO DO FLUIDO PARA REFRIGERAÇÃO	62
3.4	SIMULAÇÃO DOS PARÂMETROS DO TERMOGERADOR	63
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4.1	TESTE DE BANCADA DO FUNCIONAMENTO DO TEG	65
4.2	TESTE DO APARATO QUENTE	68
4.3	TESTE DA PLANTA DE GERAÇÃO TERMOELÉTRICA	71
4.4	RESULTADOS DO CÁLCULO DE VAZÃO DO FLUIDO PARA REFRIGERAÇÃO	81
4.5	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DOS PARÂMETROS DO TERMOGERADOR	82
4.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
5	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
5.1	SUGESTÕES DE MELHORIAS E TRABALHOS FUTUROS	88
6	PUBLICAÇÕES OBTIDAS	90
	REFERÊNCIAS	91
	APÊNDICE A – ESQUEMA ELÉTRICO DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA	94

APÊNDICE B – RELATÓRIO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO.....	96
ANEXO A – CÓDIGO DE CORES DOS TERMOPARES CONFORME NORMAS....	97
ANEXO B – ESPECIFICAÇÃO DO MÓDULO TERMOELÉTRICO MODELO	
TELBP1-12656-0.45	98
RESUMO DO CURRÍCULO LATTES	100

1 INTRODUÇÃO

O panorama atual sobre geração de energia elétrica no Brasil e no mundo tem passado, nos últimos tempos, por uma transformação, onde novas formas de geração de energia têm sido desenvolvidas. A energia tem se tornado de grande importância para o desenvolvimento econômico-social de um local e, por isso, existe a necessidade de estudo de novas formas de geração de energia elétrica.

Em 02 de novembro de 2014 foi divulgado um relatório geral de síntese mundial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, da sigla em inglês - *Intergovernmental Panel on Climate Change*), produzido por mais de 800 cientistas, onde os especialistas dizem que as emissões dos gases do efeito estufa devem cair entre 40 a 70 % entre 2010 e 2050 e cair a zero até o ano de 2100. Eles afirmam que o uso de energias renováveis e o aumento da eficiência energética teria um custo bem menor do que enfrentar as consequências do aquecimento global (IISD REPORTING SERVICES, 2014).

Sendo assim, os estudos na área de geração de energia cada vez mais convergem para a utilização de fontes renováveis ou seu reaproveitamento através de conversões energéticas. Uma das formas de reaproveitamento para obtenção de energia elétrica é através da conversão de energia térmica utilizando termogeradores (TEG), que são células fabricadas com materiais semicondutores que empregam o efeito Seebeck.

Estas células geralmente são compostas por vários pares de materiais semicondutores dos tipos “P” e “N”, conectados termicamente em paralelo e eletricamente em série. Um lado do arranjo recebe o calor residual de um determinado processo, sendo caracterizado, portanto, por alta temperatura, enquanto outro lado do arranjo possui baixa temperatura. Esta diferença de temperatura permite o princípio de funcionamento da geração elétrica (TEIXEIRA, 2009).

Grande quantidade da energia dos combustíveis utilizados em geradores elétricos que utilizam motores a combustão é desperdiçada na forma de calor (23 %), apenas uma parte é realmente transformada em trabalho (40 %). Assim, esta energia térmica residual proveniente da combustão dos gases pode ser convertida em energia elétrica aproveitável utilizando TEG. Estas descargas são resultados da falta de eficiência de processos. (FARIAS, 2009; MAMEDE FILHO, 2011).

Geradores elétricos que utilizam motores a combustão são largamente utilizados em estabelecimentos que precisam reduzir o uso de energia da rede concessionária no horário de ponta. Segundo a Eletrobrás (2011) os estabelecimentos que pertencem ao grupo A na classificação dos consumidores de energia elétrica pagam bem mais caro pelo uso de energia

elétrica no horário de ponta do que fora dele, o que aumenta em muito o gasto total com energia elétrica em um estabelecimento.

Embora se saiba que o rendimento dos TEG disponíveis hoje no mercado ainda é limitado (muitos com rendimento menor que 5 %), só pelo fato de se recuperar uma energia que é desperdiçada, isto por si só já é um benefício para qualquer projeto, pois contribuem para sua eficiência e para o desenvolvimento sustentável. Além disso, TEG são confiáveis, ausentes de partes móveis, simples e robustos em relação aos dispositivos com conversões mecânicas e seu funcionamento silencioso superam seu alto custo e sua baixa eficiência de produção de energia elétrica.

Assim, a relevância deste trabalho, que consiste na cogeração de energia elétrica, está na utilização de uma energia que é descartada ao meio ambiente, mesmo que estes resíduos e descartes não deixem de existir, pois ao se aproveitar parte da energia residual, melhora-se o rendimento como um todo do processo.

O presente trabalho é parte integrante de um projeto de pesquisa aprovado na Chamada MEC/SETEC/CNPq Nº 94/2013, através do Processo CNPq nº 8485, com o título “Produção de aparato tecnológico e de software para estudos de recuperação de perdas de energia em motogerador termoeletrico”. O projeto contempla o estudo do aproveitamento da energia térmica dissipada nos gases de exaustão de um motogerador a diesel para a geração de energia elétrica através de termogeradores (TEG), de forma a aumentar a eficiência do processo e torná-lo mais sustentável. É proposto projetar e testar, através de simulações computacionais as estruturas de interface e troca de calor entre a fonte térmica e os TEG, e dos TEG com a parte fria, que ofereçam os melhores rendimentos térmicos e distribuição uniforme de temperatura no trocador de calor, e construir e testar um protótipo de conversor termoeletrico de potência esperada de 1 kW, nas condições de operação no ponto de máxima potência. Em síntese, as suas etapas são apresentadas na Figura 1.1.

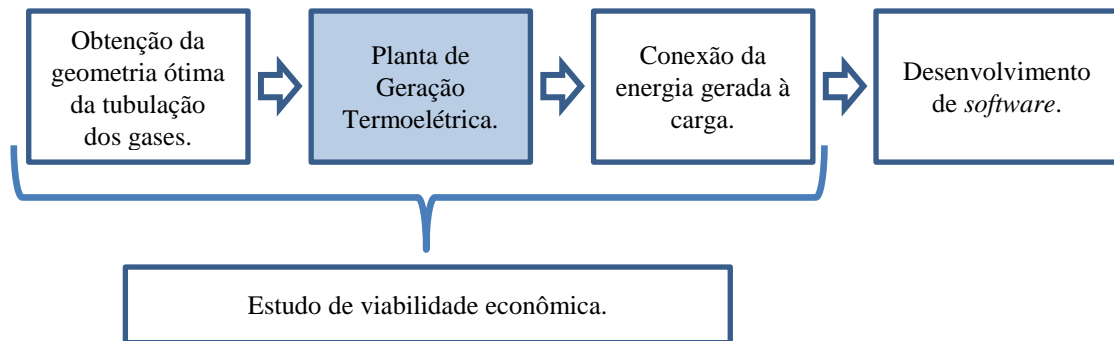
A primeira etapa, “Obtenção da geometria ótima da tubulação dos gases”, compreende os estudos para construir um aparato quente que ofereça a melhor retenção térmica dos gases e também a equalização da temperatura superficial, onde são instalados os TEG.

A segunda etapa, “Planta de geração termoeletrica”, 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 terceira 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 quarta etapa, “Estudo de viabilidade econômica”, compreende o estudo de viabilidade econômica da planta de geração termoelétrica.

A quinta etapa, “Desenvolvimento de Software”, compreende a elaboração do *software* de simulação da capacidade de recuperação de energia a partir de resíduos térmicos. A Figura 1.1 ilustra o desenvolvimento do projeto e apresenta que este trabalho contribui para o projeto de pesquisa na etapa “Planta de geração termoelétrica”.



Legenda: Etapa a ser desenvolvida neste trabalho.

Figura 1.1 – Etapas do Projeto CNPq nº 8485 – Produção de aparato tecnológico e de *software* para estudos de recuperação de perdas de energia em motogerador termoelétrico.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho é propor a modelagem e os arranjos técnicos para implementar e avaliar a eficiência da geração, a supervisão e o controle de uma planta de cogeração que utiliza termogeradores para converter a energia térmica residual dos gases de exaustão de um conjunto motogerador a óleo diesel em energia elétrica.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

As metas elencadas para o alcance desses objetivos são:

- Modelar matematicamente os parâmetros do TEG em relação às suas características termoelétricas;

- Projetar e montar uma planta de geração termoelétrica para obtenção de dados experimentais (curvas $V \times I$ e $V \times P$), incluindo a parte mecânica, o circuito hidráulico e elétrico;
- Determinar matematicamente a vazão do fluido de arrefecimento;
- Desenvolver o sistema de controle e supervisão dos processos hidráulicos, térmicos e elétricos da planta;
- Realizar testes de desempenho que procurem reproduzir as condições simuladas para otimização da produção de energia.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo desta dissertação apresenta de um modo geral, os termogeradores (TEG) e o seu rendimento e apresenta também o desperdício de calor da queima dos combustíveis utilizados em geradores elétricos. Além disso, apresenta o projeto de pesquisa no qual este trabalho está inserido, bem como os objetivos geral e específicos desta dissertação.

O capítulo 2 mostra o conceito dos efeitos termoelétricos e sua aplicação, o conceito dos materiais termoelétricos, dos termogeradores (TEG), dos motogeradores e dos equipamentos utilizados para controle e automação. É apresentado também o estado da arte com as principais contribuições da utilização da termoeletricidade na conversão de energia.

O capítulo 3 mostra os principais materiais utilizados no desenvolvimento da Planta de Geração Termoelétrica e suas características. Mostra também o projeto de todas as partes que compõem a planta a saber: aparato quente, sistema de resfriamento e sistema de controle e supervisão dos dados e a planta completa. Por fim é apresentado o cálculo da vazão do fluido para refrigeração e é feita uma simulação dos parâmetros do termogerador.

O capítulo 4 mostra o procedimento e os resultados obtidos com os testes realizados para a validação do funcionamento de um TEG e de toda a planta.

O capítulo 5 apresenta as conclusões sobre o desenvolvimento da Planta de Geração Termoelétrica, quais as publicações obtidas desta dissertação e de todo o projeto de pesquisa e quais as principais sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências utilizadas no desenvolvimento desta dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para melhor compreensão da geração termoelétrica é necessário um estudo sobre os efeitos que a compõem, dos materiais utilizados para essa conversão, como os módulos são construídos e como obter a máxima eficiência. Para a automação de processos, se faz necessário também um estudo sobre sensores de temperatura, controladores e sistemas supervisórios utilizados para monitoração.

Assim, este capítulo apresenta uma análise teórica sobre: efeitos e materiais termoelétricos, sendo o efeito Seebeck o de maior destaque; termogeradores, que são os módulos responsáveis pela geração termoelétrica, e suas fórmulas de conversão; eficiência dos materiais termoelétricos, expressa através de sua figura de mérito. É apresentado, também, um estudo dos principais contribuições da utilização da termoeletricidade na conversão de energia.

2.1 EFEITOS TERMOELÉTRICOS

Efeito termoelétrico é a conversão da energia térmica (pela diferença de temperatura) em energia elétrica ou vice-versa. Nesta teoria, são identificados três efeitos: o efeito Seebeck, efeito Peltier e o efeito Thomson.

Em 1823, Thomas Johann Seebeck relatou os resultados de uma experiência em que descobriu o fenômeno da termoeletricidade. Ele notou que em um circuito fechado, formado por dois condutores de materiais diferentes, há a circulação de corrente quando as duas pontas (junções) deste circuito forem submetidas a diferentes temperaturas. Conforme a Figura 2.1, esse fenômeno pode ser entendido com o circuito básico de um termopar (ROWE, 1995).

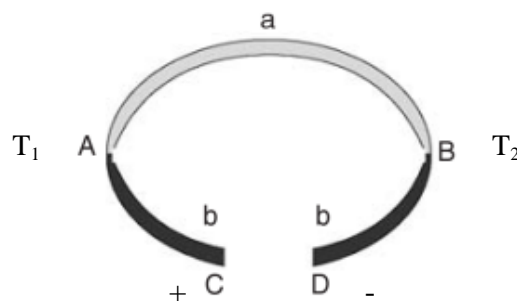


Figura 2.1 – Circuito básico termopar
Fonte: Adaptado de Rowe, 2005.

Considere, na Figura 2.1, que a e b são dois materiais condutores diferentes, conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo formando um circuito.

Mantendo as junções A e B a diferentes temperaturas (T_1 e T_2 , respectivamente) e considerando $T_1 > T_2$, uma força eletromotriz (FEM) aparecerá nos pontos C e D, pois os elétrons de um metal tendem a migrar de um terminal para outro. Desta maneira, se formam dois terminais: um positivo e outro negativo, o que é suficiente para se formar uma FEM (ROWE, 2005).

A Figura 2.2 mostra que o aparecimento de uma FEM é devido ao deslocamento dos elétrons da camada de valência de um material condutor com temperatura mais alta, para uma zona de temperatura mais baixa.

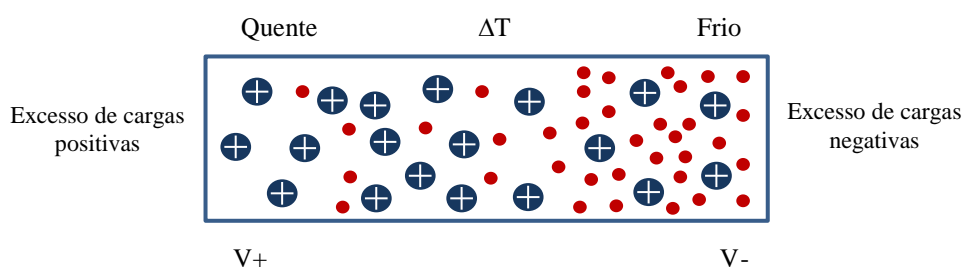


Figura 2.2 – Deslocamento de elétrons de uma fonte quente para uma fonte fria
Fonte: Adaptado de Fernandes, 2012.

Quando um material condutor ou semicondutor recebe uma alta temperatura em um de seus lados, um fluxo de calor é transmitido aos elétrons do nível de valência, que se despreendem de suas órbitas, tornando-se livres. Esses elétrons livres se deslocam para a zona de temperatura mais baixa do material, ficando com um excesso de cargas negativas e deixando a zona temperatura mais alta com excesso de cargas positivas. O deslocamento de elétrons é cessado quando se atinge um equilíbrio, ou seja, quando a tensão V é superior à energia que os elétrons possuem para se movimentar (FERNANDES, 2012).

Quanto maior a diferença de temperatura entre as juntas fria e quente, maior será a FEM gerada. Esse efeito é conhecido como efeito Seebeck e a tensão produzida (V) é proporcional à diferença de temperatura entre as duas junções. A tensão V é calculada em (1) e é proporcional, também, ao coeficiente de Seebeck dos materiais condutores e do número de pares P e N. Os coeficientes de Seebeck são considerados não-lineares e dependem do material utilizado na construção do condutor ou semicondutor, da temperatura absoluta e da estrutura molecular. Para pequenas diferenças de temperatura, esta relação é considerada linear. Um material é considerado um bom termoelétrico quando tem um coeficiente de Seebeck entre 100 mVK^{-1} e 300 mVK^{-1} , sendo, assim, necessários muitos pares termoelétricos ligados em série para que se consiga alguns volts de tensão (ROWE, 2005; YU ZHOU, PAUL e BHUNIA, 2008; SANTOS, 2010).

$$V_0 = N. (\alpha_p - \alpha_n) . \Delta T \quad (1)$$

Onde:

V_0 = tensão de circuito aberto (Vcc)

N = número de pares P e N

α_p e α_n = coeficientes de Seebeck dos materiais condutores (μVK^{-1})

ΔT = diferença de temperatura (K)

Assim, a tensão em (1) pode ser reescrita de forma simplificada, para o módulo como um todo, conforme (2), onde α é o coeficiente de Seebeck geral do módulo.

$$V_0 = \alpha . \Delta T \quad (2)$$

O efeito Peltier é o contrário do efeito Seebeck, pois produz uma diferença de temperatura quando submetido a um diferencial de tensão elétrica. Considerando novamente a Figura 2.1, se nos terminais C e D for aplicado uma tensão V , uma corrente flui no circuito e uma variação de temperatura aparece nas junções dos materiais a e b. Ocorre a liberação de calor em uma das junções enquanto que na outra o calor é absorvido (ROWE, 2005; TEIXEIRA, 2009).

O efeito Thomson é a capacidade de um material condutor homogêneo produzir calor (aquecimento ou arrefecimento) quando, ao mesmo tempo, uma corrente elétrica passa por ele e o mesmo está submetido a um gradiente de temperatura. Este efeito foi previsto em 1815 por W. Thomson quando estabelecia uma relação entre os coeficientes de Seebeck e Peltier e, mais tarde, foi obtido experimentalmente. Por ser um efeito tão pequeno, geralmente é desconsiderado nas análises (ROWE, 1995).

O efeito Thomson é quantificado pelo coeficiente de Thomson e foi denominado como o “calor específico de energia elétrica”. Esse efeito não gera uma tensão V como no efeito Peltier. Esse efeito nada mais é que a manifestação da direção do fluxo de cargas elétricas dentro de um condutor submetido a um gradiente de temperatura. Se as cargas fluírem na mesma direção do gradiente térmico, elas liberam calor e, assim, diminuem sua energia potencial. Se elas fluírem no sentido oposto, absorvem energia e aumentam sua energia potencial (ROWE, 1995).

2.2 MATERIAIS TERMOELÉTRICOS

A condutividade elétrica é um dos parâmetros considerados para a classificação dos materiais. Quanto à condutividade, os materiais podem ser classificados em: condutores, quando possuem alta condutividade elétrica (os metais são os melhores condutores); em isolantes, quando a condutividade elétrica é muito baixa ou zero; e os materiais semicondutores, que possuem uma condutividade intermediária entre os dois. Um material semicondutor pode conduzir eletricidade apenas se houver alguns elétrons em sua banda de condução ou lacunas na camada de valência. Fenômenos termoelétricos podem ser percebidos em quase todos os materiais condutores (ROWE, 2005).

Assim, materiais termoelétricos (TE) são materiais semicondutores que podem gerar energia elétrica de corrente contínua quando submetidos a uma diferença de temperatura (BENSAID et al., 2012).

Conforme a Figura 2.3 apresenta, para a construção de módulos com materiais TE devem-se montar adequadamente, formando um conjunto, elementos do tipo P e do tipo N, ambos conectados no lado quente e frio do módulo.

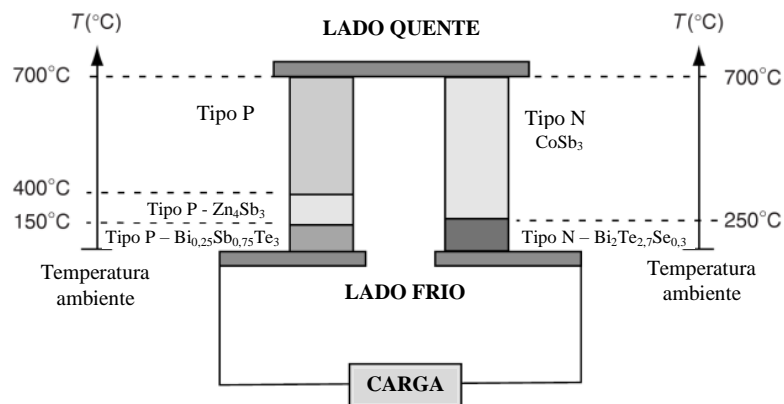


Figura 2.3 – Gerador termoelétrico de alto desempenho
Fonte: Adaptado de Rowe, 2005.

Os materiais TE são divididos em três categorias, conforme sua temperatura de operação. Telureto de Bismuto (Bi_2Te_3) e suas ligas são os materiais TE que possuem maiores valores da figura de mérito (expressão que mostra o desempenho do material) e a temperatura máxima de funcionamento é em torno de 450 K (aproximadamente 177 °C) e, portanto, são bastante utilizados na preparação de dispositivos montados próximos às temperaturas ambientes. Ligas de Telureto de Chumbo (PbTe) tem os valores da figura de mérito maiores que as ligas de Silício Germânio (SiGe). Como PbTe possui a temperatura máxima de funcionamento em torno de 1000 K (aproximadamente 823 °C) e SiGe em torno de 1300 K

(aproximadamente 1027 °C), essas ligas são bastante utilizadas na construção de termoogeradores no lado que entrarão em contato com altas temperaturas (ROWE, 1995; Ji et al., 2007).

Atualmente, para a geração termoelétrica, são utilizados materiais semicondutores, como o Telureto de Bismuto (Bi_2Te_3), que são bons materiais condutores de eletricidade, maus condutores de calor e possuem grandes coeficientes de Seebeck. Estes semicondutores são fortemente dopados para ter um excesso de elétrons (tipo N) ou uma deficiência de elétrons (tipo P) (YU ZHOU, PAUL e BHUNIA, 2008).

Segundo Farias (2009) e Ji et al. (2007) as vantagens provenientes da utilização de materiais TE para a geração de energia através do aproveitamento do calor residual de processos são: alta confiabilidade, pequeno porte, baixa geração de ruído, sem emissão de gases tóxicos, longa vida útil e flexibilidade de utilização com diferentes fontes de calor. Esta forma alternativa de geração possui aplicações a partir de diversos processos, como: indústrias que geram calor, gases de escape dos motores de automóveis, gases de escape de geradores elétricos, sistemas de transporte de óleo e gás, aeronaves e sistemas remotos diversos. Nestes casos mencionados, pode haver um aumento considerável da eficiência global do sistema.

Conforme Nascimento, Lubanco e Moreira (2012), pesquisadores do Laboratório Ames (Estados Unidos) descobriram que se adicionarem apenas 1 % de um elemento que pertencem ao grupo de terras raras (cério ou itérbio) os materiais termoelétricos chegam a uma melhoria de 25 % no rendimento. Os estudos realizados ainda não indicam qual o motivo do melhoramento, mas os cientistas supõem que essa quantidade aplicada do elemento é suficiente para alterar a estrutura cristalina da liga, melhorando, assim, o efeito Seebeck. Os materiais TE que atualmente são mais estudados são chamados de TAGS, que se refere a uma sigla dos símbolos químicos dos elementos da liga: telúrio, antimônio, germânio e prata.

2.3 TERMOGERADORES

Conversores termoelétricos são construídos de materiais semicondutores tipo P e tipo N, chamados de par termoelétrico. Cada par termoelétrico possui dois terminais, sendo um dopado para ser do tipo P e outro para ser do tipo N. Se vários pares termoelétricos forem conectados eletricamente em série (através de uma tira de cobre) e termicamente em paralelo (colocados entre dois pratos cerâmicos) de forma que fiquem eletricamente isolados e termicamente conduzindo, formam assim, um módulo. Conforme a Figura 2.4 apresenta, se o módulo for submetido a uma fonte de calor, uma potência elétrica será gerada e o módulo

funcionará como um termogerador (TEG). De forma inversa, se o módulo for sujeito a uma corrente elétrica, o calor será absorvido por um dos lados do módulo, e rejeitado pelo outro, funcionando como uma máquina frigorífica (GOULD e SHAMMAS, 2009; TEIXEIRA, 2009).

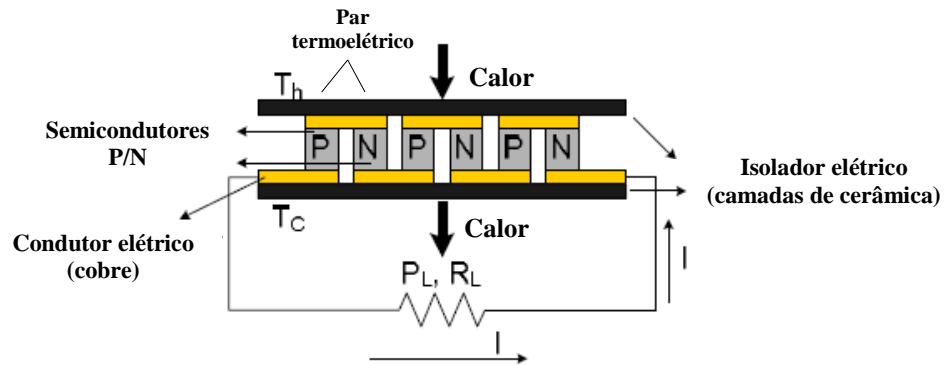


Figura 2.4 – Modelo operacional de um TEG. Pares de semicondutores tipo P e N (ligados em série)
Fonte: Adaptado de Yu Zhou, Paul e Bhunia, 2008.

A Figura 2.5 apresenta o termogerador. Um dos lados do TEG recebe o calor rejeitado de um determinado processo, sendo caracterizado, portanto, como o lado quente T_h (alta temperatura), enquanto o outro lado possui baixa temperatura (lado frio T_c). Esta diferença de temperatura permite o princípio de funcionamento da geração elétrica (TEIXEIRA, 2009).

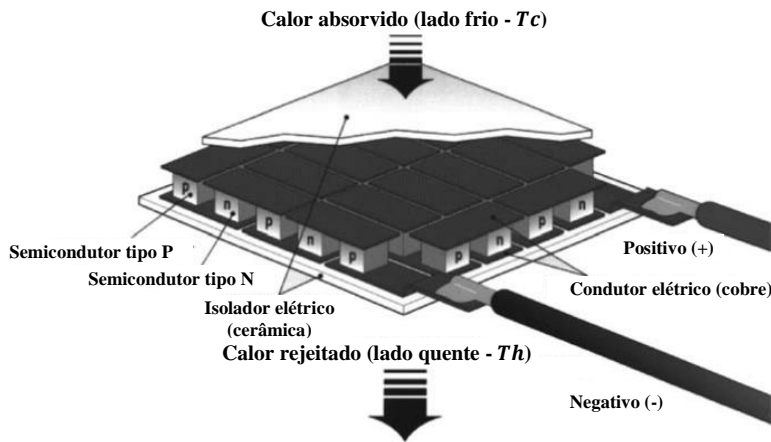


Figura 2.5 – Termogerador
Fonte: Adaptado de Rowe, 2005.

Para a construção de TEG são utilizados materiais termoelétricos (TE) que são semicondutores sólidos, responsáveis por produzirem a corrente elétrica quando unidos e submetidos a uma diferença de temperatura na junção. Esta geração de energia utilizando materiais termoelétricos é conhecida como efeito Seebeck (TEIXEIRA, 2009).

Rowe (1995) e Bensaid et al. (2012) dizem que os termogeradores devem ser utilizados onde a sua confiabilidade, ausência de partes móveis, simplicidade e robustez em relação aos dispositivos com conversões mecânicas e seu funcionamento silencioso superam seu alto custo e sua baixa eficiência de produção de energia elétrica.

O uso do efeito Seebeck para geração de energia é útil apenas para equipamentos que requerem pouca potência, pois sua principal desvantagem é a geração de baixa potência (apenas alguns Watts) mesmo associando milhares de células termelétricas. Mas, esses módulos são uma fonte de energia renovável, pois não dependem de combustíveis fósseis e geram energia apenas quando submetidos à diferença de temperatura (mesmo com uma diferença de poucos graus Celsius), o que torna este tipo de geração bastante atrativa. Por isso, esta tecnologia para geração de energia elétrica vem ganhando cada vez mais aplicações, principalmente onde se requerem alta confiabilidade, baixo custo de manutenção e o máximo aproveitamento da energia disponível (FARIAS, 2009).

Existem TEG convencionais com diversas especificações e dimensões, conforme a necessidade de aplicação. O fluxo de calor através do módulo geralmente é menor que ≈ 1000 W. A potência de saída pode variar de 0 a $\approx 26,3$ W, dependendo da faixa de temperatura do lado quente e do lado frio, que pode variar de 0 a ≈ 600 °C (de forma contínua) ou até 650 °C (forma intermitente) do lado quente e de 0 a ≈ 150 °C do lado frio. Todas essas faixas possuem estudos para aumento dos intervalos. Quanto maior o gradiente de temperatura entre o lado quente e o lado frio, maior a potência de saída do módulo. Os TEG podem operar continuamente por até 10 anos ou mais (ANDO JUNIOR et al., 2013; THERMONAMIC, 2014; Hi-Z TECHNOLOGY INC, 2014).

A Figura 2.6 apresenta o circuito elétrico equivalente dos termogeradores. A energia elétrica de corrente contínua gerada por um TEG pode ser utilizada para alimentar uma carga resistiva externa e o TEG pode ser modelado como uma fonte de tensão V_S e uma resistência interna R_{int} . Se nenhuma carga for conectada aos terminais do módulo, não haverá corrente elétrica circulando pelo circuito. Entretanto, considerando a Figura 2.6, em que uma carga elétrica (R_{ext}) é conectada ao circuito, é possível definir, conforme (3), a corrente elétrica que flui no circuito (PARK, LEE e BOND, 2014; SANTOS, 2010).

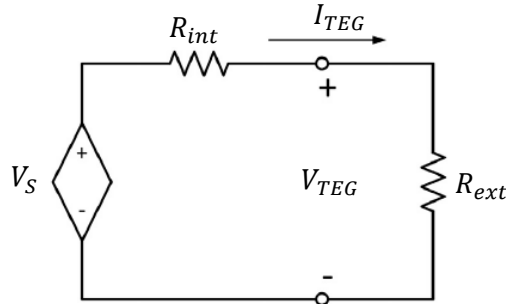


Figura 2.6 – Circuito elétrico equivalente de termogeradores
Fonte: Park, Lee e Bond, 2014.

$$I_{TEG} = \frac{V_{TEG}}{(R_{ext} + R_{int})} \quad (3)$$

Sendo assim, pode-se definir a tensão na carga conforme (4) e a potência gerada conforme (5). Assim, na Figura 2.6 considere a tensão gerada pelo TEG como a tensão da fonte ($V_{TEG} = V_S$).

$$V_{TEG} = I_{TEG} R_{ext} \quad (4)$$

$$P = V_{TEG} I_{TEG} \quad (5)$$

Substituindo-se (3) e (4) em (5), obtém-se (6), em que a potência gerada fica em função apenas da tensão gerada e das resistências. Em (6) tem-se que: R_{ext} é a resistência de carga, R_{int} é a resistência interna do módulo P/N e V_{TEG} a tensão gerada pelo TEG, ou seja, a tensão na carga (YU ZHOU, PAUL e BHUNIA, 2008; SANTOS, 2010).

$$P = \frac{V_{TEG}^2 R_{ext}}{(R_{ext} + R_{int})^2} \quad (6)$$

Substituindo-se (1) em (6), obtém-se a equação da potência gerada (dada em W) em função da diferença de temperatura e do coeficiente de Seebeck, conforme apresentado em (7).

$$P = \frac{(N \cdot \alpha \cdot \Delta T)^2 R_{ext}}{(R_{ext} + R_{int})^2} \quad (7)$$

A Figura 2.7 ilustra que o funcionamento do TEG é demonstrado pela curva de potência *versus* corrente ($P \times I$) e pela reta da tensão *versus* corrente ($V \times I$). Considerando um modelo convencional, a tensão V_S apresentada na Figura 2.6 é constante e independente da corrente de saída, e a potência pode ser considerada máxima (P_{max}) quando a resistência interna do TEG for igual a resistência de carga ($R_{int} = R_{ext}$). Porém, esta consideração das impedâncias só será verdadeira se as temperaturas do lado quente e frio do TEG se mantiverem constantes, o que não se pode considerar em aplicações práticas devido aos fatores externos. Mesmo considerando a temperatura diferencial como constante, a tensão V_{TEG} vai mudar conforme variar a corrente de carga, o que desvia o valor máximo da potência (PARK, LEE e BOND, 2014).

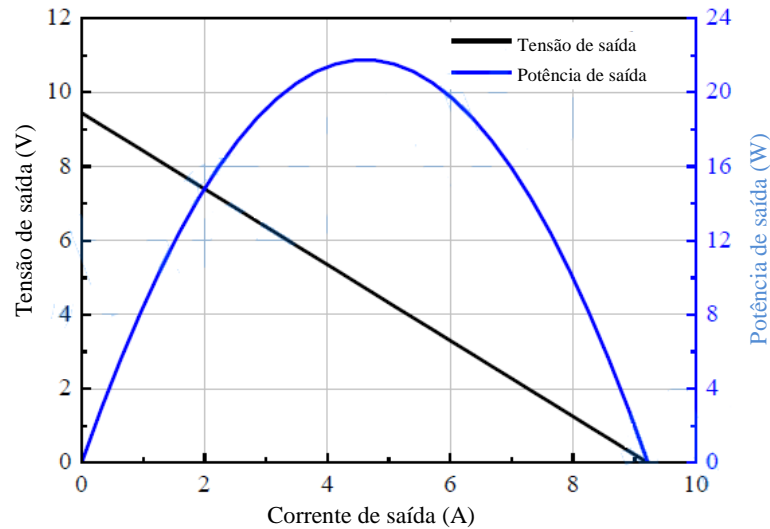


Figura 2.7 – Curvas $P \times I$ e $V \times I$ do TEG
Fonte: Adaptado de Thermonamic, 2014.

Em (8) é apresentado a potência máxima de saída do TEG, que é obtida quando a resistência interna do TEG for igual à resistência de carga. Reescrevendo-a em função do coeficiente de Seebeck e da diferença de temperatura, obtém-se (9), onde R é a soma algébrica das resistências térmicas do material metálico da junção, das junções p-n e da resistência térmica dos contatos físicos (YU ZHOU, PAUL e BHUNIA, 2008).

$$P_{max} = \frac{V_{TEG}^2}{4.R} \quad (8)$$

$$P_{max} = \frac{\alpha^2 \cdot \Delta T^2}{4 \cdot R} \quad (9)$$

Segundo Thermonamic (2014), a potência máxima do TEG (P_{max}) também ocorre quando os valores de tensão e corrente correspondem, respectivamente, a 50% dos valores da tensão de circuito aberto (V_0) e da corrente de curto circuito do TEG (I_{cc}), conforme apresentado em (10).

$$P_{max} = \left(\frac{V_0}{2}\right) \cdot \left(\frac{I_{cc}}{2}\right) \quad (10)$$

2.4 FIGURA DE MÉRITO

Nos termogeradores, a eficiência do material termoelétrico depende da diferença de temperatura (ΔT) sobre a qual o dispositivo opera e da temperatura média de funcionamento. O desempenho do material é expresso através de sua figura de mérito, denominada Z . A figura de mérito determina a depressão máxima de temperatura e o coeficiente máximo de desempenho de um termogerador. Assim, quanto maior o valor de Z , maior a eficiência de conversão da energia térmica em energia elétrica (ROWE, 2005).

Segundo Rowe (2005) entre 1909 e 1911 foi demonstrado por Altenkirch uma teoria que os bons materiais termoelétricos são os que possuem altos coeficientes de Seebeck, para obter a máxima conversão de calor em eletricidade, alta resistência térmica, para que o calor da junção seja retido, e baixa resistência elétrica, para minimizar o aquecimento por efeito Joule. Assim, a razão entre a condutividade térmica e a condutividade elétrica é uma constante e não é possível reduzir uma enquanto se aumenta a outra. Essas propriedades formam a figura de mérito Z , cuja fórmula é apresentada em (11) e é definida em unidade por grau de temperatura.

Como a figura de mérito Z pode variar conforme alteração da temperatura, foi criado ZT como uma figura de mérito adimensional, onde T é a temperatura média de funcionamento, conforme (12). Assim, pode-se dizer que os metais mais adequados são os que possuem maiores coeficientes de Seebeck.

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} \quad (11)$$

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} T \quad (12)$$

Onde:

Z = figura de mérito (1/K)

α = coeficiente de Seebeck do material (μVK^{-1})

σ = condutividade elétrica (S cm^{-1})

λ = condutividade térmica ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)

Um metal não possui essas três características da figura de mérito ao mesmo tempo. A maioria dos metais que possuem elevado coeficiente de Seebeck apresenta um baixo rendimento em relação à conversão termoelétrica (HENDRICKS e CHOATE, 2006 e ROWE, 1995).

O valor da figura de mérito varia conforme o material utilizado. Materiais TE descobertos entre 1950 e 1960 (os chamados de termoelétricos de primeira geração) limitavam a eficiência de conversão em $ZT=1$, produzindo assim, uma eficiência de conversão entre 4 a 6 %. Por várias décadas a pesquisa nesta área ficou estagnada, mas nos anos de 1990, com novas ideias teóricas relativas às propriedades termoelétricas, a pesquisa experimental foi estimulada o que levou a avanços significativos na década seguinte. Os avanços experimentais foram alcançados diminuindo significativamente a condutividade térmica através de precipitados em nano escala e composições heterogêneas. Assim, surgiu a segunda geração de materiais termoelétricos, em que o ZT quase duplicou em altas temperaturas ($ZT \approx$ entre 1,3 e 1,7) e a eficiência de conversão ficou entre 11 a 15 %. (ZHAO, DRAVID e KANATZIDIS, 2014).

De aproximadamente 1995 até os dias atuais, foram descobertos pela NASA-JPL, Laboratórios MIT-Lincoln e pela Universidade Estadual de Michigan novos materiais TE (*skutterudites*, película fina de *superlattice*, materiais de poços quânticos, e PbAgSbTe compostos e seus derivados) que aumentam a figura de mérito ZT para uma variação entre 1,5 e 2,2, aumentando, assim, a eficiência de conversão para entre 15 a 20%. São os materiais termoelétricos de terceira geração, em que se procuram, simultaneamente, melhorias no coeficiente de Seebeck e redução da condutividade térmica. Cientistas acreditam que em um futuro próximo será possível obter um ZT entre 3 e 4, o que pode viabilizar, bastante, projetos de geração termoelétrica. Não existe limite teórico para o valor de ZT , sendo, hoje, os maiores valores encontrados em materiais semicondutores fortemente dopados, tais como nas ligas

Bi_2Te_3 , PbTe e SiGe (FERNANDES, 2012; HENDRICKS e CHOATE, 2006; ZHAO, DRAVID e KANATZIDIS, 2014).

A Figura 2.8 apresenta o avanço alcançado com a figura de mérito ZT ao longo das últimas décadas e em função da temperatura. Atualmente, este cenário está evoluindo muito rápido por causa dos contínuos avanços na área, e todos os materiais que possuem melhores desempenhos são através de nano estrutura.

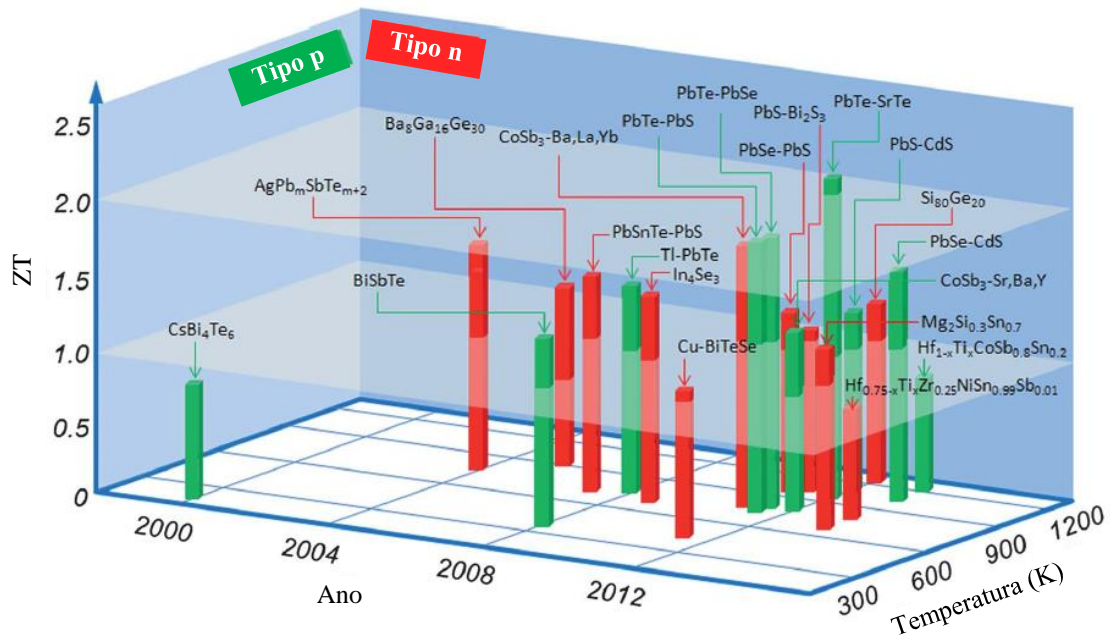


Figura 2.8 – Figura de mérito ZT dos materiais termoelétricos em função da temperatura e do ano de desenvolvimento

Fonte: Zhao, Dravid e Kanatzidis, 2014.

O rendimento máximo de um TEG (η_{max}) é dado em (13), onde Z é a figura de mérito, Th e Tc são as temperaturas dos lados quente e frio, respectivamente, do TEG e \bar{T} é o valor médio entre Th e Tc (HENDRICKS e CHOATE, 2006).

$$\eta_{max} = \left[\frac{Th - Tc}{Th} \right] \cdot \left[\frac{(1 + Z\bar{T})^{1/2} - 1}{(1 + Z\bar{T})^{1/2} + 1} \right] \quad (13)$$

Na Figura 2.9 podem-se observar gráficos da eficiência de um TEG em função da diferença de temperatura entre os lados quente e frio, considerando diferentes ZT . Observando (13), verifica-se que a máxima eficiência de um TEG está diretamente relacionada com uma diferença Th e Tc , semelhante à eficiência de Carnot (máquina que utiliza calor para realizar um trabalho), mas deve-se fazer distinção entre essas duas eficiências.

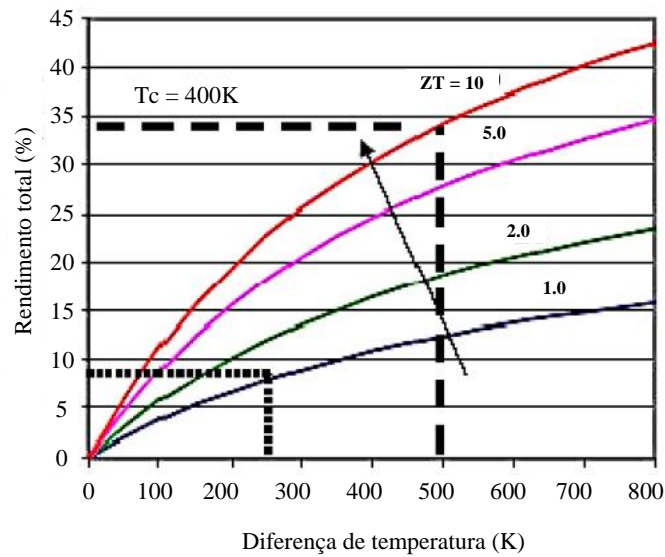


Figura 2.9 – Eficiência do TEG em função do ΔT
 Fonte: Hendricks e Choate, 2006.

2.5 MOTOGERADOR

Entre junho de 2001 a fevereiro de 2002 o Brasil enfrentou uma grande crise energética devido ao consumo daquela época estar muito alto e superando a capacidade de geração, podendo levar a uma crise ainda maior e mais duradoura. Essa crise alterou a forma das indústrias pensarem em relação à contratação da energia elétrica que consumiam: se a energia seria fornecida apenas pela concessionária local ou se poderia ser de produtores independentes. Segundo a ANEEL (2016) produtor independente é “a pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização do poder concedente para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida, por sua conta e risco”.

Assim, no setor elétrico foi instituído um novo modelo de consumidor: o consumidor livre, que é o consumidor que pode escolher de onde comprar sua energia, podendo ser da concessionária local, de uma central geradora local ou regional ou de outras fontes distantes (BARDELIN, 2004).

Com essa nova legislação, as grandes indústrias passaram a buscar antigas alternativas, de quando não existiam grandes unidades geradoras no Brasil: possuir a própria unidade geradora de energia elétrica. Hoje, não somente as indústrias, mas também hotéis e shopping centers possuem suas próprias unidades geradoras. Dessa forma, muitas indústrias investiram em grupos geradores próprios para funcionarem na falta do fornecimento de

energia elétrica pela central de fornecimento, mas apenas para suprir a carga prioritária, como máquinas que não podem ser desligadas de qualquer forma ou iluminação de emergência (MAMEDE FILHO, 2011).

Nos tempos atuais, o conceito de geração tomou novo rumo. As unidades de geração próprias não estão sendo mais adquiridas apenas para suprir as cargas prioritárias na falta de energia da concessionária, mas sim com capacidade superior à necessária e conectada em paralelo à rede elétrica para que, caso a energia vendida pelo fornecedor esteja com valor superior à unidade própria de geração, a indústria pode deixar de comprar deste fornecedor e consumir a própria energia produzida, ou seja, podendo escolher, conforme legislação vigente e expectativa de mercado, quando e qual energia utilizar. Ou, caso a geração própria esteja muito cara, utilizá-la apenas no horário de ponta de carga, que é o período do dia de maior valor cobrado pela concessionária para a compra de energia pelos grandes consumidores (MAMEDE FILHO, 2011).

De acordo com Mamede Filho (2011) os principais motivos para a instalação de usinas de geração própria em um ambiente industrial são: substituir totalmente a energia da concessionária (autoprodutor); substituir a energia da concessionária apenas no horário de ponta de carga; implantar um sistema de cogeração. Mas, tomar esta decisão de construir uma usina de geração não é fácil, pois, geralmente, o investimento inicial é alto, o tempo de retorno é demorado ou a geração de energia elétrica não é o foco do negócio.

Entre os diversos tipos existentes de unidades geradoras, segundo Bardelin (2004), muitas empresas investiram em geradores de energia elétrica a diesel e, mesmo com o fim do racionamento, continuam a utilizá-lo para gerar energia no horário de ponta ou para suprir a carga na falta da energia da concessionária.

Segundo Mamede Filho (2011), devido o aumento no interesse pela geração distribuída, motores que utilizam combustível líquido (como o óleo diesel) ganharam espaço no mercado devido à sua facilidade na instalação e ao aumento no mercado de profissionais qualificados para manutenção e operação. Outra vantagem também é que, com o uso da eletrônica de potência no controle do funcionamento dos motores a combustão interna, a emissão de poluentes e o nível de ruído diminuíram, melhorando assim, o rendimento.

Na Figura 2.10 visualiza-se uma unidade de geração, normalmente chamada de grupo gerador ou motogerador, que utilizam motores a óleo diesel. Estes geradores são muito utilizados em indústrias e em várias atividades econômicas e sociais.



Figura 2.10 – Motogerador

2.5.1 Motor a óleo diesel

O motor diesel é um tipo de motor de combustão interna cuja principal característica, que o diferencia do motor de ciclo Otto (onde a ignição ocorre por centelha), é a maneira com a qual ocorre a ignição do combustível.

O motor diesel é também chamado de motor de ignição por compressão. Esse nome é devido ao seu funcionamento em que, o ar é comprimido com alta pressão em um cilindro e, quando uma nuvem de óleo é injetada nesse fluido que está comprimido e quente, o mesmo se inflama. O ar que foi comprimido tem sua temperatura elevada devido à sua compressão praticamente adiabática, ou seja, sem troca de calor com o meio externo, feita pelo pistão do motor (MAMEDE FILHO, 2011).

Pode-se explicar o funcionamento dos motores a óleo diesel através do ciclo diesel, que apresenta quatro fases: Admissão, Compressão, Combustão e Escape. Esta sequência de fases (ou tempos) é denominada de ciclo do motor. Woodyard (2009) explica o detalhamento das quatro fases (ou tempos):

- Admissão: fase em que o pistão do motor desce, com a válvula de admissão aberta e com a válvula de escape fechada, fazendo com que o ar entre no cilindro;
- Compressão: após a entrada do ar, as válvulas de admissão e escape fecham e o pistão sobe, fazendo com que o ar admitido seja comprimido até o volume da

câmara de combustão, e ocasionando o aquecimento do ar. Ao final da compressão, é injetada, pelo bico injetor, uma nuvem de óleo diesel dentro da câmara de combustão, fazendo que se inicie a combustão devido o contato do óleo com o ar aquecido e pressurizado;

- Combustão: devido à expansão dos gases queimados, o pistão desce com as válvulas de admissão e escape fechadas. Assim, essa força de expansão é transmitida à biela e depois ao virabrequim para ocasionar o movimento de rotação do motor. Este é o único momento do processo em que se produz energia.
- Escape: com a válvula de escape aberta e a de admissão fechada, o pistão sobe fazendo com que os gases queimados sejam expulsos pela a tubulação de escapamento.

Como a fase de combustão é a única etapa em que se produz energia, na Figura 2.11 é mostrada a distribuição média de produção e perda de energia de usina a motor a óleo diesel. Dos 100 % de óleo diesel utilizado, apenas 40 % é convertido em energia elétrica e 23 % são desperdiçados na tubulação dos gases de exaustão (MAMEDE FILHO, 2011).

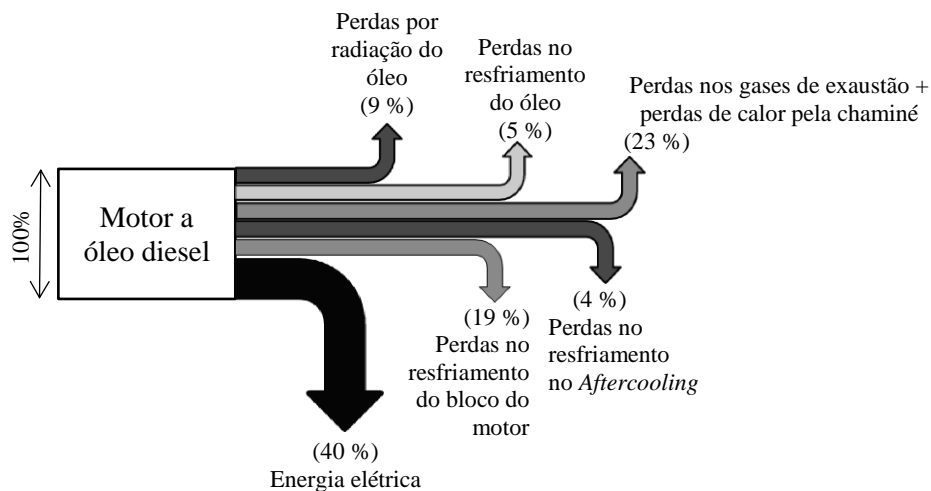


Figura 2.11 – Distribuição média de produção e perda de energia de usina a motor a óleo diesel
Fonte: Mamede Filho, 2011.

2.6 CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Durante a Revolução Industrial, em meados dos anos entre 1860 e 1900 (final do século XIX), os primeiros sistemas de controle foram desenvolvidos e implementados. Eram dispositivos totalmente mecânicos, que desempenhavam apenas algumas tarefas críticas e repetitivas e tinham uma vida útil pequena. No início do século XX (meados dos anos de

1920), os dispositivos eletromecânicos, como relés e contadores, substituíram os dispositivos mecânicos, possibilitando o desenvolvimento de funções de controle mais sofisticadas e complexas, mostrando uma alternativa viável em relação a custo. Por volta de 1970, com o desenvolvimento da tecnologia dos Circuitos Integrados (CIs), a lógica a relés passou a ser raramente adotada, apenas em sistemas mais antigos e máquinas pequenas (FRANCHI e CAMARGO, 2012).

Com o desenvolvimento dos CIs, surgiu uma nova geração de sistemas de controle, pois são circuitos menores, mais rápidos e com vida útil bem maior. A lógica de controle associada aos sistemas que utilizam CIs e relés é definida pela interligação elétrica, que são sistemas de fácil implementação, mas com grande trabalho (difícil e demorado) para alteração da lógica de controle (FRANCHI e CAMARGO, 2012).

No final da década de 1960 começaram a surgir os primeiros computadores comerciais para serem utilizados em grandes sistemas de controle. O uso desse novo equipamento proporcionou um grande avanço e melhoria em relação aos sistemas que utilizavam interligação elétrica, pois os computadores são programáveis. Mas quando os primeiros computadores comerciais surgiram, eles eram caros, grandes, de difícil programação e inapropriados (sensíveis) a ambientes industriais (FRANCHI e CAMARGO, 2012).

Devido a uma grande demanda da indústria automobilística norte-americana em mudar de forma rápida e mais econômica o sistema de controle de seus painéis de comando das linhas de montagem, foi desenvolvido, em 1968, o *Programmable Logic Controller* (PLC) ou Controlador Lógico Programável (CLP). Esse novo equipamento foi especificado não apenas para atender a indústria automobilística, mas a indústria manufatureira de um modo geral. Assim, foi desenvolvido um controlador com as seguintes características: de fácil programação e reprogramação, possibilidade de manutenção e reparo, confiável para ser utilizado em ambiente industrial, tamanho reduzido, competitivo em custo com relação a painéis de relés, com possibilidade de expansão, operação com interface amigável, possibilidade de integração com bancos de dados para tornar disponível dados do chão de fábrica (FRANCHI e CAMARGO, 2012; MORAES e CASTRUCCI, 2012).

O CLP é considerado um computador feito para operar no ambiente industrial, pois seus componentes são robustos. Os primeiros CLPs desenvolvidos eram caros e grandes, mas com o grande avanço e melhoria dos CIs, o seu preço passou a ser bem competitivo com outros sistemas de controle disponíveis. Assim, conforme a IEC (*International Electrotechnical Commission*) o CLP pode ser definido como:

Sistema eletrônico operando digitalmente, projetado para uso em um ambiente industrial, que usa uma memória programável para a armazenagem interna de instruções orientadas para o usuário para implementar funções específicas, tais como lógica, sequencial, temporização, contagem e aritmética, para controlar, através de entradas e saídas digitais ou analógicas, vários tipos de máquinas ou processos. O controlador programável e seus periféricos associados são projetados para serem facilmente integráveis em um sistema de controle industrial e facilmente usados em todas suas funções previstas (FRANCHI e CAMARGO, 2012, p. 23).

Todo sistema, do mais simples ao mais complexo e do menor ao maior, necessita de algum tipo de controle para que haja uma operação segura, precisa e economicamente viável. Assim, todo sistema de controle é composto de três partes: sensor, controlador e atuador. O sensor é um dispositivo que converte uma condição física em um sinal elétrico, como por exemplo, um sensor que lê a temperatura. O controlador é o responsável por ler o sinal elétrico de entrada e, conforme uma programação de controle pré-definida, atua as saídas. Os atuadores são os componentes que recebem o sinal elétrico proveniente do controlador e o convertem novamente em uma condição física, como por exemplo, uma válvula que abre e fecha para passagem de fluido em um processo (FRANCHI e CAMARGO, 2012).

Para que os sistemas de controle possam ser monitorados e operados com mais eficiência, os controladores podem ser conectados, através de redes e protocolos industriais, a um sistema de supervisão, chamado de Sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), que é um sistema responsável pelo monitoramento das variáveis de processo, com o principal objetivo de fornecer condições ao operador, em uma localização central, para controlar ou monitorar um processo automatizado mais rapidamente, permitindo a leitura das variáveis em tempo real e o gerenciamento e controle do processo automatizado, monitorar alarmes e armazenar informações de processo (MORAES e CASTRUCCI, 2012).

Os sistemas automatizados que possuem sistemas supervisórios podem apresentar os seguintes benefícios: informações instantâneas, redução no tempo de produção, redução de custos de produção, precisão das informações, detecção de falhas, aumento da qualidade e aumento da produtividade (MORAES e CASTRUCCI, 2012).

2.7 ESTADO DA ARTE

O efeito Peltier, descoberto em 1834, teve seu grande desenvolvimento por volta de 1960 e, assim, pensou-se que todos os dispositivos de refrigeração teriam sua tecnologia substituída por pastilhas baseadas nesse fenômeno. A pastilha baseada no efeito Peltier tem como vantagens a ausência de peças móveis, barulho e vibração, além de terem alta

durabilidade, precisão e tamanho reduzido. Mas, ao contrário do que se pensava, essas pastilhas não obtiveram grandes avanços tecnológicos, ficando com o desempenho de 4 a 5 vezes abaixo dos sistemas convencionais de refrigeração (MARTINS et al., 2011).

Atualmente, com o surgimento de novos materiais, novas tecnologias e novos métodos de processamento, os termogeradores tiveram seu interesse aumentado em aplicações industriais, pois podem ser utilizados em locais onde a bateria não é adequada, além de serem fontes de energia limpa e renováveis. As pesquisas agora têm ocorrido para descobrir novos materiais que melhoram o desempenho dos módulos termoelétricos (NASCIMENTO, LUBANCO E MOREIRA, 2012).

As aplicações que utilizam o princípio de funcionamento do efeito termoelétrico para gerar eletricidade vão desde sensores, aproveitamento térmico do calor do motor de automóveis, sistemas de transporte de óleo e gás e geradores elétricos com motores a combustão, até dispositivos elétricos que requerem baixa potência.

2.7.1 Termopares

Os termopares são sensores de temperatura bastante utilizados nas indústrias. O seu princípio de funcionamento baseia-se no efeito Seebeck que diz que se dois metais (ou ligas metálicas) diferentes forem soldados em suas duas extremidades e aquecendo uma delas, uma corrente contínua irá fluir pelo circuito. Abrindo o circuito em uma dessas extremidades, uma tensão elétrica de circuito aberto aparecerá e será diretamente proporcional à diferença de temperatura das extremidades e da composição dos dois metais utilizados na sua construção (FERNANDES, 2012; THERMA, 2014).

Conforme o metal utilizado, a Instrument Society of America (ISA) definiu que os termopares podem ser classificados como do tipo: T, J, K, E, R, S, B. Os termopares tipo T, J, K e E são considerados termopares convencionais por serem o de maior uso industrial, os fios são de custo relativamente baixo e a aplicação admite um limite maior de erro. Os termopares tipo S, R e B são considerados termopares nobres por serem constituídos de platina, ter custo mais elevado e são de altíssima precisão. Os metais utilizados e as características de cada tipo de termopar podem ser observados na Tabela 2.1 (FERNANDES, 2012; THERMA, 2014).

Tabela 2.1 – Tipos de Termopares e suas principais características

Tipo	Intervalo de temperatura de operação (°C)	Características gerais de utilização
Tipo K Cromel (NiCr)/Alumel (NiAl)	0 a 1200	<ul style="list-style-type: none"> • Atmosferas oxidantes e inertes; • Limitações em vácuo e em atmosferas redutoras.
Tipo J Ferro (Fe)/Constantan (CuNi)	0 a 800	<ul style="list-style-type: none"> • Atmosferas redutoras, inertes e em vácuo; • Limitações em atmosferas oxidantes (não recomendado para locais com enxofre).
Tipo E Cromel (NiCr)/Constantan (CuNi)	-200 a 800	<ul style="list-style-type: none"> • Atmosferas oxidantes ou inertes; • Limitações em atmosferas redutoras ou vácuo.
Tipo T Cobre (Cu)/Constantan (CuNi)	-180 a 370	<ul style="list-style-type: none"> • Atmosferas húmidas e resistentes a corrosão; • Limitações em atmosferas oxidantes.
Tipo S Platina 10% Ródio (Pt10%Rh)/Platina (Pt)	0 a 1450	<ul style="list-style-type: none"> • Atmosferas oxidantes ou inertes; • Sensível a contaminações.
Tipo R Platina 13% Ródio (Pt13%Rh)/Platina (Pt)	0 a 1450	<ul style="list-style-type: none"> • Atmosferas oxidantes ou inertes; • Sensível a contaminações.
Tipo B Platina 30% Ródio/Platina 6% Ródio	0 a 1820	<ul style="list-style-type: none"> • Atmosferas oxidantes ou inertes; • Sensível a contaminações.

Fonte: Fernandes, 2012; Therma, 2014.

A polaridade dos termopares é identificada pelo código de cores de seus dois cabos, conforme normas do Anexo A (THERMA, 2014).

2.7.2 Indústria automobilística

Os motores dos carros que utilizam Diesel aproveitam apenas 33 % da energia do combustível. A Figura 2.12 apresenta que cerca de outros 33 % são perdidos na forma de calor. Assim, as indústrias automobilísticas (marcas como Volkswagen, BMW, General Motors e Ford) utilizam TEG para recuperação desta energia térmica desperdiçada nos gases de escape (FERNANDES, 2012; TRITT, 2007).

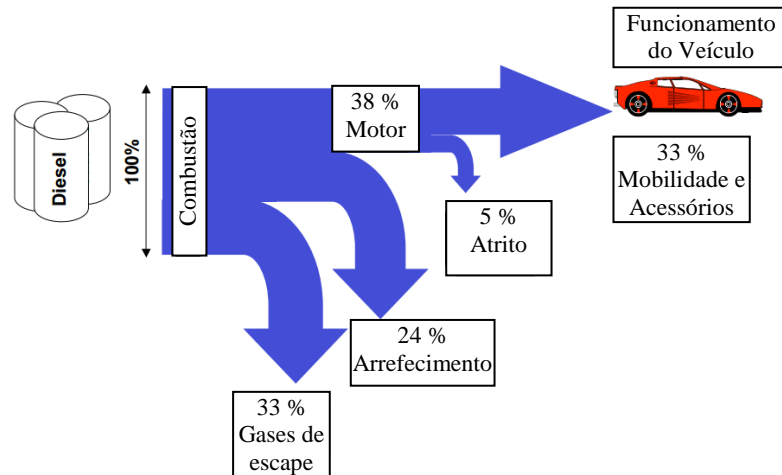


Figura 2.12 – Geração e resíduos de calor de sistemas automotivos
Fonte: Adaptado de Tritt, 2007.

O grande objetivo dessa utilização tem sido melhorar o rendimento global dos automóveis, reduzindo assim, o consumo de combustível e diminuindo a liberação dos gases de efeito estufa.

A Figura 2.13 apresenta que a Ford e a BMW desenvolveram projetos em que a fonte de calor para o lado quente do TEG (T_h) provinha dos gases de escape de automóveis, com temperatura variando entre 450 e 600 °C. O lado frio (T_c) era proveniente do fluido de arrefecimento do motor, com temperatura entre 80 a 100 °C. Mas, possuir TEG para essa temperatura de trabalho do lado quente, aumentou muito o custo do automóvel. Assim, em 2009, a BMW testou outra solução, em que a fonte de calor para o lado quente passou a ser o fluido de arrefecimento (temperatura bem mais baixa). Com isso, foram gerados 250 W e redução em torno de 2 % de CO₂ (FERNANDES, 2012).



Figura 2.13 – Termogeradores em escapamentos de automóveis
Fonte: Farias, 2009.

Vários trabalhos com termogeradores têm sido desenvolvidos na área automobilística.

Um programa para construir e testar um gerador termoelétrico de 1 kW para motores classe oito de caminhão a Diesel começou em 1987 no Departamento de Energia dos EUA e financiado pela Comissão de Energia da Califórnia. A primeira fase foi concluída em 1990 e uma nova fase foi iniciada no final de 1991. Somente em 1993 testes no gerador de 1 kW foram iniciados e continuaram por cerca de um ano, enquanto várias modificações foram feitas no sistema de transferência de calor dentro do gerador. O objetivo deste gerador é substituir o alternador por termogeradores instalados no escapamento do motor. O gerador usou 72 TEG da Hi-Z com potência de 13 W cada e foi testado em vários motores durante o processo de desenvolvimento. O objetivo de 1 kW foi atingido (BASS, ELSNER e LEAVITT, 1995).

Em 2001 foi desenvolvido um protótipo capaz de gerar cerca de 1 kW de energia elétrica a 12 V DC durante o funcionamento nominal do motor. O TEG utilizado foi o modelo HZ-14 da Hi-Z Tecnologia, que desenvolveu um TEG para melhor aplicação em caminhões a diesel. O lado quente do protótipo foi instalado em uma superfície octogonal do lado adjacente do permutador de calor do escape e a fonte fria dos módulos foi proveniente do fluido de arrefecimento do motor. O protótipo foi testado em uma célula de teste e depois em um caminhão a Diesel. Verificou-se que a potência do TEG dependia fortemente da carga do motor e menos da velocidade (BASS, KUSHCH e ELSNER, 2001).

Em 2011 foi publicado um estudo da economia de combustível que os termogeradores (TEG) geram se utilizados no escapamento de veículos utilitários esportivos (SUV) e carros que utilizam gás natural (GNV). Foram utilizados TEG comercialmente disponível de Telureto de Bismuto (Bi_2Te_3) ou *Quantum-Well* (QW). Os testes simulados são a velocidade constante no caso SUV e com a carga de energia AC constante no caso do GNV. Para os carros SUV, a economia de combustível foi, em média, 0,2% usando Bi_2Te_3 e 1,25% usando geradores QW. Para o caso do GNV, a economia de combustível foi de cerca de 0,4% usando Bi_2Te_3 e cerca de 3% usando geradores QW (KARRI, THACHER e HELENBROOK, 2011).

Em 2014 foi publicado um estudo sobre a melhor posição para instalação dos TEG nos escapamento de automóveis. Foram propostas três diferentes posições: TEG localizado na extremidade do sistema de escape, TEG localizado entre o catalisador e o silenciador e TEG localizado a montante do catalisador e silenciador. Através de simulações e experiência, o caso do TEG localizada entre o catalisador e o silenciador obteve uma distribuição do fluxo de calor mais uniforme e maior temperatura da superfície do que nos outros casos. (LIU et al., 2014).

2.7.3 Uso doméstico

O exército dos Estados Unidos da América tem a necessidade de uma cozinha móvel para preparar os alimentos quando os soldados estão se movendo rapidamente durante as operações. Assim, a Figura 2.14 apresenta que foi desenvolvido uma cozinha móvel com base no modelo da US Marine Corps, denominado *Tray Ração Heater System* (TRHS). Esse sistema consiste basicamente de um aquecedor de água para aquecer 6 bandejas de plástico com alimentos empacotados. Uma das limitações dessa cozinha é o uso de gerador de apenas 2 kW para a produção de energia elétrica. Assim, foi aplicado no TRHS, termogeradores que substituem o gerador de 2 kW, com a vantagem da redução de peso, consumo de combustível e eliminação de ruído (PICKARD, 2006).

Para alimentação do lado frio do TEG foi utilizado um sistema inovador: água fervente parada. O lado quente foi alimentado com temperatura a 250 °C proveniente do queimador. Para proporcionar a temperatura adequada nos TEG da fonte quente, foram utilizadas placas de mica e para transferência do calor do lado frio, foram utilizadas bolachas de alumínio como interface térmica entre o TEG e o tanque de água. O modelo do TEG utilizado foi o HZ-20 produzido pela Hi-Z Technology, Inc (PICKARD, 2006).

Ao se ligar o queimador, ocorre um diferencial de temperatura entre os lados quente e frio do TEG o faz com que energia elétrica seja gerada. Quando a tensão de saída do TEG atingir a tensão ideal, esta energia passar a auxiliar a bateria para acionar o sistema (PICKARD, 2006).



Figura 2.14 – Termogeradores em cozinha móvel
Fonte: Pickard, 2006.

Em 1996 foi desenvolvido e testado na Suécia um protótipo de gerador termoelétrico montado para aproveitar calor de fogões a lenha utilizados no aquecimento doméstico. Os módulos termoelétricos utilizados foram de Telureto de Bismuto. A energia elétrica gerada foi utilizada na luz elétrica e para a televisão (KILLANDER e BASS, 1996).

Em 2010, módulos termoelétricos (TE) foram utilizados em um fogão a biomassa para gerar eletricidade para alimentar um ventilador e lâmpadas. O TEG utilizado foi o TEP1-12656-0.8 da Thermonamic que gera a potência 10,5 W. O lado quente do TEG foi proveniente de um aquecedor elétrico e um dissipador de calor de alumínio com aletas foi montado no lado frio. Foram testados dois sistemas de arrefecimento diferentes para manter constante a temperatura no lado frio: uma ventoinha elétrica e água fria. Os melhores resultados foram obtidos com água fria. Com um gradiente de temperatura (ΔT) a 100 °C foi obtida uma tensão de circuito aberto de 2,65 V (CHAMPIER et al., 2010).

2.7.4 Indústria Aeroespacial

A NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) utilizou termogeradores em suas sondas espaciais, como Voyager (Figura 2.15), Pioneer, Galileo, Cassini e Viking. O uso dos módulos termoelétricos no espaço, mesmo com as perdas e ineficiência, tem vantagens devido à sua simplicidade e o pouco peso (NASCIMENTO, LUBANCO E MOREIRA, 2012).



Figura 2.15 – Termogeradores na Sonda Voyager
Fonte: Ando Júnior, 2014.

As missões realizadas pela NASA exigem segurança e confiabilidade na duração da energia da espaçonave, assim, são utilizadas baterias nucleares com *Radioisotope Thermoelectric Generator* (RTG), que são baterias que transformam calor em eletricidade,

pois a redução dos custos operacionais, do consumo de energia elétrica no espaço e a transformação de energia já disponível, além de contribuírem para a diminuição de emissão de gases poluentes na atmosfera, são de grande importância para a área espacial e para a aviação comercial (ANDO JÚNIOR, 2014).

A *Boeing Research and Technology* fez um estudo que mostra que utilizar esses módulos termoeétricos, mesmo com seu alto custo e ineficiência, produz uma redução no peso do avião que economiza mais de 0,5% de combustível. Isto, para os Estados Unidos, representa uma economia de aproximadamente 12 milhões de dólares por mês (ANDO JÚNIOR, 2014).

2.7.5 Instalações Prediais

O uso de módulos termoeétricos neste projeto consiste em instalar termogeradores nas janelas de um prédio de escritórios para suprir o consumo de energia elétrica de iluminação e equipamentos que requeiram baixa tensão, como computadores, impressora e *scanner*. A Figura 2.16 ilustra que a fonte quente de temperatura é proveniente do meio exterior do prédio e a fonte fria proveniente do lado interior do edifício (AZARBAYJANI e ANDERSON, 2008).

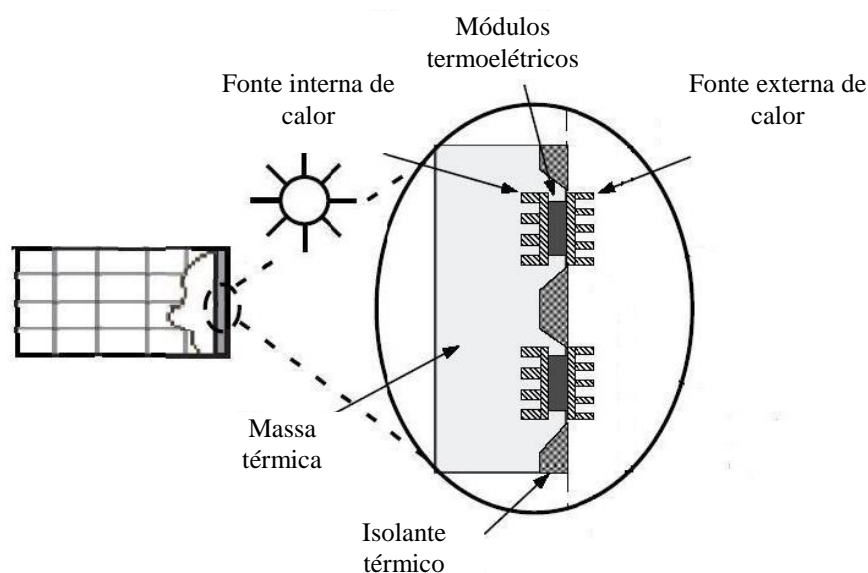


Figura 2.16 – Janela de prédio com módulos termoeétricos
Fonte: Azarbayjani e Anderson, 2008.

A sala utilizada no projeto tem um tamanho de 4,5 m x 3 m x 3 m e as seguintes premissas foram consideradas: paredes com espessura de 15 cm; os módulos termoeétricos foram instalados apenas em uma das quatro paredes (o ganho ou perda de calor das outras

paredes foram desconsiderados); foi considerada, após seis meses de análise e durante 8 horas do dia, uma diferença de 18 °C entre o ambiente externo (38 °C) e interno (20 °C); o método de transferência de calor utilizado foi o método por condução através da parede; foram utilizados módulos termoelétricos ao longo de toda a parede (3 m x 3 m); cada módulo possui tamanho de 3 cm x 3 cm e foram ligados eletricamente em paralelo. O módulo termoelétrico utilizado permite no máximo de 10 a 70 °C entre o lado quente e frio (AZARBAYJANI e ANDERSON, 2008).

Para suprir o consumo do escritório de 8 horas diárias, são necessários aproximadamente 0,435 kW/h, sendo: 57 W para o *notebook*, 24,1 W para o *scanner*, 64 a 128 W para a iluminação e 127 W para a impressora. Sendo assim, foi utilizado o módulo termoelétrico modelo 127cpl/0.4A da Thermoelectric Inc. Cada módulo fornece 0,4 A; 8,3 V e 5 W ao preço de \$ 30. Assim, foram necessários 90 módulos TE e a energia produzida pode compensar metade do consumo anual (AZARBAYJANI e ANDERSON, 2008).

2.7.6 Estudos recentes

Date et al. (2014) apresenta a análise teórica e a validação experimental de um projeto de aquecimento solar de água combinado a um sistema de geração de energia termoelétrica. A Figura 2.17 ilustra que o sistema consiste em um dispositivo com coletor solar que fornece um fluxo de calor quente para os módulos termoelétricos e a parte de arrefecimento é proveniente de tubos imersos em um tanque de água que dissipa o calor. Esse método de arrefecimento fornece uma elevada transferência de calor para os módulos termoelétricos e a água residual ainda pode ser reaproveitada nos afazeres domésticos. Para um fluxo de 50.000 W/m² e uma diferença de temperatura de 75 °C em um TEG de 40 x 40 mm, pode ser gerada uma tensão de circuito aberto de 3,02 V.

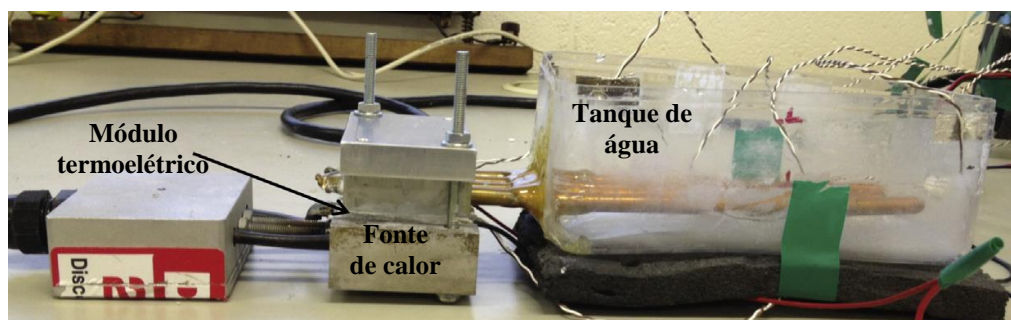


Figura 2.17 – Coletor solar e módulo termoelétrico
Fonte: Date et al., 2014.

Na Figura 2.18 Ando Júnior (2014) apresenta o protótipo de um microgerador termoelétrico baseado no efeito Seebeck, onde a fonte quente de calor para o TEG é proveniente de resíduos de processos industriais que pode ser intercambiável através de um módulo desenvolvido e denominado captor de calor e o arrefecimento do TEG é através de um bloco de refrigeração com água. Esse captor de calor pode ser trocado, o que otimiza a transferência térmica para o microgerador termoelétrico. Com uma diferença de temperatura entre os lados quentes e frios de 190 °C, sendo 265 °C no lado quente e 75 °C no lado frio, conseguiu-se uma tensão de saída 2,21 V por módulo, sendo que a tensão teórica deveria ser de 10 V. Um dos TEG utilizados no protótipo foi o modelo TEHP1-24156-1.2 da Thermonamic Module. Para as medições feitas com a condição de máxima potência de saída e com um gradiente de temperatura de 80 °C, obteve uma potência máxima de 29 W.



Figura 2.18 – Protótipo do microgerador termoelétrico
Fonte: Ando Júnior, 2014.

2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os conceitos teóricos necessários para o desenvolvimento deste trabalho, tais como: efeitos e materiais termoelétricos, termogeradores (TEG), motogeradores, equipamentos utilizados para controle e automação de processos e um breve estado da arte.

O capítulo seguinte apresenta a metodologia e lista os materiais utilizados no desenvolvimento da Planta de Geração Termoelétrica.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os principais materiais e suas características e a metodologia utilizada na montagem da Planta de Geração Termoelétrica.

A planta foi montada no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), campus Goiânia, sendo que a fonte quente de calor necessária para a geração termoelétrica é proveniente dos gases de exaustão de motogerador a diesel e a fonte fria provém de um sistema de resfriamento por onde circula água de reuso.

As temperaturas dos lados quente e frio do TEG, da água de resfriamento e do escapamento do gerador elétrico são constantemente lidas por um Controlador Lógico Programável (CLP) e monitoradas por um Sistema Supervisório a fim de que o gradiente térmico seja controlado no valor desejado.

3.1 MATERIAIS

A Tabela 3.1 apresenta os principais materiais utilizados na montagem do aparato tecnológico.

Tabela 3.1 – Materiais utilizados no aparato

Item	Qtd (pç)	Material	Modelo	TAG Fluxograma	Figura
1	42	Termogerador (TEG)	TELBP1-12656-0.45. Thermonamic.	TEG	Figura 3.1
2	8	Transdutor de Temperatura	Entrada para termopar e saída 4 a 20mA, modelo TxBlock-USB. Novus.	TY	
3	8	Termopar tipo K	Sem proteção na junta de medição – Precisão $\pm 2,2$ °C.	TT 01 a TT 08	
4	1	Termopar tipo K	Modelo com bainha.	TT 09	
5	1	Controlador lógico programável (CLP)	Família Atos, MCP 6006 com 8I/8O digitais, 8I/8O analógicas. Schneider.	UC	
6	1	Sistema supervisório	Software Elipse E3 Studio versão 4.5 Demo.		
7	1	Gerador elétrico	150kVA – Modelo G2R Cramaco.	JZ	Figura 3.2
8	6	Válvula de controle de vazão – 90 °	Modelo EVA 02, 220Vca, Marca Emicol – Pressão de operação: 0,2 a 8 kgf/cm ² ; Vazão: 7 l/min a 40 l/min. Normalmente fechadas.	FV	
9	1	Aparato quente	Hexágono, 462 mm, material aço ABNT 1045.		Figura 3.5

Continuação

Item	Qtd (pç)	Material	Modelo	TAG Fluxograma	Figura
10	6	Caixa de resfriamento	Tubo retangular aço Inox série 304 A554 70x30x1,50mm polido externo; 515 mm de comprimento. Capacidade de 1 litro.		Figura 3.6
11	2	Tanque pulmão	Capacidade de 3,6 litros em aço Inox série 304.		Figura 3.7
13	1	Isolante térmico do TEG	Placas Duraboard® LD-1200. Composição de Alumina, Silica e ligantes. Temperatura de 1260°C e ponto de fusão de 1760°C.		Figura 3.8
14	1	Isolante térmico do tanque pulmão	Lã de rocha		Figura 3.7
15	12	Placa de cobre	515 mm x 70 mm x 1,07 mm de espessura.		Figura 3.8
16	1	Bomba elétrica da água de reuso	Recalque de 5m ³ /h e potência de ½ cv	BB 01	Figura 3.12

3.1.1 Termogerador TELBP1-12656-0.45

A Figura 3.1 apresenta o TEG utilizado no aparato, o modelo TELBP1-12656-0.45 da empresa Thermonamic Electronics. Suas principais características e curvas são demonstradas no ANEXO B. Esse módulo é construído com uma mistura de Telureto de Bismuto (Bi_2Te_3) e Telureto de Chumbo (PbTe) e pode suportar um range de temperatura no lado quente de -60 °C a ± 360 °C, de forma contínua, e no máximo 400 °C (de forma intermitente). No lado frio, o range de temperatura é de -60 °C a ± 180 °C, de forma contínua, e no máximo 200 °C (de forma intermitente). O módulo possui, dos seus dois lados, uma folha de grafite de alta condutividade térmica de forma a proporcionar uma baixa resistência térmica e uma melhor transferência de calor, não necessitando, assim, de pasta térmica. A folha de grafite suporta altas temperaturas, de -40 °C a ± 400 °C.

Conforme a Figura 3.1 apresenta, o lado quente do TEG é identificado pela escrita “*Hot side*” e o lado sem escrita é o lado frio. Outra forma de identificar corretamente os lados do TEG é verificar as cores dos fios: quando o lado quente estiver para cima, o fio preto estará do lado direito. Como o lado frio do TEG suporta no máximo 200 °C, a montagem do lado quente com o frio não pode ser invertida senão o termogerador pode ser danificado. Na Figura 3.1 também é possível visualizar o TEG aberto, com seus pares termoeletrônicos P e N ligados eletricamente em série e termicamente em paralelo.

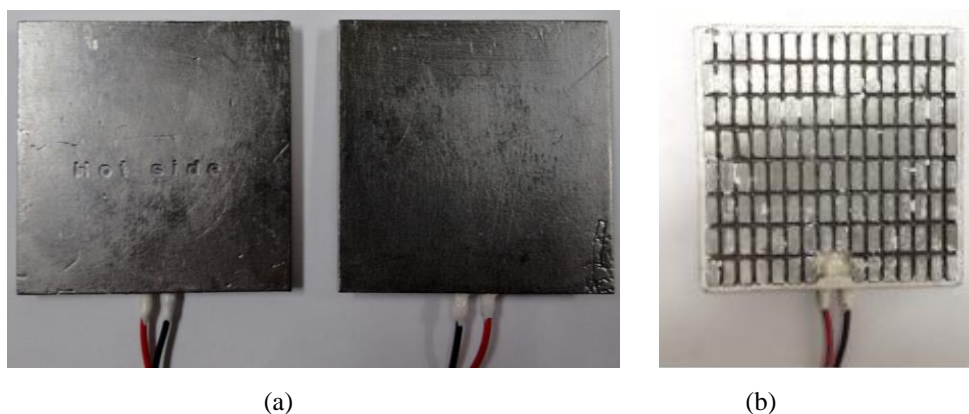


Figura 3.1 – (a) TEG TELBP1-12656-0.45; (b) Pares termoelétricos P e N

Quando o lado quente estiver a 350 °C e o lado frio a 30 °C (sua máxima eficiência), esse modelo de TEG gera uma potência de 21,7 W e uma tensão de circuito aberto de 9,2 V. Na sua máxima potência, a tensão disponibilizada é de 4,6 V e a corrente de 4,7 A. Os principais parâmetros são mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Parâmetros do TEG TELBP1-12656-0.45

Temperatura lado quente/ T_h (°C)	350
Temperatura lado frio/ T_c (°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 (W)	≈ 247
Densidade do fluxo de calor ($W\ cm^{-2}$)	$\approx 7,9$
Resistência AC (ohms), medido em 27 °C e 1000 Hz	0,42 ~ 0,52
Eficiência (%)	$\approx 6,875$
Coefficiente de Seebeck (VK^{-1})	0,02875
Figura de Mérito	0,713875
Número de pares P e N	126
Dimensões (mm)	56 x 56 x 5 ($\pm 0,5$)

Fonte: Thermonamic, 2014.

Para um melhor resultado de geração do TEG, conforme Thermonamic (2015), os TEG devem ser montados utilizando o método de compressão, ou seja, o TEG deve ser comprimido entre a placa quente e um dissipador de calor mais frio. A compressão deve ser de maneira uniforme, pois se um parafuso for mais apertado que outro, o TEG pode ser esmagado. Para o modelo de TEG utilizado nesse trabalho, a força de aperto necessária para uma geração ótima deve ser de 430 kgf ou 920 libras.

3.1.2 Gerador elétrico

O aparato tecnológico utiliza como fonte de calor os gases de exaustão de um gerador elétrico conforme a Figura 3.2 apresenta, que é um conjunto moto gerador que está instalado na sala de geradores do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), campus Goiânia. Na Tabela 3.3 são apresentados os dados do gerador elétrico.



Figura 3.2 – Gerador elétrico utilizado

Tabela 3.3 – Dados gerador elétrico

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: Dados de placa do gerador elétrico.

Apesar do funcionamento do motor diesel compreender quatro fases (admissão, compressão, combustão e escape), é apenas na fase de combustão que se produz energia. Segundo Mamede Filho (2011), dos 100% de óleo diesel utilizado, apenas 40% é convertido em energia elétrica e 23% são desperdiçados na tubulação dos gases de exaustão.

Assim, pode-se calcular a energia desperdiçada através dos gases de exaustão, conforme (14), onde: $P_{g.e.}$ é a potência das perdas de exaustão através da tubulação do escapamento do gerador (kW) e $P_{e.e.}$ é a potência da energia elétrica disponível para utilização (kW).

$$P_{g.e.} = \frac{P_{e.e.}}{0,4} \cdot 0,23 \quad (14)$$

Desse modo, quando o gerador elétrico estiver em funcionamento máximo ($P_{e.e.} = 120$ kW), os gases de exaustão tem uma potência dissipada de 69 kW.

Com base nas informações técnicas do TEG utilizado (Tabela 3.2), constata-se que para que cada módulo tenha a máxima geração 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 em funcionamento máximo, e o valor do fluxo de calor necessário para que cada TEG gere sua potência máxima, pode-se calcular, conforme (15), a quantidade de TEG necessária para extrair toda a potência dissipada nos gases de exaustão. As perdas do processo são desprezadas. Em (15) $P_{g.e.}$ é a potência das perdas de exaustão através da tubulação do escapamento do gerador (W) e Pt_{TEG} é valor do fluxo de calor necessário para que cada TEG gere sua potência elétrica máxima (W).

$$Qtd_{e_{TEG}} = \frac{P_{g.e.}}{Pt_{TEG}} \quad (15)$$

Considerando a máxima potência dissipada pelos gases de exaustão ($P_{g.e.} = 69$ kW) e o fluxo de calor ($Pt_{TEG} = 247$ W) para que cada TEG gere a potência máxima, constata-se que seriam necessários aproximadamente 280 TEG para extrair toda a potência dissipada nos gases de exaustão do gerador elétrico desse projeto.

3.1.3 Aparato quente

Conforme citado no capítulo de Introdução, o presente trabalho é parte integrante de um projeto de pesquisa com o título “Produção de aparato tecnológico e de software para estudos de recuperação de perdas de energia em motogerador termoeletrico”. A primeira etapa do projeto é intitulada “Obtenção da geometria ótima da tubulação dos gases”, e compreende

os estudos para construir um aparato quente que ofereça a melhor retenção térmica dos gases e também a equalização da temperatura superficial onde os TEG estão instalados. Como esse presente trabalho é correspondente à segunda etapa, é necessário discorrer sobre a primeira.

A geometria ótima da tubulação foi proposta por Gomes et al. (2015) e consiste em um hexágono com no máximo 500 mm de comprimento. Esse modelo de aparato quente foi definido, pois como o objetivo é construir e testar um protótipo de geração de energia elétrica de potência esperada de 1 kW, são necessários 42 (quarenta e dois) TEG de alto desempenho, sendo 7 (sete) TEG em cada face do hexágono.

Segundo Gomes et al. (2015), o aparato quente deve possuir espaço suficiente para o posicionamento dos TEG e para a manutenção do gradiente de temperatura na superfície longitudinal do duto. Assim, como a temperatura dos gases de exaustão é, aproximadamente, 500°C (dependendo da potência requerida do gerador elétrico), o aparato quente deve ter um comprimento longitudinal limitado em 500 mm, pois, a partir deste valor, foram observadas grandes gradientes de temperatura no eixo de fluxo longitudinal, tanto em elementos finitos quanto experimentais.

Na Figura 3.3 é ilustrado o desenho do aparato quente sugerido e como é sua instalação na tubulação dos gases de exaustão. Gomes et al. (2015) propõe que os TEG que estão instalados mais próximos à saída dos gases de exaustão do gerador elétrico e, conseqüentemente na entrada do aparato quente, fiquem mais afastados do hexágono, pois a temperatura dos gases é mais quente nesse ponto, e que os TEG instalados mais acima no aparato quente devem ficar mais próximos da tubulação, pois assim, tem-se uma equalização da temperatura para todos os TEG do aparato. Para a geometria ótima, essa distância entre o TEG e o hexágono pode ser aumentada ou diminuída, através de instalação de placas com espessuras adequadas e conforme a temperatura dos gases de exaustão, pois o TEG tem limitação de temperatura.

Na Figura 3.4 pode-se visualizar que, com essa modelagem no aparato quente, o gradiente de temperatura na superfície do aparato é próxima a zero graus Celsius para uma simulação de temperatura próxima a 1000 °C.

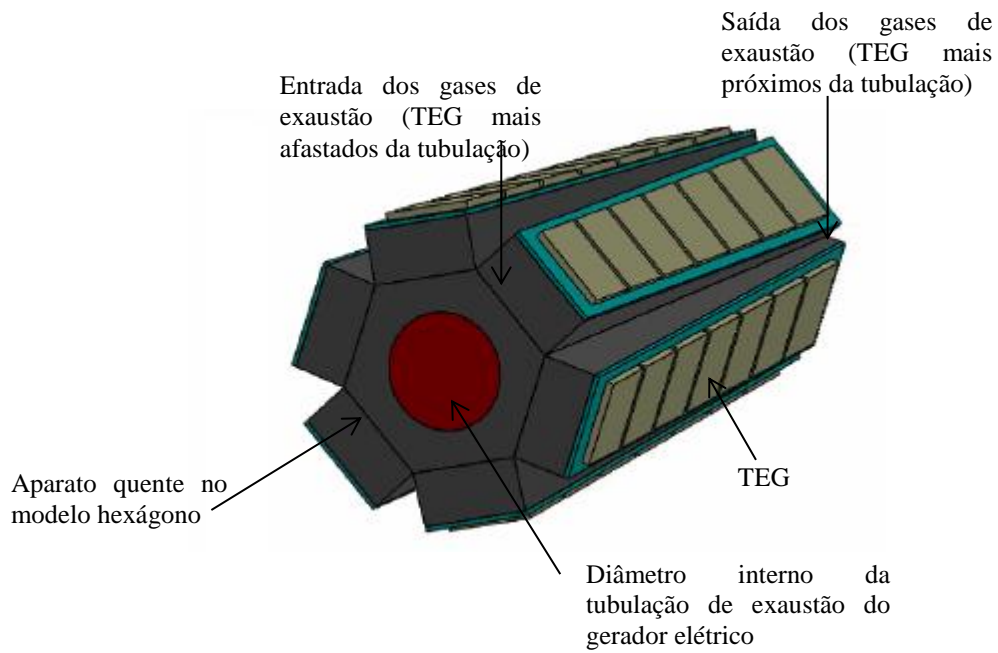


Figura 3.3 – Aparato quente proposto
Fonte: Gomes et al., 2015.

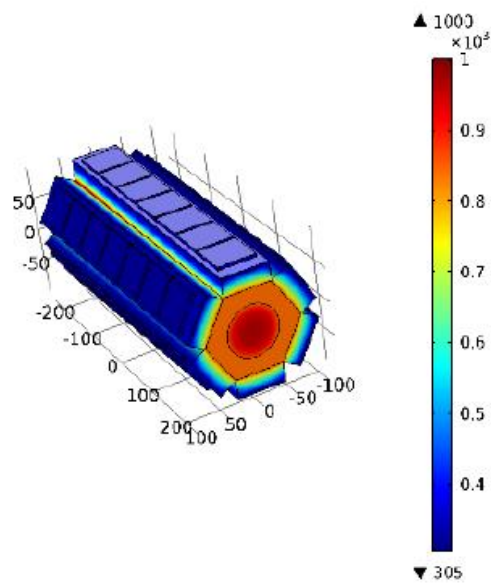


Figura 3.4 – Gradiente de temperatura para uma simulação de temperatura a 1000 °C
Fonte: Gomes et al., 2015.

Na Figura 3.5 são ilustradas as dimensões do aparato quente, sendo o comprimento de 462 mm, o material é em aço ABNT 1045 e deve ser retificado, polido e cromado.

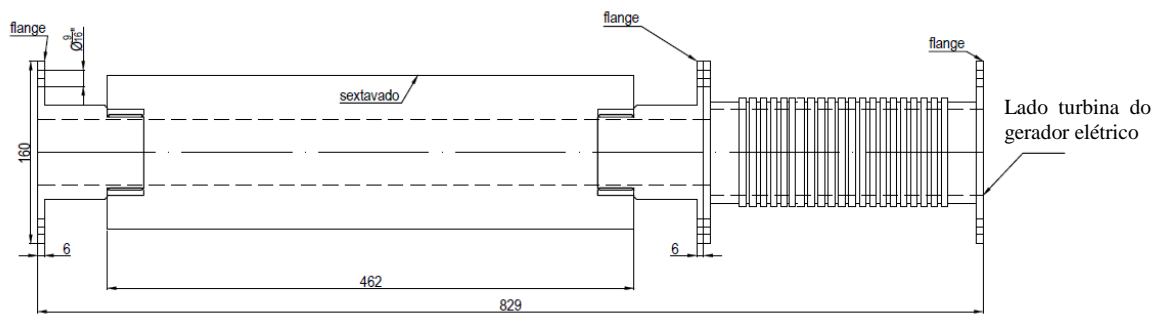


Figura 3.5 – Dimensões do aparato quente

3.1.4 Sistema de resfriamento

O sistema de resfriamento é composto por 6 (seis) caixas de resfriamento e 2 (dois) tanques pulmão.

A Figura 3.6 ilustra as caixas de resfriamento que devem garantir que haja uma boa transferência de calor entre o fluido de arrefecimento e o TEG, portanto, devem ter a superfície de contato bem lisa e com um material que garanta a transferência, além de ter que suportar o sistema que faz a pressão no TEG. Assim, as caixas devem ser desenvolvidas com tubo retangular de aço inoxidável 304 e espessura de 1,5 mm que possam ser instaladas no aparato quente, por isso, o comprimento da superfície de contato com os TEG é de 460 mm e largura de 70 mm. O material escolhido foi o aço inoxidável 304 para que o fluido de arrefecimento, que é água, não cause oxidação no sistema.

Como o sistema de pressão de entrada do fluido de arrefecimento é por gravidade, na parte superior da caixa deve possuir uma válvula reguladora de fluxo para retirar o ar existente dentro da caixa e permitir que o fluido entre. Além disso, dentro da caixa deve possuir um sistema de aletas para permitir que o fluido percorra de forma homogênea por toda a face que está em contato com o TEG.

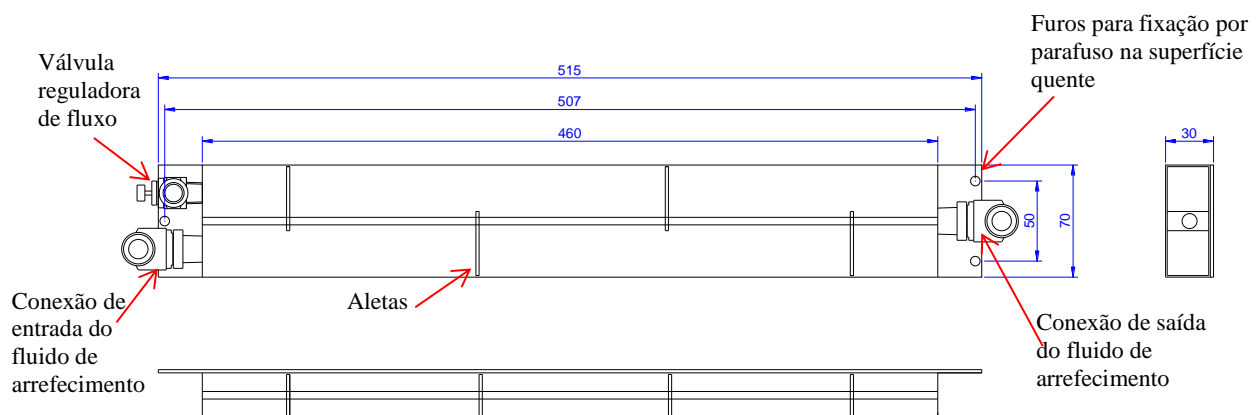


Figura 3.6 – Caixa de resfriamento

Conforme a Figura 3.7 apresenta e para garantir que o sistema tenha uma correta vazão do fluido de arrefecimento, devem ser construídos dois tanques pulmão em aço inoxidável 304 e com capacidade para 3,6 litros cada. Os tanques serão instalados acima das caixas de resfriamento e ao redor da tubulação dos gases de exaustão do gerador elétrico e, para que não haja transferência de calor entre os gases e o fluido de arrefecimento, foi colocado o isolante térmico em lã de rocha.

Como o sistema de pressão de entrada do fluido de arrefecimento é por gravidade, na parte superior de cada tanque pulmão deve ter uma conexão de entrada do fluido e uma válvula reguladora de vazão para retirar o ar existente dentro do tanque e permitir que o fluido entre. Na parte inferior de cada tanque pulmão deve ter três conexões de saída do fluido, pois cada tanque alimenta três caixas de resfriamento.

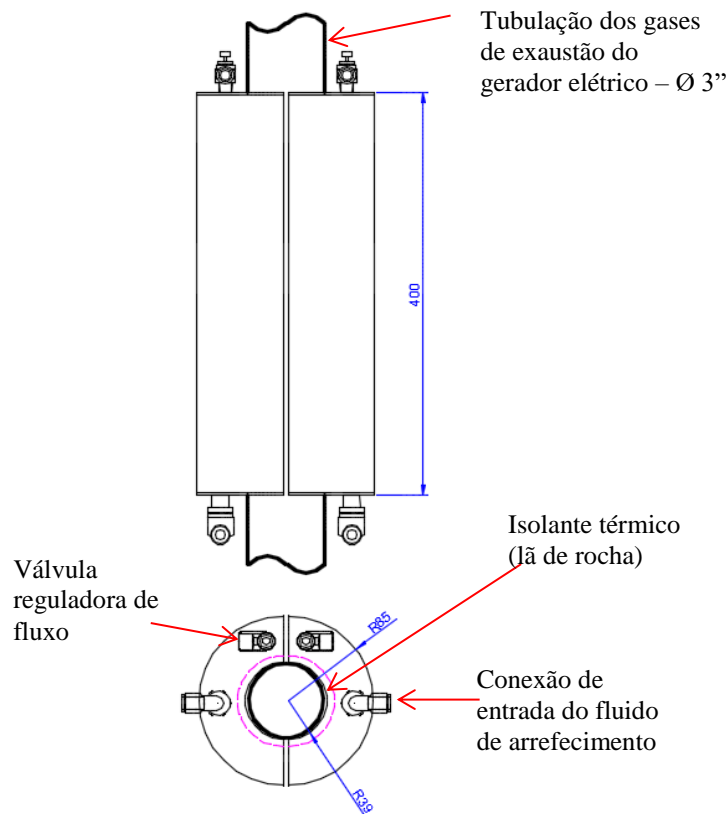


Figura 3.7 – Tanques pulmão

3.2 PLANTA DE GERAÇÃO TERMOELÉTRICA

Para melhor aproveitamento da fonte de calor, do sistema de resfriamento e, conseqüentemente, maior geração elétrica, a Planta de Geração Termoelétrica consiste em um dispositivo com geometria e material otimizados e engloba o projeto, a construção e a

montagem de uma planta de termogeradores, incluindo a parte mecânica, o circuito hidráulico e o controle e monitoramento da temperatura para obtenção de dados experimentais.

A montagem da planta é no escapamento de um gerador elétrico e, para propiciar a montagem de vários termogeradores em um único escapamento (com uma única fonte de calor), deve ser confeccionado um aparato quente hexagonal. Assim, conforme a Figura 3.8 apresenta, o calor do gás de exaustão do escapamento é transmitido para o lado quente de 42 (quarenta e dois) TEG, sendo que cada lado do hexágono possui 7 (sete) TEG. Conforme projeto da Figura 3.6, no lado frio, em cada lado do hexágono, são colocadas as caixas de resfriamento.

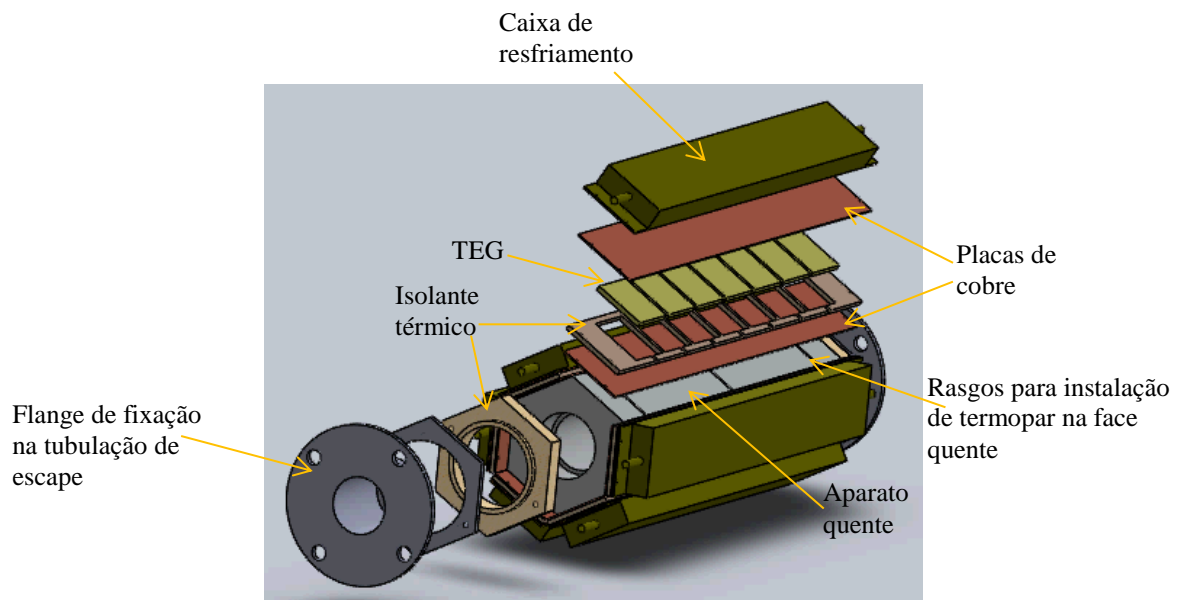


Figura 3.8 – Projeto da Planta de Geração Termoelétrica

Para que haja uma melhor condução entre o aparato quente e os TEG e entre os TEG e as caixas de resfriamento, devem ser colocadas placas de cobre de 1,07 mm de espessura. O material cobre foi escolhido por possuir uma condutividade térmica melhor que a do aço. A condutividade térmica de um material é a medida da capacidade do material conduzir calor, assim, um alto valor de condutividade indica que o material é um bom condutor de calor. Na temperatura ambiente, o cobre possui condutividade térmica de $401 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ e o aço de $52 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Toda a planta não foi construída com o material cobre, pois seu custo é alto e por oxidar facilmente.

Como a largura do TEG é um pouco menor que a largura do aparato quente, na montagem, uma pequena parte da superfície quente pode transferir calor para o lado frio. Para que isso não ocorra, um isolante térmico deve ser colocado. Deve ser colocado isolante

térmico também entre o aparato quente e os flanges de fixação da tubulação de escape, isso é para que os parafusos de fixação não transfira calor da superfície quente para as caixas de resfriamento.

Toda a planta de geração termoelétrica deve ser envolvida por abraçadeiras para pressão nos TEG, pois apenas os parafusos de fixação da caixa de resfriamento não são suficientes para pressionar os TEG no aparato. Segundo Thermonamic (2015), a Figura 3.9 ilustra que mesmo as superfícies que parecem estar lisas e planas, na verdade, quando são ampliadas para melhor visualização, possuem “colinas”, “picos” e “vales”. Quando as superfícies entram em contato uma com a outra, apenas os picos fazem contato, gerando uma transferência térmica ruim e uma consequente baixa geração elétrica do TEG, pois o calor só pode passar por onde as superfícies realmente se tocam. Estima-se que a quantidade média de contato entre duas superfícies lisas é, na realidade, apenas 5 %, os outros 95 % são vazios.

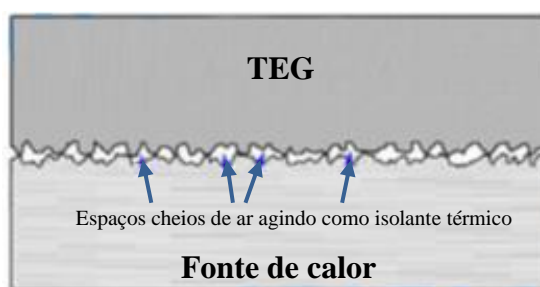


Figura 3.9 – Superfície de contato do TEG se mal pressionado
Fonte: Thermonamic, 2015.

Um Estudo de Caso feito por Gomes (2015) no simulador *Comsol Multiphysics*, do perfil de velocidade e da temperatura no interior da tubulação dos gases de exaustão, mostra que a implantação de uma mola no interior da tubulação pode aumentar em 8,7% a temperatura média na superfície do aparato quente. A simulação foi feita com uma mola de 10 mm de diâmetro do fio e 8 (oito) revoluções no interior da tubulação. Foi comparada a variação de temperatura na superfície para dois dutos idênticos de aço com temperatura na fonte quente de 500°C.

O objetivo de turbilhonar o fluido aparenta ser completamente satisfeito quando observado as Figura 3.10 (a) e (b). Na Figura 3.10 (b) observa-se que o fluido muda sua direção e ocorre um maior desprendimento de energia térmica.

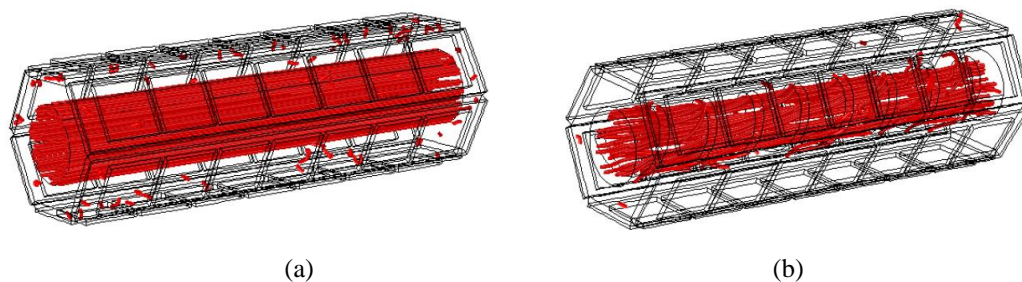


Figura 3.10 – Simulação do perfil de velocidade no interior da tubulação dos gases de exaustão. (a) Fluxo linear do fluido (gás) sem mola; (b) Interferência no fluxo do fluido (gás) com mola.

Fonte: Gomes, 2015.

Com essa simulação feita, deve ser colocado dentro do aparato quente uma mola de 10 mm de diâmetro do fio e 8 (oito) revoluções.

3.2.1 Sistema de controle e supervisão dos dados

Para que a Planta de Geração Termoelétrica funcione em sua máxima eficiência, é necessário que haja controle e supervisão da temperatura no lado quente e frio do TEG, pois sua geração é conforme ΔT gerado nas duas faces. Como o lado quente é proveniente dos gases de exaustão e depende da potência requerida do gerador elétrico, não é possível o controle da temperatura, mas é possível supervisionar qual sua temperatura máxima e instalar placas com espessuras adequadas para que a temperatura dos TEG não ultrapasse o máximo permitido, conforme descrito no item 3.1.3.

Para controle e supervisão da temperatura, existem 8 (oito) pontos de medição que podem ser alterados de posição, conforme a necessidade de teste a ser realizado. Mas, alguns pontos são essenciais, como a temperatura nos lados frio e quente dos TEG e a temperatura dentro do escapamento.

Os sensores de temperatura utilizados para medição são termopares do tipo K conectados a transdutores de temperatura, que são responsáveis por converter o sinal de tensão de saída dos termopares para sinal de corrente (4 a 20 mA). O sinal de corrente dos transdutores é ligado a entradas analógicas de um Controlador Lógico Programável (CLP), que faz a leitura e controla todo o sistema. No Apêndice A está o esquema elétrico dos instrumentos.

Assim, os pontos de medição considerados nos testes devem ser:

- 6 termopares modelo sem proteção na junta de medição: cada um termopar faz a leitura da água em cada caixa de resfriamento (face fria);

- 1 termopar no aparato quente, medindo a temperatura da face quente do TEG, instalado logo após a saída dos gases da turbina do gerador elétrico e entrada no aparato quente (modelo sem proteção na junta de medição);
- 1 termopar no aparato quente medindo a temperatura da face quente do TEG instalado na saída do aparato quente (modelo sem proteção na junta de medição);
- 1 termopar (modelo com bainha) medindo a temperatura dos gases de exaustão. Como o controle do CLP é limitado em 8 pontos, e a medição de temperatura dos gases é apenas para informação, este ponto de temperatura é medido em um multímetro com escala de temperatura.

Para a leitura da temperatura no aparato quente, foram feitos rasgos (rebaixos) para que o termopar fosse instalado, não atrapalhando assim, que o TEG fosse instalado corretamente. Mas essa montagem pode atrapalhar a real leitura da face quente.

O ideal é que a leitura de temperatura do lado frio fosse, exatamente, na face do TEG, mas essa medição não é possível, pois como o TEG deve ficar pressionado entre as fontes quente e fria, colocar um termopar ali no meio ocasionaria uma má montagem da planta. Assim, o termopar foi instalado para ser feita a leitura da água dentro de cada caixa de resfriamento, não sabendo exatamente qual é a temperatura na face do TEG.

Para o controle da temperatura na face fria, o termopar faz constantemente a leitura da água na caixa de resfriamento e envia o sinal ao CLP. O CLP, conforme programação definida, abre ou fecha uma válvula do tipo *ON-OFF* (normalmente fechada) para que água fria entre dentro da caixa de resfriamento e troque calor com a água quente que estava lá dentro. O valor do *setpoint* da temperatura na face fria do TEG é editável, podendo ficar em qualquer valor conforme as curvas do TEG (Anexo B). Para esse trabalho, o controle é feito para a face fria nas faixas de temperatura de 30 °C e 50 °C. Esses valores foram definidos em função das curvas do TEG disponíveis no catálogo do fabricante. Levou-se em consideração também, a relação rendimento *versus* economia de água para resfriamento, pois quanto menor a temperatura no TEG, maior é o seu rendimento, mas, conseqüentemente, mais água será gasta para manter a face nessa temperatura.

Assim, os controles de temperatura da face fria são nas seguintes faixas:

- Controle da face fria a 30 °C: a válvula abre para a troca de calor da água quando atinge 30 °C e fecha quando sua temperatura cai para 28 °C;
- Controle da face fria a 50 °C: a válvula abre para troca de calor da água quando atinge 50 °C e fecha quando sua temperatura cai para 47 °C.

Para a supervisão das variáveis de temperatura, deve haver uma comunicação entre o CLP e um Sistema Supervisório (Elipse E3 da Elipse Software). Na tela de monitoração das variáveis do processo do Sistema Supervisório deve ser possível visualizar as variáveis de temperatura e os alarmes do processo. Deve ser apresentado o relatório do processo, onde será possível visualizar a data, a hora e o valor de temperatura de cada TEG.

Na tela de monitoração das variáveis do processo deve existir um botão que altera o modo de operação das válvulas *ON-OFF*. Dois modos devem ser permitidos: o “Modo Automático”, que significa que o controle da temperatura na face fria do TEG ocorre automaticamente, ou seja, as válvulas abrem ou fecham conforme o valor do *setpoint* da temperatura na face fria do TEG e o “Modo Manual”, que significa que as válvulas devem ser abertas manualmente para que ocorra a troca de calor da água. Para abri-las manualmente, deve-se clicar em cima do desenho de cada válvula da tela, conforme escrita V1, V2, V3, V4, V5, V6. Nessa mesma tela deve ser possível visualizar as temperaturas do processo, sendo T₁ a T₆ as temperaturas da água das caixas de resfriamento, T₇ a temperatura da parte superior do aparato quente e T₈ a temperatura da parte inferior do aparato quente.

3.2.2 Sistema completo da Planta de Geração Termoelétrica

A Figura 3.11 apresenta o fluxograma completo da Planta de Geração Termoelétrica. É apresentado como o aparato quente com os TEG devem ser montados na tubulação dos gases de exaustão do motogerador a diesel, a parte de refrigeração, com as caixas de resfriamento e os tanques pulmão, e os pontos de medição de temperatura. Como o aparato quente possui seis lados, a caixa de resfriamento do lado esquerdo do fluxograma representa as faces frias de 1 a 3 e a caixa de resfriamento do lado direito do fluxograma representa as faces frias de 4 a 6, sendo que cada face fria possui sua válvula de controle de vazão (FV) e sua medição de temperatura (TT). Referente à face 1, FV 01 é a válvula de controle de vazão e TT 01 é a medição de temperatura e, assim, sucessivamente para cada face.

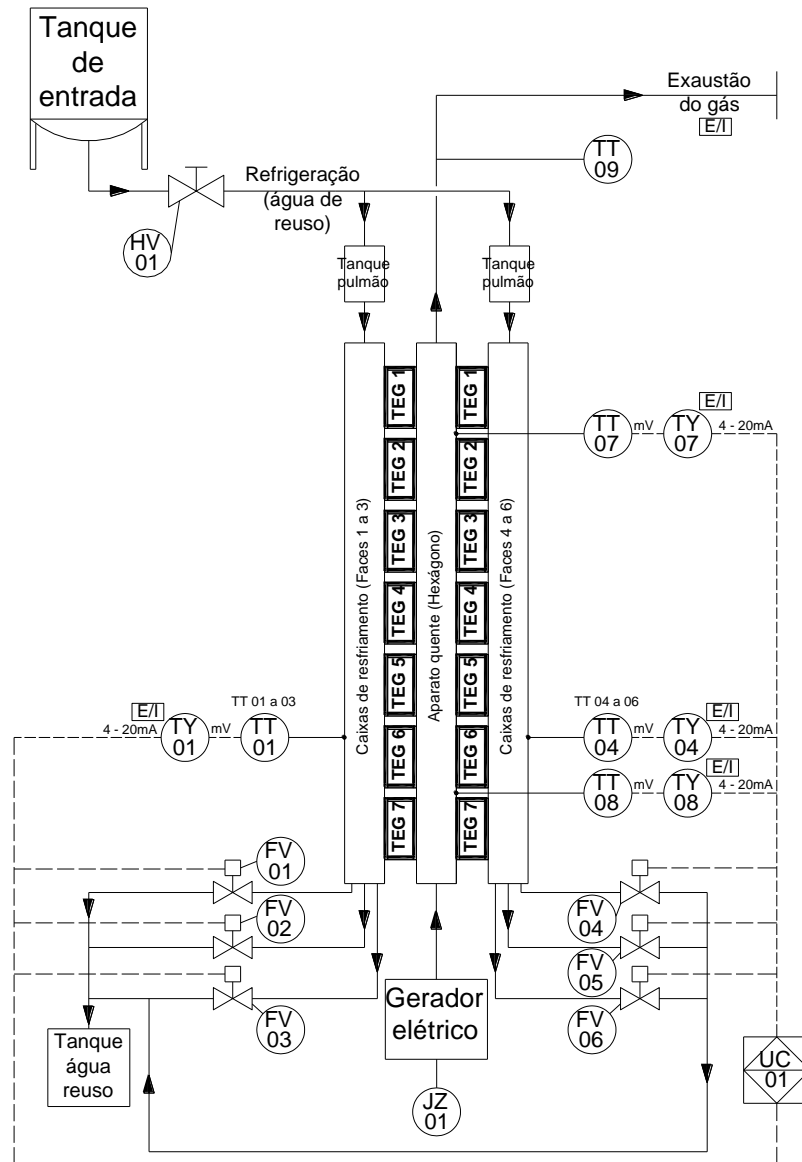


Figura 3.11 – Fluxograma da Planta de Geração Termoelétrica

O fluxograma da Figura 3.12 apresenta que fluido utilizado na face fria do TEG é água de reuso. A água é proveniente dos tanques de lavar roupas do IFG Campus Goiânia, que passa por uma zona de raízes e depois, através de uma bomba, é levado para a caixa d'água de 500 l. Da caixa d'água, o fluido vai para o tanque de entrada da Planta de Geração Termoelétrica, depois segue para os tanques pulmão, para as caixas de resfriamento e, por fim, retorna para o tanque de mistura e filtração. Dessa forma, a Planta de Geração Termoelétrica não tem gasto com água potável, apenas com a energia elétrica para funcionamento da bomba elétrica, que tem uma vazão de recalque de $5 \text{ m}^3/\text{h}$ e potência de $\frac{1}{2}$ cv.

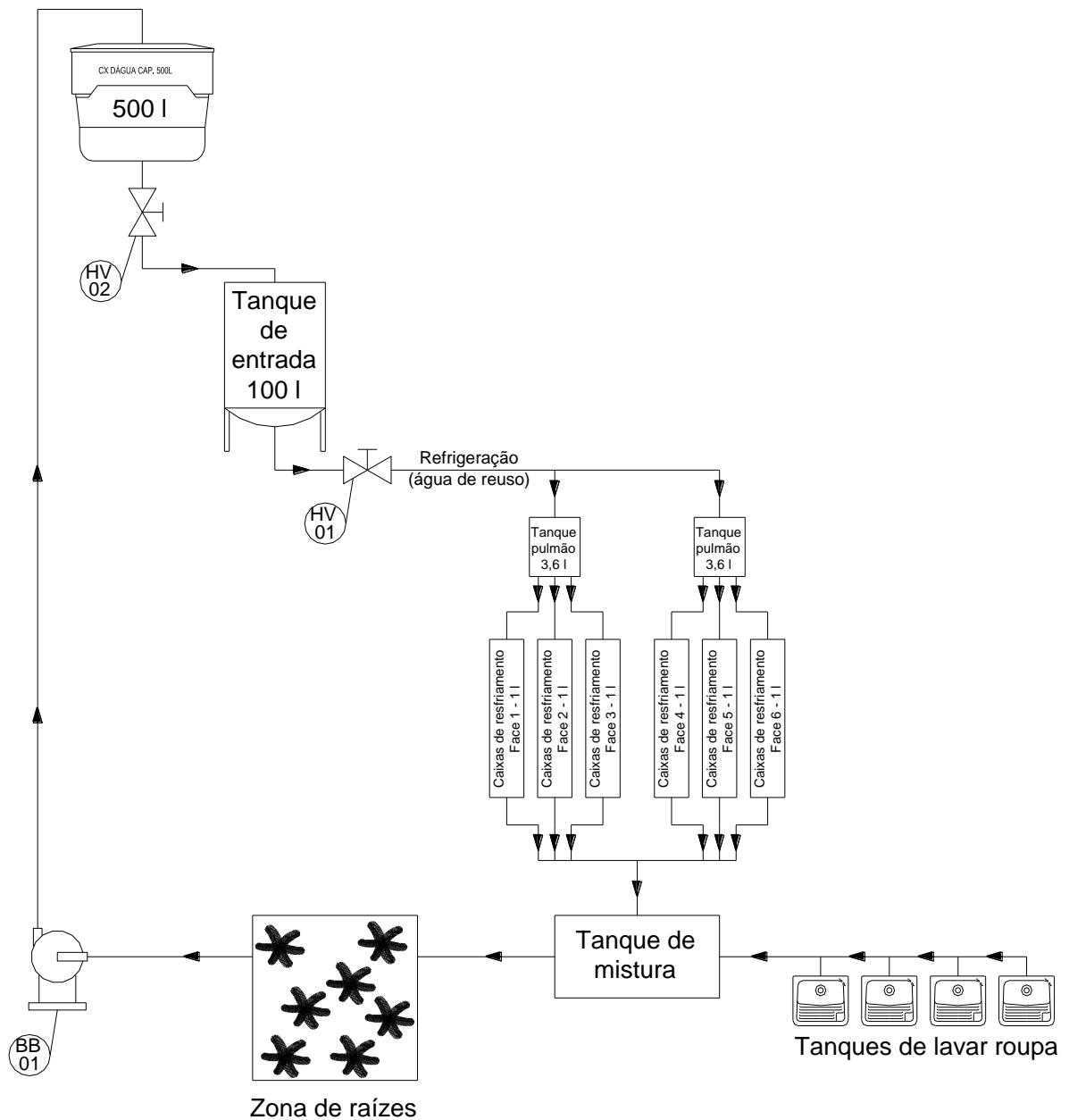


Figura 3.12 – Fluxograma da água de reuso

3.3 CÁLCULO DA VAZÃO DO FLUIDO PARA REFRIGERAÇÃO

Para que o TEG atinja a máxima eficiência, é necessário que o seu lado frio fique a 30 °C. Como nesse projeto a refrigeração é por meio de água de reuso que circula em caixas de resfriamento, é necessário o cálculo do volume de água para que a temperatura do lado frio do TEG fique nessa temperatura.

Para o cálculo da massa de água, é necessário o cálculo do calor, conforme (16) e (17). Substituindo (17) em (16), tem-se (18) para o cálculo da massa.

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t} \quad (16)$$

$$Q = m \cdot Cp \cdot \Delta T \quad (17)$$

$$m = \frac{\Phi \cdot \Delta t}{Cp \cdot \Delta T} \quad (18)$$

Onde:

Φ = Fluxo de calor (cal s⁻¹)

m = massa (g)

Q = Calor (cal)

Δt = diferença de tempo (s)

ΔT = diferença de temperatura (K)

Cp = Calor específico (cal g⁻¹K⁻¹)

3.4 SIMULAÇÃO DOS PARÂMETROS DO TERMOGERADOR

Baseado no circuito elétrico dos termogeradores da Figura 2.6 e a fim de simular a geração de tensão, corrente e potência do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 nas diversas condições de temperatura Th e Tc , deve-se montar e simular, no *software* Simulink®, o circuito equivalente da Figura 3.13 e Figura 3.14. A fonte de tensão V_S é proporcional a diferença de temperatura (ΔT) do lado quente (Th) e lado frio (Tc) do TEG e do coeficiente de Seebeck. Quando o TEG estiver sem carga, a corrente deve ser zero e a tensão de circuito aberto deverá ser de 9,2 V quando $Th = 350$ °C e $Tc = 30$ °C (condições do catálogo do fabricante). Deve-se simular o TEG sem carga para o lado frio a 30 °C e 50 °C.

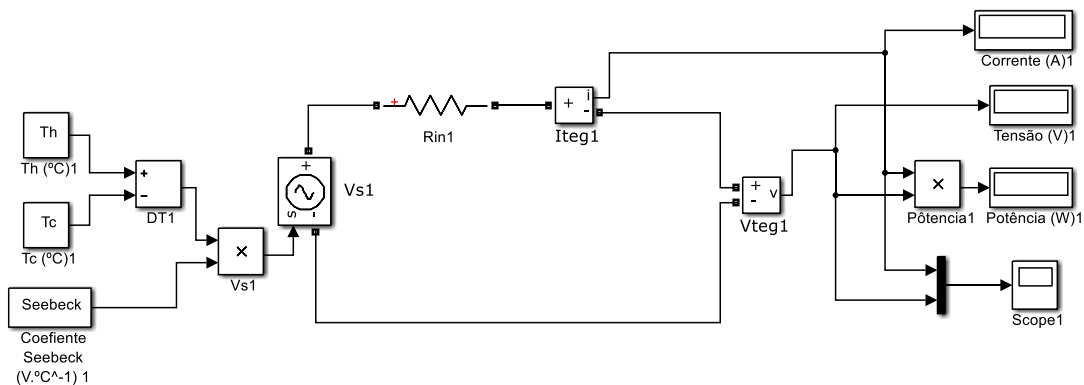


Figura 3.13 – Circuito equivalente do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 sem carga

Quando, na Figura 3.14, o TEG estiver operando na sua máxima eficiência, a resistência externa (R_{ext}) será igual à resistência interna do TEG (R_{int}), ou seja, $0,97 \Omega$ quando nas condições de $T_h = 350 \text{ °C}$ e $T_c = 30 \text{ °C}$. O valor de tensão deve ser metade do da tensão de circuito aberto e a corrente deve ser metade da corrente de curto circuito. Deve-se simular o TEG com carga para o lado frio a 30 °C e 50 °C .

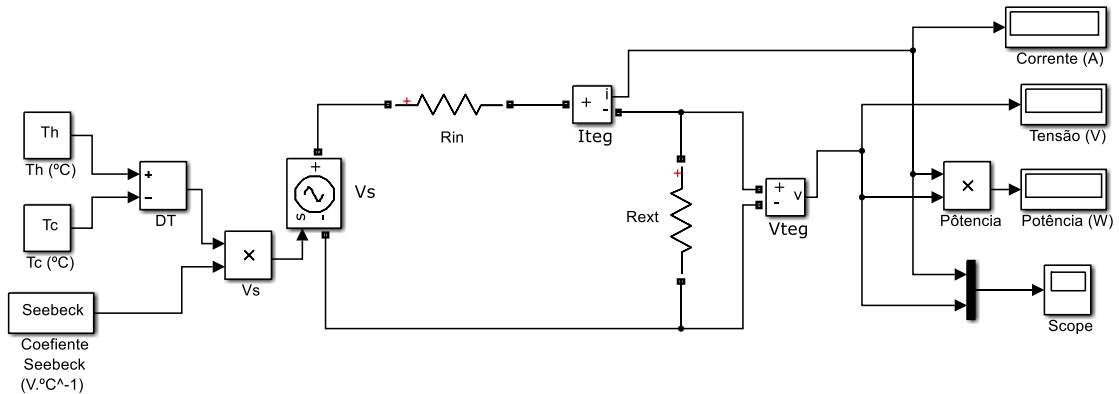


Figura 3.14 – Circuito equivalente do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 com carga

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou a metodologia utilizada para o desenvolvimento da Planta de Geração Termoelétrica e listou o material utilizado, descrevendo detalhadamente a construção e a montagem de todos os itens. Apresentou como os testes da planta devem ser realizados, qual a metodologia para o cálculo da vazão do fluido para refrigeração e para simulação dos parâmetros do termogerador.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados do teste em bancada de apenas um TEG, do teste do aparato quente sem e com mola e do teste da Planta de Geração Termoelétrica considerando as temperaturas do lado frio a 30 °C e 50 °C . São apresentados também os resultados da vazão obtida no sistema.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo é apresentada a validação do funcionamento do TEG escolhido e são descritos os resultados dos testes do aparato quente sem e com mola e da Planta de Geração Termoelétrica. São mostrados os valores das temperaturas dos lados quente e frio, os valores de tensão e da corrente gerados por cada TEG e da vazão de água de reuso usado na refrigeração.

4.1 TESTE DE BANCADA DO FUNCIONAMENTO DO TEG

Antes de realizar os ensaios experimentais dos TEG na Planta de Geração Termoelétrica, foi realizado um teste de bancada com um TEG a fim de validar o seu funcionamento.

O teste de bancada consiste em montar e pressionar um TEG entre uma fonte quente (T_h) e uma fria (T_c), conforme Figura 4.1. A face quente é de alumínio e recebe calor de um bico de Bunsen com gás liquefeito de petróleo (GLP). A face fria consiste em uma caixa de resfriamento fabricada em aço por onde circula água. O controle de fluxo é por meio de válvula e CLP, o mesmo da Planta de Geração Termoelétrica. Um termopar tipo K (modelo sem proteção na junta de medição) foi colocado na face quente (TT 02) e outro na água de refrigeração (TT 01). Os valores de tensão no TEG com carga (V_{TEG}) e da corrente do TEG (I_{TEG}) foram medidos por um multímetro.

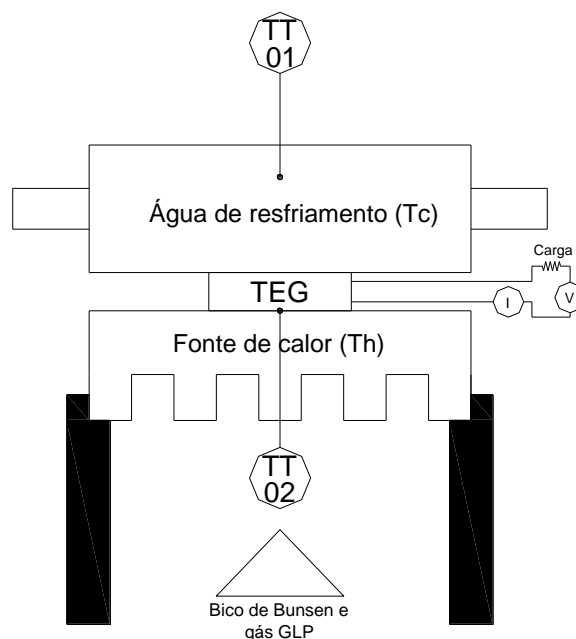


Figura 4.1 – Esquema de montagem do teste de bancada de um TEG

Na Figura 4.2 é possível visualizar a montagem do teste de bancada. A pressão do TEG entre as faces quente e fria foi através de um arame.

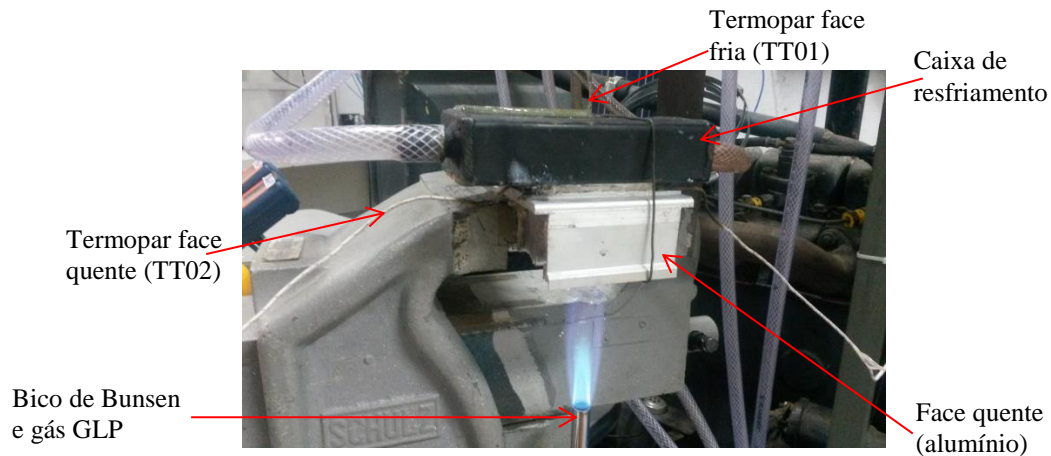


Figura 4.2 – Teste de bancada de um TEG, com bico de Bunsen e gás GLP

Na Figura 4.3 é apresentada a imagem térmica feita por um Termovisor a laser modelo ITTMV-100 da Instrutemp. Na imagem é possível visualizar, pelo espectro de cores, que a temperatura da caixa de resfriamento (T_c) fica em torno de 30 °C e que a fonte de calor (T_h), após um tempo para a equalização da temperatura, fica em torno de 300 °C.

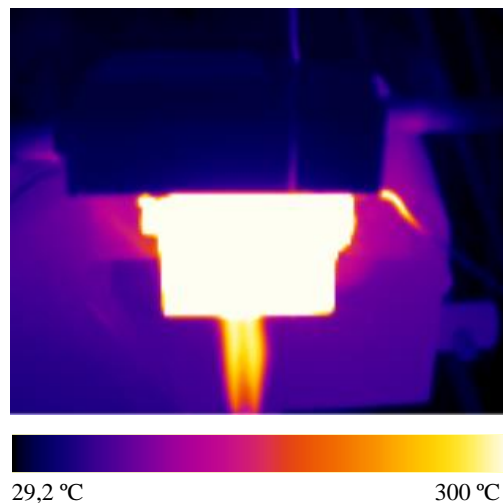


Figura 4.3 – Imagem térmica do teste de bancada

Para o teste de bancada foram consideradas as seguintes condições: $T_h = 297$ °C e $T_c = 27$ °C (temperatura na água), na face fria a temperatura ficou próxima a 30 °C. Os valores da tensão (V_{TEG}) e da corrente (I_{TEG}) gerados pelo TEG e os valores da resistência de carga utilizados são apresentados na Tabela 4.1. Os valores considerados da resistência de carga são aleatórios e os disponíveis comercialmente. A potência máxima (P_{max}) foi calculada conforme (5), pois o TEG está ligado a uma carga.

Tabela 4.1 – Dados de tensão, corrente e potência gerada pelo TEG no teste de bancada

Resistência de carga R_{ext} (Ω)	V_{TEG} (V)	I_{TEG} (A)	P_{max} (W)
Circuito aberto	5,150	0,000	0
220	5,127	0,012	0,061524
110	5,100	0,045	0,2295
29,15	4,950	0,176	0,8712
21,15	4,872	0,232	1,130304
7,95	4,542	0,535	2,42997
6,95	4,468	0,613	2,738884
5,7	4,370	0,700	3,059
3,2	3,857	1,193	4,601401
2,9	3,739	1,288	4,815832
2,4	3,465	1,490	5,16285
2,25	3,465	1,522	5,27373
2,15	3,405	1,573	5,356065
2,05	3,349	1,633	5,468917
1,95	3,283	1,698	5,574534
1,85	3,201	1,774	5,678574
1,75	3,130	1,850	5,7905
1,65	3,050	1,928	5,8804
1,55	3,000	1,987	5,961
1,45	2,879	2,100	6,0459
1,35	2,763	2,220	6,13386
1,25	2,639	2,309	6,093451
1	2,705	2,245	6,072725
0,9	2,525	2,345	5,921125
0,8	2,421	2,514	6,086394
0,7	2,270	2,618	5,94286
0,6	2,070	2,800	5,796
0,5	1,888	2,973	5,613024
0,4	1,685	3,230	5,44255
0,3	1,435	3,463	4,969405
0,2	1,101	3,795	4,178295
0,1	0,739	4,117	3,042463
0,05	0,533	4,310	2,29723
Curto-circuito	0,000	4,918	0

Com esse teste não foi possível a reprodução ideal para a geração termoeétrica máxima do TEG, pois a temperatura da face quente ficou abaixo de 350 °C e a pressão feita no TEG não foi medida (provavelmente ficou abaixo do requerido pelo fabricante), mas é possível ver que funciona. Durante o teste, observa-se que a tensão de circuito aberto do TEG varia ao longo do tempo, pois como a válvula de controle é do tipo *ON-OFF*, assim que ela

abre para resfriar a face fria, o TEG tem sua geração termoelétrica aumentada, pois aumenta o ΔT , mas caso a válvula fique aberta por muito tempo, a face fria do TEG resfria um pouco a face quente, diminuindo o ΔT e, conseqüentemente, a geração termoelétrica.

Conforme dados da teoria do TEG e da Tabela 4.1, observa-se que a potência máxima (MPP) foi quando a resistência de carga ($R_{ext} = 1,35 \Omega$) ficou próxima à resistência interna do TEG ($R_{int} = 0,97 \Omega$). Elas não foram iguais, porque conforme a teoria dos termogeradores, esses valores só teriam o mesmo valor se as temperaturas T_h e T_c tivessem se mantido constantes, o que não ocorre em aplicações práticas devido aos fatores externos.

Comparando os dados experimentais do teste de bancada com os dados do fabricante do TEG (ANEXO B), verifica-se que para estas condições de T_h e T_c atribuídas ao TEG, houve uma geração de tensão de circuito aberto de 70% do catálogo, pois o TEG deveria gerar uma tensão de 7,4 V e gerou apenas 5,15 V. Esta diferença de geração pode, em parte, ser atribuída a má pressão do TEG entre as fontes quente e fria. Em relação à potência, deveria ter sido gerado 16 W e gerou 6,1 W, 38% do catálogo.

A Figura 4.4 apresenta as curvas de desempenho do TEG (V x I e P x I) do teste em bancada.

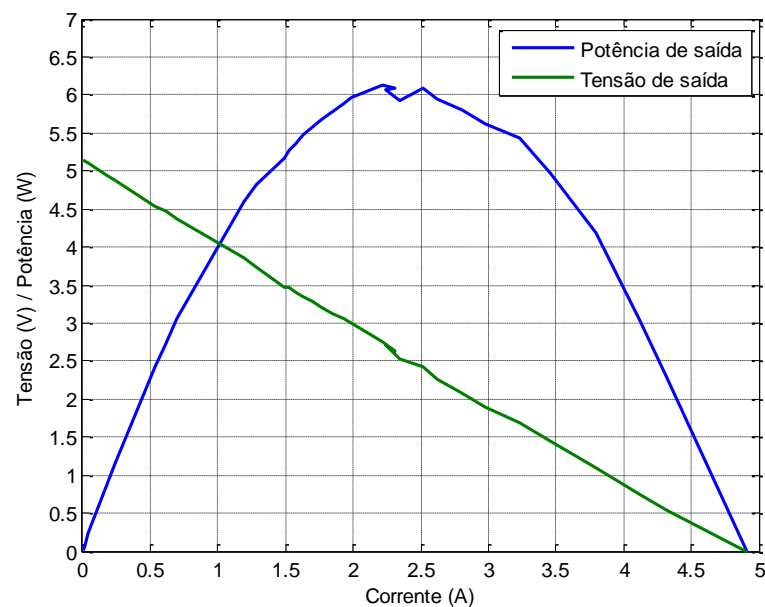


Figura 4.4 – Curva de desempenho do TEG do teste em bancada com $T_h=297 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T_c=30 \text{ }^\circ\text{C}$

4.2 TESTE DO APARATO QUENTE

Em um primeiro momento, foram realizados ensaios experimentais no gerador elétrico e no aparato quente a fim de monitorar algumas variáveis do processo, tais como:

temperatura, pressão e velocidade dos gases de exaustão e a máxima temperatura da superfície do aparato quente.

A Figura 4.5 apresenta o aparato quente montado na tubulação dos gases de exaustão, ainda sem os TEG e sem as caixas de resfriamento. O aparato foi montado após o amortecedor de vibração. É possível visualizar os rasgos (feito em apenas uma face) para instalação dos termopares na face quente.

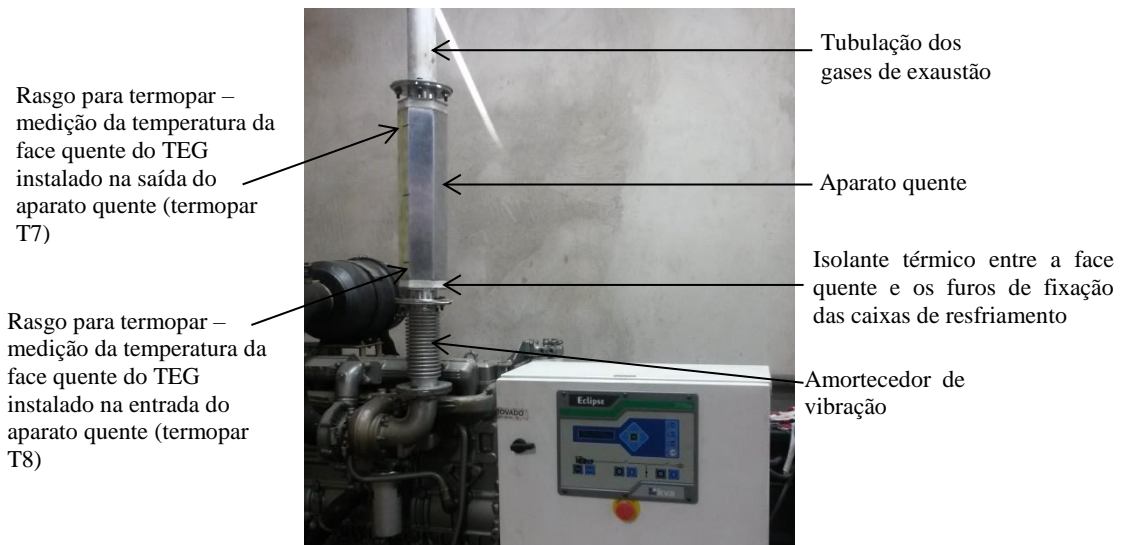


Figura 4.5 – Aparato quente montado na tubulação dos gases de exaustão

No teste foram medidas as temperaturas dos gases de exaustão e da face quente, sem os TEG, para diferentes condições: aparato quente sem e com mola e para duas potências do gerador elétrico, 60 kW e 80 kW. Este teste serve para validação do estudo feito no item 3.2 e para verificação da máxima temperatura da face quente para diferentes potências do gerador elétrico.

Os seguintes dados dos gases de exaustão foram obtidos (tubulação de $\varnothing 3''$): Pressão = 0,2713 psi; Velocidade = 55,80 m/s. Esta medição foi realizada já no último ponto de saída da tubulação, após o silenciador.

No teste do aparato quente sem mola, os pontos de medição considerados são apresentados na Figura 4.6 e os valores obtidos estão na Tabela 4.2. Na Figura 4.6 (a) é apresentada a imagem térmica do aparato quente sem mola. Pelo espectro de cores, observa-se que na parte inferior do aparato a temperatura é maior que na parte superior e que a temperatura no rasgo é maior que na face. No teste do aparato quente com mola, os pontos de medição considerados são apresentados na Figura 4.7 e os valores obtidos estão na Tabela 4.2. Na Figura 4.7 (a) é apresentada a imagem térmica do aparato quente com mola. Pelo espectro

de cores, observa-se que a temperatura ficou mais equalizada ao longo do aparato e que a temperatura no rasgo é maior que na face.

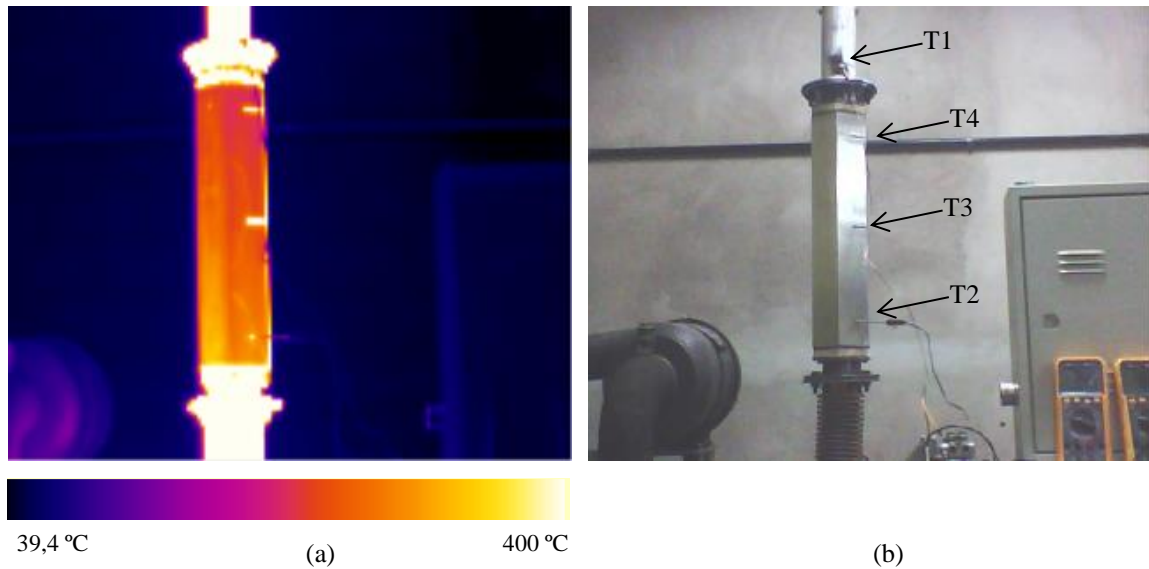


Figura 4.6 – (a) Imagem térmica do aparato quente sem TEG e sem mola; (b) Aparato quente sem os TEG

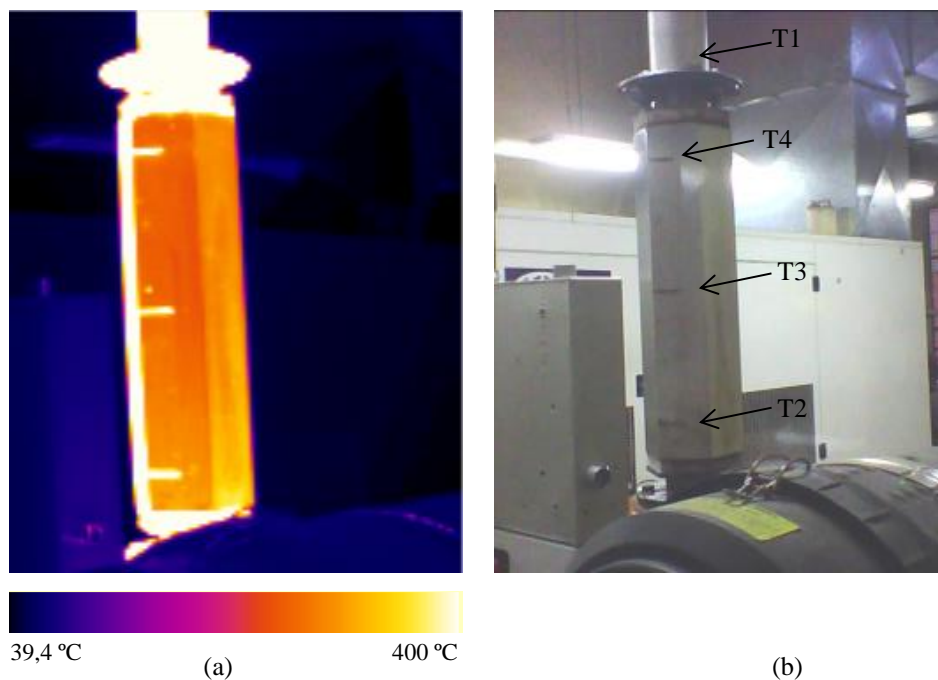


Figura 4.7 – (a) Imagem térmica do aparato quente sem TEG e com mola; (b) Aparato quente sem os TEG

Nos dois testes, o ponto de medição de temperatura T_1 foi obtido através do termopar tipo K modelo com baixa e colocado dentro do escapamento. Os pontos de medição de temperatura T_2 , T_3 e T_4 foram obtidos através do termopar tipo K, modelo sem proteção na junta de medição, e colocados no rasgo da face quente, sendo T_2 a medição na parte inferior

do aparato (logo na saída da turbina do gerador elétrico), T_3 a medição na média do aparato e T_4 a medição na parte superior do aparato. As medições foram realizadas após estabilização das temperaturas.

Tabela 4.2 – Dados de temperatura do aparato quente sem TEG e comparação sem mola e com mola

Potência gerador elétrico (kW)	Condições	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)
60	Sem mola	406	290	274	245
	Com mola	441	296	275	268
80	Sem mola	486	350	314	290
	Com mola	534	350	330	325

Pelos resultados dos testes do aparato quente sem e com mola e considerando a potência do gerador elétrico em 80 kW, tem-se que a temperatura dentro da tubulação dos gases (T_1) aumentou em aproximadamente 9% quando a mola foi colocada, comprovando o estudo do item 3.2. A temperatura na parte inferior da face quente (T_2) continuou a mesma, porém as temperaturas (T_3 e T_4) ao longo do aparato equalizaram. A temperatura da parte superior da face quente aumentou em 10,7%.

4.3 TESTE DA PLANTA DE GERAÇÃO TERMOELÉTRICA

Para validação da Planta de Geração Termoelétrica foram realizados dois testes: temperatura do lado frio do TEG a 30 °C e a 50 °C.

Em todos os testes o aparato quente foi montado com mola e não foram utilizadas placas com espessuras adequadas e com distanciamento (conforme estudo do item 3.1.3) para equalizar a temperatura no sentido longitudinal do aparato quente porque, a temperatura, na entrada da planta, já ficou em 350 °C (temperatura da máxima eficiência de geração do TEG) e na saída da planta a temperatura diminuiu consideravelmente. Se instalassem placas para equalização, a geração térmica dos TEG iria cair, pois todo o aparato quente iria se estabilizar na menor temperatura.

A Figura 4.8 apresenta o controlador lógico programável (CLP) utilizado para o controle das temperaturas das faces frias. Para a supervisão das variáveis de temperatura, há uma comunicação entre o CLP e um Sistema Supervisório (Eclipse E3 da Eclipse Software) através da porta serial RS 232 e do protocolo de rede industrial APR03 (específico do CLP utilizado).



Figura 4.8 – Painel elétrico com o CLP

A Figura 4.9 apresenta a tela de monitoração das variáveis do processo do Sistema Supervisório, que é a tela onde é possível visualizar as variáveis de temperatura e os alarmes do processo. No Sistema Supervisório, os termopares T_1 a T_6 são as temperaturas da água das caixas de resfriamento das faces 1 a 6, respectivamente, o termopar T_7 é a temperatura da parte superior do aparato quente e o termopar T_8 é a temperatura da parte inferior do aparato quente. A temperatura dos gases de escape (T_9) foi medida por um termopar ligado a um multímetro.

Na tela de monitoração das variáveis do processo da Figura 4.9, existe um botão localizado no quadro de comando que altera o modo de operação das válvulas *ON-OFF*. Se o botão estiver com a escrita “Modo Automático”, significa que o controle da temperatura na face fria do TEG ocorre automaticamente, ou seja, as válvulas abrem ou fecham conforme o valor do *setpoint* da temperatura na face fria do TEG. Se o botão estiver com a escrita “Modo Manual”, significa que as válvulas devem ser abertas manualmente para que ocorra a troca de calor da água. Para abri-las manualmente, basta clicar em cima do desenho de cada válvula da tela, conforme escrita V1, V2, V3, V4, V5, V6.

A Figura 4.10 apresenta o relatório do processo, onde é possível visualizar a data, a hora e o valor de temperatura que estava em cada caixa de resfriamento.

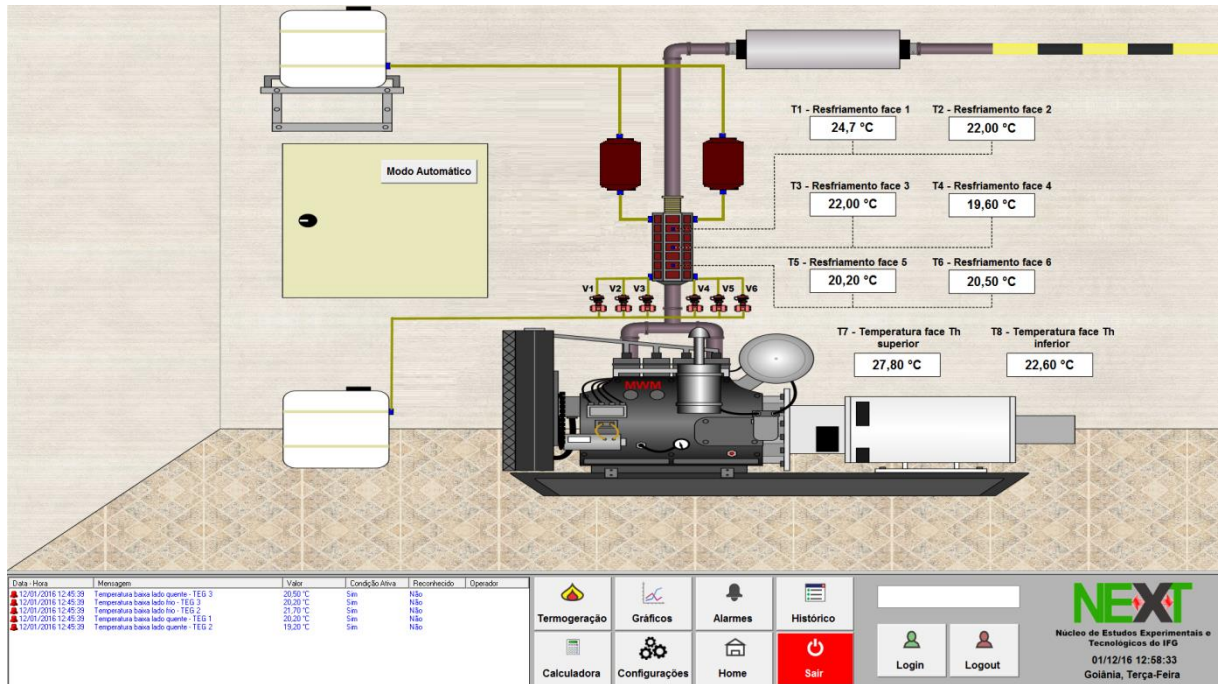


Figura 4.9 – Sistema Supervisório – Tela de monitoração das variáveis do processo

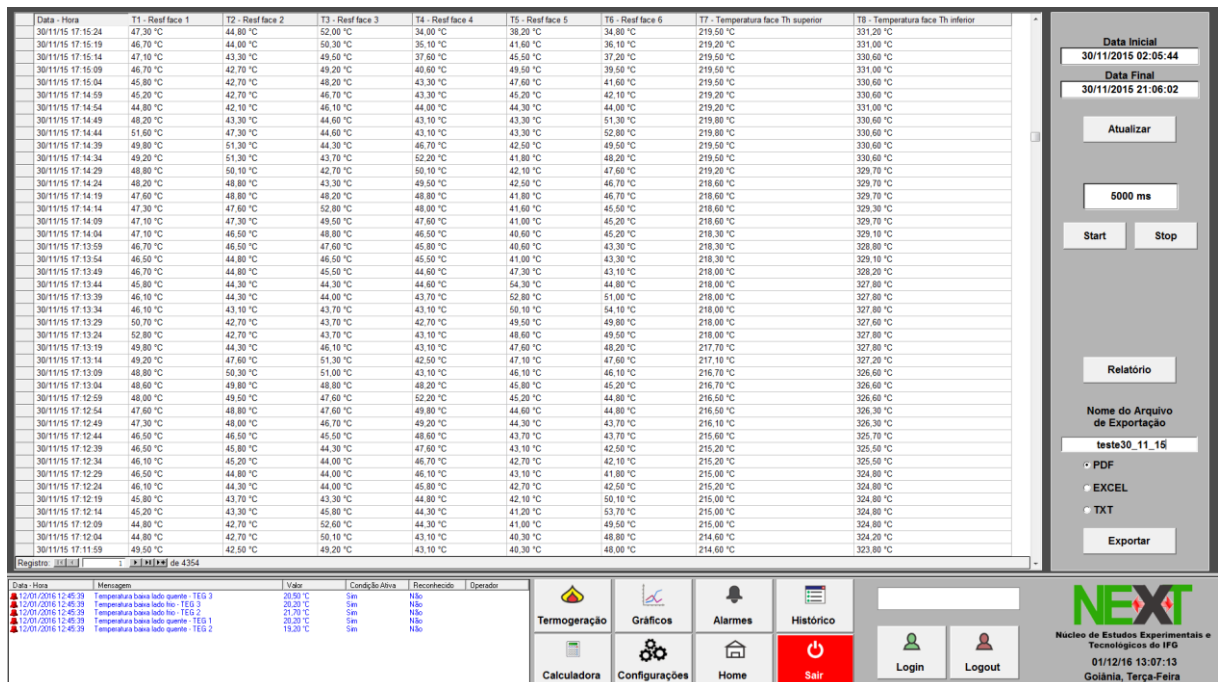


Figura 4.10 – Sistema Supervisório – Tela de relatórios

A disposição dos TEG e dos termopares no aparato quente foi feita conforme a Figura 4.11. O TEG 1 montado na face 1 foi denominado como 1.1, o TEG 2 montado na face 1 foi

denominado como 1.2, o TEG 1 montado na face 2 foi denominado 2.1 e assim sucessivamente.

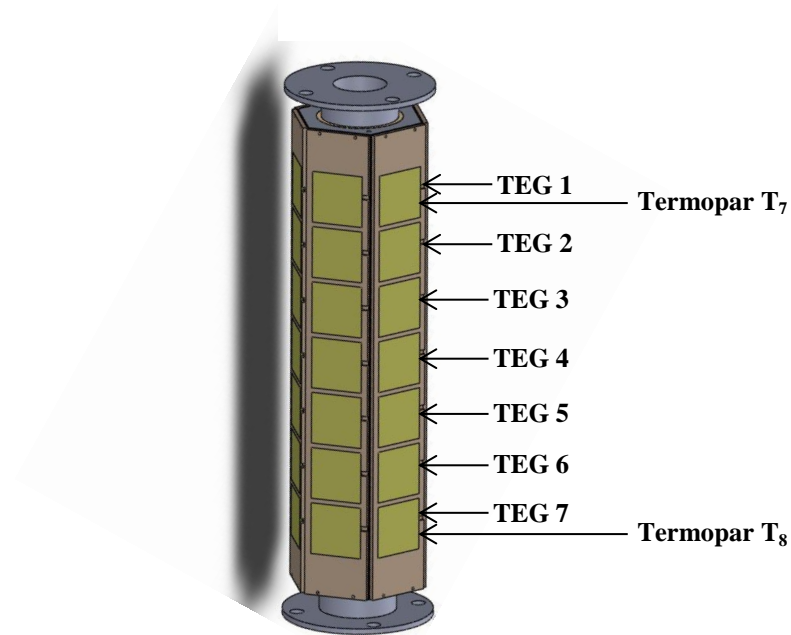


Figura 4.11 – Numeração dos TEG no aparato quente

A Figura 4.12 apresenta a montagem dos TEG na caixa de resfriamento. A sequência de montagem foi: caixa de resfriamento, placa de cobre, isolante térmico e TEG, placa de cobre novamente (não mostrada na figura).



Figura 4.12 – Montagem dos TEG na caixa de resfriamento

A Figura 4.13 apresenta a Planta de Geração Termoelétrica montada. Nela visualiza-se o sistema de refrigeração, contendo os dois tanques pulmão e as caixas de resfriamento, o suporte para pressão nos TEG e as válvulas de controle de vazão do fluido de arrefecimento. Observa-se que a turbina do gerador elétrico e o amortecedor de vibração estão isolados

termicamente, isso para que a tubulação dos gases de exaustão não perca calor e para que as mangueiras, conexões e válvulas da planta não sejam danificadas com o calor liberado.

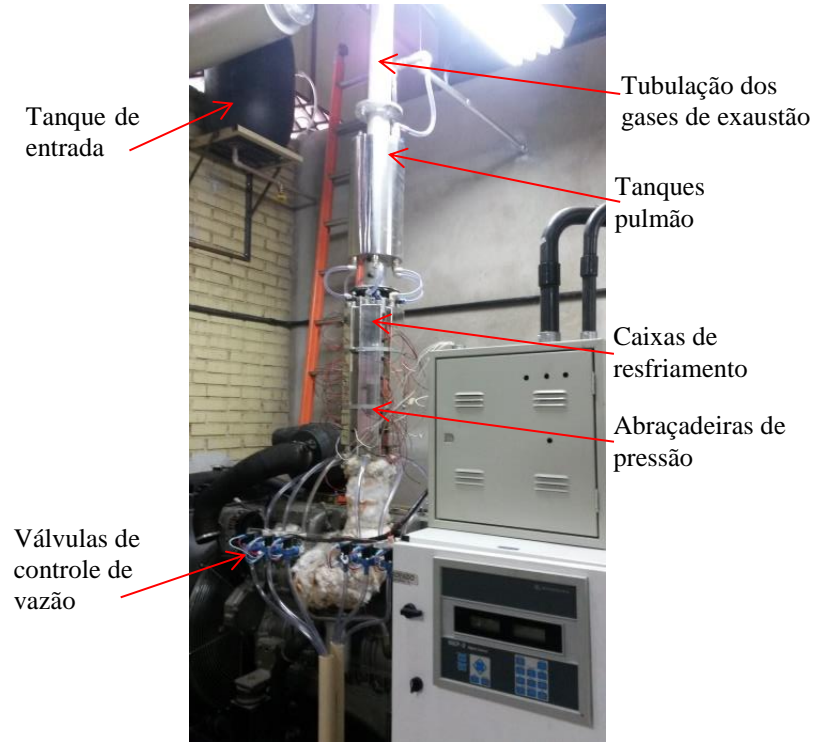


Figura 4.13 – Condições da Planta de Geração Termoelétrica – 1º Teste

No primeiro teste o controle de temperatura do lado frio do TEG (T_c) foi feito a 30 °C, a temperatura do termopar T_7 se manteve a 253 °C, a temperatura do termopar T_8 se manteve a 350 °C, a temperatura dos gases de exaustão ficou em 548 °C e os TEG foram pressionados entre as faces fria e quente apenas por duas abraçadeiras, conforme Figura 4.13. Foram medidos, com um multímetro, os valores de tensão de circuito aberto (V_0) gerados pelos TEG localizados na parte inferior do aparato quente. Os valores obtidos estão na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Dados da Planta de Geração Termoelétrica – 1º teste

T_7 (°C)	T_8 (°C)	TEG	V_0 (V)	TEG	V_0 (V)	TEG	V_0 (V)
253	350	1.7	2,322	2.7	2,303	3.7	2,647
		4.7	1,678	5.7	1,562	6.7	2,418

No primeiro teste, com controle da face fria a 30 °C, a vazão de água utilizada para resfriamento dos TEG foi 10 l/min e a vazão máxima do sistema de resfriamento montado é

de 9 l/min, assim, as válvulas de controle tiveram que ficar o tempo todo aberta para manter a temperatura no valor desejado. Como os TEG não ficaram bem pressionados, a geração termoelétrica foi considerada baixa.

No segundo teste o controle de temperatura do lado frio do TEG (T_c) foi feito a 50 °C, a temperatura do termopar T_7 se manteve, em média, a 245 °C, a temperatura do termopar T_8 se manteve a 330 °C, a temperatura dos gases de exaustão ficou em 680 °C e os TEG foram pressionados entre as faces fria e quente por cinco abraçadeiras, conforme Figura 4.14. Os valores das temperaturas podem ser visualizados no relatório do Sistema Supervisório no Apêndice B. Foram medidos, com um multímetro, os valores de tensão de circuito aberto (V_0) e da corrente de curto-circuito (I_{cc}) gerado por cada TEG. Os valores obtidos estão na Tabela 4.4. A potência máxima (P_{max}) foi calculada conforme (10), pois a literatura ensina que a potência máxima do TEG ocorre quando os valores de tensão e corrente correspondem, respectivamente, a 50 % dos valores da tensão de circuito aberto (V_0) e da corrente de curto circuito (I_{cc}).



Figura 4.14 – Condições da Planta de Geração Termoelétrica – 2º Teste

Tabela 4.4 – Dados da Planta de Geração Termoelétrica – 2º teste

TEG	V_0 (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

No segundo teste, com controle da face fria a 50 °C, a vazão de água utilizada para resfriamento dos TEG foi 3,7 l/min, 63 % menor que no controle a 30 °C. Observou-se que a geração termoelétrica foi maior que no primeiro teste (devido a pressão nos TEG) e que os

TEG localizados na parte inferior do aparato (TEG 7) geraram bem mais que os localizados na parte superior (TEG 1) porque estavam com maior temperatura.

Comparando a potência gerada pelo TEG 6.6 (4,6398 W), que foi o TEG com maior geração, com os dados de catálogo do fabricante para essas condições (ANEXO B), que deveria ser de 18 W, houve uma geração termoelétrica de 26 % do catálogo. Esta diferença de geração pode, em parte, ser atribuída a má pressão do TEG entre as fontes quente e fria. Outra consideração que também deve ser feita é em relação às medições de temperatura, uma vez que não se sabe o real valor nas faces quentes e frias do TEG, pois o controle da face fria é na água e o da face quente é no rasgo do aparato quente (conforme estudo do item 4.2, a temperatura no rasgo é maior que na face).

A Planta de Geração Termoelétrica é composta por 42 (quarenta e dois) TEG, distribuídos em 6 (seis) faces, sendo 7 (sete) TEG por face.

Com a finalidade de verificar os valores de tensão e corrente totais da planta, primeiramente avaliou-se cada face separadamente, sendo os 7 (sete) TEG de cada face ligados em série. A tensão de saída (V_{out}) é a soma das tensões dos TEG, no entanto, para a corrente de saída (I_{out}) prevalece a menor corrente fornecida por 1 (um) TEG daquela face. A Tabela 4.5 apresenta os valores medidos por face.

Tabela 4.5 – Características elétricas por face da Planta de Geração Termoelétrica

Face	V_{out} (V)	I_{out} (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

Posteriormente, as 6 (seis) faces foram ligadas em paralelo. A corrente total da Planta de Geração Termoelétrica é a soma das correntes individuais de cada face e a tensão total é a menor tensão das faces. Os valores totais de geração da Planta de Geração Termoelétrica estão na

Tabela 4.6, sendo V_{mpp} a tensão gerada na máxima potência e I_{mpp} a corrente na máxima potência. Verifica-se que para as condições de montagem da Planta, a potência máxima gerada total foi de 60,48 W.

Tabela 4.6 – Características elétricas da Planta de Geração Termoelétrica

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

Com base nos dados de catálogo do fabricante, se os 42 (quarenta e dois) TEG tivessem gerado sua máxima potência nos valores considerados de temperatura ($T_7 = 245\text{ °C}$ e $T_8 = 330\text{ °C}$) e considerando que a temperatura muda ao longo do aparato quente em torno de 14 °C por TEG (valor obtido pela diferença entre T_7 e T_8 dividido pelo número de TEG na face), as tensões de circuito aberto, correntes e potências geradas por cada posição do TEG deveria ser conforme a Tabela 4.7 (valores aproximados). Foi considerado Th como a temperatura da face quente e a temperatura da face fria igual a 50 °C .

Tabela 4.7 – Dados de geração do fabricante do TEG para cada posição da Planta de Geração Termoelétrica

Posição TEG	Th (°C)	V_0 (V)	I_{cc} (A)	P_{max} (W)
1	245	5,7	5,7	8,1
2	258	6,0	6,0	9,0
3	272	6,5	7,4	12,0
4	286	7,0	7,4	13,0
5	300	7,2	7,8	14,0
6	314	7,7	8,3	16,0
7	328	8,0	9,0	18,0

Assim, cada face composta por 7 (sete) TEG ligados em série deveria ter o valor de $V_{out} = 48,1\text{ V}$ e $I_{cc} = 5,7\text{ A}$. A tensão de saída (V_{out}) é a soma das tensões dos TEG e a corrente de saída (I_{out}) prevalece a menor corrente fornecida por 1 (um) TEG daquela face.

Ligando as 6 (seis) faces em paralelo e com base nos dados de catálogo do fabricante do TEG, os valores totais de geração da Planta de Geração Termoelétrica deveriam ser o da Tabela 4.8. A corrente total é a soma das correntes individuais de cada face e a tensão total é a menor tensão das faces. Verifica-se que para as condições do catálogo do fabricante do TEG, a potência máxima gerada deveria ser de $479,8\text{ W}$.

Tabela 4.8 – Características elétricas da Planta de Geração Termoelétrica com base nos dados do catálogo do fabricante do TEG

V_{out} (V)	I_{out} (A)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)	P_{max} (W)
48,1	39,9	24,05	19,95	479,80

Assim, neste teste, verifica-se que a Planta de Geração Termoelétrica gerou 12,6 % das condições do catálogo do fabricante do TEG.

O consumo de energia elétrica que a planta possui é com o sistema de automação e controle e com a bomba elétrica utilizada na água de reuso, que é uma bomba de ½ cv (367,8 W) e vazão de 5 m³/h. A vazão necessária para resfriar a 50 °C todos os TEG da planta é de 3,7 l/min = 222 l/h = 0,222 m³/h. Considerando a vazão da bomba, tem-se que são necessários 0,04444 h para a bomba recalcar o consumo de água. Assim, considerando o tempo de recalque da bomba e sua potência por hora, é necessária uma potência 16,33 W para suprir o consumo da bomba em uma hora.

A potência do sistema de automação e controle é de 180 W em uma hora. Assim, o consumo total de energia da planta é de 196,33 Wh.

Para verificar se o isolante térmico (lã de rocha) colocado ao redor da tubulação dos gases de exaustão do gerador elétrico realmente não transferiu calor para o fluido de arrefecimento do tanque pulmão (conforme estudo do item 3.1.4), foram feitas medições da temperatura da água em três pontos:

- No tambor de entrada da planta;
- Na válvula reguladora de fluxo da entrada do tanque pulmão;
- Na válvula reguladora de fluxo na entrada das caixas de resfriamento.

A temperatura da água no tambor de entrada é de 25 °C. Já na válvula reguladora de fluxo da entrada do tanque pulmão a temperatura é de 32 °C, mas assim que as válvulas de controle de vazão abrem para trocar calor, imediatamente a temperatura cai para 26 °C. Para o controle de 50 °C da face fria, a temperatura da água na válvula reguladora de fluxo na entrada das caixas de resfriamento é de 48 °C, mas assim que as válvulas de controle de vazão abrem para trocar calor, imediatamente a temperatura cai para 38 °C.

Na Figura 4.15 é possível observar, pelo espectro de cores, que a temperatura nos tanques pulmão e nas caixas de resfriamento fica próxima a 35 °C. Assim, verifica-se que o isolante térmico (lã de rocha) colocado ao redor da tubulação dos gases de exaustão do gerador elétrico foi eficiente.

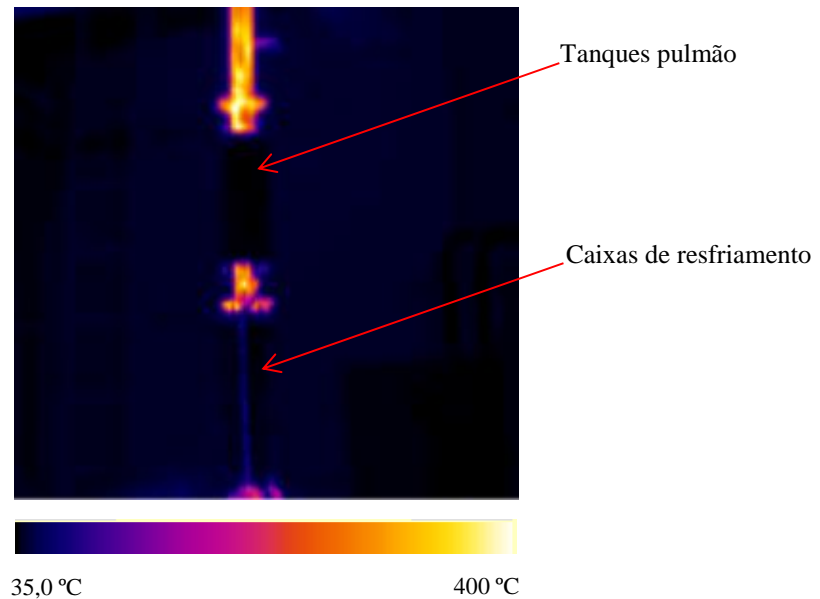


Figura 4.15 – Imagem térmica da Planta de Geração Termoelétrica

4.4 RESULTADOS DO CÁLCULO DE VAZÃO DO FLUIDO PARA REFRIGERAÇÃO

Considerando o gerador elétrico ligado sem carga, a temperatura do lado frio (T_c) do TEG fica em torno de 72 °C. Assim, é necessário que esta temperatura caia para 30 °C.

O modelo de TEG utilizado, quando em seu ponto mais crítico, ou seja, $T_h = 350$ °C e $T_c = 30$ °C, possui um fluxo de calor (Φ) de aproximadamente 247 W e uma potência elétrica de saída de 21,7 W. Dessa forma, o fluxo de calor que deverá ser dissipado da superfície fria do TEG para o metalon de refrigeração é de 225,3 W ou 225,3 Js⁻¹ ou 53,82 cal s⁻¹.

Considerando um tempo de 60 s, o calor específico da água igual a 1 cal g⁻¹K⁻¹ e que a temperatura da água de refrigeração esteja, inicialmente, a 25 °C e que aumentará para 30 °C, tem-se que a massa de água necessária para refrigeração de apenas um TEG é a apresentada em (19).

$$m = \frac{53,82 \times 60}{1 \times 5} = 645,84 \text{ g} = 0,654 \text{ kg} \quad (19)$$

Considerando que a densidade da água é 1000 kg m⁻³, tem-se que são necessários 0,654 litros de água para refrigerar o lado frio de cada TEG e mantê-lo a 30 °C.

Quando 42 TEG são montados na planta, são necessários 27,47 litros de água por minuto para refrigeração a 30 °C.

Considerando todas as outras mesmas condições, mas alterando a temperatura da água de refrigeração para 50 °C, são necessários aproximadamente 5,5 litros de água por minuto para a refrigeração da planta com 42 TEG.

Estes dois valores de temperatura foram considerados no cálculo porque são valores de referências fornecidos pelo fabricante (ANEXO B).

4.5 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DOS PARÂMETROS DO TERMOGERADOR

Baseado no circuito elétrico dos termogeradores montou-se, no *software* Simulink®, o circuito equivalente do TEG ilustrado na Figura 4.16. A fonte de tensão V_S é proporcional a diferença de temperatura (ΔT) do lado quente (Th) e lado frio (Tc) do TEG e do coeficiente de Seebeck.

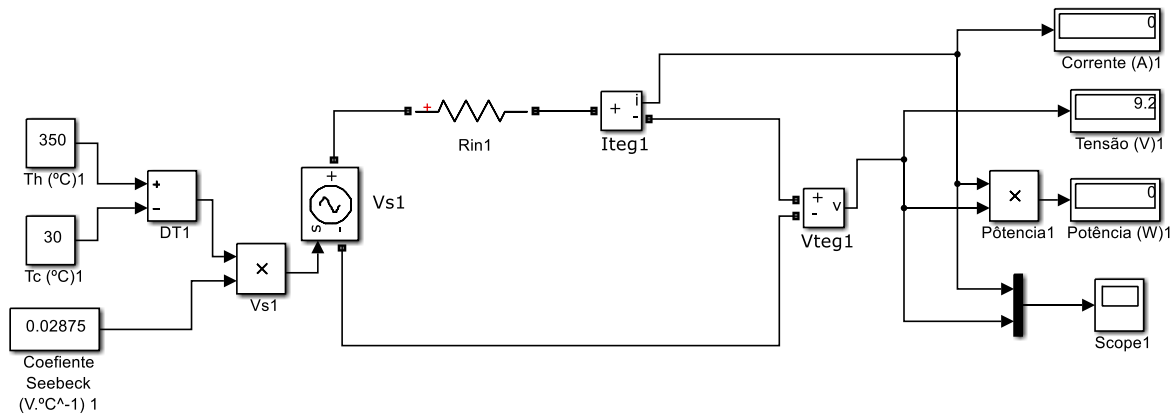


Figura 4.16 – Circuito equivalente do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 sem carga, $Th=350$ °C e $Tc=30$ °C

Na Figura 4.16, quando o TEG estiver operando na sua máxima eficiência ($Th = 350$ °C e $Tc = 30$ °C) e sem carga conectada aos seus terminais, pode-se verificar que a tensão de circuito aberto gerada é 9,2 V, o que confere com as informações do catálogo do fabricante.

Quando, na Figura 4.17, o TEG estiver operando na sua máxima eficiência, o seu valor de corrente é 4,742 A, a tensão de 4,6 V e a potência de 21,81 W. Assim, pode-se verificar que os valores de tensão, corrente e potência são iguais aos do catálogo do fabricante do TEG.

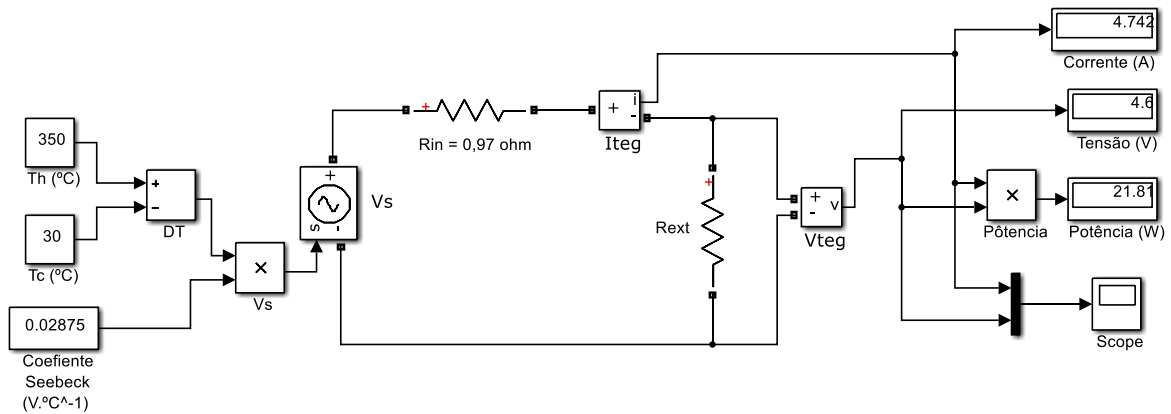


Figura 4.17 – Circuito equivalente do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 com carga, $Th=350\text{ °C}$ e $Tc=30\text{ °C}$

A Figura 4.18 ilustra os valores de geração do TEG quando estiver operando sem carga conectada aos seus terminais e considerando a temperatura $Th = 350\text{ °C}$ e $Tc = 50\text{ °C}$. Verifica-se que, nestas condições, a tensão de circuito aberto gerada é de 8,6 V, o que comprova a proporcionalidade da tensão gerada em função da diferença de temperatura ΔT . Como houve aumento da temperatura Tc em relação à Figura 3.13 e, conseqüentemente, diminuição do ΔT , a tensão gerada foi menor.

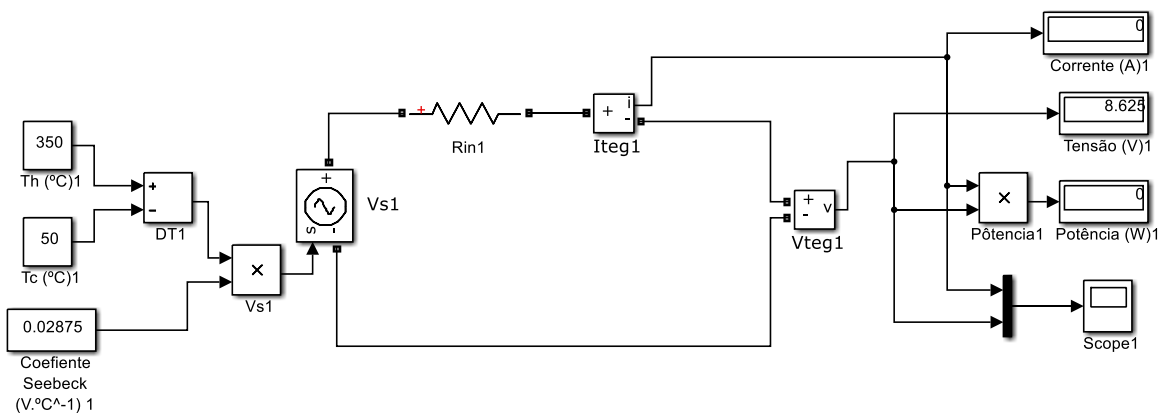


Figura 4.18 – Circuito equivalente do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 sem carga, $Th=350\text{ °C}$ e $Tc=50\text{ °C}$

Se o TEG operar com carga e com a temperatura $Th = 350\text{ °C}$ e $Tc = 50\text{ °C}$, os valores gerados são os apresentados na Figura 4.19. O valor de tensão será de 4,3 V, o de corrente de 4,4 A e 19,17 W de potência, um rendimento menor de 11,65 % que se operado com $Tc = 30\text{ °C}$.

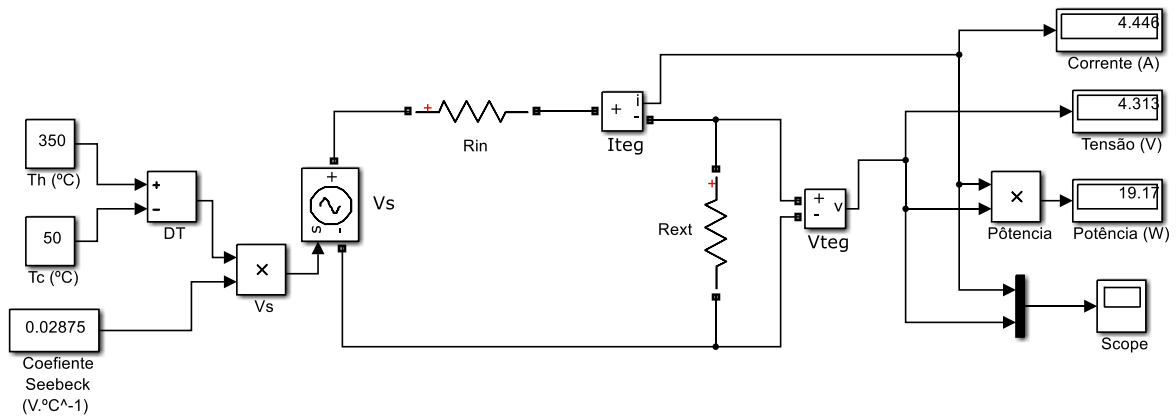


Figura 4.19 – Circuito equivalente do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 com carga, $Th=350\text{ °C}$ e $Tc=50\text{ °C}$

Observando os gráficos fornecidos pelo catálogo do fabricante (ANEXO B), verifica-se que, tanto a resistência interna quanto os valores de tensão, corrente e potência variam conforme alteração das temperaturas Th e Tc . Utilizando o *software* Matlab®, os gráficos do catálogo foram simulados para as condições de $Th = 350\text{ °C}$ e $Tc = 30\text{ °C}$ e estão apresentados na Figura 4.20 e Figura 4.21.

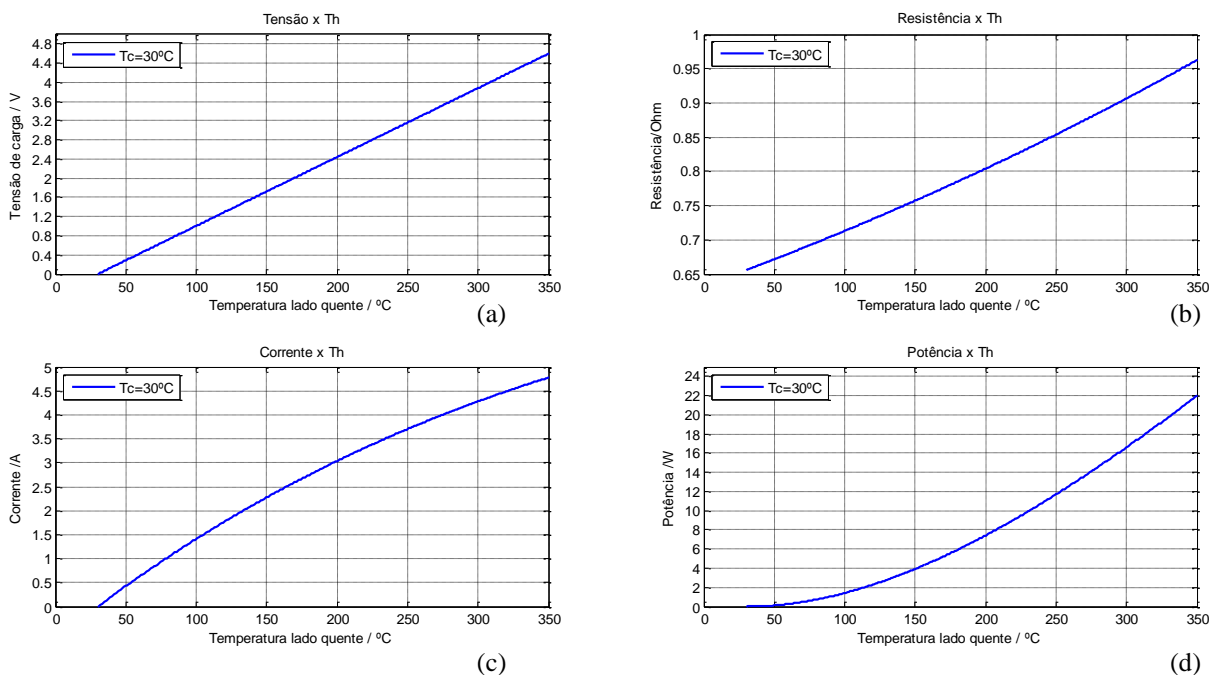


Figura 4.20 – Curvas de desempenho do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 com $Tc=30\text{ °C}$. (a) Curva Tensão x Th ; (b) Curva Resistência interna x Th ; (c) Curva Corrente x Th ; (d) Curva Potência x Th

Visualizando os gráficos da Figura 4.20 observa-se a proporcionalidade da variação da tensão, corrente e potência conforme a variação da temperatura do lado quente. Observa-se que quanto maior o gradiente de temperatura, maiores são os valores gerados pelo TEG. O

valor da resistência interna também aumenta conforme aumenta a temperatura do lado quente. Para obtenção destes gráficos, o coeficiente de Seebeck foi considerado constante, porém eles não são lineares e dependem da temperatura absoluta, mas para pequenas diferenças de temperatura, esta relação pode ser considerada linear.

Em relação ao gráfico da Figura 4.21 observa-se que quando a tensão é máxima, o valor de corrente é zero, caracterizando a tensão de circuito aberto (V_0). Da mesma forma, quando a corrente é máxima, o valor da tensão é zero, caracterizando a corrente de curto-circuito (I_{cc}). Quando a tensão e a corrente estão na metade de seus valores máximos, tem-se a máxima potência (P_{max}), caracterizando as condições de (10).

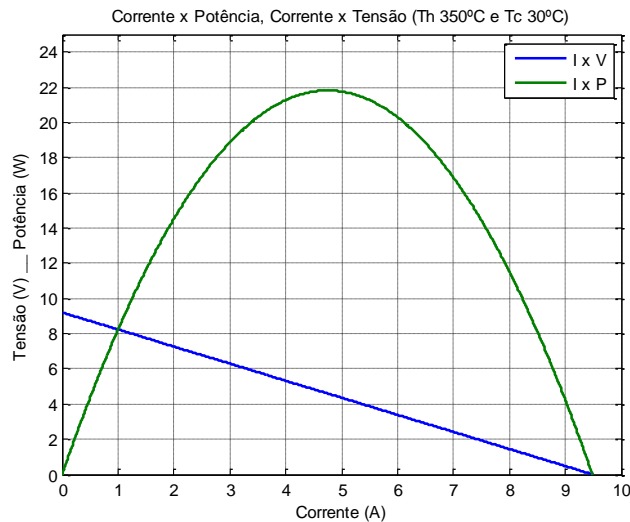


Figura 4.21 – Curva de desempenho do TEG modelo TELBP1-12656-0.45 com $T_h=350\text{ °C}$ e $T_c=30\text{ °C}$

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os resultados do teste em bancada de apenas um TEG, do teste do aparato quente sem e com mola e do teste da Planta de Geração Termoelétrica considerando as temperaturas do lado frio a 30 °C e 50 °C . Foram apresentados também os resultados da vazão obtida no sistema, os resultados do cálculo da vazão do fluido para refrigeração e os resultados da simulação dos parâmetros do termogerador.

O próximo capítulo apresenta as conclusões obtidas com os testes realizados, sugere melhorias para este trabalho e propõe sugestões de trabalhos futuros.

5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa dissertação propôs a modelagem e os arranjos técnicos para implementar e avaliar a eficiência da geração, a supervisão e o controle de uma planta de cogeração que utiliza termogeradores (TEG) para converter a energia térmica residual dos gases de exaustão de um conjunto motogerador a óleo diesel em energia elétrica.

Mesmo sabendo que o rendimento dos TEG disponíveis hoje no mercado ainda é limitado e o investimento inicial é alto (em média \$ 70 por TEG), o fato de se recuperar uma energia que é desperdiçada, é um benefício para qualquer projeto, pois contribuem para sua eficiência e para o desenvolvimento sustentável. Por isso, as vantagens dos TEG (confiáveis, ausentes de partes móveis, simples e robustos em relação aos dispositivos com conversões mecânicas e funcionamento silencioso) conseguem superar esse alto custo e a baixa eficiência de produção de energia elétrica.

Assim, uma Planta de Geração Termoelétrica foi projetada, desenvolvida e testada. Com a metodologia e os resultados apresentados (60,48 W, o que representa 12,6 % das condições do catálogo do fabricante do TEG), abre-se um caminho para melhorias e contribui para trabalhos futuros. Os procedimentos experimentais utilizados e a metodologia adotada beneficiarão avanços na área de geração termoelétrica, pois mostra que é possível sua instalação em qualquer lugar que utiliza geradores elétricos e que deseja aproveitar o calor desperdiçado para gerar eletricidade, seja ela para baterias ou para ser ligada à rede elétrica.

Parte do problema do baixo rendimento da Planta de Geração Termoelétrica está na má transferência térmica, pois o calor só pode passar por onde as superfícies realmente se tocam. Assim, não basta que o aparato quente e as caixas de resfriamento estejam na temperatura ideal, é necessário que o TEG seja pressionado corretamente entre essas superfícies. Outra importante consideração a ser feita é em relação às medições de temperatura, uma vez que não se sabe o real valor nas faces quentes e frias do TEG, pois o controle da face fria foi feito na água e o da face quente foi no rasgo do aparato quente.

A grande dificuldade encontrada no desenvolvimento deste trabalho foi realizar todas as etapas do projeto de pesquisa ao mesmo tempo e com o mesmo prazo, sendo que a etapa seguinte só poderia ser realizada após a obtenção de algum resultado da etapa anterior. Assim, como este trabalho pertence à segunda etapa do projeto, conforme descrito na introdução, muitos testes só puderam ser realizados após a conclusão dos resultados da primeira etapa.

Os procedimentos adotados para o alcance dos objetivos desta dissertação são descritos a seguir.

Para o alcance do objetivo “Modelar matematicamente os parâmetros do TEG em relação às suas características termoelétricas” foi feita, no item 3.4, uma simulação no *software* Simulink® com os dados do circuito elétrico dos termogeradores. Verificou-se que, tanto a resistência interna quanto os valores de tensão, corrente e potência variaram conforme a alteração das temperaturas T_h e T_c , o que comprova o funcionamento do efeito Seebeck.

Em relação ao objetivo “Projetar e montar uma planta de geração termoelétrica para obtenção de dados experimentais (curvas $V \times I$ e $V \times P$), incluindo a parte mecânica, o circuito hidráulico e elétrico” procurou-se, em todo o capítulo 3 dessa dissertação descrever o projeto da planta. No projeto e desenvolvimento do aparato quente fez uma superfície que equalizasse a temperatura ao longo de todo o aparato e com material (placa de cobre) com melhor condutividade térmica. Foram utilizados isolantes térmicos para que a temperatura da face quente não transferisse para a face fria. Foi colocada uma mola dentro do aparato quente para que a temperatura dos gases de exaustão distribuisse melhor sobre a face, produzindo um aumento de 9 % na eficiência. Todos estes dados foram apresentados no capítulo 4 (Resultados e discussão). Na parte de resfriamento dos TEG, a fim de contribuir para a sustentabilidade da planta, foi utilizada água de reuso, assim, o gasto foi apenas com a bomba elétrica e com o sistema de automação e controle (196,33Wh).

No objetivo “Determinar matematicamente a vazão do fluido de arrefecimento” foram feitos, no item 3.3, os cálculos da vazão necessária para resfriar os TEG considerando o lado frio a 30 e 50 °C. No capítulo 4 (Resultados e discussão) a vazão foi medida e comprovou-se que se resfriar o TEG a 50 °C, a vazão é 63 % menor que no controle a 30 °C, sendo que para uma mesma temperatura quente, o rendimento do TEG é apenas 4 % menor a 50 °C.

Para o alcance do objetivo “Desenvolver o sistema de controle e supervisão dos processos hidráulicos, térmicos e elétricos da planta” provou-se que o sistema de controle e automação funcionou bem, pois quando a temperatura de 50 °C foi atingida, imediatamente a válvula abre, baixando a temperatura das caixas de resfriamento consideravelmente. Não é necessário, para fins acadêmicos, que o controle e a automação do sistema sejam por CLP e por um Sistema Supervisório industrial, mas caso a Planta de Geração Termoelétrica seja instalada em algum ambiente agressivo, que é o caso de um ambiente industrial, estes são os equipamentos de controle projetados para tal fim, os mais confiáveis.

No objetivo “Realizar testes de desempenho que procurem reproduzir as condições simuladas para otimização da produção de energia”, foram feitos testes em bancada em

apenas um TEG, apenas no aparato quente e em toda a planta com duas diferentes temperaturas do lado frio. Todos os testes foram repetidos três vezes, e valores bem aproximados foram obtidos, não sendo necessário descrever todos.

Não foi encontrado nenhum outro projeto de geração termoelétrica que utilizasse como fonte quente os gases de exaustão de um moto gerador, o que torna este projeto inovador e promissor. Além disso, o processo de cogeração usado abre um caminho para melhorar a eficiência de processos industriais.

Este trabalho é apenas o início para vários outros estudos, pois dos projetos com TEG pesquisados, o tempo de estudo foi longo e o resultado satisfatório demorado.

5.1 SUGESTÕES DE MELHORIAS E TRABALHOS FUTUROS

Para melhoria dessa dissertação e aumento da eficiência na Planta de Geração Termoelétrica são sugeridas algumas melhorias em todo o sistema e são propostas algumas sugestões para trabalhos futuros.

Assim, sugere-se que o aparato quente seja fabricado com uma menor espessura e com um material diferente do aço para que não se perca tanto calor dos gases de exaustão para a face quente (a queda foi de 680 °C para 330 °C). Dessa forma, podem-se utilizar as chapas de equalização do sistema e conseguir uma temperatura por igual e próxima à eficiência máxima do TEG em todo o aparato quente. O ideal é utilizar um material mais leve e com melhor condutividade, como o alumínio.

O sistema de pressão dos TEG entre as faces fria e quente também pode ser melhorado. É sugerido que se projete um sistema com pressão conhecida e que possa ser controlada em cada TEG individualmente.

Outra sugestão é que a leitura das faces quente e fria seja diretamente na face, e não na água e no rasgo como nessa dissertação, mas de forma que não interfira na montagem ideal dos TEG.

O controlador utilizado no sistema de automação também pode ser alterado para que se tenha um menor consumo de energia elétrica. Sugere-se um microcontrolador. Sugere-se também que os valores de tensão, corrente e potência gerados pelos TEG sejam visualizados pelo Sistema Supervisório.

Propõe-se também que se faça um projeto para reaproveitar o calor da água pré-aquecida da saída do sistema de resfriamento. Como a água sai aproximadamente a 50 °C, ela pode ser aproveitada para sistemas de aquecimento.

Por fim, pode-se utilizar um TEG com melhor rendimento, de forma que uma maior temperatura na face quente gere uma potência maior. Até o fim do desenvolvimento deste trabalho, novos TEG surgiram, como o modelo TELP1-12656-0.9 da Thermonamic. Este TEG suporta 600 °C na face quente, gera uma máxima potência de 26,3 W e requer menos pressão para instalação do TEG, apenas 230 kgf (praticamente metade do TEG utilizado neste trabalho).

6 PUBLICAÇÕES OBTIDAS

A realização do projeto de pesquisa aprovado na Chamada MEC/SETEC/CNPq N° 94/2013, através do Processo CNPq n° 8485, levou à submissão e aceitação de 3 (três) artigos 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:

- 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.
- 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.

O projeto de pesquisa também teve 2 (dois) artigos submetidos e aprovados na forma de apresentação oral, sendo um no *Congreso Internacional IEEE CHILECON 2015* e outro no *23nd 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. Waste heat recovery plant for exhaust ducts using thermoelectric generators. In: **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. Optimized exhaust duct applied in thermoelectric waste heat recovery system. In: **International Congress of Mechanical Engineering COBEM 2015**.

REFERÊNCIAS

ANDO JUNIOR, O. et al. Analyze the potential of use thermoelectric materials for power cogeneration by energy harvesting–Brazil. **Int. J. of Automation and Power Eng**, v. 2, n. 5, p. 303-311, 2013.

ANDO JUNIOR, Oswaldo Hideo. **Protótipo de um microgerador termoeétrico para captação de energias residuais baseado no Efeito Seebeck com sistema de transferência de calor intercambiável**. 2014. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ANEEL. Informações Técnicas: Definições dos agentes. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=41>>. Acesso em: 13 jan. 2016.

AZARBAYJANI, M.; ANDERSON, J. **Assessment of Solar Energy Conversion Technologies-Application of Thermoelectric Devices in Retrofit an Office Building**. 2008.

BASS, John C.; ELSNER, Norbert B.; LEAVITT, Frederick A. Performance of the 1 kW thermoelectric generator for diesel engines. In: **AIP Conference Proceedings**. IOP INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING LTD, 1995. p. 295-295.

BASS, John C.; KUSHCH, Aleksandr S.; ELSNER, Norbert B. Thermoelectric generator (TEG) for heavy diesel trucks. In: **XX International Conference on Thermoelectrics: Proceedings ICT2001**. 2001.

BENSAID, Samir et al. High efficiency Thermo-Electric power generator. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 2, p. 1385-1398, 2012.

BARDELIN, Cesar Endrigo Alves. **Os efeitos do racionamento de energia elétrica ocorrido no Brasil em 2001 e 2002 com ênfase no consumo de energia elétrica**. 2004. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.

CHAMPIER, D. et al. Thermoelectric power generation from biomass cook stoves. **Energy**, v. 35, n. 2, p. 935-942, 2010.

DATE, Ashwin et al. Theoretical and experimental study on heat pipe cooled thermoelectric generators with water heating using concentrated solar thermal energy. **Solar Energy**, v. 105, p. 656-668, 2014.

ELETROBRAS. **Manual Prático PROCEL: Manual de Tarifação da Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: ELETROBRAS, ago. 2011. Disponível em: <[FARIAS, Sandro Ricardo Alves. **Protótipo de um microgerador termoeétrico de estado sólido: cogeração a gás**. 2009. Dissertação \(Mestrado\). UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE.](http://www.eletrobras.com/elb/procel/services/DocumentManagement/FileDownload.EZTSvc.asp?DocumentID={4FA2469D-32D8-4645-B627-109013DF2A59}&ServiceInstUID={AEBE43DA-69AD-4278-B9FC-41031DD07B52}>>. Acesso em: 11 out. 2013.</p>
</div>
<div data-bbox=)

FERNANDES, Alberto E. S. dos Santos. **Conversão de energia com células de Peltier**. Dissertação (Mestrado). Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 2012.

FRANCHI, Claiton Moro; CAMARGO, Valter Luís Arlindo. **Controladores Lógicos Programáveis – Sistemas Discretos**. 2.ed. São Paulo: Érica, 2012.

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. Estudo de Caso - **Implementação de uma Mola no Interior do Duto, Ensaio em Elementos Finitos**. Documento Interno, IFG, 2015.

GOULD, Chris; SHAMMAS, Noel. **A review of thermoelectric MEMS devices for micro-power generation, heating and cooling applications**. UK: Staffordshire University, 2009.

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.

IISD REPORTING SERVICES. IPCC-40 Final. A Reporting Service for Environment and Development Negotiations. **Earth Negotiations Bulletin**, v. 12, n. 607, 2014. Disponível em: <<http://www.iisd.ca/download/pdf/enb12607e.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2014.

Ji, X. et al. Solution-Chemical Syntheses of Nano-Structured Bi₂Te₃ and PbTe Thermoelectric Materials. **Journal of Electronic Materials**, USA, v. 36, n. 7, 2007.

KARRI, M. A.; THACHER, E. F.; HELENBROOK, B. T. Exhaust energy conversion by thermoelectric generator: two case studies. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n. 3, p. 1596-1611, 2011.

KILLANDER, Anders; BASS, John C. A stove-top generator for cold areas. In: **Thermoelectrics, 1996. Fifteenth International Conference on**. IEEE, 1996. p. 390-393.

LIU, X. et al. A case study on compatibility of automotive exhaust thermoelectric generation system, catalytic converter and muffler. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 2, p. 62-66, 2014.

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

MARTINS, Jorge et al. Thermoelectric exhaust energy recovery with temperature control through heat pipes. **SAE International**, p. 1-23, 2011.

MORAES, Cícero Couto de; CASTRUCI, Plínio de Lauro. **Engenharia de automação industrial**. 2.ed. [Reimpr.]. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

NASCIMENTO, André L. E. de Souza; LUBANCO, Jhennifer Campos; MOREIRA, Thayara Abreu. Fontes Alternativas de Energia Elétrica: Potencial Brasileiro, Economia e Futuro. **Bolsista de Valor**, v. 2, n. 1, p. 23-36, 2012.

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

PICKARD, Don et al. **A Self-powered Field Feeding System**. ARMY NATICK SOLDIER CENTER MA, 2006.

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

ROWE, D.M. (Ed). **Thermoelectrics handbook: macro to nano**. USA: CRC Press, 2005.

SANTOS, L. P. **Análise de Desempenho de um Gerador Termoelétrico Baseado no Efeito Seebeck**. Dissertação (Mestrado). Taubaté, SP: Universidade de Taubaté, 2010.

TEIXEIRA, Tiago R. C. **Estudo de um Sistema Híbrido com Colectores Solares Termofotovoltaicos Acoplados a um Termogerador Eléctrico**. Porto, Portugal: FEUP, 2009.

THERMA. **Cabos de Compensação e Extensão para Termopares**. Disponível em: <http://www.therma.com.br/produtos_tabelas/cabos-compensa%C3%A7%C3%A3o-extens%C3%A3o-termopares.pdf>. Acesso em: 08 dez. 2014.

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.

THERMONAMIC. **Power Module Installation Notes**. Disponível em: <http://www.thermonamic.com/Power%20Module%20Installation%20for%20TELBP%20modules.pdf>. Acesso em: 04 set. 2015.

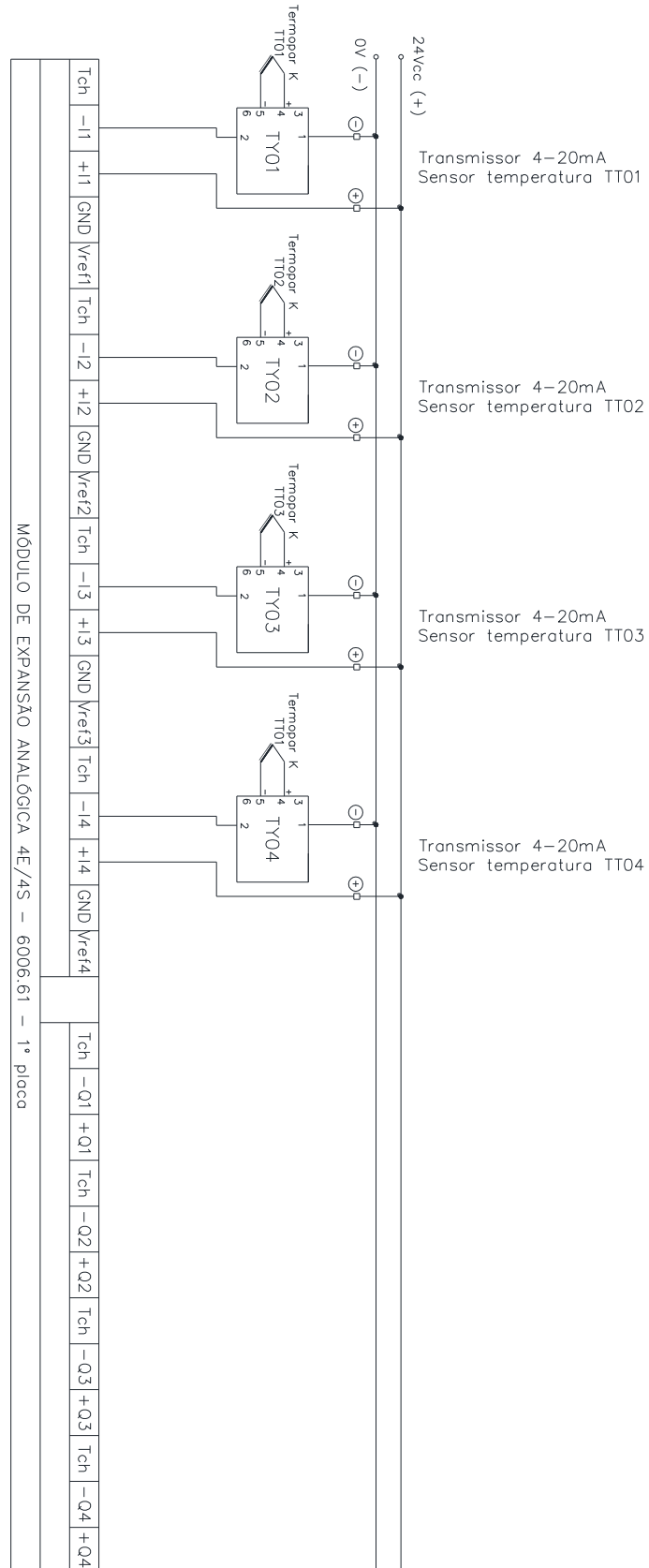
TRITT, Terry M. **Challenges and Opportunities in Thermoelectric Materials Research for Automotive Applications**. Conference Wednesday, Aug. 15th 2007. Dept. of Physics & Astronomy, Clemson University.

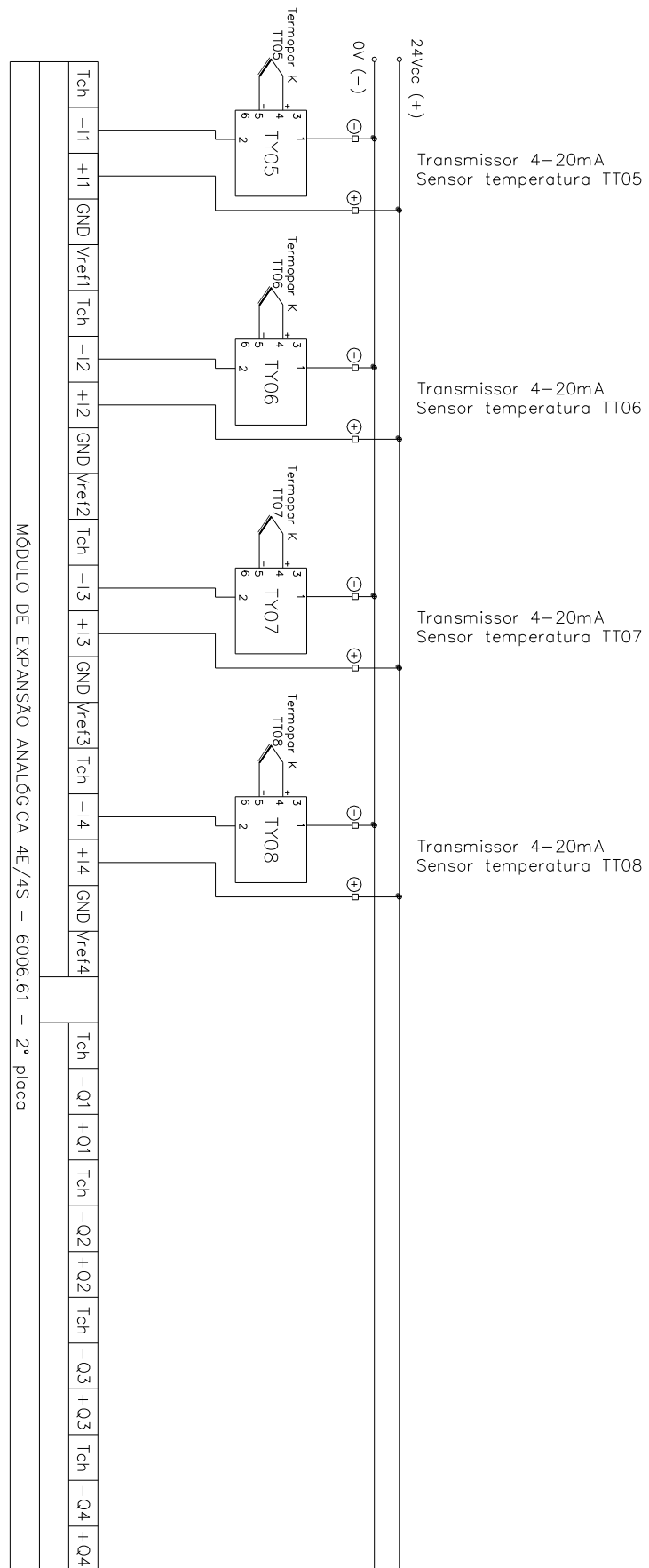
WOODYARD, Doug. **Pounder's marine diesel engines and gas turbines**. Butterworth-Heinemann, 2009.

YU ZHOU; PAUL, S.; BHUNIA, S. **Harvesting Wasted Heat in a Microprocessor Using Thermoelectric Generators: Modeling, Analysis and Measurement**. Design, Automation and Test in Europe, 2008. DATE '08, p.98,103,10-14 March 2008. doi: 10.1109/DATE.2008.4484669.

ZHAO, Li-Dong; DRAVID, Vinayak P.; KANATZIDIS, Mercuri G. The panoramic approach to high performance thermoelectrics. **Energy & Environmental Science**, v. 7, n. 1, p. 251-268, 2014.

APÊNDICE A – ESQUEMA ELÉTRICO DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA





APÊNDICE B – RELATÓRIO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO

Relatório - Histórico Medições

Data - Hora	T1 Tc face 1	T2 Tc face 2	T3 Tc face 3	T4 Tc face 4	T5 Tc face 5	T6 Tc face 6	T7 (°C) Th face sup	T8 (°C) Th face inf
16/12/2015 11:19:18	48,60 °C	46,50 °C	43,70 °C	43,10 °C	50,10 °C	46,10 °C	246,10	325,70
16/12/2015 11:19:23	49,50 °C	45,50 °C	44,00 °C	44,30 °C	52,80 °C	47,60 °C	245,70	325,10
16/12/2015 11:19:28	50,70 °C	47,60 °C	45,20 °C	44,60 °C	50,10 °C	49,50 °C	246,30	323,00
16/12/2015 11:19:33	50,70 °C	49,50 °C	45,20 °C	45,80 °C	43,30 °C	51,00 °C	246,10	327,60
16/12/2015 11:19:38	47,10 °C	46,50 °C	46,10 °C	46,50 °C	41,00 °C	49,80 °C	246,30	320,00
16/12/2015 11:19:43	44,60 °C	45,50 °C	48,00 °C	47,30 °C	40,30 °C	43,70 °C	246,10	327,80
16/12/2015 11:19:48	44,80 °C	45,20 °C	49,50 °C	48,20 °C	42,50 °C	43,30 °C	246,10	323,00
16/12/2015 11:19:53	46,50 °C	45,20 °C	52,20 °C	49,80 °C	44,60 °C	43,30 °C	245,50	328,20
16/12/2015 11:19:58	48,00 °C	45,50 °C	45,20 °C	48,80 °C	44,60 °C	44,80 °C	245,70	325,50
16/12/2015 11:20:03	48,20 °C	48,00 °C	43,10 °C	43,70 °C	44,80 °C	46,50 °C	245,50	325,10
16/12/2015 11:20:08	48,60 °C	47,60 °C	44,30 °C	44,00 °C	45,50 °C	46,50 °C	245,70	327,80
16/12/2015 11:20:13	50,10 °C	45,80 °C	44,80 °C	44,60 °C	47,10 °C	47,60 °C	246,10	327,80
16/12/2015 11:20:18	50,10 °C	47,30 °C	45,20 °C	45,50 °C	47,60 °C	49,20 °C	246,10	329,70
16/12/2015 11:20:23	46,70 °C	47,30 °C	45,80 °C	46,10 °C	49,50 °C	51,60 °C	246,30	324,80
16/12/2015 11:20:28	45,20 °C	49,80 °C	47,10 °C	46,50 °C	49,80 °C	48,00 °C	245,70	328,50
16/12/2015 11:20:33	45,20 °C	50,10 °C	49,20 °C	47,30 °C	52,60 °C	43,70 °C	245,70	323,00
16/12/2015 11:20:38	46,50 °C	41,60 °C	52,80 °C	48,60 °C	49,20 °C	44,80 °C	245,10	327,60

Legenda:

Tc - Lado Frio

Th - Lado quente

ANEXO A – CÓDIGO DE CORES DOS TERMOPARES CONFORME NORMAS

SENSOR	COMBINAÇÃO METÁLICA		NORMA AMERICANA ANSI MC -96.1	NORMA INTERNACIONAL IEC 584-3	NORMA INGLESA BS 1843	NORMA ALEMÃ DIN 43710	NORMA JAPONESA JIS C1610-1981	LIMITE DE ERRO	
	FIO +	FIO -						PADRÃO	ESPECIAL
J	Fe (magnético)	Constantan Cu-Ni						2,2°C ou 0,75%	1,1°C ou 0,4%
K	Niquel-Cromo Ni - Cr	Niquel-Alum Ni - Al (magnético)						2,2°C ou 0,75%	1,1°C ou 0,4%
W*X	Cobre Cu	Cu - Ni							
T	Cobre Cu	Constantan Cobre-Niquel Cu - Ni						1,0°C ou 0,75%	0,5°C ou 0,4%
E	Niquel-Cromo Ni - Cr	Constantan Cobre-Niquel Cu - Ni						1,7°C ou 0,5%	1,0°C ou 0,4%
N	Nicrosil Ni-Cri-Si	Nisil Ni-Si-Mg					Não é padrão Utilize cores norma ANSI	2,2°C ou 0,75%	1,1°C ou 0,4%
R	Platina 13% rodhio Pt-10% Rh	Platina Pt						1,5°C ou 0,25%	0,6°C ou 0,1%
S	Platina 10% rodhio Pt-10% Rh	Platina Pt						1,5°C ou 0,25%	0,6°C ou 0,1%
B	Platina 30% rodhio Pt-30% Rh	Platina 6% rodhio Pt-6% Rh			Use fio de cobre			0,5% 800°C	Não estabilizado

ANEXO B – 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

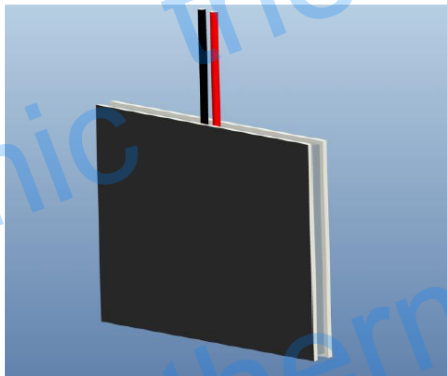
TELBP1-12656-0.45

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.

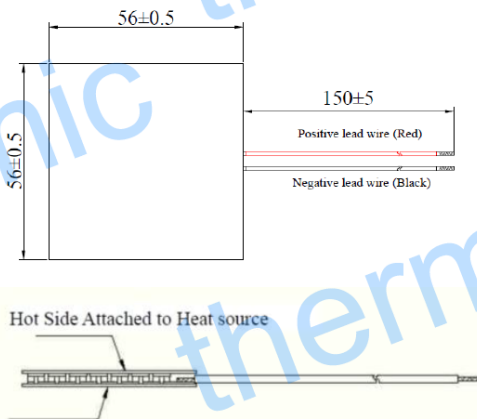
Patent NO.: ZL 2010 1 0193517.9

Specification of the Module

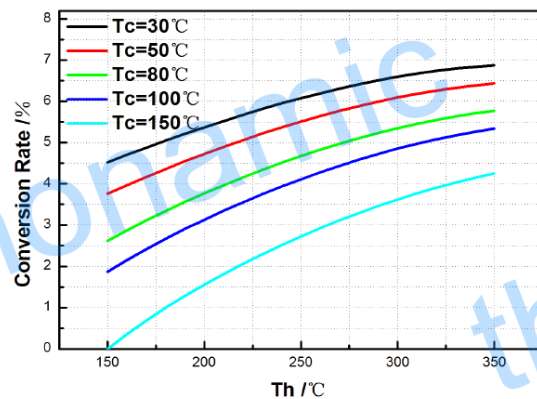


Hot Side Temperature / Th (°C)	350
Cold Side Temperature / Tc (°C)	30
Open Circuit Voltage (V)	9.2
Matched Load Resistance (ohms)	0.97
Matched load output voltage (V)	4.6
Matched load output current (A)	4.7
Matched load output power (W)	21.7
Heat flow across the module(W)	≈ 247
Heat flow density(W cm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

Geometric Characteristics Dimensions in millimeter



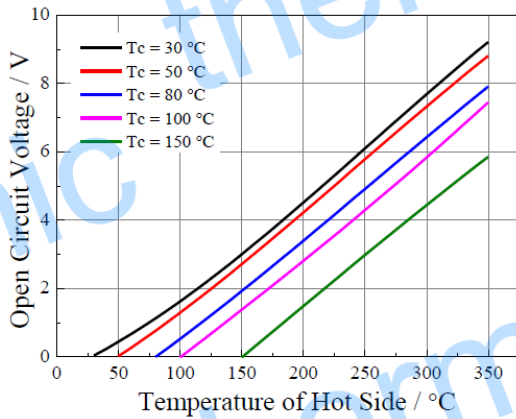
Conversion Rate of the modules Vs Th under various Tc



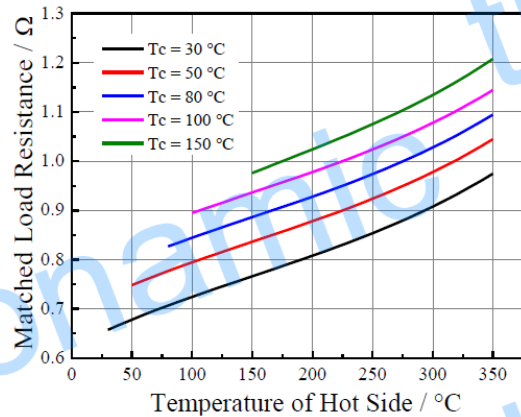
Noted: Conversion rate = Matched load output power/Heat flow through the module

Performance Curves of the Module

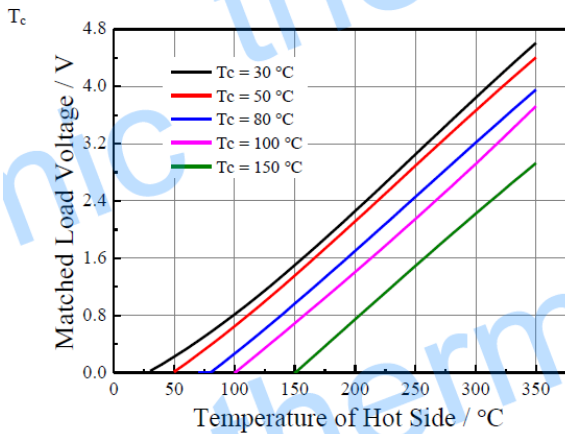
TELBP1-12656-0.45



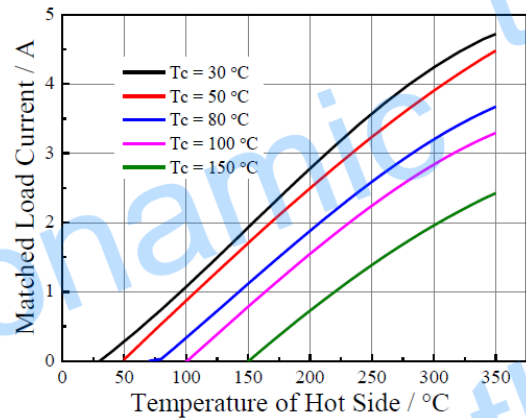
The chart for open circuit voltage Vs T_h under various T_c



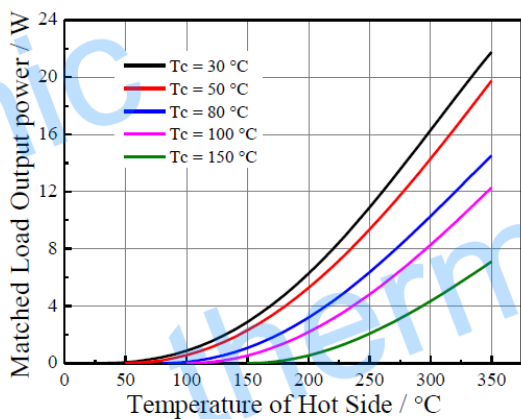
The chart for matched load resistance Vs T_h under various T_c



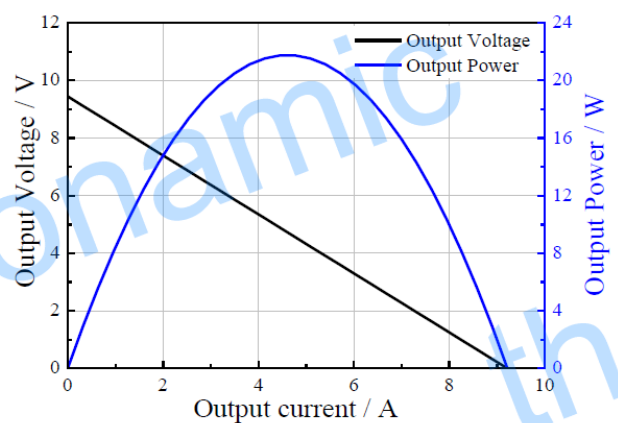
The chart for matched load voltage Vs T_h under various T_c



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/0578463733869836>

Mestranda em Tecnologia de Processos Sustentáveis pelo IFG Goiânia, possui pós-graduação em Gerenciamento de Projetos pela Faculdade Alves Faria (2011), graduação em Engenharia de Controle e Automação pela Universidade Paulista (2006) e curso técnico em Eletrotécnica pelo CEFET-GO (1999). Atualmente é professora no Instituto Federal Goiano (IF Goiano - Câmpus Trindade) e Pesquisadora no Núcleo de Estudos Experimentais e Tecnológico do Instituto Federal de Goiás (NExT/IFG). Tem experiência na área de Engenharia de Controle e Automação, sendo a área de atuação em: Automação e manutenção industrial; Gerenciamento de projetos (utilizando MS Project) e desenvolvimento de máquinas e processos; Programação de CLPs, Sistemas Supervisórios e Inversores de Frequência; Projetos elétricos e eletro-pneumáticos; Especificação técnica e funcional de equipamentos.