

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E
SUSTENTABILIDADE**

**REAPROVEITAMENTO DE CALOR DE UMA CALDEIRA
PARA COGERAÇÃO DE ENERGIA PELO EFEITO SEEBECK**

HILTON JAMES DE LIMA NUNES

CAMPO GRANDE

2018

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

REAPROVEITAMENTO DE CALOR DE UMA CALDEIRA
PARA COGERAÇÃO DE ENERGIA PELO EFEITO SEEBECK

HILTON JAMES DE LIMA NUNES

Trabalho de Conclusão Final de Curso (para defesa) do Mestrado Profissional apresentada na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração Eficiência Energética.

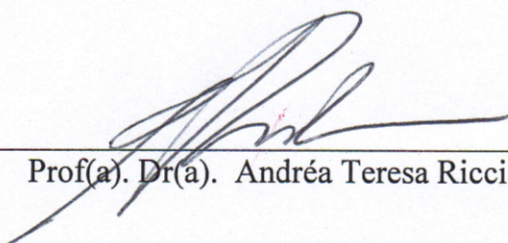
Orientador: Prof(a). Dr(a). Andréa Teresa Riccio Barbosa

CAMPO GRANDE

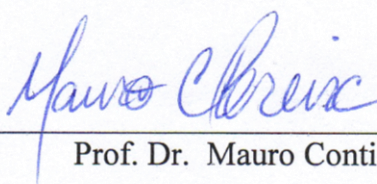
Agosto / 2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

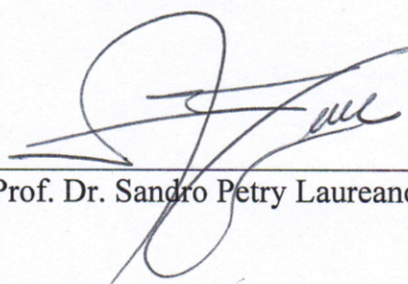
Redação final do Trabalho de Conclusão Final de Curso defendida por **Hilton James de Lima Nunes**, aprovada pela Comissão Julgadora em 23 de Agosto de 2018, na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade.



Prof(a). Dr(a). Andréa Teresa Riccio Barbosa – Orientadora
FAENG/UFMS



Prof. Dr. Mauro Conti Pereira – Membro Titular
CCE/UCDB



Prof. Dr. Sandro Petry Laureano Leme – Membro Titular
FAENG/UFMS

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao Senhor Jesus por me conceder sabedoria e graça.

*Dedico também a minha esposa Miriam Galiano, que com muito amor
tem me ensinado a ser cada dia mais paciente e a esperar no Senhor.*

*Dedico também ao meu filho Davi, que tem me ensinado a ser um melhor
pai todos os dias através da simplicidade de seus sorrisos e carinhos*

*Dedico também aos meus pais por serem tão dedicados
e incondicionais em amor.*

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor Jesus,

A minha esposa Miriam Galiano P. Lima,

Ao meu filho Davi Galiano Lima.

Aos meus pais, Ramão Oliveira Nunes e Zenaide Lima Nunes,

EPÍGRAFE

*“Aquele que anda com sábios ficará cada vez mais sábio,
mas o companheiro dos tolos acabará mal”*

Provérbios (13:20)

*“E, quando Deus concede riquezas e bens a alguém, e o capacita a desfrutá-los, a
aceitar a sua sorte e a ser feliz em seu trabalho, isso é um presente de Deus.”*

Eclesiastes 5:19

*“Instrui ao sábio, e ele se tornará mais sábio;
Ensina ao justo, e ele crescerá na ciência.”*

Provérbios 9:9

*“Se eu tivesse oito horas para derrubar uma árvore,
passaria seis afiando meu machado.”*

Abraham Lincoln

RESUMO

O Efeito Seebeck foi descoberto por Thomas Seebeck em 1821 quando observou que dois materiais metálicos distintos, quando unidos, se aquecidos em uma de suas junções, apresentam uma corrente elétrica. Esse efeito tem a capacidade de recuperar parte da energia térmica e transformá-la em energia elétrica, isso sem a liberação de resíduos. Ao longo dos anos, diversas pesquisas científicas foram elaboradas propondo o seu uso, em diferentes situações. E, a partir desses estudos, originou-se o módulo termoelétrico, um dispositivo composto por semicondutores dopados por diferentes materiais metálicos. Este trabalho propõe a aplicação de módulos termoelétricos para estudar o aumento da eficiência de uma caldeira, através do Efeito Seebeck. Sabe-se que caldeiras são dispositivos que geram vapor através da queima de um determinado combustível e durante este processo perdem calor, que é irradiado através de suas paredes. A recuperação de calor é necessária e de extrema importância para diminuir o desperdício de energia em processos e máquinas. E como todas as tecnologias utilizadas atualmente, tal recuperação pode ser aprimorada com novas técnicas e equipamentos mais eficientes. Diante dessa problemática, foi construído um protótipo para analisar a quantidade de calor que pode ser reaproveitada por um módulo termoelétrico na caldeira de um hospital. Durante esse trabalho, um *datalogger* foi desenvolvido para analisar o desempenho do protótipo e foi utilizada uma câmera termográfica para aferir e definir parâmetros do projeto. A partir do calor irradiado em um módulo termoelétrico aplicado em uma área medindo $0,0016\text{m}^2$, obteve-se a potência média de $0,079\text{W}$, com um rendimento médio de $0,052\%$. A caldeira junto ao seu sistema de exaustão possui área total de $61,48\text{ m}^2$, porém somente a área de $59,48\text{m}^2$ permite a expansão do protótipo com o área utilizável. A partir desta área utilizável foi inferida uma estimativa em condições ideais para um potencial de cogeração de $2,9\text{ kW/h}$. A criação de um protótipo que contemple toda a caldeira como idealizado é economicamente inviável. Possivelmente, no futuro, os módulos termoelétricos podem apresentar uma maior eficiência e ter um menor custo, o que pode tornar este projeto viável economicamente. Esses resultados demonstram que apesar do alto custo de implementação do projeto, é possível cogerar energia em uma caldeira através do Efeito Seebeck.

Palavras- chaves: Efeito Seebeck, caldeira, cogeração.

ABSTRACT

The Seebeck Effect was discovered by Thomas Seebeck in 1821 when he observed that two distinct metallic materials, when united, if heated in one of their joints, present an electric current. This effect has the ability to recover some of the thermal energy and transform it into electrical energy, without the release of waste. Over the years, several scientific researches have been developed proposing its use, in different situations. And, from these studies, the thermoelectric module originated, a device composed of semiconductors doped by different metallic materials. This work proposes the application of thermoelectric modules to study the increase of the efficiency of a boiler, through the Seebeck Effect. It is known that boilers are devices that generate steam through the burning of a particular fuel and during this process lose heat, which is radiated through its walls. Heat recovery is necessary and of utmost importance to reduce the waste of energy in processes and machines. And like all technologies currently used, such a recovery can be enhanced with new, more efficient techniques and equipment. Faced with this problem, a prototype was constructed to analyze the amount of heat that can be reused by a thermoelectric module in the boiler of a hospital. During this work, a datalogger was developed to analyze the performance of the prototype and a thermographic camera was used to gauge and define project parameters. From the heat radiated in a thermoelectric modulus applied in an area measuring 0.0016m^2 , the average power of 0.079W was obtained, with an average yield of 0.052% . The boiler next to its exhaust system has a total area of 61.48 m^2 , but only the area of 59.48m^2 allows the expansion of the prototype with the usable area. From this usable area an ideal estimate for a potential of cogeneration of $2.9\text{ kW} / \text{h}$ was inferred. The creation of a prototype that contemplates the whole caldera as idealized is economically unfeasible. Possibly, in the future, the thermoelectric modules can present a greater efficiency and have a lower cost, which can make this project economically viable. These results demonstrate that despite the high cost of implementing the project, it is possible to capture energy in a boiler through the Seebeck Effect.

Keywords: Seebeck Effect, boiler, cogeneration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Missões espaciais onde foi utilizada tecnologia termoelétrica.....	20
Figura 2 – MMRTG a bordo da espaçonave <i>New Horizons</i>	21
Figura 3 – Gerador termoelétrico	24
Figura 4 – Sistema de cogeração no sistema de exaustão de um motor	25
Figura 5 – Esquema de um fio quântico retangular de PbTe.....	26
Figura 6 – Tubo octogonal com a instalação de 8 termo geradores.	27
Figura 7 - Gráfico 1ª etapa de buscas de artigos científicos	29
Figura 8 – Gráfico 2ª etapa de buscas de artigos científicos	29
Figura 9 - Gráfico 3ª etapa de buscas de artigos científicos	30
Figura 10 – Funcionamento básico de uma caldeira.....	33
Figura 11 - Trocadores de tubos concêntricos	34
Figura 12 - Trocadores com escoamento cruzado aletado e não-aletado	34
Figura 13 - Trocador de calor casco e tubos	35
Figura 14 - Trocadores compactos de tubos aletados	35
Figura 15 – Funcionamento de uma caldeira aquatubular	36
Figura 16 – Funcionamento de uma caldeira flamotubular	37
Figura 17 - Efeito Seebeck	43
Figura 18 - Gerador termoelétrico	44
Figura 19 - Efeito Peltier	45
Figura 20- Termopar.....	48
Figura 21- Gerador termoelétrico	49
Figura 22 - Refrigerador termoelétrico	50
Figura 23 - Caldeira do HRMS.....	58
Figura 24 – Esquema do protótipo.....	60
Figura 25 - Tarugo de alumínio utilizado no desenvolvimento do coletor de calor	61
Figura 26 – Tarugo de alumínio com vários furos para termopares	62
Figura 27 – Módulos termoelétricos.....	62
Figura 28 – Dissipador de calor	63
Figura 29 – Dissipador de calor com furo lateral para instrumentação	64
Figura 30 – Módulos termoelétricos sobre o dissipador de calor	64

Figura 31 – Dissipador de calor encaixado no cano de PVC.....	65
Figura 32 – Montagem dos tubos de PVC.....	65
Figura 33 – Termografia do local adequado para a instalação do protótipo	66
Figura 34 – Local da montagem do protótipo na caldeira do HRMS.....	67
Figura 35 - Coletor de calor na caldeira	68
Figura 36 – carga (<i>RL</i>), multímetros e alimentação elétrica	68
Figura 37 – Computador preso a tampa da caixa metálica	69
Figura 38 – protótipo em funcionamento na caldeira do HRMS.....	69
Figura 39 – identificação das partes do protótipo.....	70
Figura 40 – Caixa metálica	70
Figura 41 – Entrada de ar.....	71
Figura 42 – <i>Datalogger</i>	71
Figura 43 – Núcleo de cogeração	72
Figura 44 – Tubo de PVC	72
Figura 45 – tubo de PVC e bocal do queimador.....	73
Figura 46 – Termopar do tipo K	73
Figura 47 – Distribuição dos sensores no protótipo	74
Figura 48 – Sensor de temperatura LM35	75
Figura 49 – Esquema eletrônico do <i>datalogger</i>	76
Figura 50 – Foto da placa eletrônica.....	78
Figura 51 – Fluxograma do <i>datalogger</i>	79
Figura 52 – Módulos termoeletrônicos.....	80
Figura 53 – Termografia da caldeira	81
Figura 54 – Termografia da caldeira	81
Figura 55 – Termografia da caldeira	82
Figura 56 – Termografia da caldeira	82
Figura 57 – Termografia da caldeira	82
Figura 58 – Termografia da caldeira	82
Figura 59 – Termografia, emissividade 0,98	83
Figura 60 – Termografia, emissividade 0,74	83
Figura 61 – local de instalação do coletor de calor	84
Figura 62 – Termografia na região da fornalha	84

Figura 63 – Termografia: coletor de calor	85
Figura 64 – Termografia: coletor de calor polido.....	85
Figura 65 – Foto do protótipo completo funcionando junto à caldeira	86
Figura 66 – Termografia do protótipo em	86
Figura 67 – Termografia da caldeira	87
Figura 68 – Termografia da caldeira	87
Figura 69 – T1, T2, T3 e T4	88
Figura 70 – T1 e T2	90
Figura 71 – Histograma T1.....	91
Figura 72 – Histograma T2.....	91
Figura 73 – T3 e T4	92
Figura 74 – Histograma T3.....	93
Figura 75 – Histograma T4.....	93
Figura 76 – T1, T2 e delta	94
Figura 77 – Histograma Delta.....	95
Figura 78 – Delta e Potência Gerada	95
Figura 79 – Histograma potência.....	96
Figura 80 – Delta e tensão gerada a vazio	97
Figura 81 – Histograma V_a	98
Figura 82 – V_a e Coeficiente Seebeck.....	99
Figura 83 – Histograma Coeficiente Seebeck	100
Figura 84 – R_{in} e Potência gerada	101
Figura 85 – Histograma Resistência Interna (R_{in})	102
Figura 86 – Potência gerada e rendimento	105
Figura 87 – Histograma Rendimento.....	106
Figura 88 – Potencial de cogeração da caldeira e curva de carga de 6 residências de 330KWh	109
Figura 89 – Potencial de cogeração da caldeira e potencial de geração solar para 6 residências	113
Figura 90 – Ficha técnica do gerador solar consultado na internet	114
Figura 91 – Potencial de cogeração da caldeira e potencial de geração solar para 6 residências	115

Figura 92 – Potencial de cogeração da caldeira, potencial de geração solar e curva de carga.....	116
Figura 93 – Potencial de cogeração da caldeira e curva de carga de 2 residências	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pesquisa Bibliométrica	30
Tabela 2 – publicações por ano	31
Tabela 3 - Dados estatísticos T1, T2, T3 e T4.....	89
Tabela 4 – Dados estatísticos T1 e T2	90
Tabela 5 - Dados estatísticos T3 e T4.....	92
Tabela 6 – Estatística T1, T2 e Delta.....	94
Tabela 7 – Estatística delta e potência	96
Tabela 8 – Estatística Delta e V_a	97
Tabela 9 – Estatística V_a e Coeficiente Seebeck.....	99
Tabela 10 – Estatística Potência e Resistência Interna	102
Tabela 11 – Estatística Potência e Rendimento	105
Tabela 12 – Área utilizável da caldeira e sistema de exaustão	108
Tabela 13 – Potencial de cogeração termoelétrica	108
Tabela 14 – <i>Payback</i> descontado.....	111
Tabela 15 – Potencial de geração solar e potencial de cogeração na caldeira.....	115

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Bi_2Te_3	Telureto de Bismuto
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
HRMS	Hospital Regional de Mato Grosso do Sul
LADE	Laboratório de Análise e Desenvolvimento de Edificações
MMRTG	<i>Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PbTe	Telureto de Chumbo
PC	Poder Calorífico
Pcc	Perdas associadas ao combustível presente nas cinzas
Pp	Perdas por purgas
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
Ptc	Perdas associadas à temperatura das cinzas
PU-238	Plutônio
PVC	Policloreto de polivinila
TIR	Taxa Interna de Retorno
TTL	<i>Transistor–transistor logic</i>
URSS	União Soviética
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VPL	Valor Presente Líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Coeficiente Seebeck [V/° C];
α_a	Coeficiente Seebeck referente ao material A [V/° C];
α_b	Coeficiente Seebeck referente ao material B [V/° C];
β	Coeficiente de Thomson [V/° C];
ΔT	Diferença de temperatura entre os meios [° C, K];
Δx	Espessura de material que o calor deverá atravessar [m];
π	Coeficiente Peltier [V];
A	Área de contato [m²];
C_{Pa}	Calor específico da água no estado líquido [kJ/kg ° C];
C_{Par}	Calor específico médio do ar entre T_{CH} e T_{Ref} [kJ/kg ° C];
C_{Par}	Calor específico médio do vapor entre T_{CH} e T_{Ref} [kJ/kg ° C];
$E_2 - E_1$	Variação total de energia do sistema, determina-se através das variações de energia interna, cinética e potencial [J];
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m²K];
h_a	Entalpia da água [kJ/kg];
h_v	Entalpia do vapor [kJ/kg];
I	Corrente elétrica [A];
I_L	Corrente elétrica na carga [A]
k	Condutividade térmica do material [W/° C.m];
$\dot{m}_c$	Vazão mássica do combustível [kg/s];
$\dot{m}_v$	Vazão mássica do vapor [kg/s];
$\dot{m}_{GS}$	Vazão mássica dos gases de combustão [kg/s];
m_c	Massa de carbono presente nas cinzas ([kg/kg] de comb.);
m_v	Vazão mássica de vapor ([kg/kg] de comb.);
m_p	Vazão média de água purgada ([kg/kg] de comb.);
m_r	Massa de cinza obtida pela massa de combustível ([kg/kg] de comb.);
m'_v	Vazão mássica do vapor formado na combustão e presente no combustível ([kg/kg] de comb.);
η	Rendimento teórico [Adimensional]

η_{MD}	Eficiência método direto [Adimensional];
η_{rev}	Rendimento teórico [Adimensional]
η_{rev}	Eficiência de uma máquina de Carnot
η_{ttl}	Rendimento teórico total [Adimensional];
Q_j	Calor gerado [W];
Q_p	Quantidade de calor por unidade de área de contato da junção [W];
Q_t	Temperatura no lado frio [° C, K];
R	Resistividade elétrica do material [Ω .m];
R_L	Resistência da carga [Ω];
R_{in}	Resistência interna do módulo termoeletrico [Ω]
T_h	Temperatura alta proveniente da fonte de calor quente [° C, K];
T_{CH}	Temperatura dos gases na chaminé [° C];
T_H	Temperatura alta proveniente da fonte de calor quente [° C, K];
T_{Ref}	Temperatura de referência adotada [° C];
T_c	Temperatura baixa proveniente da fonte de calor fria [° C, K];
T_f	Temperatura do fluido em um lugar afastado da superfície [° C, K];
T_p	Temperatura de saturação da água na pressão da caldeira [° C];
T_s	Temperatura da superfície [° C, K];
V_0	Tensão gerada a vazio [V];
V_L	Tensão sobre a carga [V];
$W_{1\rightarrow 2}$	Trabalho sofrido ou exercido pelo sistema [J];
W_{Liq}	Trabalho líquido realizado pela máquina térmica [J];
W_{ttl}	Trabalho líquido que a máquina realiza [W];
PC	Poder calorífico do combustível [kJ/kg];
V	Diferencial de potencial elétrico [V];

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	38
Equação 2.....	39
Equação 3.....	39
Equação 4.....	40
Equação 5.....	40
Equação 6.....	41
Equação 7.....	41
Equação 8.....	43
Equação 9.....	45
Equação 10.....	45
Equação 11.....	46
Equação 12.....	46
Equação 13.....	47
Equação 14.....	48
Equação 15.....	50
Equação 16.....	51
Equação 17.....	51
Equação 18.....	52
Equação 19.....	52
Equação 20.....	53
Equação 21.....	54
Equação 22.....	55
Equação 23.....	89
Equação 24.....	98
Equação 25.....	100
Equação 26.....	100
Equação 27.....	102
Equação 28.....	103
Equação 29.....	104
Equação 30.....	104

SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO.....	ii
DEDICATÓRIA.....	iii
AGRADECIMENTOS	iv
EPÍGRAFE	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
LISTA DE EQUAÇÕES	xvi
SUMÁRIO.....	xvii
1 Introdução	20
1.1 Justificativa	22
1.2 Objetivos.....	23
1.2.1 Objetivo Geral	23
1.2.2 Objetivos específicos	23
1.2.3 Divisão do Trabalho	23
2 Trabalhos relacionados.....	24
2.1 Pesquisa Bibliométrica	28
2.1.1 Resultados bibliométricos	29
3 Fundamentos teóricos.....	32
3.1 Definição e funcionamento de Caldeiras	32
3.2 Alguns modelos mais utilizados de trocadores de calor:	34
3.3 Tipos de caldeiras	36
3.3.1 Caldeira Aquatubular.....	36
3.3.2 Caldeira flamotubular	36
3.3.3 Caldeira de recuperação.....	37
3.4 Cálculo da eficiência de uma caldeira e tipos de perdas.....	37
3.4.1 Perdas pela chaminé	38
3.4.2 Perdas por radiação e convecção	39
3.4.3 Perdas por purgas (Pp).....	40

3.4.4	Perdas associadas à temperatura das cinzas (Ptc).....	40
3.4.5	Perdas associadas ao combustível presente nas cinzas (Pcc).....	40
3.5	Problemas comuns	41
3.6	Como aumentar a eficiência de uma caldeira	41
3.7	Efeito Seebeck	42
3.8	Efeito Peltier	44
3.9	Efeito Thomson.....	46
3.10	Efeito Joule.....	47
3.11	Termopar	47
3.12	Módulos Termoelétricos	48
3.13	Termodinâmica do Sistema.....	50
3.14	Transferência de calor	53
3.14.1	Transferência de calor através de condução térmica	54
3.14.2	Transferência de calor através da convecção térmica.....	54
3.14.3	Isolamento térmico	55
4	Metodologia	57
4.1	Localização da pesquisa.....	57
4.1.1	A caldeira.....	58
4.2	Análise termográfica da caldeira e sistema de exaustão	59
4.3	Desenvolvimento do Protótipo de Cogeração de Energia	59
4.3.1	Coletor de calor	61
4.3.2	Módulos termoelétricos	62
4.3.3	Dissipador de calor	63
4.3.4	Tubo de PVC	65
4.3.5	Definição do local da instalação do protótipo na caldeira.....	66
4.3.6	Montagem do protótipo na caldeira.....	66
4.4	Instrumentação do protótipo	73
4.4.1	Funcionamento do <i>datalogger</i>	77
5	Resultados	80
5.1	Análise termográfica da caldeira e sistema de exaustão	81
5.1.1	Primeira etapa da análise termográfica.....	81
5.1.2	Segunda etapa da análise termográfica.....	83
5.1.3	Terceira etapa da análise termográfica	86
5.2	Análise dos dados obtidos com o <i>datalogger</i>	87
5.2.1	Análise das temperaturas	88
5.2.2	Análise da potência gerada pelo delta de temperaturas	94

5.2.3	Análise da tensão gerada a vazio	98
5.2.4	Análise da potência gerada sobre a carga	100
5.2.5	Análise da quantidade de calor fornecido ao módulo termoeletrico	102
5.2.6	Análise da quantidade de calor dissipado pelo módulo termoeletrico	103
5.2.7	Análise do rendimento térmico.....	104
6	Discussão.....	107
6.1	Análise dos resultados	107
6.2	Análise da viabilidade econômica	108
6.3	Análise de viabilidade econômica	109
6.3.1	Valores utilizados nos cálculos de viabilidade	109
6.3.2	<i>Payback</i> descontado	110
6.3.3	Valor Presente Líquido (VPL).....	112
6.3.4	Taxa Interna de Retorno (TIR)	112
6.3.5	Análise de investimentos	112
6.4	Semelhanças com um sistema de geração fotovoltaico	112
6.4.1	Diferenças com sistema de geração solar	113
6.5	Comparação do sistema proposto com um kit de geração solar	113
6.6	Proposta de trabalhos futuros.....	117
6.7	Dificuldades	118
7	Conclusão.....	119
8	Referências.....	120

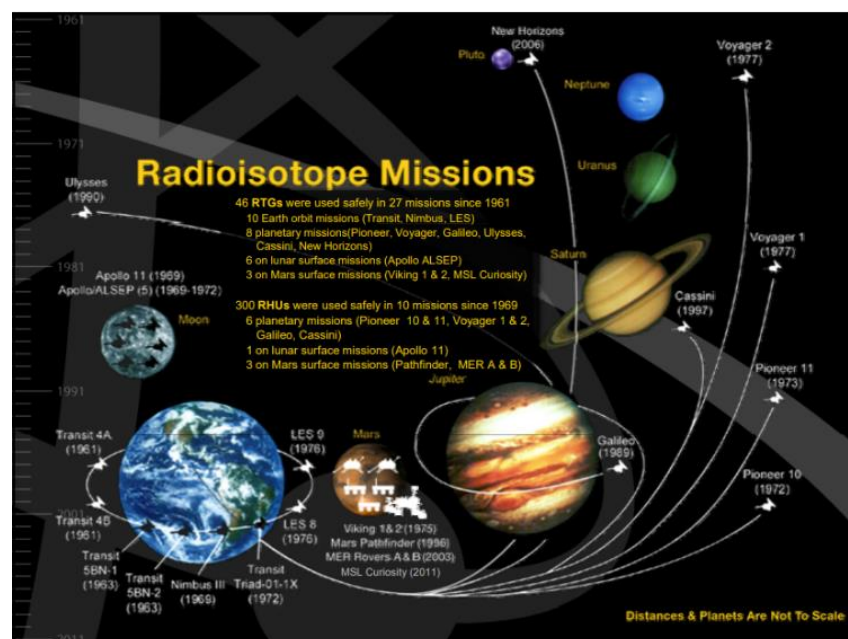
1 INTRODUÇÃO

Empresas em geral como indústrias, hospitais, lavanderias e muitas outras utilizam caldeiras, que são fontes de calor, que desperdiçam energia térmica. Diante desse processo de desperdício, percebe-se uma oportunidade de realizar melhorias para aumentar a eficiência do sistema, que podem ser obtidas através do uso dos módulos termoelétricos, com o feito Seebeck.

Salienta-se que a geração termoelétrica de energia proveniente do Efeito Seebeck tem sido amplamente utilizada, desde sua descoberta em meados 1821, quando Thomas Seebeck observou que quando dois metais distintos unidos são aquecidos, em sua junção, surge uma diferença de potencial elétrico (MOURA, 2010; FERNANDES, 2012).

Esse fenômeno, denominado Efeito Seebeck, que é a geração de energia a partir de um diferencial de potencial térmico, tem despertado atenção de muitos pesquisadores e instituições ao longo dos anos. Como, por exemplo, a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) que em meados de 1955 iniciou pesquisa com o uso de módulos termoelétricos, resultando na construção do *Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator* (MMRTG), (Figura 1).

Figura 1 – Missões espaciais onde foi utilizada tecnologia termoelétrica



Fonte: (NASA 2018)

Tendo como base de seu funcionamento a geração termoelétrica através do Efeito Seebeck e foi utilizada em várias missões espaciais como pode ser observado na Figura 1 (NASA 2018).

O MMRTG utiliza módulos termoelétricos que convertem o calor proveniente do plutônio (PU-238) em energia elétrica para abastecer todo o *hardware* da missão. O MMRTG pode ser observado a bordo da espaçonave *New Horizons* (Figura 2).

Figura 2 – MMRTG a bordo da espaçonave *New Horizons*



Fonte: (NASA 2018)

A antiga União Soviética (URSS) também efetuou pesquisas e executou projetos similares, como a aplicações dos módulos termoelétricos nos satélites Cosmos-84 e Cosmos-90.

Atualmente a aplicação dos módulos termoelétricos é comum na indústria aeronáutica, capturando calor desperdiçado a partir do sistema de exaustão do motor e gerando energia para toda a aeronave, sem afetar o desempenho do motor (BENNETT, 2005).

Diante desse contexto, esse trabalho traz uma proposta inovadora, testando o aumento da eficiência de uma caldeira com a aplicação de módulos termoelétricos em sua estrutura, para absorver o calor residual e transformá-lo em energia elétrica útil.

Como resultado, espera-se comprovar o aumento da eficiência da caldeira, utilizada nesse trabalho. Observando-se que as melhores caldeiras fabricadas nos dias atuais, mesmo com a utilização de gás natural como combustível ou quando abastecidas

a carvão, apresentam eficiência energética variando de 75% a 85% (BARROS, BORELLI e GEDRA 2015).

1.1 Justificativa

O funcionamento de uma máquina ou processo é tema recorrente em estudos, para se alcançar novos níveis de eficiência energética. Nesse processo, nota-se que a caldeira é uma máquina térmica que recebeu melhorias e grandes avanços tecnológicos desde sua invenção. O emprego de novos tipos de materiais isolantes e de condução térmica permitiram melhorias significativas em sua eficiência. Como, por exemplo, as caldeiras flamotubulares, que segundo Barros (2015), possuem atualmente sua eficiência energética variando de 75% a 78%, enquanto que as caldeiras aquatubulares demonstram um melhor desempenho, variando de 80% a 85% de eficiência.

Tais números demonstram-se atrativos, principalmente nos dias atuais, quando leva-se em conta o custo da energia elétrica, o custo dos combustíveis fósseis e a atual situação econômica do país. Contudo, é possível melhorar ainda mais essas porcentagens, com estudos e projetos que utilizam novas tecnologias de cogeração de energia e reaproveitamento de calor.

Salienta-se que com o aumento da eficiência desses sistemas haverá economia de combustíveis fósseis, normalmente utilizados. Além de contribuir com o meio ambiente, pois quanto maior o aproveitamento da quantidade de calor gerado, maior será sua eficiência global e menor será a emissão de gases que provocam o efeito estufa em nosso planeta.

Assim, esses fatos motivaram a pesquisa, para o desenvolvimento de um protótipo que efetuará cogeração de energia, ao absorver o calor residual da caldeira. Dessa forma, foram utilizados módulos termoeletricos, que a partir do Efeito Seebeck convertem o diferencial de potencial térmico em energia elétrica útil.

Esta pesquisa tem como base trabalhos científicos que foram consultados e serviram como referência para esta inovação, no aumento da eficiência de quaisquer tipos ou modelos de caldeiras.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o aumento de eficiência energética de uma caldeira, a partir de um sistema de cogeração de energia, compostos por módulos termoelétricos com o Efeito Seebeck.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desse trabalho podem ser listados da seguinte forma:

- Obter os parâmetros de funcionamento da caldeira;
- Projetar um sistema pontual de módulos termoelétricos para obter seus parâmetros;
- Realizar simulações do sistema projetado;
- Transformar o calor desperdiçado de uma caldeira em energia elétrica útil;
- Inferir o aumento da eficiência de uma caldeira ao aplicar o sistema de cogeração de energia composto pelos módulos termoelétricos em toda a caldeira;
- Apresentar o estudo de viabilidade econômica.

1.2.3 Divisão do Trabalho

Esse trabalho está dividido em quatro partes:

- Introdução teórica;
- Metodologia para avaliação;
- Resultados esperados;
- Conclusão.

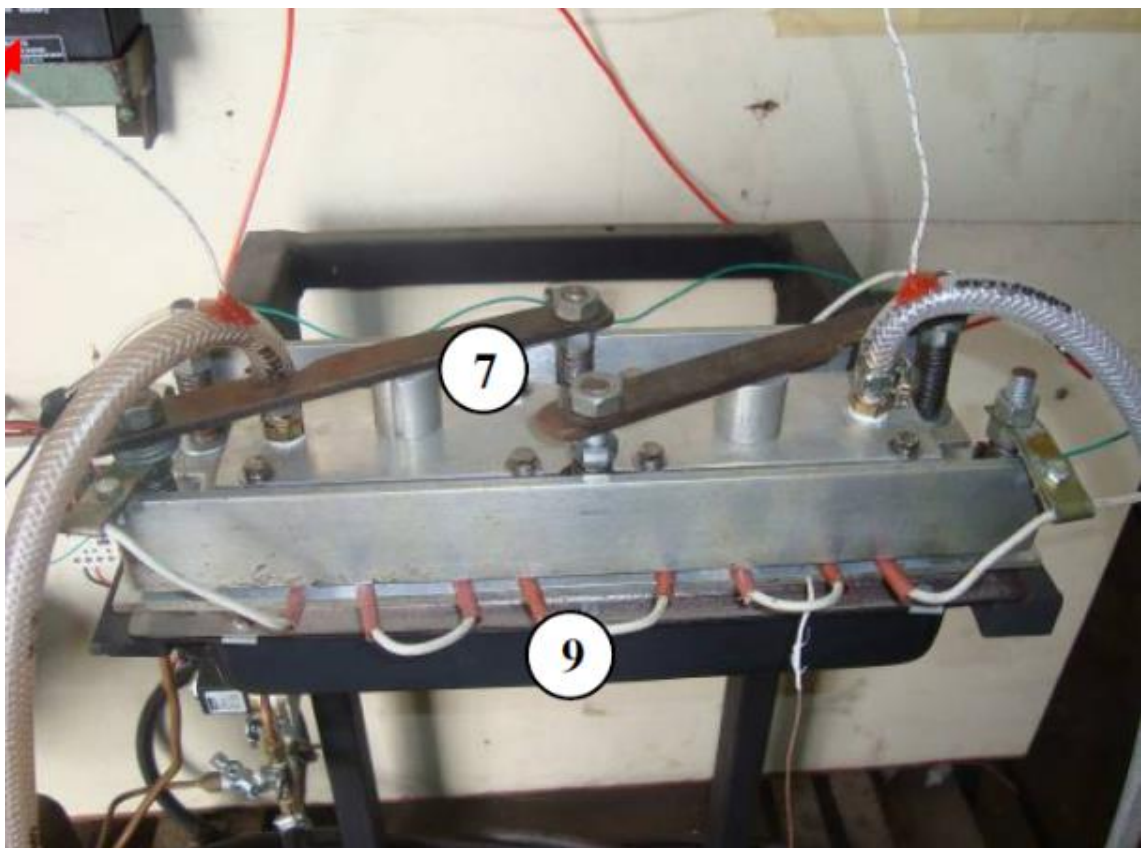
2 TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção são apresentados trabalhos que abordam alguns temas e suas relações com o projeto proposto.

Sakatsume (2004) apresenta uma análise de diferentes tipos micro geradores. Avaliando cada tecnologia, seu desempenho, a recuperação de calor, as emissões de gases que provocam o efeito estufa, os avanços tecnológicos e os equipamentos existentes. O micro gerador termoelétrico a base do Efeito Seebeck é apresentado como um potencial micro gerador a ser utilizado no setor residencial.

Farias (2009) construiu um gerador termoelétrico de estado sólido, capaz de converter a energia térmica liberada na combustão de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) em energia elétrica. Utilizando módulos termoelétricos através do Efeito Seebeck, Farias (2009) obteve como resultado baixa eficiência na conversão de energia térmica para energia elétrica, na ordem de 0,31%, Figura 3.

Figura 3 – Gerador termoelétrico



Fonte: (FARIAS 2009)

Quando se relaciona esses resultados ao poder calorífico do GLP obteve-se baixa eficiência desse gerador termoeletrico, quando comparado com outros tipos de geradores. Inviabilizando assim, a construção de um gerador totalmente dedicado à conversão termoeletrica, composto por módulos termoeletricos a base do Efeito Seebeck. Entretanto, o uso de módulos termoeletricos apresenta grande potencial, quando dedicados a cogeração de energia, assim como é apresentado no projeto proposto.

Santos (2010) montou um protótipo de cogeração de energia sobre o sistema de exaustão de um motor a combustão interna. A fonte de calor principal é o sistema de gases de exaustão e a fonte de arrefecimento dos módulos termoeletricos é a troca de calor natural com o ar. O sistema se mostrou eficiente quanto à cogeração de energia apesar de baixos valores resultantes, que poderiam ser melhores caso fosse utilizado um sistema de arrefecimento forçado, no lado frio dos módulos termoeletricos aumentando assim o desempenho de maneira significativa, Figura 4.

Figura 4 – Sistema de cogeração no sistema de exaustão de um motor

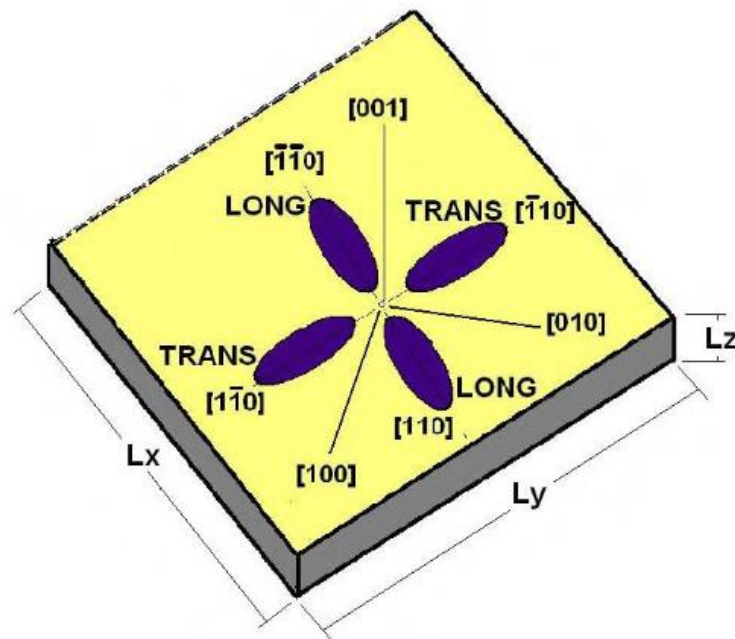


Fonte: (L. P. SANTOS 2010)

Costa (2010) propôs um aumento teórico do rendimento do Efeito Seebeck, em fios quânticos, compostos por telureto de chumbo (PbTe), em substituição ao Telureto de Bismuto (Bi_2Te_3). Mensurou as propriedades termoeletricas e eletrônicas de fios

quânticos compostos por PbTe, a partir da análise de variações na condutância e o Efeito Seebeck nos fios, em função da geometria e de parâmetros estruturais. Realizou estudos comparativos, com resultados experimentais, ao longo das direções dos fios quânticos, Figura 5.

Figura 5 – Esquema de um fio quântico retangular de PbTe



Fonte: (COSTA 2010)

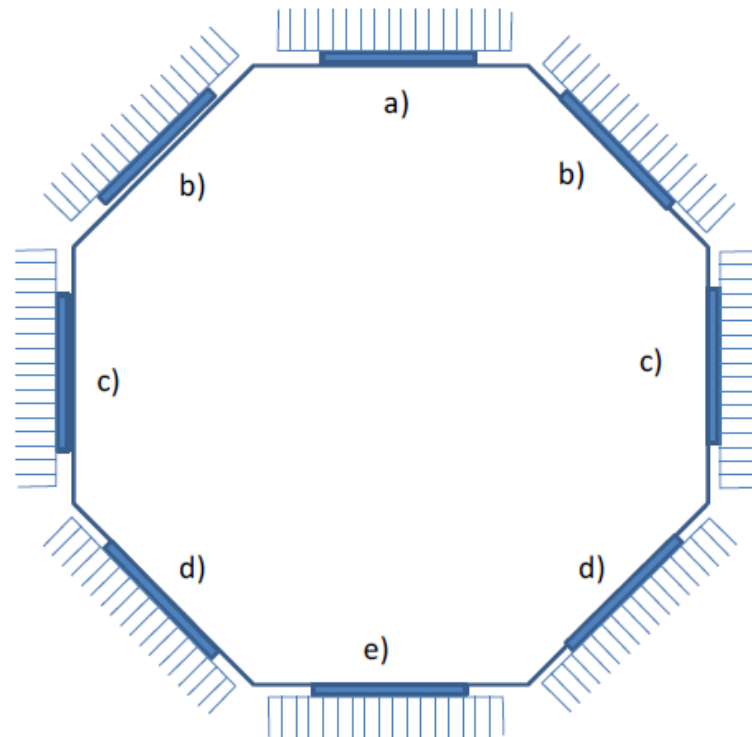
Cristophe et al. (2011) construíram uma análise teórica, com base na evolução científica do Efeito Seebeck, nos últimos cinquenta anos. Estudaram o quanto de entropia é produzida no fenômeno da termoelectricidade, ao avaliarem a densidade de corrente elétrica relativa ao potencial da geração termoeletrica. Assim, encontraram um valor teórico ótimo para a geração de energia, com o mínimo de entropia para aplicações do efeito termoeletrico em geradores de energia de estado sólido.

Carvalho (2012) apresentou uma proposta de geração de energia, a partir do calor gerado no escapamento de um automóvel, utilizando módulos termoeletricos. Em sua pesquisa, comprova a eficácia de seu projeto para geração de energia limpa, sem a liberação de resíduos nocivos para o meio ambiente.

Fernandes (2012) propôs a utilização de módulos termoeletricos para desenvolver um sistema de recuperação de energia de um equipamento industrial. Em

seu trabalho, através de ensaios, comprovou a eficácia da utilização de um gerador constituído por placas termoeletricas alocadas em uma tubulação de alumínio, com face externa octogonal, gerando energia limpa e sem liberação de resíduos para o meio ambiente, Figura 6.

Figura 6 – Tubo octogonal com a instalação de 8 termo geradores.



Fonte: (A. E. FERNANDES 2012)

Véras (2014) investigou e encontrou degradações causadas por ciclos térmicos ou variações de temperatura sobre os módulos termoeletricos comprometendo o seu desempenho. Ele comprovou que se os módulos termoeletricos forem submetidos a uma utilização cíclica, apresentam valores de tensão menores em relação a antes de serem submetidos ao teste.

Ando Junior (2014) construiu um protótipo de micro gerador termoeletrico para captação de energias residuais através do Efeito Seebeck. O seu gerador termoeletrico apresentou resultados atrativos para o uso em cogeração termoeletrica, comprovando a viabilidade técnica de seu uso em máquinas ou processos fabris.

Audiffred (2015) propôs a utilização de geradores termoelétricos em segmentos do sistema de um satélite. A partir de testes experimentais, em bancada, o autor conseguiu comprovar a eficácia do gerador termoelétrico obtendo 112,82 mW de potência em um módulo termoelétrico.

Conforme os trabalhos citados e a pesquisa realizada, verificou-se que o uso da cogeração de energia através do Efeito Seebeck em caldeiras é um assunto ainda inovador, tornando-se uma contribuição sobre a qual o resultado de fornecimento de energia tornará possível estudar se há potencial para sua utilização nas caldeiras.

2.1 Pesquisa Bibliométrica

Para verificar os trabalhos relacionados a esse projeto, foi realizado um levantamento bibliométrico para obter o estado da arte do assunto: “Cogeração de energia através do Efeito Seebeck em caldeiras”. Foram feitas pesquisas nos periódicos eletrônicos Capes, que por sua vez efetua pesquisa dentro de outros *sites* como por exemplo o Elsevier (*Journal of Cleaner Production*), Emerald (*International Journal of Sustainability in Higher Education*), entre outras. Além disso, foi utilizado o *software* livre Harzing’s Publish or Perish versão 5.24.1.6182.

A 1ª etapa da pesquisa nos *sites* foi realizada em dezembro de 2016 utilizando como palavras chave de busca os termos “*Industrial boiler, thermoelectricity, Seebeck*” que em português é “Caldeira industrial, termoeletricidade, Seebeck”.

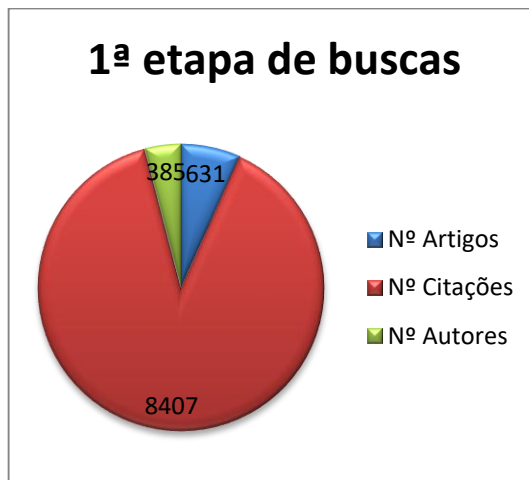
Na 2ª etapa da pesquisa a prioridade foram os trabalhos apresentados a partir de 2010, delimitando os artigos. O fato de selecionar os artigos mais novos, dos últimos seis anos, leva em consideração a evolução dos materiais que compõem os módulos termoelétricos. Visto que os artigos mais recentes apresentam módulos termoelétricos mais modernos, com melhor desempenho.

E para a 3ª etapa da pesquisa foi efetuada uma procura pelos títulos, onde foi possível melhorar a seleção dos artigos, utilizando um filtro rejeitando palavras, as quais foram “*solar, rankine, teological, handbook, book, turbine, treating organic, fiber optic, controller*” que em português são “Solar, rankine, teológico, manual, livro, turbina, tratamento, orgânica, fibra óptica, controlador”. Isto devido ao fato de que estas palavras não são comumente utilizadas em artigos científicos para tratar do assunto desse projeto

2.1.1 Resultados bibliométricos

Na 1ª etapa da pesquisa foi possível encontrar um total de 631 artigos, com 385 autores e um total de 8407 citações, como pode ser observado na Figura 7.

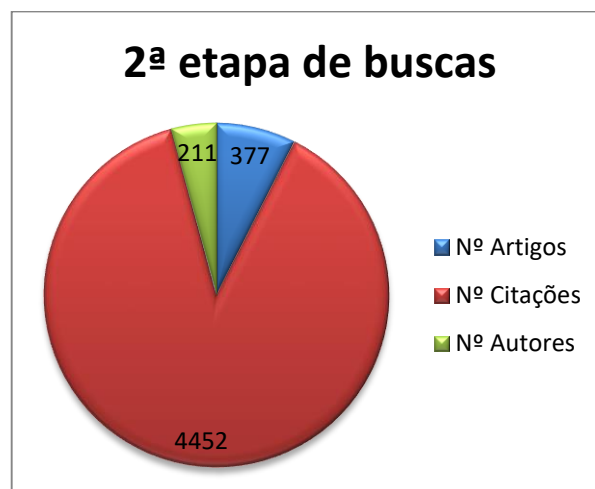
Figura 7 - Gráfico 1ª etapa de buscas de artigos científicos



Fonte: próprio autor

Logo na 2ª etapa da pesquisa foi aplicado o filtro de data buscando os artigos com tecnologias mais recentes desde o ano de 2010, resultando em 377 artigos conforme a Figura 8.

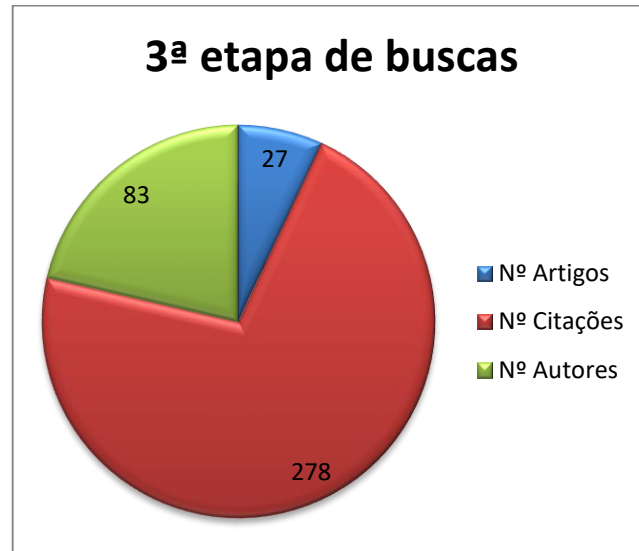
Figura 8 – Gráfico 2ª etapa de buscas de artigos científicos



Fonte: próprio autor

Na 3ª etapa da pesquisa, ao analisar os títulos utilizando o filtro rejeitando palavras, foi possível filtrar para um total de 27 artigos com 83 autores e um total de 278 citações, como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Gráfico 3ª etapa de buscas de artigos científicos



Fonte: próprio autor

Todas as etapas da pesquisa podem ser observadas na **Tabela 1**.

Tabela 1 - Pesquisa Bibliométrica

Pesquisa Bibliométrica			
	1º etapa	2º etapa	3º etapa
Nº Artigos	631	377	7
Nº Citações	8407	4452	78
Nº Autores	385	211	3
Ano de publicação	1847 - 2016	2010-2016	2010-2016

Através da quantidade de quantidade de artigos publicados nos anos de 2010 a 2016 pôde-se observar o nível de interesse dos pesquisadores, o que demonstra que apesar do grande potencial do Efeito Seebeck, o assunto ainda é pouco explorado, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 – publicações por ano

Ano	Nº de publicações
2010	5
2011	6
2012	2
2013	4
2014	3
2015	4
2016	3

Através dessa pesquisa Bibliométrica foram identificados estudos sobre o Efeito Seebeck no exterior, sendo um assunto ainda pouco explorado no Brasil. Portanto, a cogeração de energia através do Efeito Seebeck é um tema com poucos artigos científicos brasileiros nas plataformas pesquisadas, apesar de apresentar grande potencial efetivo em cogeração de energia e relevante contribuição científica para publicações.

Dessa forma, buscou-se demonstrar uma análise quantitativa das publicações científicas sobre o assunto. Novas pesquisas deverão ser efetuadas sobre o assunto, como pesquisas qualitativas com enfoque nos métodos utilizados e resultados obtidos na cogeração de energia através do Efeito Seebeck.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Definição e funcionamento de Caldeiras

A caldeira é um equipamento destinado a acumular e produzir vapor com pressão superior à pressão atmosférica. Para que transforme água em vapor, as caldeiras utilizam combustíveis tais como gás, madeira, óleo, entre outros. Diversos fabricantes produzem vários tipos de caldeiras, que com a tecnologia atual, oferecem eficiência que varia de 71% a 86% (BHATT et al, 1999).

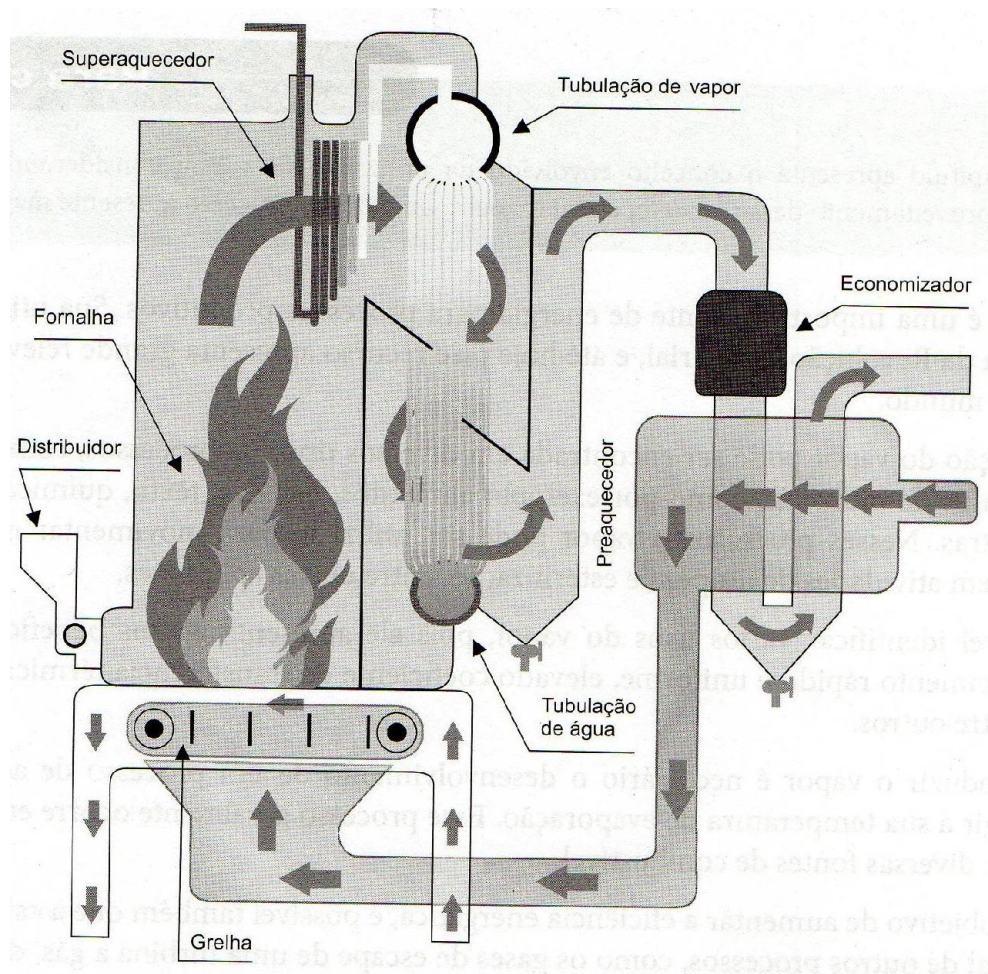
Uma Caldeira transfere o calor gerado através da combustão para a água, sendo basicamente um equipamento trocador de calor, que possui uso amplo na engenharia em geral, tanto na geração ou cogeração de energia, em indústrias químicas e alimentícias, em hospitais, entre outros. O seu uso é necessariamente ligado à troca de energia térmica de um fluido, que são os gases a altas temperaturas geradas pela combustão, para a água. Como pode ser observado no esquema básico de uma caldeira apresentado na Figura 10 (BOLES et al, 2006; INCROPERA et al, 2008; BARROS et al, 2015).

Todos os componentes da caldeira e o seu funcionamento são apresentados na Figura 10, e descritos a seguir:

1. O combustível é injetado pelo distribuidor no interior da fornalha para efetuar combustão;
2. Os gases na combustão estão a altas temperaturas e iniciam a geração de vapor, quando passam ao redor dos tubos com água, que estão ligados entre o tubulão de vapor e o tubulão de água;
3. Antes de sair da caldeira, o vapor gerado passa pelo superaquecedor de vapor, que é exposto diretamente ao calor produzido na fornalha, aquecendo ainda mais o vapor já produzido;
4. Após os gases provenientes da combustão terem transferido calor para a água através das paredes dos tubos, esses gases ainda estão a altas temperaturas. Assim, antes que esses sejam eliminados no sistema de exaustão passam pelo economizador, pré-aquecendo a água que irá alimentar o tubulão de água no interior da caldeira;

5. Logo após os gases ainda em altas temperaturas passam pelo pré-aquecedor de ar, elevando a temperatura do ar que irá alimentar o sistema de combustão da fornalha, aumentando a eficiência da queima do combustível;
6. Por fim, a grelha retira as cinzas que sobraram da queima do combustível.

Figura 10 – Funcionamento básico de uma caldeira



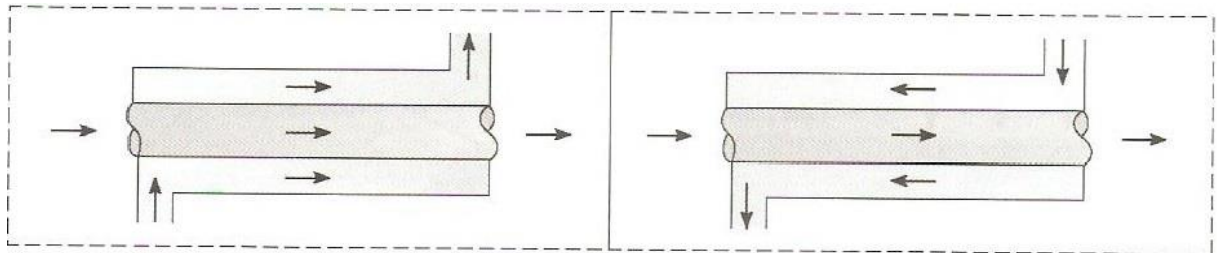
Fonte: (BARROS et al, 2015)

Observa-se, entretanto que nem todas as caldeiras possuem o sistema economizador e pré-aquecedor, como é o caso da caldeira que é utilizada nesse trabalho.

3.2 Alguns modelos mais utilizados de trocadores de calor:

Trocador de calor de tubos concêntricos é o trocador mais simples, onde não há contato entre os fluidos e o escoamento dos fluidos pode ser paralelo ou contracorrente, conforme apresentado na Figura 11 (BOLES et al, 2006; INCROPERA et al, 2008; BARROS et al, 2015).

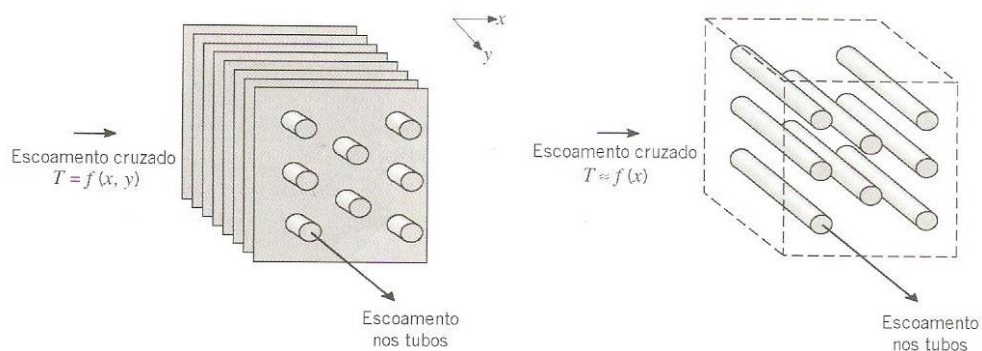
Figura 11 - Trocadores de tubos concêntricos



Fonte: (INCROPERA et al, 2008).

Trocador de calor com escoamento cruzado, ocorre quando os fluidos escoam perpendicularmente entre si, não havendo a mistura entre os fluidos. Conforme mostrado na Figura 12 (BOLES et al, 2006; INCROPERA et al, 2008; BARROS et al, 2015).

Figura 12 - Trocadores com escoamento cruzado aletado e não-aletado

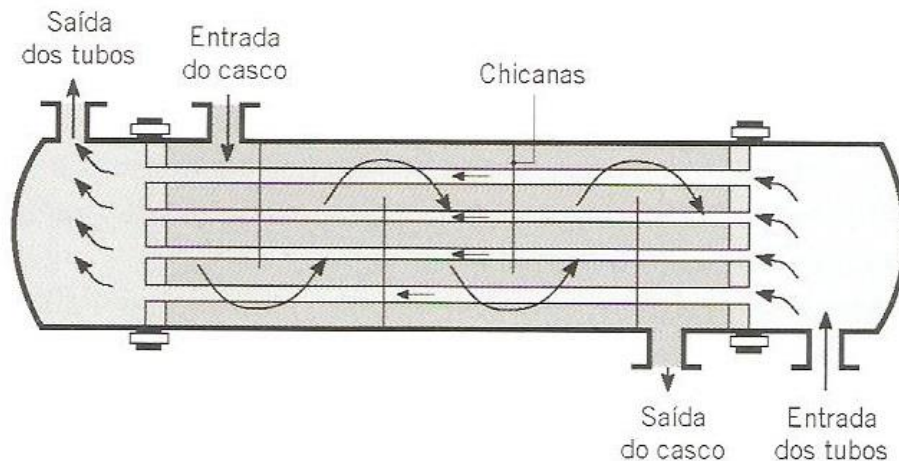


Fonte: (INCROPERA et al, 2008).

O trocador de calor de casco e tubos é basicamente composto de um tubo de grande diâmetro (casco), que é preenchido por vários tubos de diâmetro menor, espaçados entre si para que o fluido possa circular entre tubos menores. Assim, faz-se a

troca térmica entre os fluidos. Dentro do casco há também as chicanas, que são instaladas com o objetivo de provocar turbulência no fluido que está no interior do casco e assim aumentar o poder convectivo do fluido, conforme pode ser visto na Figura 13 (BOLES et al, 2006; BERGMAN et al, 2008).

Figura 13 - Trocador de calor casco e tubos

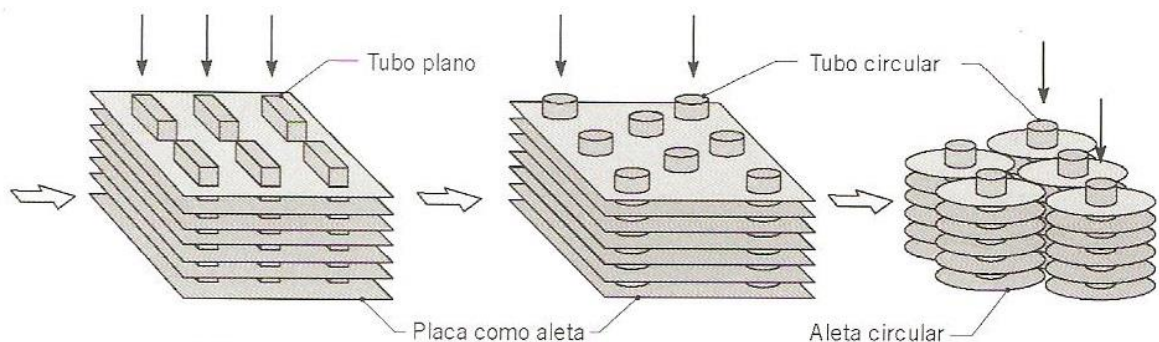


Fonte: (INCROPERA et al, 2008).

O trocador de calor compacto é usado quando se deseja ter uma grande área de troca de calor ocupando um pequeno espaço. Sua grande utilização é em sistemas em que pelo menos um dos fluidos de troca de calor é um gás.

Estes são constituídos de tubos aletados, onde as aletas podem ser planas ou circulares, dependendo da geometria do tubo e do espaço onde será aplicado o trocador, conforme mostrado na Figura 14 (BOLES et al, 2006) (INCROPERA et al, 2008).

Figura 14 - Trocadores compactos de tubos aletados



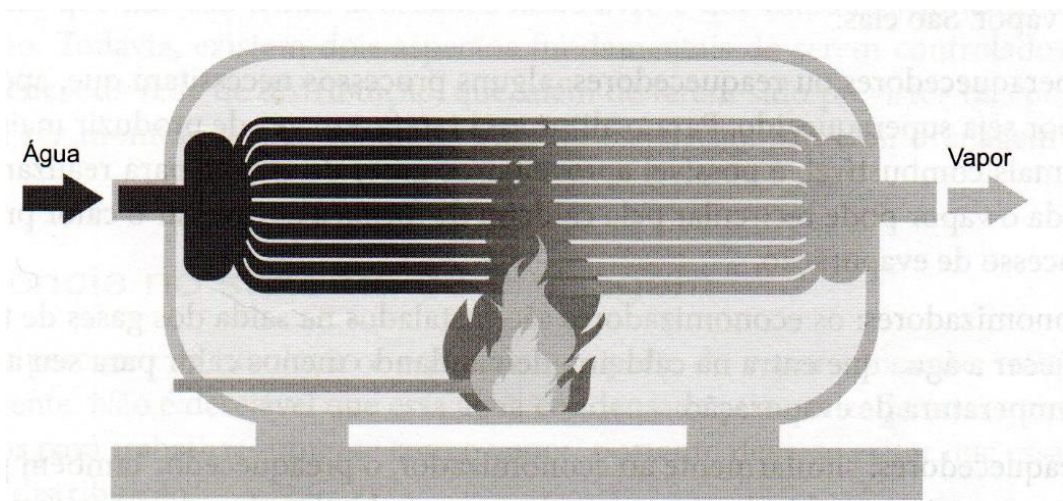
Fonte: (INCROPERA et al, 2008)

3.3 Tipos de caldeiras

3.3.1 Caldeira Aquatubular

É um tipo de gerador de vapor que utiliza os gases provenientes da combustão através de radiação nos tubos que contém água, aquecendo-a e convertendo-a em vapor. Que por sua vez é transferido ao tubulão superior e esse vapor é conduzido através de tubos isolados termicamente até a sua utilização. As primeiras caldeiras aquatubulares foram desenvolvidas para ter baixa vazão, acarretando em baixa produção de vapor. Com o desenvolvimento da tecnologia, a zona de convecção foi melhorada, aumentando assim a produção de vapor. Um exemplo do funcionamento de uma caldeira aquatubular é apresentado na Figura 15 (BOTELHO e BIFANO 2011; BARROS et al, 2015).

Figura 15 – Funcionamento de uma caldeira aquatubular

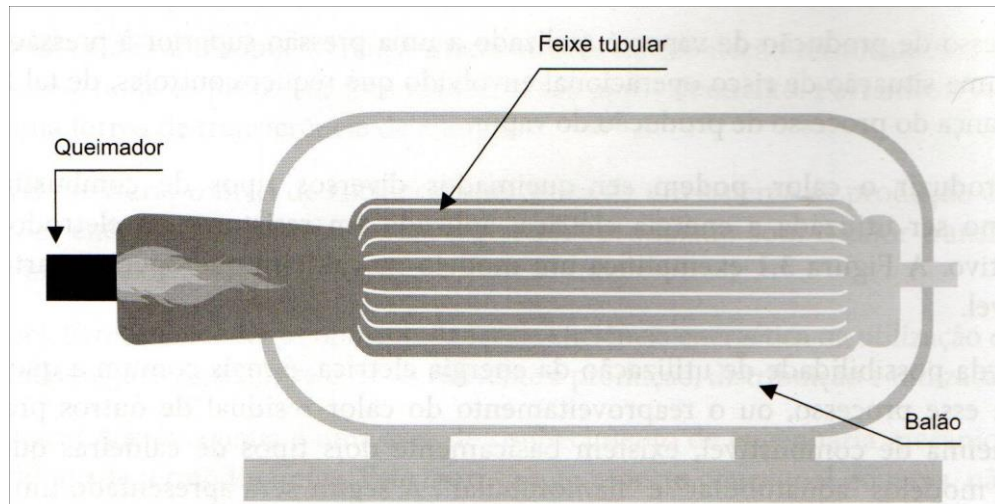


Fonte: (BARROS et al, 2015).

3.3.2 Caldeira flamotubular

Nesse tipo de gerador de vapor os gases provenientes da combustão circulam por dentro de tubos, aquecendo a água que está envolta dos tubos (Figura 16). Esse tipo de caldeira pode ser com tubos horizontais ou verticais, sendo que as caldeiras flamotubulares com tubos horizontais estão presentes na maior parte de processos industriais (BEGA, 2003; TELLES, 2011; BARROS et al, 2015)

Figura 16 – Funcionamento de uma caldeira flamotubular



Fonte: (BARROS et al, 2015).

3.3.3 Caldeira de recuperação

Diversos tipos de máquinas térmicas como turbinas, grupo geradores, entre outros, desperdiçam calor através dos gases de exaustão. Logo, para melhorar o rendimento destas máquinas térmicas, pode-se utilizar uma caldeira de recuperação. Estas são alocadas de maneira a aproveitar os gases a altas temperaturas gerados no processo de combustão para transformar a água em vapor. Em alguns casos específicos a caldeira de recuperação efetua cogeração de energia ao absorver o calor residual coletado (BEGA, 2003; TELLES, 2011; BARROS et al, 2015).

3.4 Cálculo da eficiência de uma caldeira e tipos de perdas

Existem duas maneiras de se mensurar a eficiência de uma caldeira: Pelo método direto e pelo método indireto. Para que seja possível obter a eficiência através do método direto é necessário obter os valores de temperatura e pressão da água antes de entrar no tubulão da caldeira e do vapor ao sair da caldeira. Para obter-se o valor de vazão mássica, pode ser utilizado um instrumento de pressão do tipo Tubo de Pitot, Placa de Orifício ou Tubo de Venturi. Logo os valores de entalpia¹ podem ser obtidos através da

¹ Define-se por entalpia o grau de agitação das moléculas de um determinado fluido em um determinado meio. Quando recebem ou liberam energia no sistema, a quantidade de calor pode ser determinado através da variação da entalpia (BORGNAKKE, SONNTAG e WYLEN 2003).

combinação dos valores obtidos por instrumentos de temperatura, como termopares ou termistores junto aos valores de pressão já obtidos.

Ao multiplicar a vazão mássica do vapor ($\dot{m}_v$) pela diferença de entalpia do vapor (h_v) pela entalpia da água (h_a), dividindo-se pela vazão mássica ($\dot{m}_c$) do combustível multiplicada pelo seu Poder Calorífico (PC), obtém-se a equação do método direto como pode ser observada na Equação 1 (NOGUEIRA, NOGUEIRA e ROCHA 2005).

$$\eta_{MD} = \frac{\dot{m}_v (h_v - h_a)}{\dot{m}_c PC}$$

Equação 1

Onde:

- η_{MD} = Eficiência método direto [Adimensional];
- $\dot{m}_v$ = a vazão mássica do vapor [kg/s];
- h_v = Entalpia do vapor [kJ/kg];
- h_a = Entalpia da água [kJ/kg];
- $\dot{m}_c$ = Vazão mássica do combustível [kg/s];
- PC = Poder calorífico do combustível [kJ/kg];

Para se obter a eficiência de uma caldeira, através do método indireto, é preciso mensurar a diferença de calor no vapor gerado pelo calor fornecido, proveniente da queima do combustível, e subtrair da soma de todas as perdas de calor na caldeira e, por fim, comparar com o PC do combustível. Conhecendo-se todos os tipos de perdas, pode-se obter a equação do método indireto (NOGUEIRA, NOGUEIRA e ROCHA 2005). Logo, as principais possíveis perdas são:

3.4.1 Perdas pela chaminé

Esse tipo de perda pode ser subdividido em duas partes, primeiro, as associadas aos gases secos (P_{GS}) criados no processo de combustão (Equação 2) e segundo, as associadas ao vapor presente na chaminé (Equação 3) (NOGUEIRA, NOGUEIRA e ROCHA 2005).

$$P_{GS} = m_{GS} * C_{Par} (T_{CH} - T_{Ref})$$

Equação 2

Onde:

- P_{GS} = Perdas associadas aos gases secos [kcal/kg];
 m_{GS} = Vazão mássica dos gases de combustão [kg/s];
 C_{Par} = Calor específico médio do ar entre T_{CH} e T_{Ref} [kJ/kg ° C];
 T_{CH} = Temperatura dos gases na chaminé [° C];
 T_{Ref} = Temperatura de referência adotada [° C];

$$P_v = m_p * C_{Pv} (T_{CH} - T_{Ref}) + m'_v * h_v$$

Equação 3

Onde:

- P_v = Perdas associadas ao vapor presente na chaminé [kcal/kg];
 m_p = Vazão mássica de vapor ([kg/kg] de comb.);
 C_{Pv} = Calor específico médio do vapor entre T_{CH} e T_{Ref} [kJ/kg ° C];
 T_{CH} = Temperatura dos gases na chaminé [° C];
 T_{Ref} = Temperatura de referência adotada [° C];
 m'_v = Vazão mássica do vapor formado na combustão e presente no combustível ([kg/kg] de comb.);
 h_v = entalpia de vaporização da água na entalpia de referência [kJ/kg];

3.4.2 Perdas por radiação e convecção

Mensurar esse tipo de perdas é bastante complicado devido à necessidade de se efetuar várias medições complexas para a sua obtenção. Logo, é estimado que estas perdas podem variar entre 1% a 4% da energia total fornecida pelo combustível (NOGUEIRA, NOGUEIRA e ROCHA 2005).

3.4.3 Perdas por purgas (P_p)

A manutenção periódica da caldeira exige que sejam controladas as concentrações de sais na água no interior da caldeira, podendo a purga², ser executada de maneira periódica ou contínua. Pode-se mensurar esse tipo de perda através da Equação 4 (NOGUEIRA, NOGUEIRA e ROCHA 2005).

$$P_p = m_p * C_{pa}(T_p - T_{Ref})$$

Equação 4

Onde:

m_p = Vazão média de água purgada ([kg/kg] de comb.);

C_{pa} = Calor específico da água no estado líquido [kJ/kg ° C];

T_p = Temperatura de saturação da água na pressão da caldeira [° C];

T_{Ref} = Temperatura de referência adotada [° C];

3.4.4 Perdas associadas à temperatura das cinzas (P_{tc})

Durante a queima de combustíveis sólidos, existe uma perda associada à saída das cinzas, que é representada pela Equação 5 (NOGUEIRA, NOGUEIRA e ROCHA 2005).

$$P_{tc} = m_r * 1170$$

Equação 5

Onde:

m_r = Massa de cinza obtida pela massa de combustível ([kg/kg] de comb.);

1170 = representa um valor médio aproximado da entalpia sensível das cinzas [kJ/kg];

3.4.5 Perdas associadas ao combustível presente nas cinzas (P_{cc})

Para que seja possível mensurar a quantidade de combustível não queimado presente nas cinzas, realiza-se uma análise da quantidade de carbono presente nas cinzas, conforme a Equação 6 (NOGUEIRA, NOGUEIRA e ROCHA 2005).

² Define-se por purga a eliminação de impurezas que encontram-se no interior das tubulações de água da caldeira (NOGUEIRA, NOGUEIRA e ROCHA 2005).

$$P_{cc} = m_c * 33780$$

Equação 6

Onde:

m_c = massa de carbono presente nas cinzas ([kg/kg] de comb.);

33780 = representa um fator de correção [Adimensional];

Conhecidos todos os tipos de perdas, pode-se efetuar a somatória de todos os resultados obtidos de cada tipo de perda e dividir pela quantidade de energia fornecida pelo combustível. Tem-se então o cálculo da eficiência através do método indireto (η_{mi}), como é demonstrado na Equação 7 (NOGUEIRA, NOGUEIRA e ROCHA 2005).

$$\eta_{mi} = 1 - \frac{\sum perdas}{q_f}$$

Equação 7

Onde:

q_f = Energia fornecida pelo combustível por unidade de combustível [Adimensional];

3.5 Problemas comuns

Um dos problemas bastante comuns que ocorre quando uma caldeira é alimentada por óleo combustível, que poderá formar ácido sulfúrico dentro da câmara de combustão, quando o enxofre entra em contato com partículas de água, podendo gerar corrosão. Outro problema pode ocorrer quando a água a ser transformada em vapor não é tratada para ser utilizada na caldeira, o que pode provocar o acúmulo de partículas mais pesadas do que o vapor, dentro da caldeira. Nestes particulados incluem-se materiais como calcário, cloro entre outros. Também podem estar contidos na água, e quando se torna vapor, partículas desses materiais acumulam-se dentro da caldeira, podendo gerar entupimento nos tubos.

3.6 Como aumentar a eficiência de uma caldeira

Visando o melhor aproveitamento do poder calorífico do combustível utilizado, algumas medidas podem contribuir significativamente para aumentar a eficiência de uma caldeira:

- Adicionar um pré-aquecedor de ar, que resulta em um melhor aproveitamento de todo o combustível utilizado;
- Manter o pré-aquecedor de ar limpo, pois caso o aquecedor de ar esteja sujo, pouco ar entra na câmara de combustão, resultando em baixa eficiência na relação ar/combustível;
- Utilizar pré-aquecimento da água. Quando a água está a uma temperatura ambiente e entra na caldeira para ser transformada em vapor, esta acaba por criar um pequeno efeito contrário, até que seja totalmente aquecida. Por um pequeno período de tempo, esta água que está a uma menor temperatura, resfria a água aquecida dentro da caldeira, resultando em maior tempo para gerar vapor e, conseqüentemente, utiliza maior quantidade de combustível do que o necessário;
- Realizar manutenções preventivas, para evitar o acúmulo de partículas que provocam o entupimento da tubulação e a má condutância térmica.

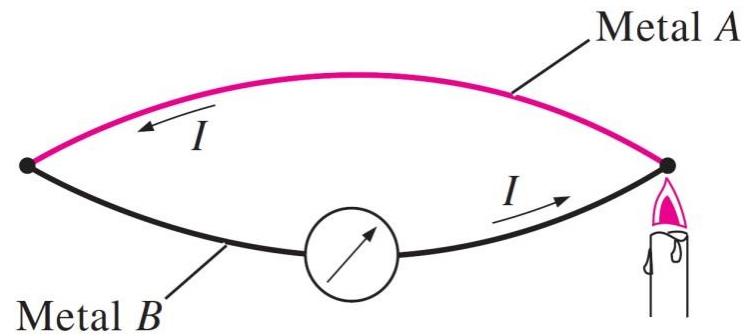
Nos tópicos seguintes serão apresentados os efeitos característicos dos módulos termoeletricos.

3.7 Efeito Seebeck

O pioneiro no estudo do Efeito Seebeck foi Thomas Seebeck, que em 1821, observou um fenômeno que quando dois metais distintos são unidos e aquecidos, em sua junção surge uma diferença de potencial elétrico (MOURA, 2010; FERNANDES, 2012).

A diferença de potencial gera uma corrente elétrica I , conforme a Figura 17. A esse fenômeno foi dado o nome de Efeito Seebeck (GERTHSEN, 1998; BOLES et al, 2006).

Figura 17 - Efeito Seebeck



Fonte: (BOLES et al, 2006)

Para que fosse possível quantificar a energia gerada em relação a quantidade de calor aplicado à junção, T.J. Seebeck criou um coeficiente de tensão por temperatura. O coeficiente Seebeck (α) é uma relação matemática determinada em função da tensão V , dividida pelo diferencial das temperaturas referentes às junções. Ou seja, o coeficiente Seebeck é dado por V/K , conforme a Equação 8 (GERTHSEN, 1998; COSTA, 2010; FERNANDES, 2012).

$$\alpha = \frac{V}{\Delta T}$$

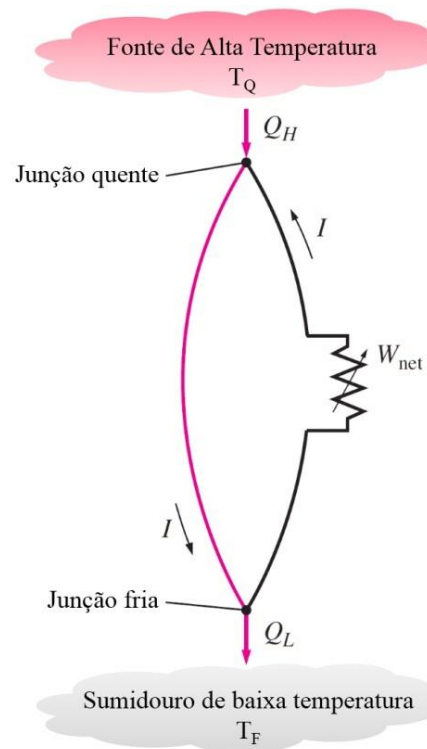
Equação 8

Onde:

- α = Coeficiente Seebeck [$V/^{\circ}C$];
 V = Tensão gerada [V];
 ΔT = diferencial de temperaturas [$^{\circ}C$, K];

O Efeito Seebeck é o princípio básico dos geradores termoelétricos, como se pode observar na Figura 18.

Figura 18 - Gerador termoelétrico



Fonte: (BOLES et al, 2006).

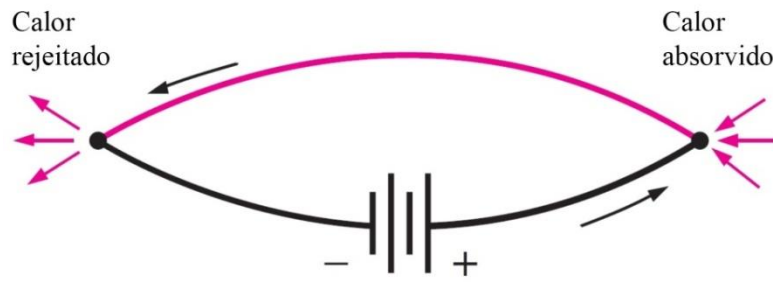
O trabalho W é produzido sobre uma carga quando uma fonte de calor Q_H de alta temperatura aquece uma junção ao mesmo tempo em que o calor é absorvido por um sumidouro de calor Q_L , na outra junção (BOLES et al, 2006; GERTHSEN, 1998).

3.8 Efeito Peltier

Jean Peltier, em 1834, observou um fenômeno contrário ao Efeito Seebeck. Ele observou que quando aplicado uma tensão elétrica nas extremidades de uma junção metálica, composta por dois materiais distintos, o calor é retirado de um lado da junção e transportado para o outro lado. A esse fenômeno foi dado o nome de Efeito Peltier (FERNANDES, 2012) (ANACLETO, 2007).

É possível criar um refrigerador a partir do efeito contrário ao Efeito Seebeck, onde aplica-se uma tensão elétrica V às junções. Logo, o calor é retirado ou absorvido de uma junção e rejeitado através da outra junção. Conforme a Figura 19 (ANACLETO, 2007; GERTHSEN, 1998; BOLES et al, 2006; CARVALHO, 2012).

Figura 19 - Efeito Peltier



Fonte: (BOLES et al, 2006).

Esse fenômeno ou Efeito Peltier pode ser melhor entendido através da Equação 9.

$$Q_p = \pi * I$$

Equação 9

Onde:

Q_p = Quantidade de calor por unidade de área de contato da junção [W];

π = Coeficiente Peltier [V];

I = Corrente elétrica [A];

Para descrever matematicamente o lado quente do módulo termoelétrico, tem-se a Equação 10:

$$Q_h = \alpha * T_h * I$$

Equação 10

Onde:

Q_h = Quantidade de calor rejeitado no lado quente por unidade de área de contato da junção [W];

α = Coeficiente Seebeck [V/° C];

T_h = Temperatura no lado quente [° C, K];

I = Corrente elétrica [A];

Para descrever matematicamente o lado frio do módulo termoelétrico, tem-se a Equação 11.

$$Q_c = \alpha * T_c * I$$

Equação 11

Onde:

- Q_c = Quantidade de calor absorvido no lado frio por unidade de área de contato da junção [W];
- α = Coeficiente Seebeck [V/° C];
- T_c = Temperatura no lado frio [° C, K];
- I = Corrente elétrica [A];

Analisando a Equação 10 e a Equação 11, pode-se notar o uso do coeficiente Seebeck na descrição matemática do Efeito Peltier, fato que será melhor compreendido ao analisar o efeito Thomson (GERTHSEN, 1998).

3.9 Efeito Thomson

Joseph Thomson, por volta de 1850, estudou os Efeitos Seebeck e Peltier sobre uma junção entre materiais metálicos distintos. Ao ensaiar a passagem de corrente elétrica sobre um material homogêneo, onde havia um gradiente de temperatura, observou que a absorção ou a liberação de calor é proporcional a intensidade do fluxo elétrico ou corrente elétrica (ANACLETO, 2007; CARVALHO, 2012).

Quando combinados os Efeitos Seebeck e Peltier, obtém-se o efeito Thomson. Quando aplicada uma corrente e tensão elétrica conhecida sobre as junções de dois materiais metálicos ou semicondutores distintos e esses estiverem entre duas fontes de calor, pode-se observar variações de tensão e corrente elétrica no circuito, em relação ao diferencial de temperatura entre as fontes de calor. Esse efeito é a base para relacionar matematicamente os Efeitos Seebeck e Peltier, conforme a Equação 12 (ANACLETO, 2007; CARVALHO, 2012; GERTHSEN, 1998).

$$\beta = \frac{Q_t}{I - (\Delta T)}$$

Equação 12

Onde:

- β = Coeficiente de Thomson [V/° C];

- Q_t = Temperatura no lado frio [$^{\circ}$ C, K];
 I = Corrente elétrica [A];
 ΔT = diferencial de temperaturas [$^{\circ}$ C, K];

3.10 Efeito Joule

Todo material condutor apresenta uma característica única de oposição a passagem de corrente elétrica, que é dado o nome de resistividade. Esta característica pode ser verificada em um condutor, quando uma determinada corrente elétrica I flui através dele. Logo, a esse fenômeno é dado o nome de efeito Joule, conforme a Equação 13 (FERNANDES, 2012; CARVALHO, 2012).

$$Q_j = R * I^2$$

Equação 13

Onde:

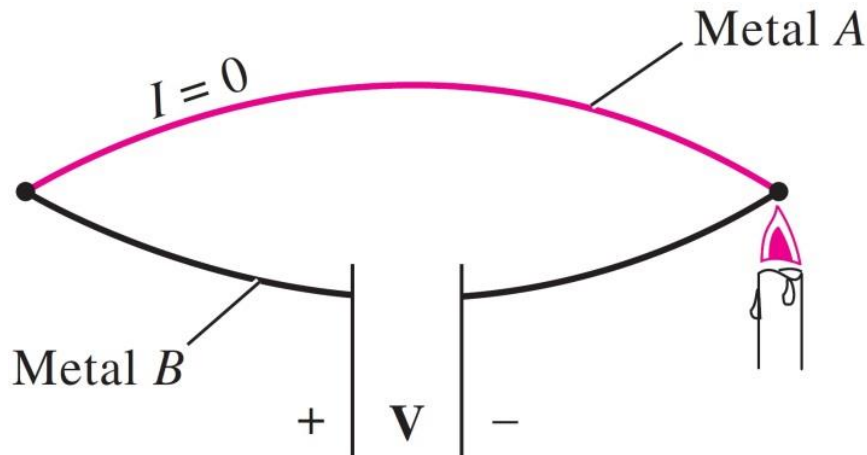
- Q_j = Calor gerado [W];
 I = Corrente elétrica [A];
 R = Resistividade elétrica do material [Ω .m];

O calor produzido pelo efeito Joule é importante para a descrição do comportamento de um módulo termoeletrico com o Efeito Peltier, pois além do calor absorvido durante o funcionamento, também é gerado calor devido ao efeito Joule (FERNANDES, 2012; CARVALHO, 2012).

3.11 Termopar

Atualmente, é comum a utilização de sensores de temperatura do tipo termopar. Esse instrumento apresenta grande confiabilidade em processos industriais, quando aplicado de maneira correta. Seu funcionamento é através do Efeito Seebeck, onde existem duas junções de materiais metálicos ou semicondutores distintos, formando um gerador termoeletrico. Esse é capaz de gerar uma tensão de até 40 micro volts, pela diferença em $^{\circ}$ C entre as junções. A Figura 20 apresenta seu funcionamento (BOLES et al, 2006; CARVALHO, 2012).

Figura 20- Termopar



Fonte: (BOLES et al, 2006).

Cada metal possui um coeficiente Seebeck distinto, entre suas características. Assim, pode-se expressar de forma matemática a tensão gerada através da Equação 14.

$$V = (\alpha_a - \alpha_b) * (T_h - T_c)$$

Equação 14

Onde:

- V = Diferencial de potencial elétrico [V];
- α_a = Coeficiente Seebeck referente ao material A [V/° C];
- α_b = Coeficiente Seebeck referente ao material B [V/° C];
- T_h = Temperatura alta proveniente da fonte de calor quente [° C, K];
- T_c = Temperatura baixa proveniente da fonte de calor fria [° C, K];

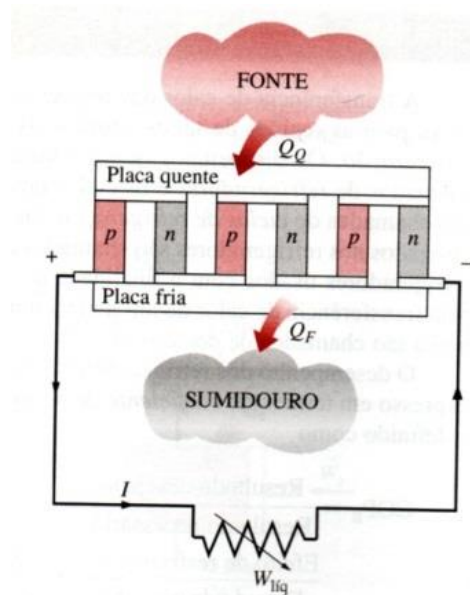
3.12 Módulos Termoelétricos

As máquinas feitas a partir de junções criadas com materiais metálicos distintos foram as precursoras da termoeletricidade. Logo, com o avanço da tecnologia, novos materiais surgiram no âmbito científico e os materiais semicondutores, criados a partir de Telureto de Bismuto (Bi_2Te_3) foram os que mostraram ser mais eficientes em comparação aos materiais metálicos homogêneos. Assim, foram criadas placas ou módulos termoelétricos compostos por n junções, entre materiais semicondutores tipo

N e tipo P, distribuídos de maneira uniforme, para um melhor aproveitamento da área de contato.

Esses módulos termoeletrônicos são utilizados atualmente, como geradores termoeletrônicos de estado sólido. Nesse caso, é necessário que exista uma fonte de calor sobre a face quente do módulo termoeletrônico, ao mesmo tempo em que exista um sumidouro de calor sobre a face fria. Desta maneira o Efeito Seebeck entra em ação sobre os semicondutores realizando trabalho, gerando um diferencial de potencial elétrico entre seus terminais como é apresentado na Figura 21 (BOLES et al, 2006).

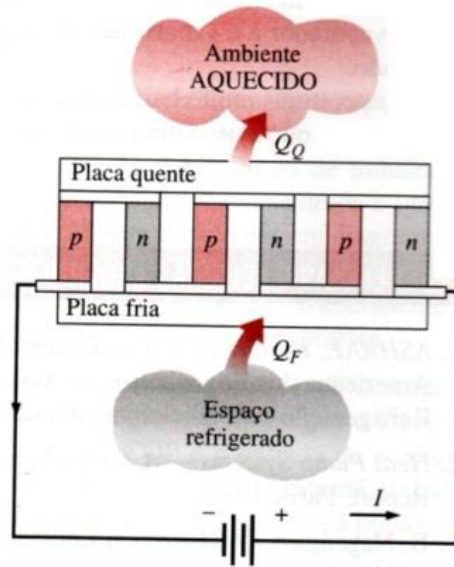
Figura 21- Gerador termoeletrônico



Fonte: (BOLES et al, 2006).

Os módulos termoeletrônicos podem ainda ser utilizados como refrigeradores de estado sólido. Utilizando o Efeito Peltier, que nesse caso, quando é aplicado um diferencial de potencial elétrico sobre seus terminais, o módulo termoeletrônico funciona como uma bomba de calor. Sendo capaz de extrair calor sobre a face fria e rejeitando-o através da face quente para o sumidouro de calor, como apresentado na Figura 22 (BOLES et al, 2006).

Figura 22 - Refrigerador termoelétrico



Fonte: (BOLES et al, 2006).

3.13 Termodinâmica do Sistema

Conforme a Primeira Lei da Termodinâmica, a energia não pode ser criada e nem destruída, mas pode ser transformada em outro tipo de energia. Desta forma, a energia elétrica pode ser transformada em energia térmica, por meio de uma resistência. Ou ainda, a energia cinética, provocada pela queda de água de uma hidrelétrica é convertida em energia elétrica, por meio da movimentação das turbinas. Sendo assim, a Primeira Lei faz referência à conservação de energia, onde toda energia fornecida a um sistema serve para aumentar a sua energia interna. Essa energia pode ser transferida na forma de calor, trabalho e fluxo de massa.

Na Primeira Lei não há a definição do sentido para a transferência de energia, pois a quantidade de energia transferida de um sistema, tem que ser igual à quantidade de energia absorvida pela vizinhança, e o mesmo pode ocorrer no sentido inverso. Assim, a Primeira Lei pode ser escrita conforme a Equação 15 (BOLES et al, 2006; BORGNAKKE et al, 2003).

$$Q_{1 \rightarrow 2} - W_{1 \rightarrow 2} = E_2 - E_1$$

Equação 15

Onde

$Q_{1\rightarrow 2}$ = calor recebido ou doado do sistema [W];

$W_{1\rightarrow 2}$ = trabalho sofrido ou exercido pelo sistema [J];

$E_2 - E_1$ = variação total de energia do sistema, determina-se através das variações de energia interna, cinética e potencial [J];

Sabe-se que na realidade um sistema não consegue ser tão eficaz como a Primeira Lei idealiza, onde toda energia recebida será transformada integralmente em outro tipo energia. Então, faz-se necessário a compreensão da Segunda Lei da Termodinâmica junto aos enunciados de Kelvin-Planck e Clausius, onde é impossível uma máquina térmica que recebe uma certa quantidade de calor de uma fonte de calor, a alta temperatura, converter todo esse calor em trabalho líquido, sem que haja uma perda de calor para um reservatório a baixa temperatura. Além disso, é impossível uma outra máquina térmica retirar calor de uma fonte de calor a baixa temperatura e transferir esse calor para uma fonte de calor a alta temperatura, sem que haja a necessidade de realizar um trabalho nessa máquina (BOLES et al, 2006; BORGNAKKE et al, 2003).

A Segunda Lei da Termodinâmica trata também do sentido em que ocorre a transferência de energia. Como por exemplo, a lâmina de um liquidificador, esta exerce trabalho mecânico e esse trabalho ocasiona um aumento da energia interna da água que pode ser retirada na forma de calor. Mas, sabe-se que se ao aplicar calor à água, não haverá trabalho mecânico na lâmina do liquidificador. Esse exemplo mostra como é fácil transformar trabalho em qualquer tipo de energia para se determinar a eficiência térmica de uma máquina térmica, usa-se a Equação 16 e Equação 17, proposta pela Segunda Lei da Termodinâmica: (BOLES et al, 2006; BORGNAKKE et al, 2003).

$$\eta_{T\acute{e}rmico} = W_{Li q}/Q_H$$

Equação 16

Ou,

$$\eta_{T\acute{e}rmico} = 1 - Q_c/Q_H$$

Equação 17

Onde:

$W_{Li q}$ = Trabalho líquido realizado pela máquina térmica [J];

- Q_H = a taxa de calor recebido pelo módulo termoeletrico, ou, calor transferido da fonte a alta temperatura [W];
- Q_c = Calor transferido para a fonte a baixa temperatura, ou ambiente externo [W];
- η = Rendimento teórico [Adimensional]

De acordo com Goupil (2011), a taxa de calor recebido pelo módulo termoeletrico, Q_H , pode ser escrita conforme a Equação 18:

$$Q_H = \alpha T_H I_L - \frac{1}{2} R_{in} I_L^2 + K(T_H - T_C)$$

Equação 18

Onde:

- Q_H = a taxa de calor recebido pelo módulo termoeletrico, ou, calor transferido da fonte a alta temperatura [W];
- α = Coeficiente Seebeck [V/° C];
- T_H = Temperatura alta proveniente da fonte de calor quente [° C, K];
- T_c = Temperatura baixa proveniente da fonte de calor fria [° C, K];
- I_L = Corrente elétrica na carga [A];
- R_{in} = Resistência interna do módulo termoeletrico [Ω]
- K = Condutividade térmica do módulo termoeletrico [W/ ° Cm]

E de igual maneira, de acordo com Goupil (2011), a taxa de calor removido do módulo termoeletrico, Q_C , pode ser escrita conforme a Equação 19:

$$Q_C = \alpha T_C I_L + \frac{1}{2} R_{in} I_L^2 + K(T_H - T_C)$$

Equação 19

Onde:

- Q_C = a taxa de calor removido do módulo termoeletrico, ou, calor transferido para a fonte fria [W];
- α = Coeficiente Seebeck [V/° C];
- T_H = Temperatura alta proveniente da fonte de calor quente [° C, K];

- T_c = Temperatura baixa proveniente da fonte de calor fria [$^{\circ}$ C, K];
 I_L = Corrente elétrica na carga [A];
 R_{in} = Resistência interna do módulo termoeletrico [Ω]
 K = Condutividade térmica do módulo termoeletrico [W/ $^{\circ}$ Cm]

E ainda de acordo com Goupil (2011), pode-se escrever a Equação da potência produzida (P_{pro}) pelo módulo termoeletrico em função de Q_C e Q_H conforme a Equação 20:

$$P_{pro} = Q_H - Q_C = \alpha I_L (T_H - T_C) - R_{in} I_L^2$$

Equação 20

Onde:

- P_{pro} = potência produzida pelo módulo termoeletrico [W];
 Q_H = a taxa de calor recebido pelo módulo termoeletrico, ou, calor transferido da fonte a alta temperatura [W];
 Q_C = a taxa de calor removido do módulo termoeletrico, ou, calor transferido para a fonte fria [W];
 α = Coeficiente Seebeck [V/ $^{\circ}$ C];
 T_H = Temperatura alta proveniente da fonte de calor quente [$^{\circ}$ C, K];
 T_C = Temperatura baixa proveniente da fonte de calor fria [$^{\circ}$ C, K];
 I_L = Corrente elétrica na carga [A];
 R_{in} = Resistência interna do módulo termoeletrico [Ω]

Esses parâmetros descritos serão utilizados para os cálculos de eficiência no sistema proposto.

3.14 Transferência de calor

A transferência de calor ocorre naturalmente quando existe uma diferença de temperatura entre dois corpos. O corpo com temperatura mais elevada tende a doar calor para o corpo com temperatura menos elevada. Esses tendem a entrar em equilíbrio

térmico um com o outro através do meio em que residem ou através do contato direto (KREITH, 2003).

O projeto apresentado contará com dois meios principais de transferência de calor: condução e a convecção. Nota-se também que poderá ocorrer transferência de calor devido à radiação, mas seu valor é desprezível em comparação aos valores da condução e convecção.

3.14.1 Transferência de calor através de condução térmica

A condução térmica ocorre devido à transferência de energia das partículas mais energéticas para partículas menos energéticas. No caso dos sólidos, usados nesse trabalho, a transferência ocorre devido à combinação das vibrações moleculares e o transporte de energia, através dos elétrons livres.

A taxa de transferência de calor por condução é encontrada através da Equação 21 (BOLES et al, 2006; BORGNAKKE et al, 2003):

$$Q_{Cond} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Equação 21

Onde:

- Q_{Cond} = taxa de calor transferido por condução [W];
- k = condutividade térmica do material [W/° C.m];
- A = área de contato [m²];
- ΔT = diferença de temperatura entre os meios [° C, K];
- Δx = espessura de material que o calor deverá atravessar [m];

3.14.2 Transferência de calor através da convecção térmica

A convecção térmica é caracterizada pela transferência de energia entre uma superfície sólida e um fluido que está em contato com essa superfície. Nesse tipo de transferência acontecem dois efeitos combinados: condução e movimento do fluido. Assim, se o fluido estiver em movimento, a troca de calor será maior, caso contrário, a troca de calor será realizada somente por meio da condução, reduzindo assim a taxa de transferência de calor (BOLES et al, 2006; BORGNAKKE et al, 2003).

Quando a convecção acontece devido à falta de movimentação do fluido, esta recebe o nome de convecção natural ou livre, que ao diminuir a densidade do fluido que está em contato com a superfície, causa a sua ascensão, deixando assim espaço para que o fluido mais pesado entre em contato com a superfície. Mas, por outro lado, se o fluido for forçado a escoar sobre essa superfície através de estímulos externos, como bombas ou ventiladores, esse então é chamado de convecção forçada (BOLES et al, 2006; BORGNAKKE et al, 2003; BOHN et al, 2003).

A determinação da taxa de transferência de calor por convecção é determinada pela Lei do Resfriamento de Newton, conforme Equação 22:

$$Q_{conv} = hA(T_s - T_f)$$

Equação 22

Onde:

- Q_{conv} = taxa de transferência de calor por convecção [W];
 h = coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m²K];
 A = área sobre a qual ocorre a transferência [m²];
 T_s = temperatura da superfície [° C, K];
 T_f = temperatura do fluido em um lugar afastado da superfície [° C, K];

3.14.3 Isolamento térmico

Os materiais utilizados como isolantes térmicos devem apresentar baixa condutividade térmica, para evitar que o calor não seja transferido de um meio para o outro. Essa característica pode ser, na maioria das vezes, obtida através da formação de pequenas bolsas de ar ou gás dentro de um sólido. Mas como os gases tem comportamento de um fluido, eles podem transferir o calor por convecção natural dentro das bolsas de ar e por radiação entre as paredes dessas bolsas de ar. Então, para um isolamento efetivo de um sistema, é necessário fazer uma combinação de mecanismos de fluxos de calor (BOHN et al, 2003).

Há três tipos de materiais principais para a confecção de um isolante térmico:

1. Materiais fibrosos que são compostos de filamentos de baixa densidade e pequeno diâmetro, os quais são utilizados para a confecção de mantas em fibra de vidro (200°C), lã mineral (700°C) ou fibras refratárias (700°C à 1700°C);

2. Materiais granulares que consistem de um material inorgânico no formato de partículas ou pequenos flocos utilizados em pó ou formatos pré-estabelecidos;

3. Materiais celulares podem ser encontrados como painéis estendidos rígidos ou flexíveis, também podem ser espumados ou pulverizados no local de aplicação e obter a geometria desejada (BOHN et al, 2003; SANTANA, 2012).

Esses conceitos serão utilizados no desenvolvimento do trabalho, que será apresentado, no capítulo seguinte.

4 METODOLOGIA

Para analisar o aumento da eficiência energética de uma caldeira através de um sistema de cogeração de energia foi desenvolvido um protótipo e instalado na parede externa de uma caldeira em um hospital. A proposta foi obter a potência gerada nesse protótipo, para fazer inferência do valor da potência gerada total, caso a caldeira fosse toda revestida com o mesmo material.

Na instalação do protótipo foram utilizados dois módulos. Um para a obtenção da potência gerada e outro para obtenção dos parâmetros do Efeito Seebeck, necessários nos cálculos realizados. Esses parâmetros obtidos foram comparados com trabalhos já publicados e validados em outras dissertações e teses.

Na definição do local a ser instalado o protótipo levou-se em consideração a necessidade de haver uma diferença de temperatura (delta de temperatura) sobre as faces do módulo termoeletrico. Dessa forma, foi necessário o uso de uma câmara termográfica que forneceu a temperatura na face da caldeira. Outra característica importante na definição do local a ser instalado o protótipo foi a necessidade de se manter a integridade estrutural da caldeira.

Observa-se que parte desse protótipo é um *datalogger*, desenvolvido especificamente para monitorar e registrar todos os ensaios realizados durante o funcionamento do protótipo, enquanto a caldeira funciona em regime permanente.

Cada uma dessas etapas e o local onde foi realizada a pesquisa serão descritas, com detalhes, nas subseções seguintes.

4.1 Localização da pesquisa

A pesquisa foi realizada no Hospital Regional de Mato Grosso do Sul (HRMS), que é um hospital público na cidade de Campo Grande, capital do estado de Mato Grosso do Sul. O HRMS atende 45 especialidades médicas, possui 302, leitos em uma área total de 32.000 m².

A comissão de ética em pesquisa do HRMS conferiu a aprovação da metodologia utilizada no desenvolvimento desse projeto de pesquisa, conforme preconiza a resolução 466 de 12 de dezembro de 2012. O projeto de pesquisa é intitulado: “AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA CALDEIRA DO HRMS A PARTIR DO EFEITO SEEBECK”. Através desse projeto de pesquisa, foram feitos todos os procedimentos metodológicos descritos nesse trabalho.

4.1.1 A caldeira

A caldeira utilizada nesse trabalho é um equipamento destinado a produzir vapor para o setor de lavanderia do HRMS. Esta caldeira é o modelo AWN 2, flamotubular, fabricada pela empresa ATA – Combustão técnica. Seu queimador é alimentado a gás natural, consumindo aproximadamente 161 Nm³/h, para produzir uma taxa de evaporação máxima de 50 Kg/hm² e temperatura de saída dos gases a 483,15 K. E, segundo o fabricante, com eficiência térmica de $91 \pm 2\%$, quando funcionando corretamente e, com todas as manutenções preventivas realizadas. A Figura 23 apresenta a caldeira utilizada nesse trabalho.

Figura 23 - Caldeira do HRMS



Fonte: próprio autor

Visto que o setor de engenharia do HRMS não possui os dados de eficiência real da caldeira, as perdas foram mensuradas a partir do método indireto (Nogueira, et al., 2005).

Levando-se em conta que a caldeira utilizada não possui tecnologias de recuperação de calor, pré-aquecimento de ar, pré-aquecimento de água, que não estão sendo feitas manutenções

preventivas de limpeza interna de sedimentos. As principais perdas na caldeira são listadas a seguir:

- a) Perdas por radiação, que variam entre 4% da energia;
- b) Perdas por não possuir equipamento de recuperação de calor com pré-aquecimento de água e ar, pode representar uma redução na eficiência em torno de 20%;

Deduzindo as perdas da eficiência total de 91% citada pelo fabricante, em um cenário otimista, estima-se uma eficiência da caldeira de aproximadamente 67%. Isto sem contar os quatro anos em que a caldeira funcionou de maneira intermitente com falta de manutenção preventiva e limpeza, assim como o problema de vazamentos nas conexões e tubulações de vapor e água, gerando depósitos de sedimentos e corrosão, diminuição significativa de sua eficiência.

4.2 Análise termográfica da caldeira e sistema de exaustão

Para identificar os locais de maior calor irradiado nas paredes da caldeira, foi utilizado uma câmera termográfica da marca Flir, modelo i60, emprestada do Laboratório de Análise e Desenvolvimento de Edificações (LADE) da UFMS.

Dessa forma, realizou-se uma completa análise termográfica da caldeira subdividida em três etapas distintas.

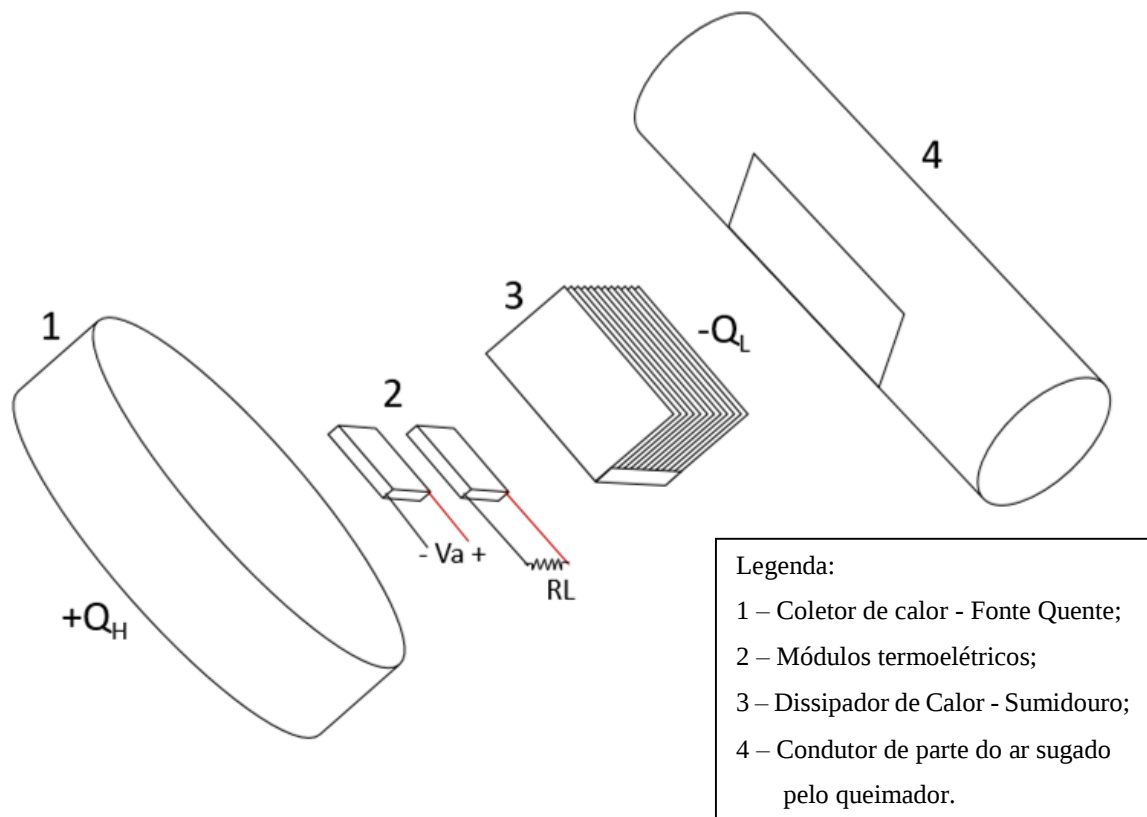
- A primeira etapa antes de desenvolver o protótipo de cogeração de energia, para identificar as temperaturas em toda área externa da caldeira para que fosse possível definir o local da instalação do protótipo;
- A segunda etapa da termografia foi realizada durante a montagem do protótipo, o que auxiliou na verificação da transferência de temperaturas no local onde foi instalado;
- A terceira etapa foi feita, desta vez com o protótipo em funcionamento para comprovar o funcionamento do protótipo.

Em todas as três etapas foram colhidas imagens da caldeira e em duas diferentes escalas de cor, na escala cinza e colorida e foram utilizados os valores de emissividade recomendados pelo manual do fabricante da câmera utilizada.

4.3 Desenvolvimento do Protótipo de Cogeração de Energia

Foi construído um protótipo de um gerador termoelétrico composto por diferentes partes. Um esquema representativo é apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Esquema do protótipo



Fonte: (próprio autor).

Nesse esquema representativo, tem-se a fonte de calor, representado por Q_H , é o valor correspondente à quantidade de calor fornecida para o sistema de cogeração. Q_L , é o valor do calor dissipado pelo sistema de cogeração, o V_a que é a tensão gerada por um módulo termoeletrico a vazio [V] e o R_L que é o valor da carga [Ω] conectada à o outro módulo termoeletrico.

Para gerar energia através do Efeito Seebeck é necessário que haja um gradiente de temperatura, entre as faces dos módulos termoeletricos. Por isso, o protótipo foi desenvolvido para conduzir o calor da parede da caldeira, para uma face do módulo e para dissipar o calor residual, na outra face do módulo. Por isso, foi utilizado o coletor de calor (1) que é uma peça de alumínio que absorve o calor emitido pela caldeira. Esse emite o calor através de condução térmica para a superfície dos módulos termoeletricos (2). O dissipador de calor (3) absorve o calor da superfície oposta dos módulos termoeletricos (2), novamente através de condução

térmica. Todo o calor absorvido pelo dissipador é trocado com o ar através de convecção forçada para o interior de uma tubulação de PVC (4) por onde é sugado parte do ar que alimenta o queimador da caldeira.

4.3.1 Coletor de calor

O coletor de calor foi montado artesanalmente a partir de uma peça de alumínio onde foram fixados os módulos termoeletrônicos e um sensor de temperatura termopar do tipo K. Os termopares industriais do tipo K são sensores que captam valores de temperatura que podem instrumentar de 0 a 1.260°C e necessitam ser parafusados na estrutura em que se deve instrumentar. Um dos instrumentos utilizados no protótipo foi instalado no coletor de calor (1) visando não interferir na integridade estrutural da caldeira. O coletor de calor foi construído a partir de um tarugo de alumínio medindo 165 mm de diâmetro por 30 mm de largura, apresentado na Figura 25.

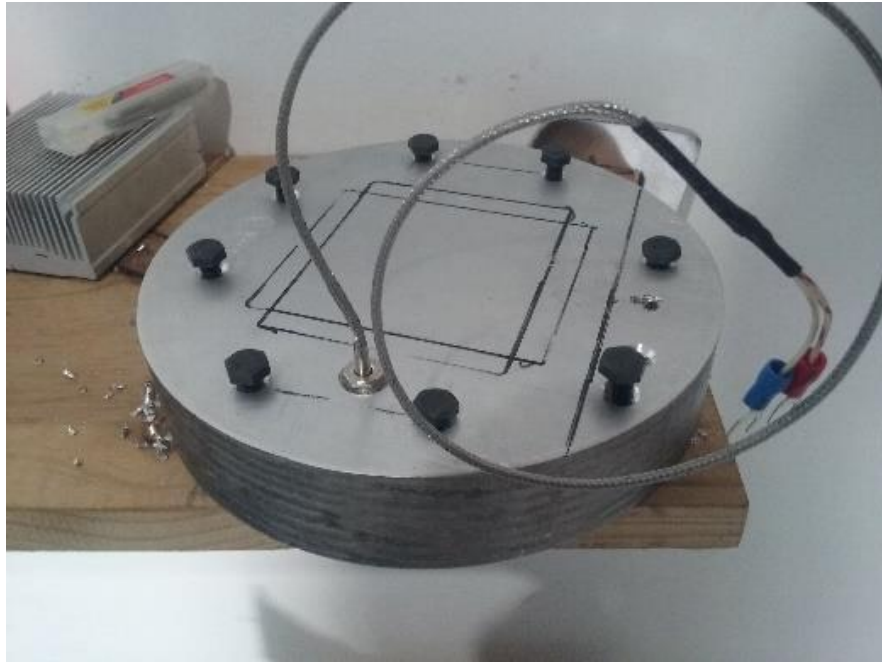
Figura 25 - Tarugo de alumínio utilizado no desenvolvimento do coletor de calor



Fonte: próprio autor

A peça foi lixada e preparada (com uma broca de aço rápido de 5mm e uma ferramenta para criar rosca interna de 6 mm), vários furos com rosca foram feitos, em cada um deles foi alocado um parafuso para evitar contaminação. Esses orifícios podem ser utilizados para trocar o termopar de posição quando necessário, conforme Figura 26.

Figura 26 – Tarugo de alumínio com vários furos para termopares



Fonte: próprio autor

4.3.2 Módulos termoeletrônicos

Dois módulos termoeletrônicos modelo F40550, da fabricante *Xinghe Electronics*, foram comprados para esse trabalho (Figura 27).

Figura 27 – Módulos termoeletrônicos



Fonte: próprio autor

Os módulos termoeétricos são constituídos internamente por semicondutores compostos de Telureto de Bismuto Bi_2Te_3 . Possuem como característica a resistência interna de $6,8 \, \Omega$ e tem o coeficiente Seebeck de aproximadamente $25 \, \text{mV}/^\circ\text{C}$ (MINGJIE GUAN 2017).

4.3.3 Dissipador de calor

Um dissipador de calor de alumínio aletado (3) que é comumente utilizado em processadores de computador foi utilizado para esse protótipo. Esse dissipador de calor (3) recebe todo o calor residual dos módulos termoeétricos através de condução térmica e efetua a transferência de calor por convecção forçada, ao trocar calor com o ar que flui no interior do tubo de PVC (4). O Dissipador de alumínio mede 82 mm de comprimento, 60 mm de largura e 30 mm de altura, como pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 – Dissipador de calor



Fonte: próprio autor

Foi preparado o dissipador com um furo lateral com rosca de 6 mm para alocar um termopar do tipo K, para que fosse possível identificar a quantidade de calor que está sendo rejeitada pelos módulos termoeétricos, como pode ser observado na Figura 29.

Figura 29 – Dissipador de calor com furo lateral para instrumentação



Fonte: próprio autor

Os módulos termoeletrônicos (2), são os únicos elementos entre a fonte de calor (coletor de calor) (1) e o sumidouro de calor (dissipador de calor) (3), para que exista transferência de calor apenas através desses módulos (2). Caso estejam corretamente alocados é possível conhecer a quantidade real de calor convertida em energia elétrica útil e sua eficiência. Os módulos termoeletrônicos (2) foram alocados sobre o coletor de calor (1) e na parte inferior do dissipador de calor (3), conforme a Figura 30.

Figura 30 – Módulos termoeletrônicos sobre o dissipador de calor



Fonte: próprio autor

4.3.4 Tubo de PVC

Foi desenvolvido um sistema de condução de com tubos de PVC medindo 75 mm de diâmetro e 5,4 metros de comprimento. Esse sistema permite que se faça a convecção forçada no dissipador de calor (3), ao conduzir parte do ar que é sugado pela alimentação do queimador da caldeira, ao passar por suas aletas, como é apresentado na Figura 31.

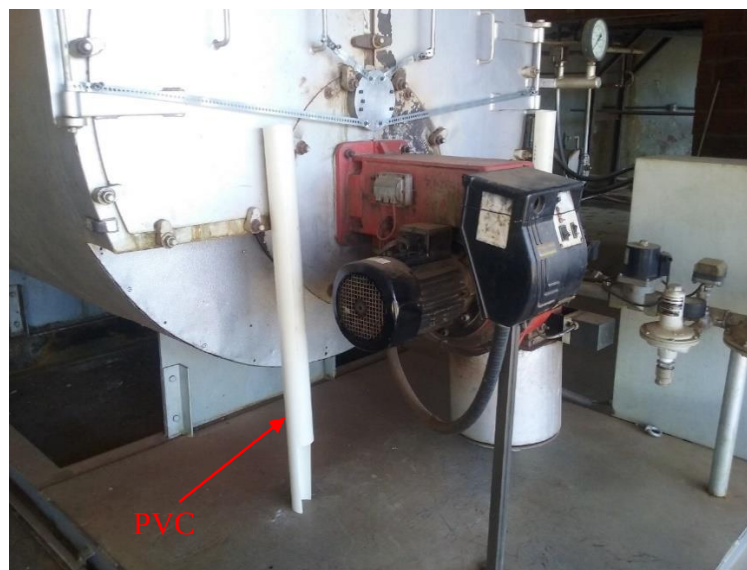
Figura 31 – Dissipador de calor encaixado no cano de PVC



Fonte: próprio autor

A caldeira possui um queimador com um bocal que suga o ar à temperatura ambiente. Com esse sistema desenvolvido parte desse ar irá passar pelos tubos de PVC posicionados próximos ao bocal do queimador e ao coletor de calor (1), como pode ser observado na Figura 32.

Figura 32 – Montagem dos tubos de PVC

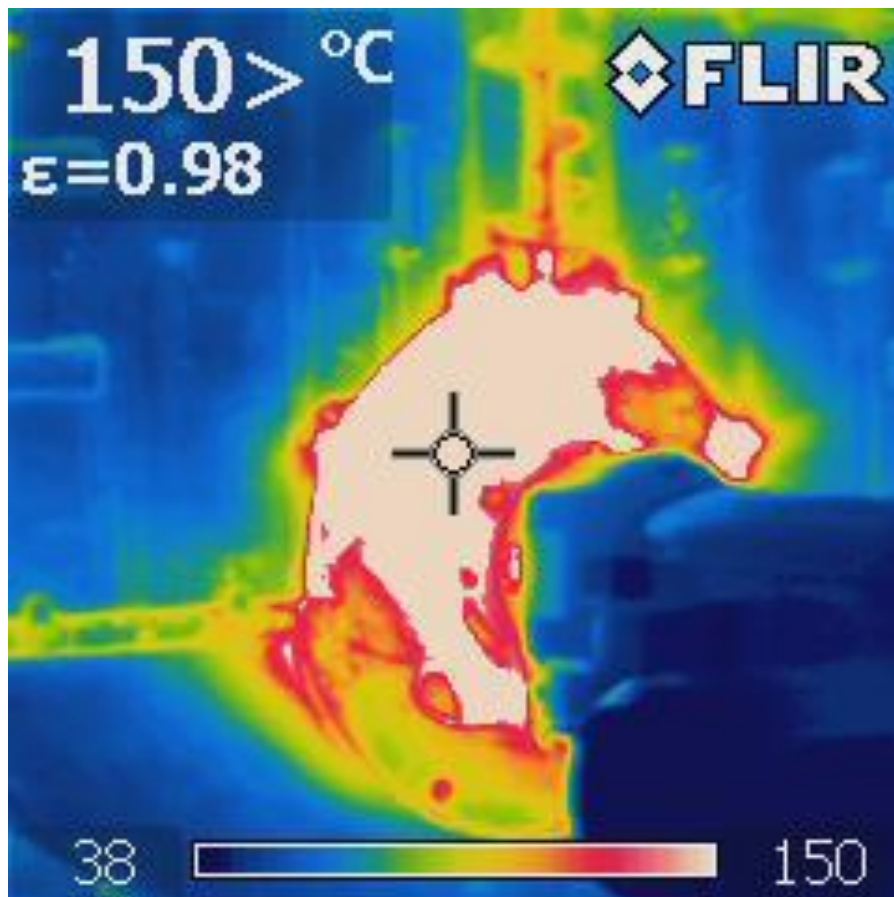


Fonte: próprio autor

4.3.5 Definição do local da instalação do protótipo na caldeira

Para definir o local adequado para a instalação do protótipo, foi feita uma análise termográfica para identificar os pontos com maior perda de calor em toda a caldeira. Além disso, outro fator que influenciou na definição do local foi a distância do protótipo do sistema de sucção de ar do queimador. Essa deveria ser pequena para que o protótipo fosse de baixo custo. Assim, o local escolhido foi na parede frontal da caldeira, logo acima do queimador, observa-se que esse local não possui isolamento térmico e através da termografia foi observado que esse ponto possui grande perda de calor (Figura 33).

Figura 33 – Termografia do local adequado para a instalação do protótipo



Fonte: próprio autor

4.3.6 Montagem do protótipo na caldeira

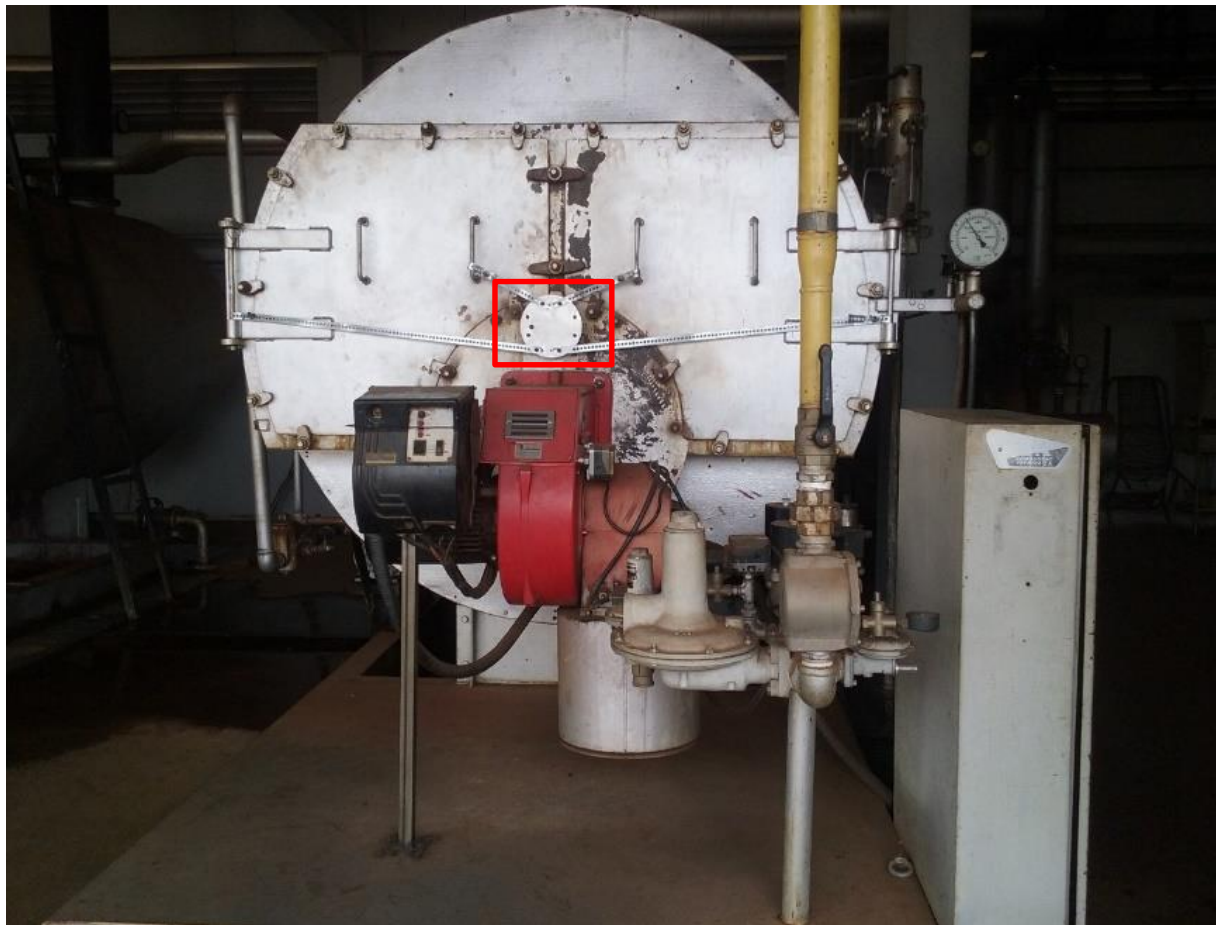
A montagem do protótipo ocorreu com total segurança, realizada no momento em que a caldeira se encontrava desligada. Cada parte do protótipo e sua montagem será descrita nas subseções seguintes.

O protótipo foi implementado em escala reduzida devido à restrição econômica para a sua concepção. Logo, a quantidade de calor aproveitada é pequena, em comparação com todo o calor possível de ser disponibilizado pela caldeira e seu sistema de exaustão.

Através das figuras termográficas obtidas na primeira e segunda etapa foi possível identificar um local “ótimo” para efetuar a montagem do protótipo, sem interferir na integridade estrutural da caldeira.

O local escolhido fica logo acima do queimador, com fácil acesso ao sistema de sucção de oxigênio do queimador, que alimenta a chama interna na fornalha da caldeira. O local é marcado em vermelho na Figura 34.

Figura 34 – Local da montagem do protótipo na caldeira do HRMS



Fonte: próprio autor

O coletor de calor (1) foi instalado com o auxílio de fitas perfuradas que são normalmente utilizadas como abraçadeiras, como é mostrado na Figura 35.

Figura 35 - Coletor de calor na caldeira



Fonte: próprio autor

A carga (R_L) foi embarcada no interior de uma caixa metálica junto a três multímetros, um disjuntor e a uma régua de tomadas que alimenta um computador e o *datalogger*, como é mostrado na Figura 36.

Figura 36 – carga (R_L), multímetros e alimentação elétrica



Fonte: próprio autor

Na tampa da caixa metálica foi instalado um computador que é conectado via USB ao *datalogger*, como mostrado na Figura 37.

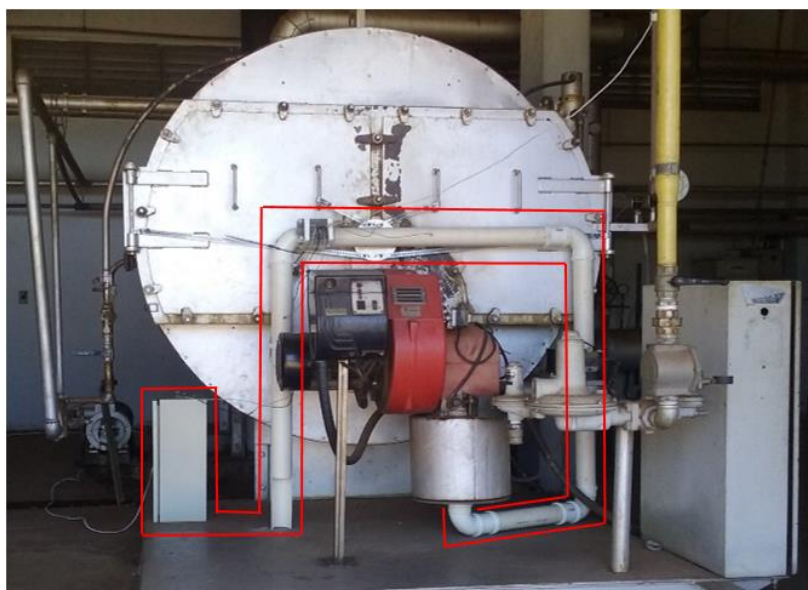
Figura 37 – Computador preso a tampa da caixa metálica



Fonte: próprio autor

Por fim, o protótipo montado, coletando calor da caldeira, cogerando energia e com o *datalogger* em funcionamento é mostrado na Figura 38.

Figura 38 – protótipo em funcionamento na caldeira do HRMS



Fonte: próprio autor

Para um melhor entendimento, foram identificados de A a F os itens que compõem todo o protótipo, juntamente com uma breve explicação de seu funcionamento, como é apresentado na Figura 39.

Figura 39 – identificação das partes do protótipo



Fonte: próprio autor

- A) Caixa metálica onde encontram-se a carga (R_L), três multímetros, um disjuntor, uma régua de tomadas e um computador com fonte de energia;

Figura 40 – Caixa metálica



Fonte: próprio autor

- B) Entrada por onde é sugado ar que efetua convecção forçada nas aletas do dissipador de calor (3);

Figura 41 – Entrada de ar



Fonte: próprio autor

- C) *Datalogger*;

Figura 42 – *Datalogger*



Fonte: próprio autor

- D) Núcleo de cogeração, local onde encontra-se o coletor de calor (1), dois módulos termoeletrônicos (2) e o dissipador de calor (3);

Figura 43 – Núcleo de cogeração



Fonte: próprio autor

E) Tubo de PVC;

Figura 44 – Tubo de PVC



Fonte: próprio autor

F) Local onde o tubo de PVC encontra o bocal do queimador.

Figura 45 – tubo de PVC e bocal do queimador



Fonte: próprio autor

4.4 Instrumentação do protótipo

Ao instrumentar um termopar obtém-se o valor de temperatura do ponto em que está sendo analisado, somado ao valor da temperatura ambiente. A caldeira utilizada nesse trabalho tem por objetivo atender as necessidades da lavanderia de um hospital, porém é um equipamento de nível industrial e tanto o protótipo de cogeração, quanto os instrumentos utilizados devem possuir robustez correspondente. Desta maneira, foi escolhido o termopar do tipo K que tem 20 mm de comprimento, rosca de 6 mm e cabeça sextavada de 10 mm, como pode ser observado na Figura 46.

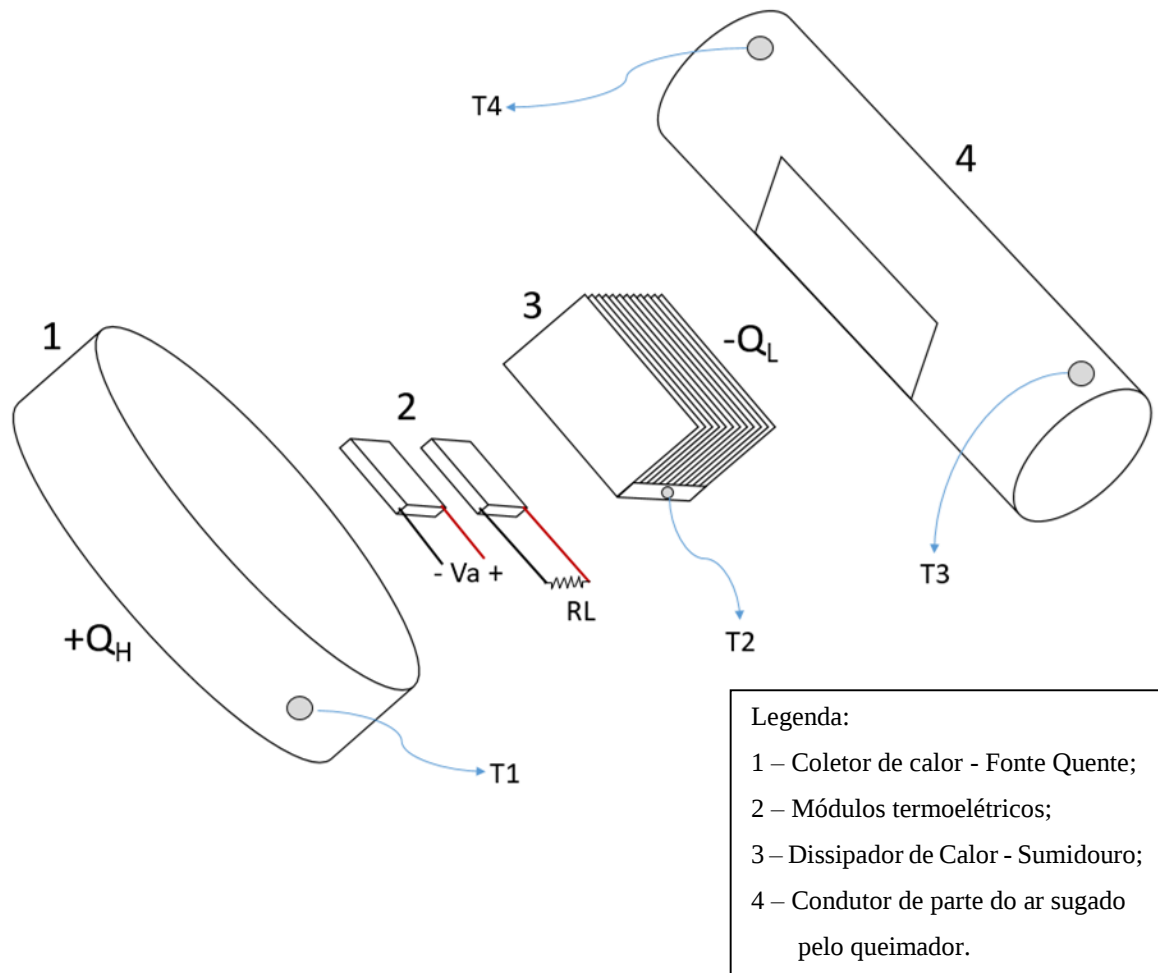
Figura 46 – Termopar do tipo K



Fonte: próprio autor

Os instrumentos de temperatura termopar do tipo k foram alocados no protótipo conforme é demonstrado na Figura 47.

Figura 47 – Distribuição dos sensores no protótipo



Fonte: (próprio autor).

Devido a sua resistência mecânica, o termopar do tipo K é comumente utilizado como instrumento em processos industriais de metalúrgicas, fábricas de vidros, siderúrgicas, usina de cimento e cal, fundição, fábricas de cerâmica e processos industriais em geral.

Sua faixa de utilização está entre 0 a 1260 ° C, sua força eletromotriz varia de 0 a 50,990 mV, e pode ser utilizado em atmosferas inertes e oxidantes.

Para instrumentar corretamente o termopar, o *datalogger* deve subtrair o valor da temperatura ambiente para registrar a real temperatura de cada ponto instrumentado por um termopar. Foi utilizado o sensor de temperatura LM35 (Figura 48) para efetuar a aquisição da

temperatura ambiente e servir de referência para o *datalogger*. O sensor LM35 pode ser observado na Figura 48.

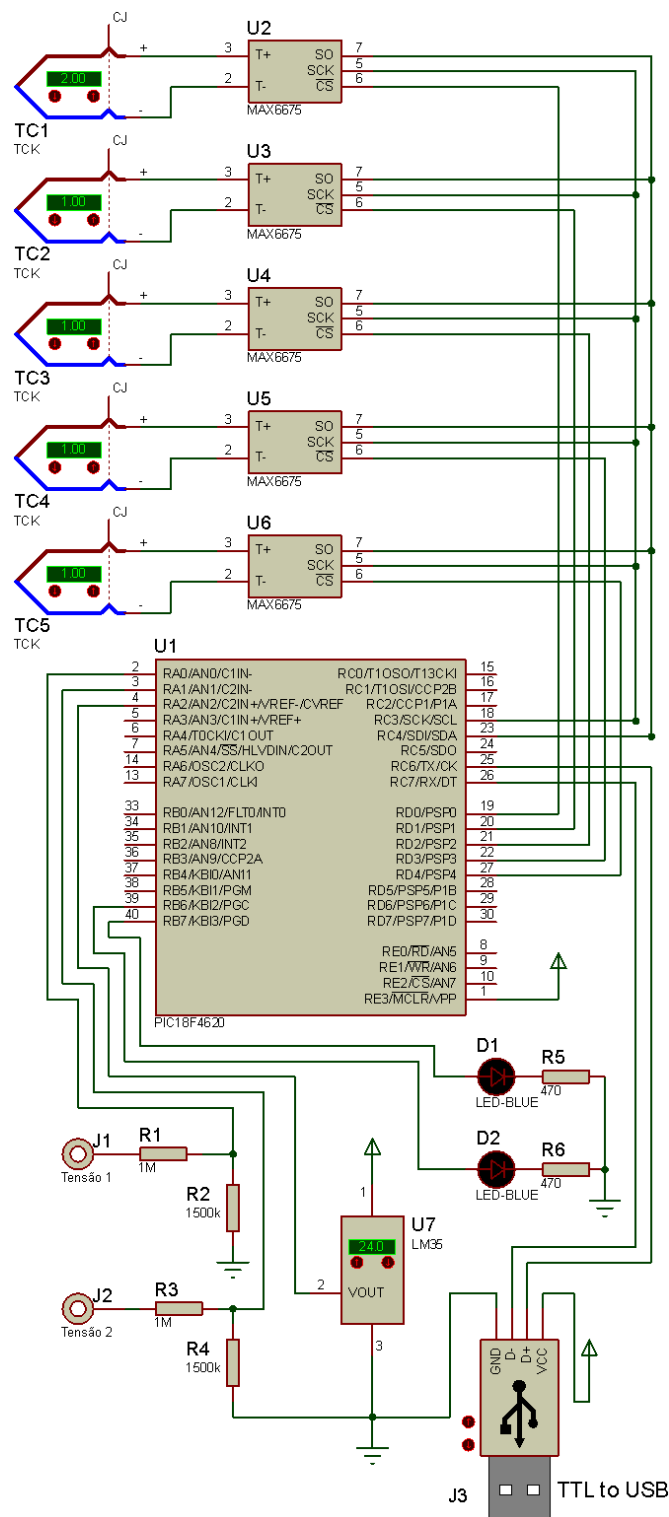
Figura 48 – Sensor de temperatura LM35



Fonte: próprio autor

O sensor LM35 trabalha com uma corrente elétrica de 10 mA e possui uma saída analógica linear de 10 mV/ ° C, com capacidade de detectar temperaturas entre -55 a 150 ° C. Apresenta um erro de aproximadamente 0,01 ° C para temperaturas ambientes de até 25° C e para temperaturas acima de 25 ° C até 150 ° C o erro varia entre 0,01 a 0,05 ° C.

O *datalogger* desenvolvido para o protótipo possui um micro controlador PIC-18F4620, capaz de efetuar a aquisição dos dados de temperatura provenientes dos termopares do tipo K. Ao mesmo tempo em que registra a diferença das temperaturas instrumentadas em cada ponto, pela referência da temperatura ambiente, fornecida pelo LM35. Efetua ainda a leitura e o registro de tensões e corrente elétrica geradas por cada um dos módulos termoeletrônicos. A cada segundo, o *datalogger* cria uma nova linha com todos esses dados, que são transmitidos através de conexão USB para um computador conectado à nuvem, que salva esses dados no formato txt. O esquema eletrônico do *datalogger* pode ser observado na Figura 49.

Figura 49 – Esquema eletrônico do *datalogger*

Legenda:

- TC1 – Termopar 1
- TC2 – Termopar 2
- TC3 – Termopar 3
- TC4 – Termopar 4
- TC5 – Termopar 5
- U1 – Micro controlador PIC 18f4620
- U2 – Transdutor Analógico Digital
- U3 – Transdutor Analógico Digital
- U4 – Transdutor Analógico Digital
- U5 – Transdutor Analógico Digital
- U6 – Transdutor Analógico Digital
- U7 – LM35 Sensor Temperatura Ambiente
- D1 – Led de Status um (Sistema ligado)
- D2 – Led de Status dois (transmitindo dados)
- R1 – Resistor 1 M Ω
- R2 – Resistor 1,5 M Ω
- R3 – Resistor 1 M Ω
- R4 – Resistor 1,5 M Ω
- R5 – Resistor 470 Ω
- R6 – Resistor 470 Ω
- J1 – Entrada de tensão sobre a carga conectada ao módulo termoeletrico (M1)
- J2 – Entrada de tensão gerada pelo módulo termoeletrico a vazio (M2)
- J3 – Conexão TTL para USB

Fonte: (próprio autor).

4.4.1 Funcionamento do *datalogger*

O *datalogger* possui cinco instrumentos de temperatura termopar tipo K, TC1 a TC5, em que cada um deles está conectado diretamente a um transdutor analógico digital (U2 a U6), específico para uso em termopares do tipo K. Para que o *datalogger* possa efetuar a aquisição correta das temperaturas dos termopares, um sensor LM35 efetua a leitura da temperatura ambiente, U7. Os valores de tensão gerada em cada um dos módulos termoeletrônicos também são registrados pelo *datalogger*.

Foram consultadas diferentes pesquisas científicas (FARIAS 2009), (CARVALHO 2012) (ANDO JUNIOR 2014) e (A. E. FERNANDES 2012) para determinar qual o melhor valor de carga deveria ser utilizado neste projeto. Foi escolhida a pesquisa de Fernandes (2012) pelos seus resultados. Nela, foram utilizados diferentes valores de carga para um módulo termoeletrônico e encontrou-se a melhor relação entre a carga e potência, com o valor de 7 ohms para a carga.

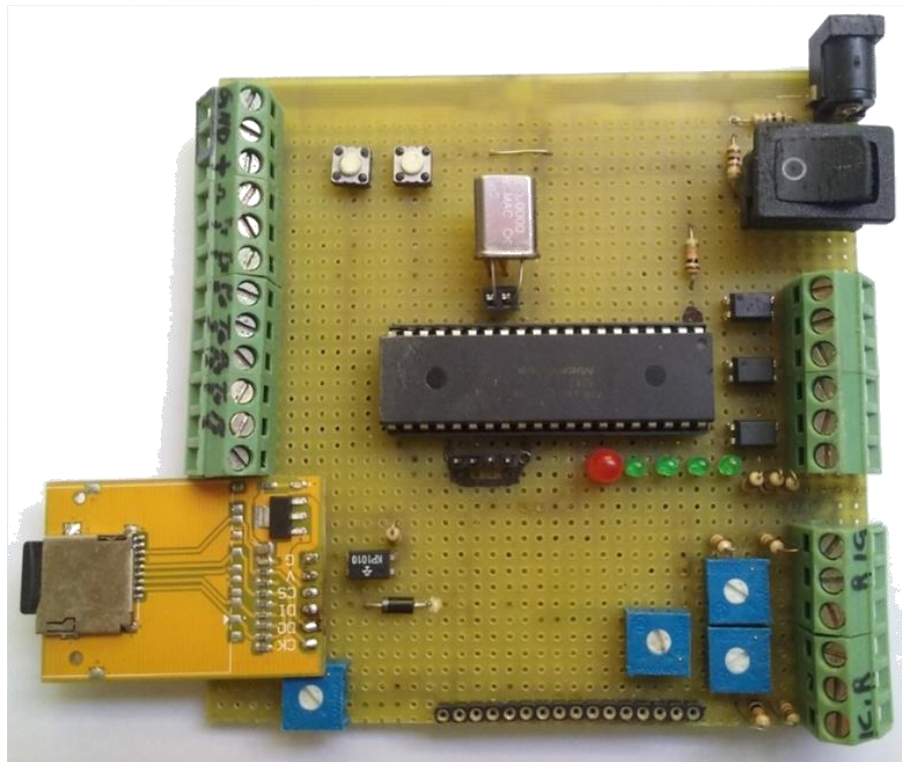
Dessa maneira, para efetuar a instrumentação da potência gerada, um módulo termoeletrônico foi ligado a uma carga (R_L) de 7 ohms e o outro módulo foi montado a vazio, sem carga, tendo em seus terminais apenas o sistema de instrumentação. No módulo termoeletrônico ligado a carga (R_L) foi possível conhecer a tensão e a corrente atuante sobre a carga (R_L). Já sobre o módulo termoeletrônico sem carga, foi possível conhecer sua tensão a vazio (V_a), um dado importante para estimar o coeficiente Seebeck (α) e a resistência interna (R_{in}) do módulo termoeletrônico.

O *datalogger* efetua a leitura de tensão e corrente do módulo termoeletrônico com carga, a leitura de tensão do módulo termoeletrônico sem carga e lê todas os sensores de temperatura, e os envia para um computador via conexão USB. Esse computador escreve os dados em uma nova linha do arquivo de texto, criado no cartão de memória local e os salvam em nuvem³.

O Diodo Emissor de Luz ou *Light Emitting Diode* (LED) D1 indica que o circuito está ligado e o LED D2 pisca a cada ciclo do programa embarcado no micro controlador, para demonstrar seu funcionamento. O circuito montado do *datalogger* é apresentado na Figura 50.

³ Utilização da memória, da capacidade de armazenamento e cálculo de computadores e servidores compartilhados e interligados por meio da internet seguindo o princípio da computação em grade.

Figura 50 – Foto da placa eletrônica

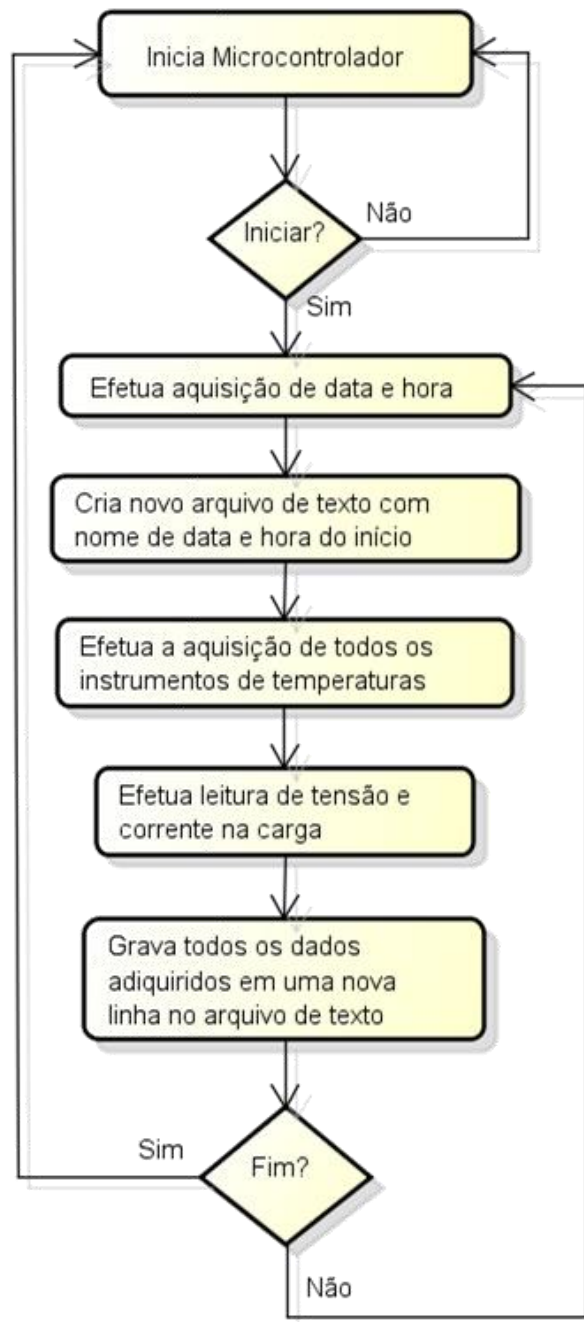


Fonte: (próprio autor).

O *datalogger* registra 5 variáveis de temperatura, sendo que uma delas é unicamente um sensor instalado para *backup* e caso um dos outros 4 sensores venha a falhar, o mesmo pode ser substituído. Das quatro variáveis de temperatura T1, T2, T3 e T4, as de maior importância são T1 e T2. A temperatura T1 proveniente do sensor instalado no coletor de calor é aproximadamente a mesma temperatura na parede da caldeira, que por condução térmica, recebe calor e o entrega a uma face do módulo termoeletrico. A temperatura T2 é aproximadamente a temperatura na outra face do módulo termoeletrico, onde também por condução térmica é retirado o calor e dissipado através de convecção forçada pelas aletas de alumínio.

Cada linha do arquivo de texto recebido pelo computador possui várias colunas, cada uma delas com seus respectivos dados colhidos de cada um de seus instrumentos.

A lógica do programa embarcado no micro controlador é demonstrada através do fluxograma da Figura 51.

Figura 51 – Fluxograma do *datalogger*

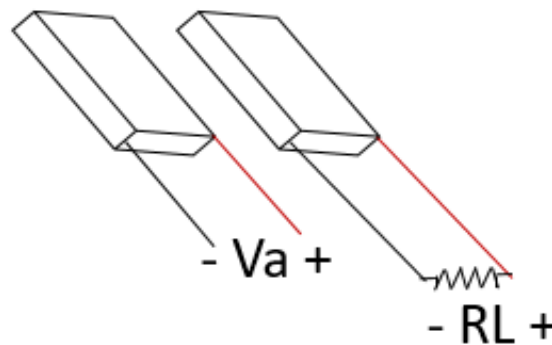
Fonte: (próprio autor).

Após vários ensaios, verifica-se que os dados coletados foram gravados no cartão de memória. Esses dados são mostrados na seção resultados e discutidos na seção discussão dos resultados, com análises de levantamento das curvas características de eficiência e de funcionamento dos módulos termoeletrônicos.

5 Resultados

Dois módulos ocupam uma área total de $0,0032 \text{ m}^2$, sendo que um desses módulos termoeletrico que ocupa a área de $0,0016 \text{ m}^2$ é conectado a uma carga R_L de 7 ohms, utilizada para quantificar a potência gerada. Dessa forma, a outra metade dessa área, $0,0016 \text{ m}^2$, foi utilizada no outro módulo termoeletrico a vazio, ou seja, sem estar conectado a uma carga. Assim, foi possível analisar a sua resposta elétrica em volts denominada V_a , diante do delta de temperaturas, possibilitando a obtenção dos dados de condutividade térmica e coeficiente Seebeck, conforme é ilustrado na Figura 52.

Figura 52 – Módulos termoeletricos



Fonte: (próprio autor).

Com a caldeira funcionando em regime permanente, o *datalogger* efetuou a coleta dos dados, que foram utilizados para a realização de cálculos e simulações computacionais no *software Matlab*. Determinou-se, dessa forma, a quantidade de calor que foi aproveitada e efetivamente transformada em energia elétrica útil.

A caldeira e seu sistema de exaustão juntos possuem área total de $61,48 \text{ m}^2$, porém nem toda esta área pode ser utilizada, devido as conexões de tubos e portas de inspeção. A área teórica total utilizável para a instalação de módulos termoeletricos é de $59,48 \text{ m}^2$. Como o projeto não possui apoio financeiro para a utilização de toda a área teórica utilizável, foi então construído um protótipo capaz de fornecer os dados de quantidade de calor fornecido, de dissipado e potência gerada de um módulo termoeletrico. Os dados colhidos foram utilizados para gerar uma estimativa teórica aproximada da potência elétrica que a caldeira poderia gerar. Esta estimativa teórica contempla a área total utilizável da caldeira, condições ideais de

funcionamento, delta de temperaturas ideal e despreza as possíveis perdas por transferência de calor.

Nesta estimativa, seriam utilizados 37.173 módulos termoeletrônicos para revestir toda a área utilizável de 59,48m² da caldeira e seu sistema de exaustão, de maneira que seria possível mensurar resultados teóricos, referentes a todo o seu potencial de cogeração.

5.1 Análise termográfica da caldeira e sistema de exaustão

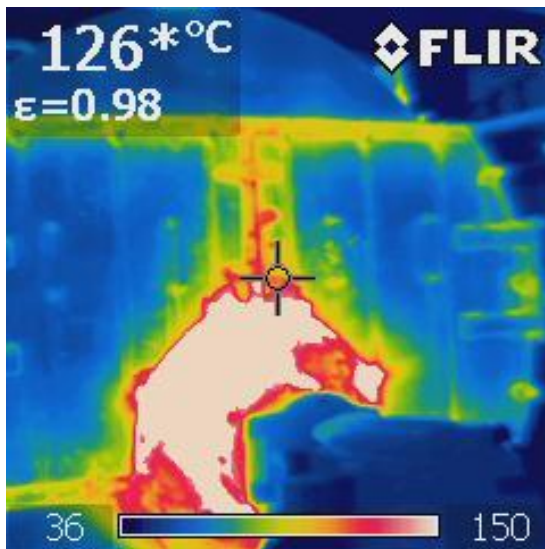
Serão apresentados os resultados das três etapas da análise termográfica.

5.1.1 Primeira etapa da análise termográfica

Esta análise possibilitou identificar todos os pontos de maior calor da caldeira, para definir o melhor local de montagem do protótipo. Para esta análise, foram utilizados valores de emissividades recomendadas pelo fabricante do instrumento, de 0,98 para ferro e aço.

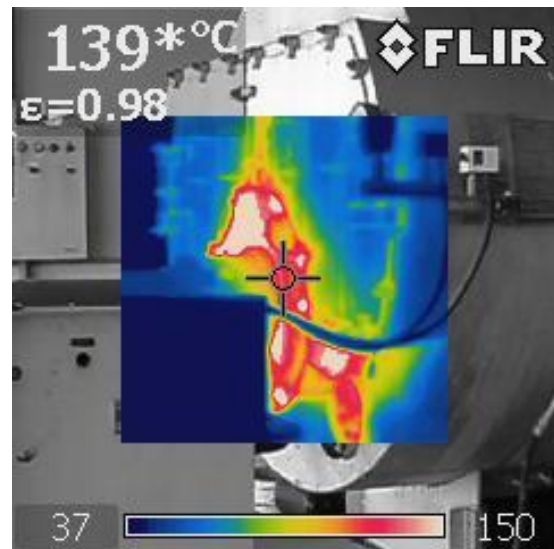
Foram identificadas temperaturas variando entre 126 a 139 ° C na região da fornalha, onde a caldeira se conecta ao queimador, como pode ser observado na Figura 53 e Figura 54.

Figura 53 – Termografia da caldeira



Fonte: próprio autor

Figura 54 – Termografia da caldeira

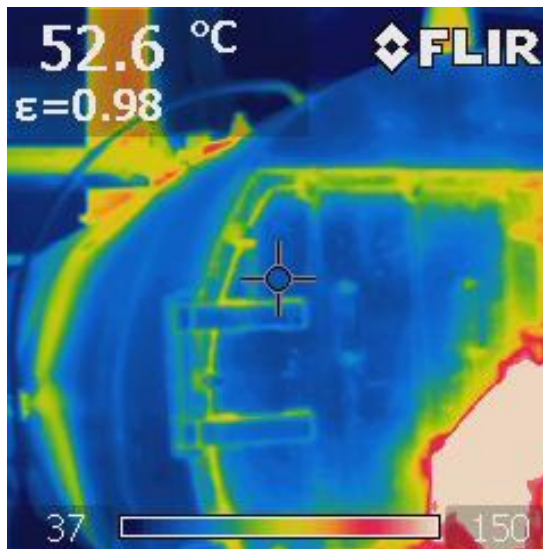


Fonte: próprio autor

Foram identificadas temperaturas variando entre 52,6 a 112 ° C nos locais onde a caldeira possui pintura de cor clara. A temperatura é maior nos pontos onde a pintura está

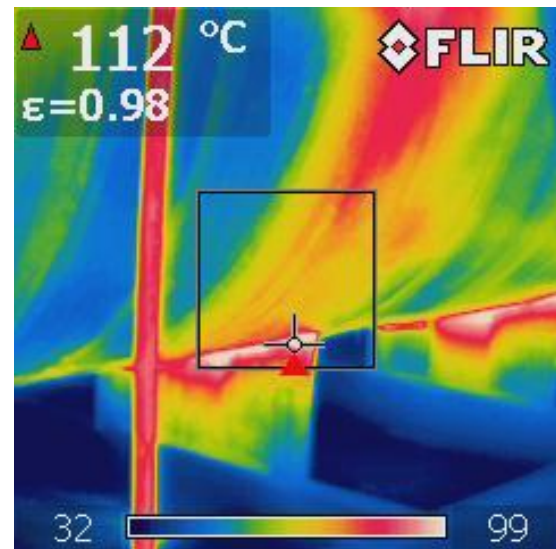
descascada. Nesses locais é possível se obter uma temperatura maior, como é mostrado na Figura 55 e Figura 56.

Figura 55 – Termografia da caldeira



Fonte: próprio autor

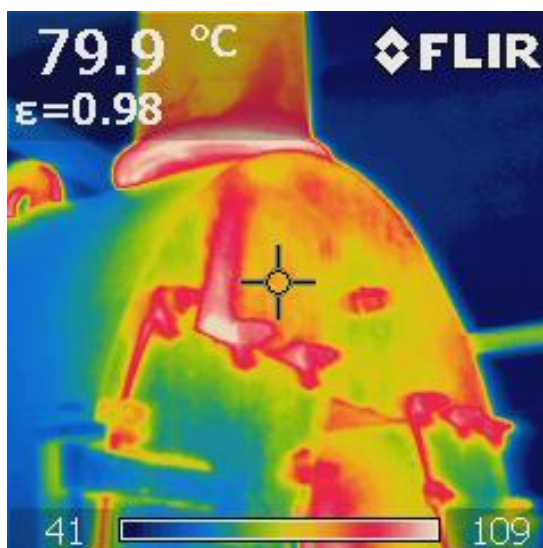
Figura 56 – Termografia da caldeira



Fonte: próprio autor

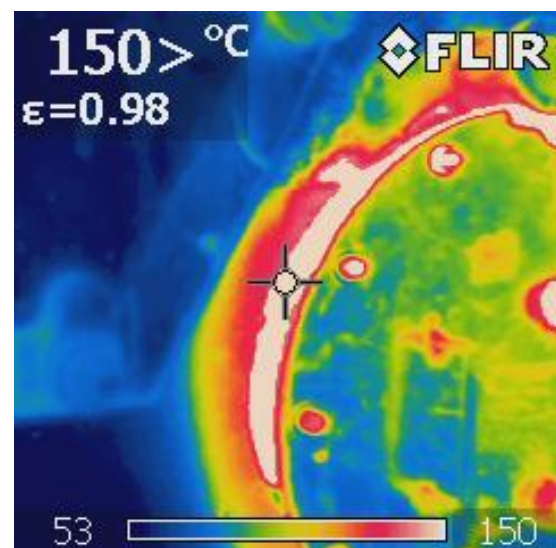
Foram identificadas temperaturas variando entre 79,9 ° C a temperaturas maiores que 150 ° C na região perto da chaminé. Mais uma vez, foi possível observar a temperatura maior nos locais onde a tinta já não existe, como é observado na Figura 57 e Figura 58.

Figura 57 – Termografia da caldeira



Fonte: próprio autor

Figura 58 – Termografia da caldeira

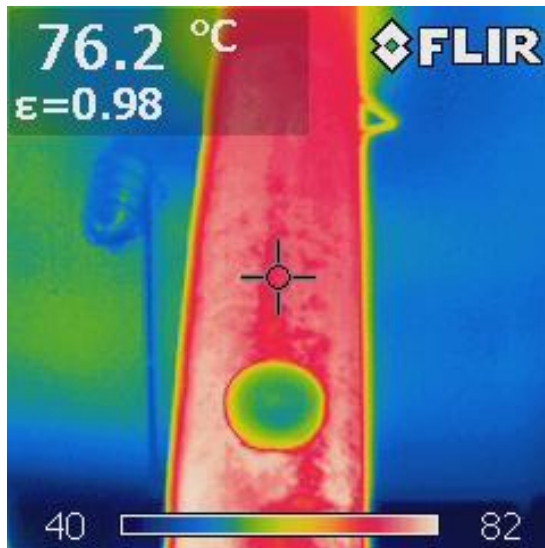


Fonte: próprio autor

A termografia efetuada na chaminé foi feita em escala de cinza, com emissividade de 0,74 que é recomendada para ferro e aço oxidado e colorida, com a emissividade de 0,98, para ferro e aço. Os valores de emissividade foram ajustados antes da medição termográfica conforme a recomendação descrita no manual do fabricante da câmera termográfica.

Dessa maneira, foram encontradas temperaturas variando entre 76,2 ° C a 144 ° C. A diferença nas temperaturas se deve a configuração de emissividade na câmera termográfica, sendo utilizado 0,98 para ferro e aço (Figura 59) e como a chaminé está oxidada foi utilizada emissividade de 0,74 (Figura 60).

Figura 59 – Termografia, emissividade 0,98



Fonte: próprio autor

Figura 60 – Termografia, emissividade 0,74



Fonte: próprio autor

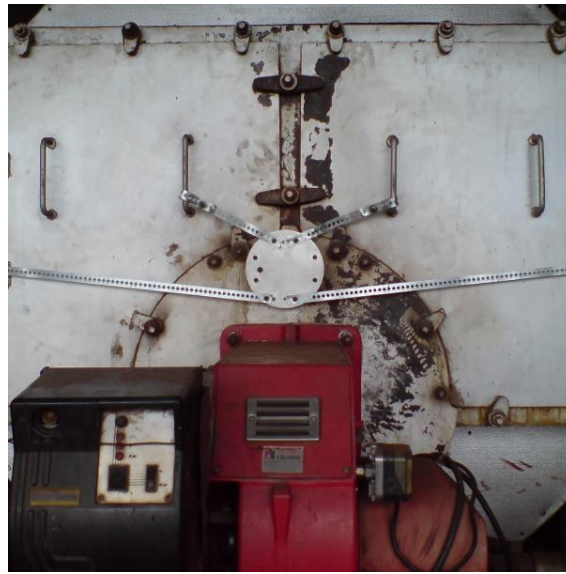
Através desta análise termográfica foi identificado um fluxo de calor contínuo e homogêneo em todo o corpo da caldeira e sistema de exaustão. Permitindo a montagem do protótipo em praticamente qualquer segmento analisado. Logo, por questão de custos do material, foi escolhida para a montagem do protótipo a região frontal da caldeira, acima do queimador.

5.1.2 Segunda etapa da análise termográfica

Foi realizada a segunda etapa da análise termográfica durante a montagem do protótipo.

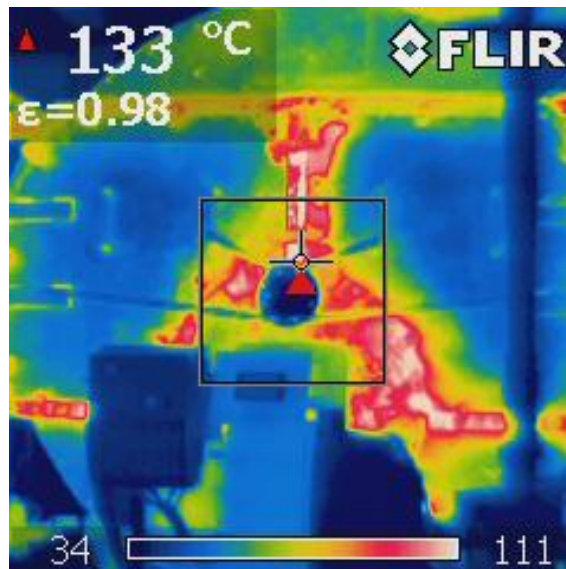
Para esta medição foi utilizado a emissividade de 0,98 na região da fornalha, acima do queimador, onde foi instalado o coletor de calor do protótipo de cogeração (Figura 61). É possível observar que a temperatura nesta região é de 133 ° C, visto que esta medição ocorreu poucas horas após a caldeira ser ligada (Figura 62).

Figura 61 – local de instalação do coletor de calor



Fonte: próprio autor

Figura 62 – Termografia na região da fornalha



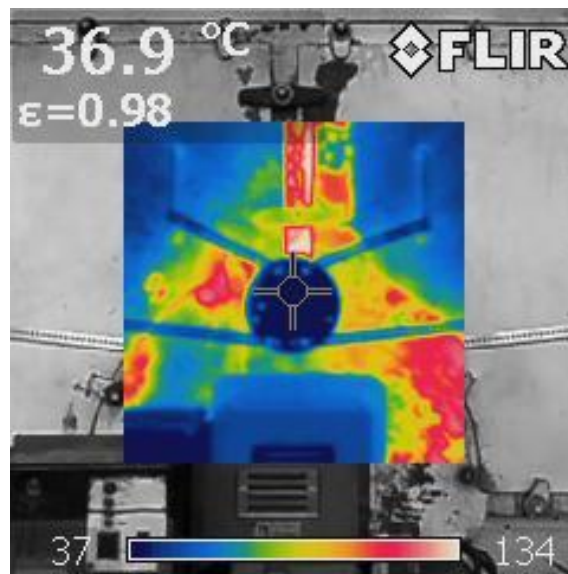
Fonte: próprio autor

O coletor de calor é feito de alumínio e possui uma superfície plana e polida para facilitar a transferência de calor por condução. Característica que dificulta a medição por termografia,

pois a face polida reflete a luz ambiente, mascarando a real temperatura e impedindo que esta possa ser obtida através de uma câmera termográfica (Figura 63).

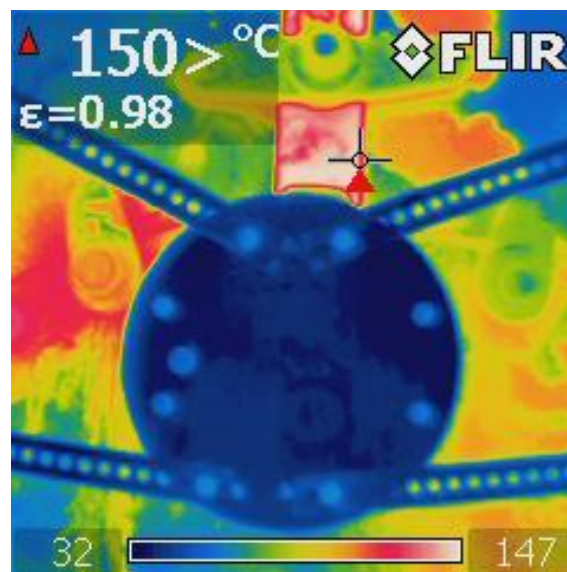
Como o coletor de calor está em contato direto com a parede da caldeira e em função do local ser de maior temperatura, pode-se estimar que a temperatura do coletor de calor é aproximadamente igual a temperatura da superfície em que está em contato. Pode-se observar a região da parede da caldeira onde a temperatura é superior a 150 ° C (Figura 64).

Figura 63 – Termografia: coletor de calor



Fonte: próprio autor

Figura 64 – Termografia: coletor de calor polido

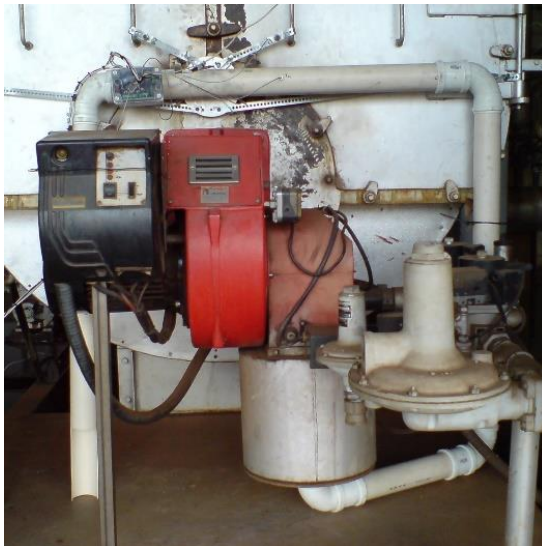


Fonte: próprio autor

5.1.3 Terceira etapa da análise termográfica

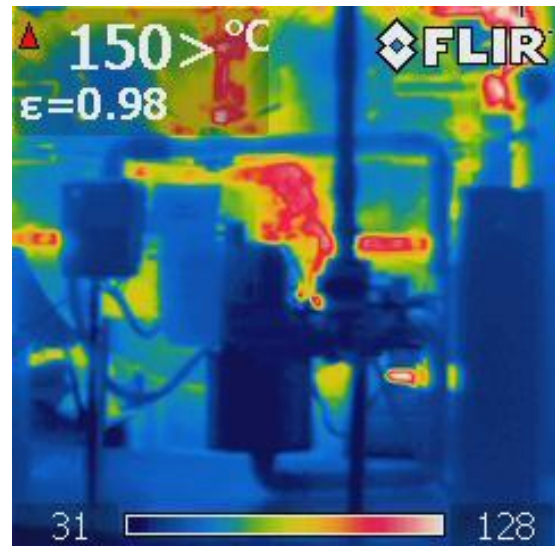
A terceira etapa da análise termográfica foi realizada com o protótipo totalmente montado e em funcionamento, reaproveitando o calor residual da caldeira na área em que foi instalado. A análise termográfica nesta etapa auxilia na verificação do funcionamento do protótipo e na validação das temperaturas obtidas com o *datalogger*. É possível verificar através das imagens termográficas que a temperatura do tubo de PVC é aproximadamente igual à temperatura ambiente. Percebeu-se que o protótipo alcançou e manteve um delta de temperatura entre as faces do módulo termoeletrico, como é apresentado na Figura 65 e Figura 66.

Figura 65 – Foto do protótipo completo funcionando junto à caldeira



Fonte: próprio autor

Figura 66 – Termografia do protótipo em funcionamento junto à caldeira



Fonte: próprio autor

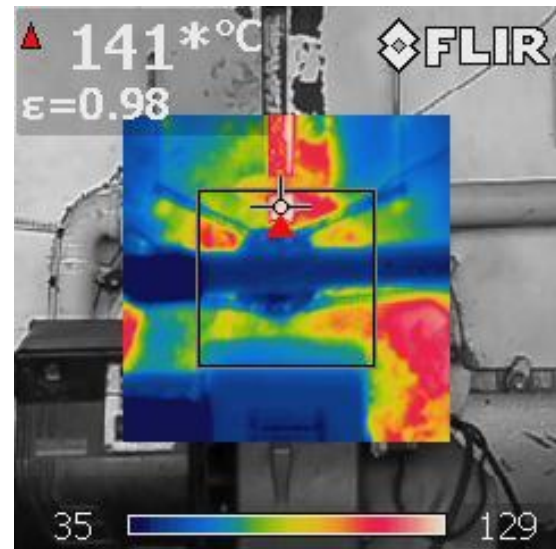
Observa-se que a temperatura sobre a parede da caldeira, onde o protótipo de cogeração foi instalado, tem o valor médio de 141° C. Nesse momento a temperatura do tubo de PVC era de aproximadamente 35 ° C correspondendo com a temperatura ambiente e mantendo o delta necessário, como é apresentado na Figura 67 e Figura 68.

Figura 67 – Termografia da caldeira



Fonte: próprio autor

Figura 68 – Termografia da caldeira



Fonte: próprio autor

5.2 Análise dos dados obtidos com o *datalogger*

O *datalogger* registrou um total de 9 variáveis a cada segundo, em várias medições realizadas, em um período total de 37 dias. De todas as medições realizadas, foi escolhida para a análise uma medição com o período total de 30 horas, período em que a caldeira funcionou de maneira totalmente autônoma, sem interferência humana. As 9 variáveis obtidas pelo *datalogger* são:

1. Tensão no módulo termoeletrico a vazio (V1);
2. Tensão no módulo termoeletrico com carga (VL);
3. Corrente no módulo termoeletrico com carga (IL);
4. Temperatura ambiente em graus Celsius (Ta);
5. Temperatura no coletor de calor (T1);
6. Temperatura no dissipador de calor (T2);
7. Temperatura do ar de entrada no tubo de PVC (T3);
8. Temperatura do ar após passagem pelo dissipador de calor no tubo de PVC (T4);
9. Temperatura do sensor reserva, não utilizado (T5).

O registro escolhido possui 9 colunas, onde cada uma corresponde a uma variável e 107.045 linhas, onde cada linha corresponde a uma leitura por segundo de todas as 9 variáveis. Os gráficos com os resultados compilados serão apresentados nas seções subsequentes.

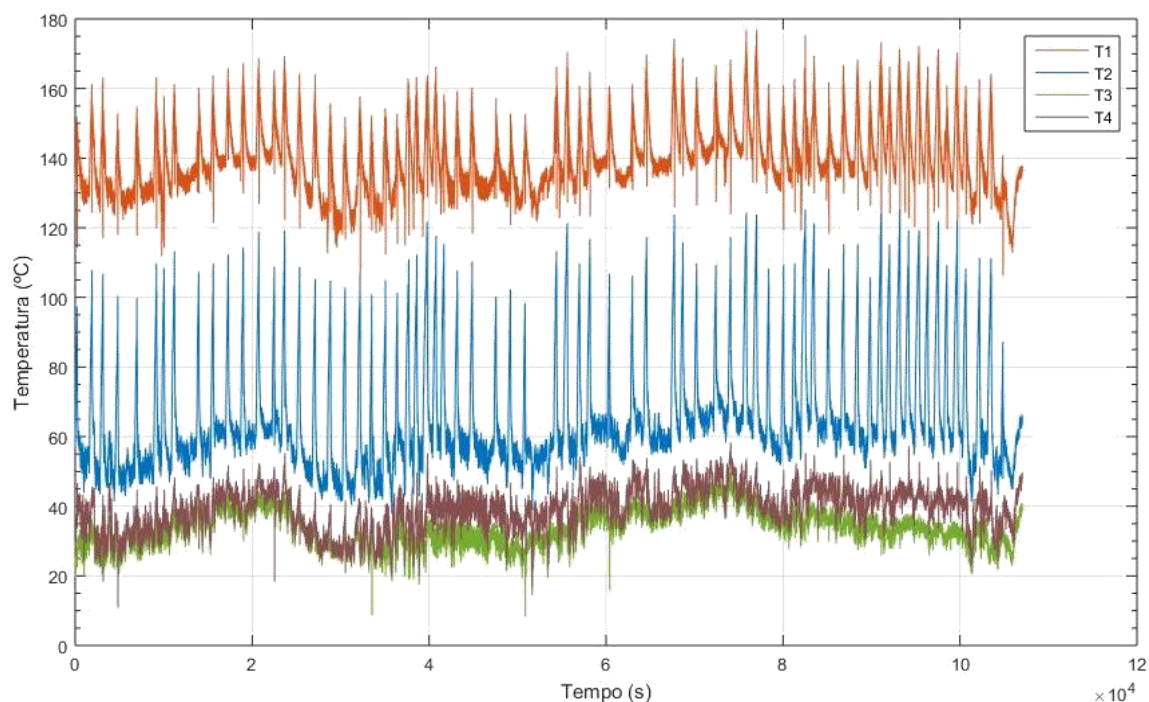
5.2.1 Análise das temperaturas

O comportamento característico do fluxo de calor no protótipo, pode indicar o seu correto funcionamento. Este comportamento pode ser observado através dos instrumentos de temperatura T1 a T4.

As temperaturas T1 e T2 são as variáveis que compõem o delta de temperaturas sobre as faces dos módulos termoelétricos do protótipo. Como o Efeito Seebeck só é ativado no módulo termoelétrico quando existe um fluxo de calor ou diferencial de potencial térmico entre suas faces, espera-se que a temperatura T1 seja maior que T2.

Da mesma forma, T4 deve ser maior que T3. Verifica-se que o valor médio de T1 é de 140,4 °C, o valor médio de T2 é de 65,49 °C, o valor médio de T3 é de 35,3 °C e o valor médio de T4 é de 39,3° C (Figura 69).

Figura 69 – T1, T2, T3 e T4



Fonte: próprio autor

No decorrer deste trabalho, serão apresentadas tabelas contendo dados estatísticos para cada variável do gráfico apresentado e que foram adquiridos através do *datalogger*.

Os dados estatísticos referente a cada variável apresentada na Figura 69 são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados estatísticos T1, T2, T3 e T4

Estatística	T1	T2	T3	T4
Mínimo	85,70	37,90	8,30	10,80
Máximo	176,80	125,30	49,80	58,30
Média	140,40	65,48	33,48	39,29
Variância	97,87	251,69	25,35	35,77
Desvio padrão	9,893	15,86	5,036	5,981
Moda	138,30	58,30	33,30	42,30
Erro Padrão	0,030	0,048	0,015	0,018
Nº Amostras	107045	107045	107045	107045

O calor que flui através do protótipo surge da parede da caldeira e é transferido ao módulo termoeletrônico através do coletor de calor. Este calor (Q_{cond}) pode ser quantificado através das temperaturas registradas pelos sensores T1 e T2.

Conforme Fernandes (2012), o valor da condutividade térmica do alumínio (K) é de 237, e como os valores de espessura e área de contato utilizados neste projeto são conhecidos, pela Equação 23:

$$Q_{\text{Cond}} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Equação 23

Onde:

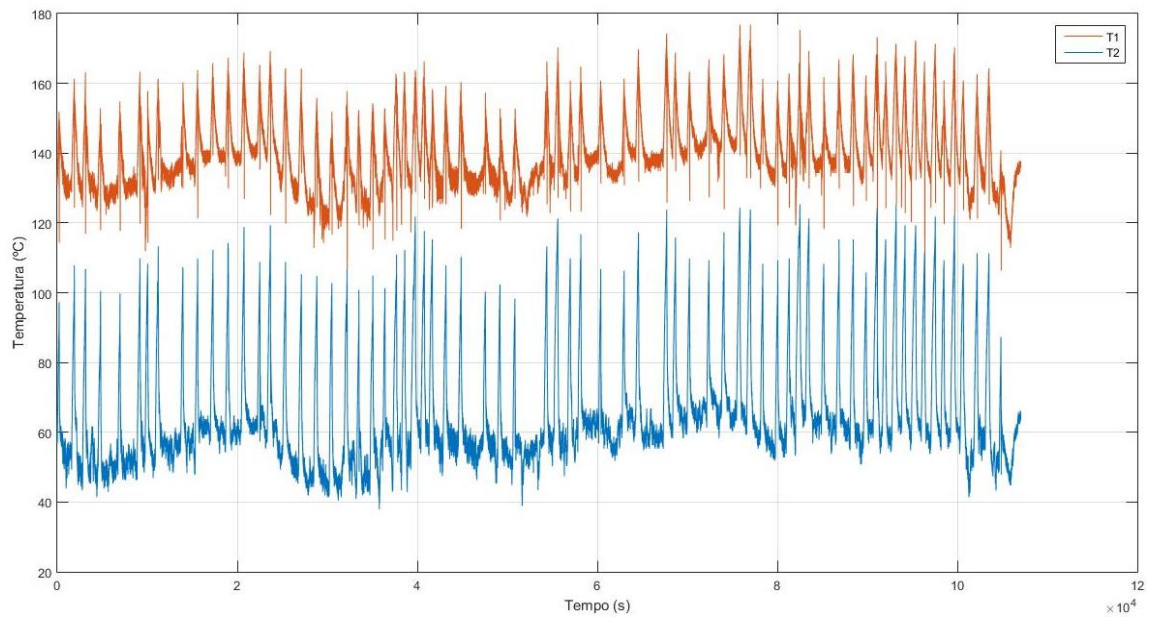
$$\begin{aligned} Q_{\text{Cond}} &= ? \text{ W}; \\ k &= 237 \text{ W/}^\circ\text{C m}; \\ A &= 0,0016 \text{ m}^2; \\ \Delta T &= T1 - T2 \text{ }^\circ\text{C}; \\ \Delta x &= 0,033 \text{ m}; \end{aligned}$$

$$Q_{\text{Cond}} = 237 \cdot 0,0016 \frac{T1 - T2}{0,033}$$

O valor médio do calor (Q_{cond}) fornecido pela caldeira através do coletor de calor pela área instrumentada de 0,0016m² é de 860,837 W.

O módulo termoeletrônico transforma parte deste calor (Q_{cond}) em energia elétrica e todo o calor que sobra flui para a outra face do módulo termoeletrônico e é registrado pelo sensor T2 (Figura 70).

Figura 70 – T1 e T2



Fonte: próprio autor

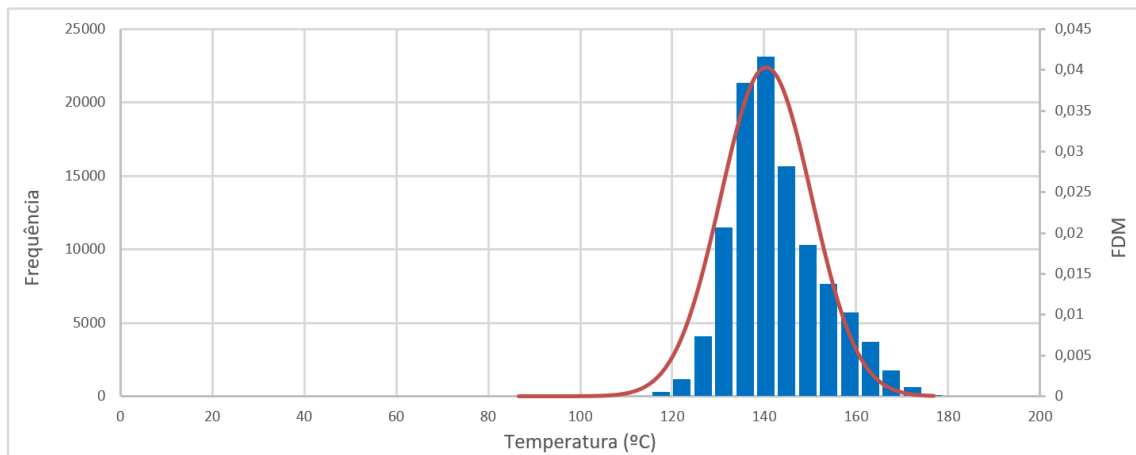
Os dados estatísticos referente a cada variável apresentada na Figura 70 são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados estatísticos T1 e T2

Estatística	T1	T2
Mínimo	85,70	37,90
Máximo	176,80	125,30
Média	140,40	65,48
Variância	97,87	251,69
Desvio padrão	9,893	15,86
Moda	138,30	58,30
Erro Padrão	0,030	0,048
Nº Amostras	107045	107045

Através dos dados de instrumentação e dados estatísticos de T1 foi criado um histograma para uma melhor visualização da frequência dos dados instrumentados pelo *datalogger*.

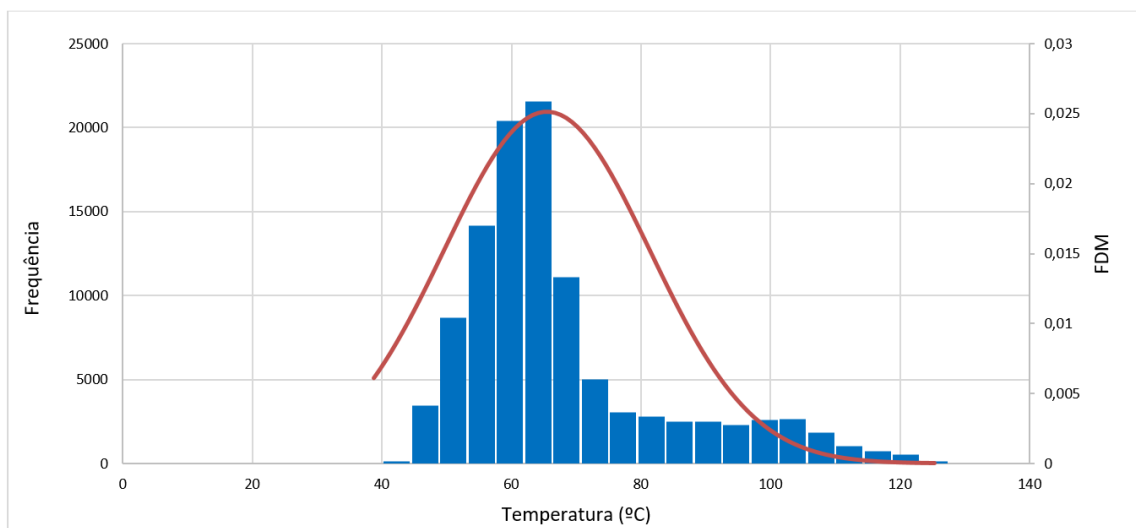
Figura 71 – Histograma T1



Fonte: próprio autor

Através dos dados de instrumentação e dados estatísticos de T2 foi criado um histograma para uma melhor visualização da frequência dos dados instrumentados pelo *datalogger*.

Figura 72 – Histograma T2

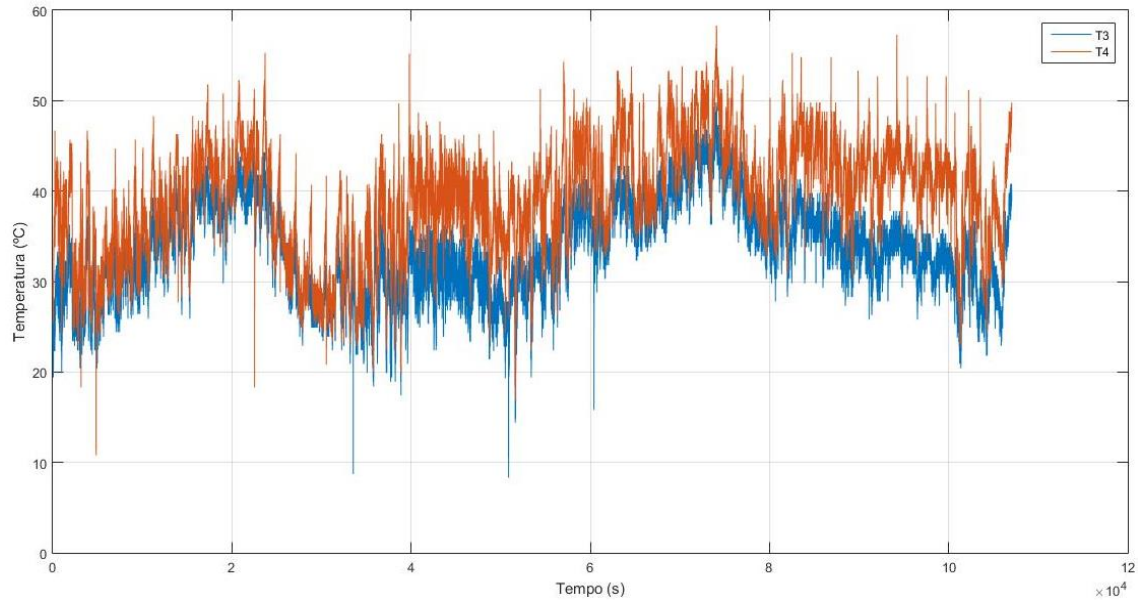


Fonte: próprio autor

O ar entra no protótipo à temperatura ambiente e é registrado pelo sensor T3. Por convecção forçada o ar adquire todo o calor não aproveitado pelo módulo termoeletrônico ao

passar pelas aletas do dissipador de calor, fixo na outra face dos módulos termoeletrônicos. Logo após, a temperatura do ar é registrada pelo sensor T4 (Figura 73).

Figura 73 – T3 e T4



Fonte: próprio autor

Os valores de temperaturas apresentados servem para se obter os valores dos indicadores de funcionamento do protótipo que serão apresentados na discussão dos resultados.

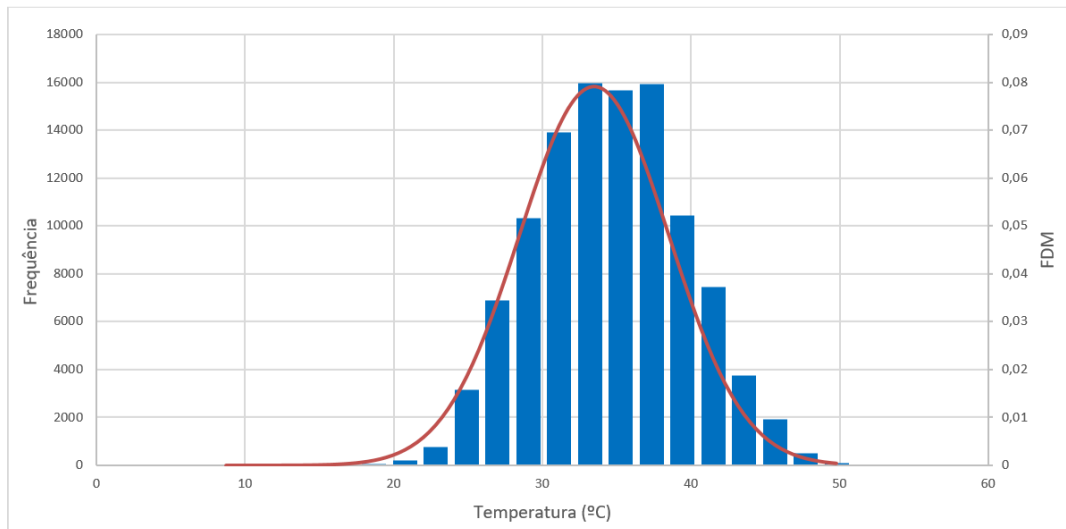
Os dados estatísticos referente a cada variável apresentada na Figura 73 são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados estatísticos T3 e T4

Estatística	T3	T4
Mínimo	8,30	10,80
Máximo	49,80	58,30
Média	33,48	39,29
Variância	25,35	35,77
Desvio padrão	5,036	5,981
Moda	33,30	42,30
Erro Padrão	0,015	0,018
Nº Amostras	107045	107045

Através dos dados de instrumentação e dados estatísticos de T3 foi criado um histograma para uma melhor visualização da frequência dos dados instrumentados pelo *datalogger*.

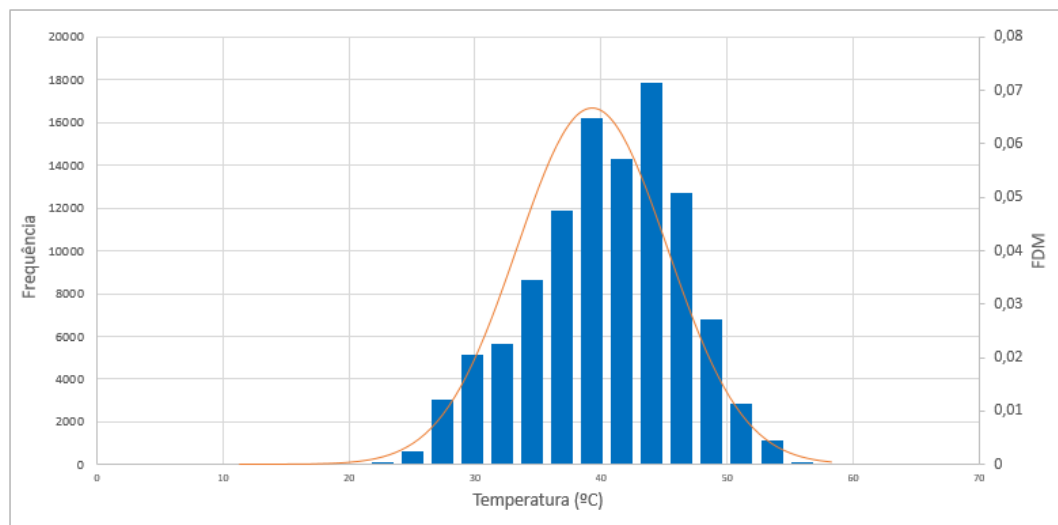
Figura 74 – Histograma T3



Fonte: próprio autor

Através dos dados de instrumentação e dados estatísticos de T4 foi criado um histograma para uma melhor visualização da frequência dos dados instrumentados pelo *datalogger*.

Figura 75 – Histograma T4

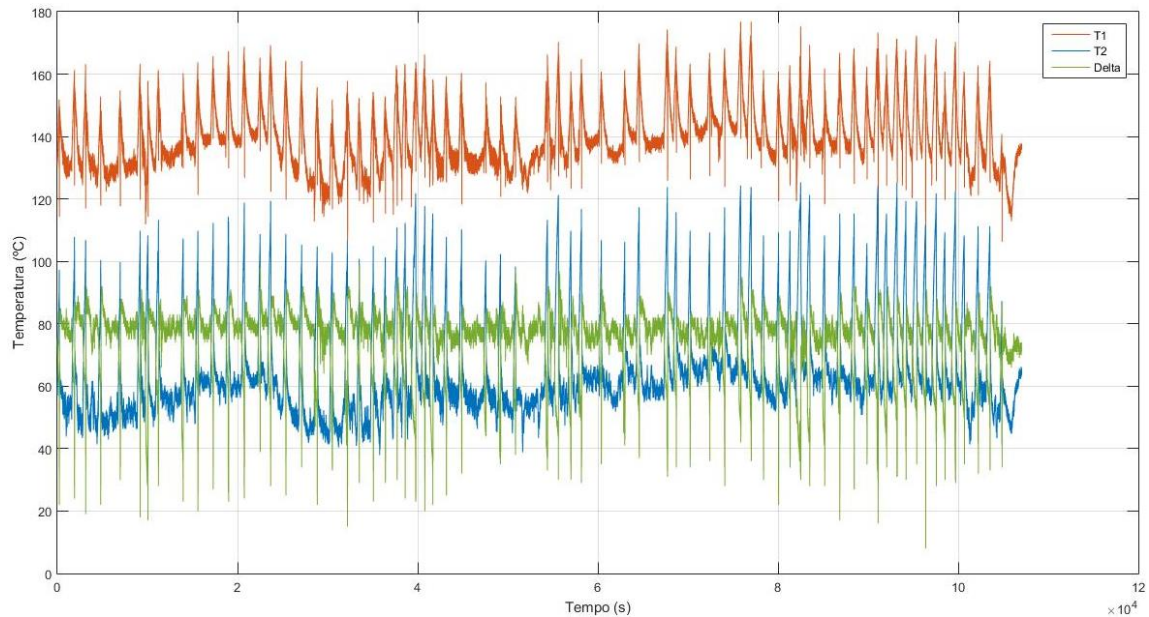


Fonte: próprio autor

5.2.2 Análise da potência gerada pelo delta de temperaturas

De todos os dados obtidos os indicadores mais importantes para validação do projeto são o delta e a potência gerada no módulo termoeletrico com carga. O delta é o valor da diferença entre as temperaturas T1 e T2 (Figura 76).

Figura 76 – T1, T2 e delta



Fonte: próprio autor

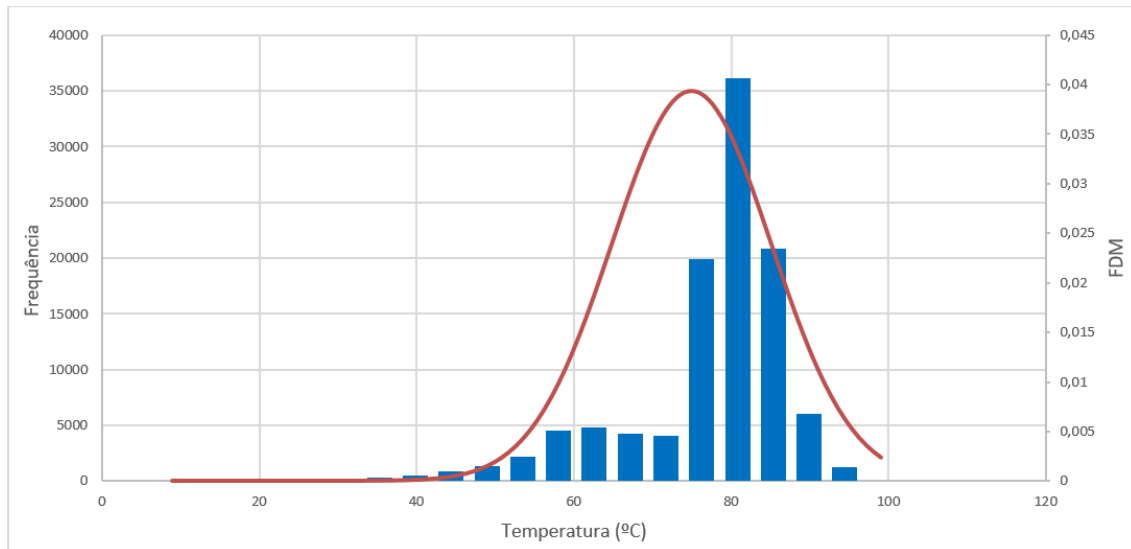
Os dados estatísticos referente a cada variável apresentada na Figura 76 são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Estatística T1, T2 e Delta

Estatística	T1	T2	Delta
Mínimo	85,70	37,90	8
Máximo	176,80	125,30	99
Média	140,40	65,48	74,915
Variância	97,87	251,69	103,013
Desvio padrão	9,893	15,865	10,15
Moda	138,30	58,30	79
Erro Padrão	0,030	0,048	0,031
Nº Amostras	107045	107045	107045

Como os histogramas referentes as temperaturas T1 e T2 já foram apresentadas nas Figura 71 e Figura 72, é apresentado na Figura 77 apenas o histograma referente ao delta.

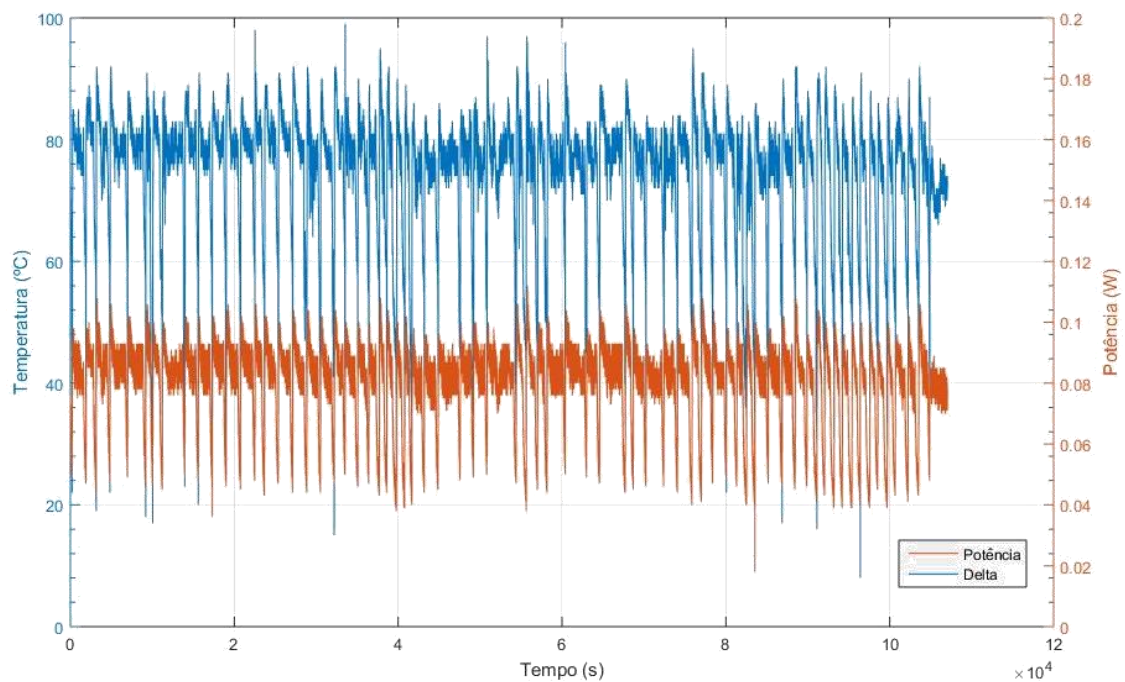
Figura 77 – Histograma Delta



Fonte: próprio autor

O valor do delta influencia diretamente na geração de energia através do Efeito Seebeck. Só é possível existir valores de potência gerada se existir um delta de temperaturas sobre as faces do módulo termoeletrônico. Observa-se que o valor da potência gerada no módulo termoeletrônico com carga é diretamente proporcional ao delta, variando em torno do valor médio de 0,079W (Figura 78).

Figura 78 – Delta e Potência Gerada



Fonte: próprio autor

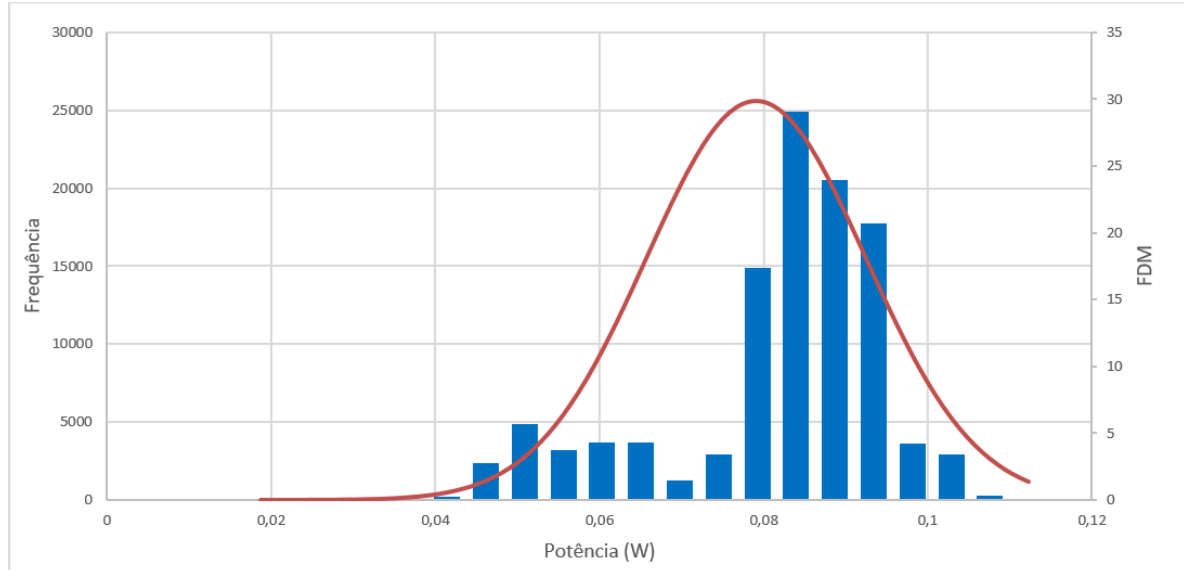
Os dados estatísticos referente a cada variável apresentada na Figura 78 são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Estatística delta e potência

Estatística	Delta	Potência
Mínimo	8	0,018
Máximo	99	0,112
Média	74,91	0,079
Variância	103,01	0,0002
Desvio padrão	10,14	0,013
Moda	79	0,085
Erro Padrão	0,031	0,000041
Nº Amostras	107045	107045

Como o histograma referentes a ao delta já foi apresentado na Figura 77, é apresentado na Figura 79 apenas o histograma referente a potência.

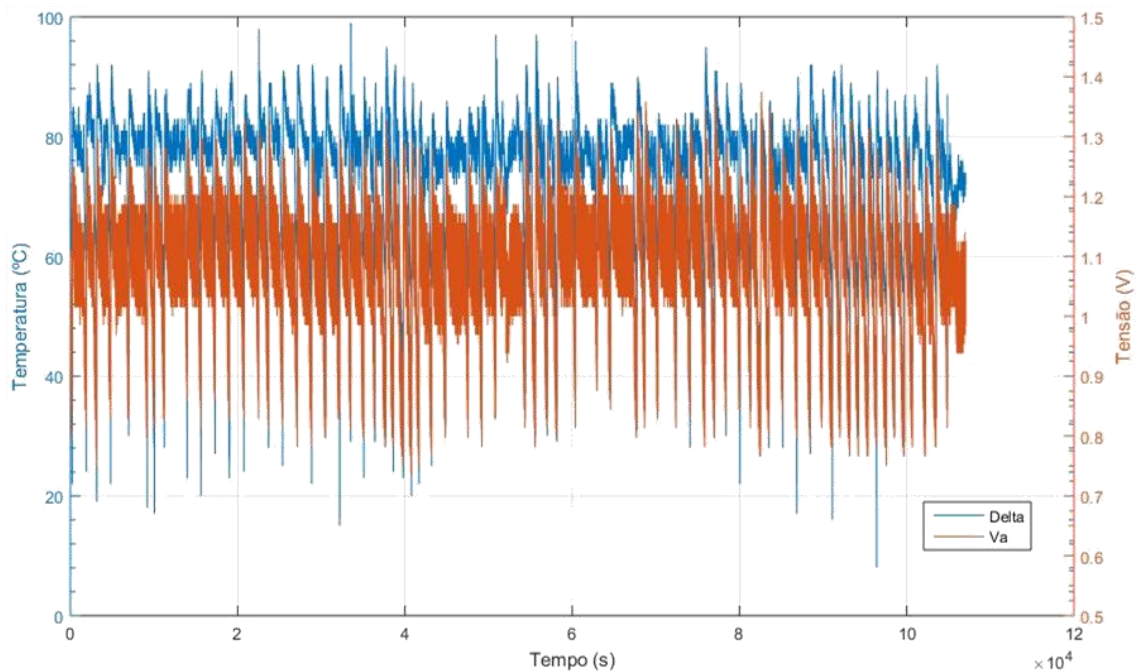
Figura 79 – Histograma potência



Fonte: próprio autor

É necessário analisar a tensão gerada a vazio (V_a), para obter o coeficiente Seebeck em relação ao delta de temperaturas T_1 e T_2 , como observa-se na Figura 80.

Figura 80 – Delta e tensão gerada a vazio



Fonte: próprio autor

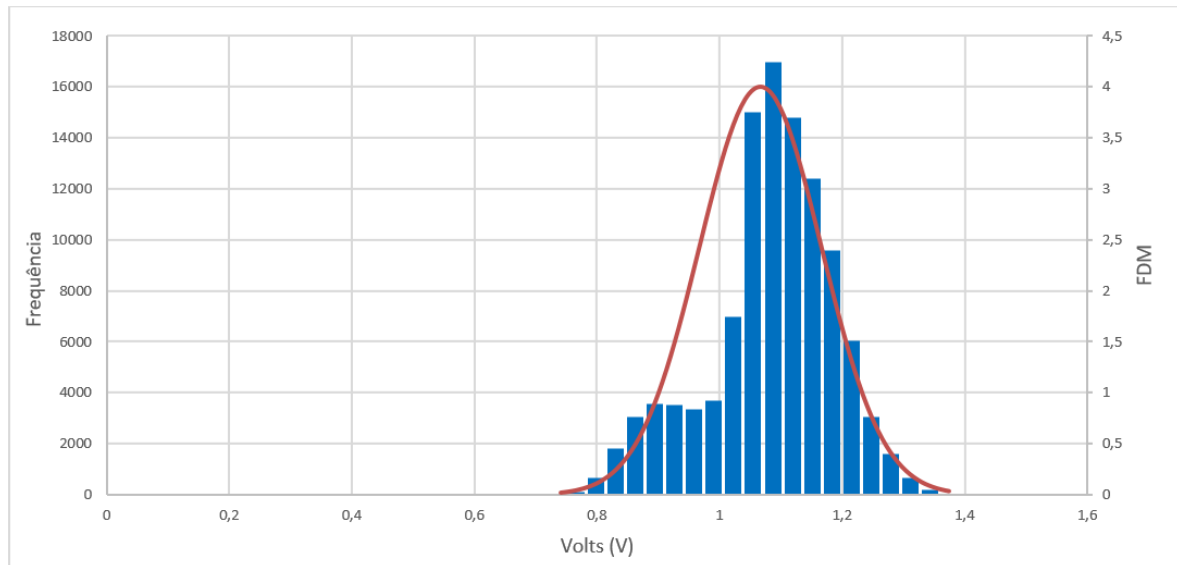
Os dados estatísticos referente a cada variável apresentada na Figura 80 são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Estatística Delta e Va

Estatística	Delta	Va
Mínimo	8	0,73
Máximo	99	1,38
Média	74,91	1,067
Variância	103,01	0,0099
Desvio padrão	10,15	0,0997
Moda	79	1,062
Erro Padrão	0,0310	0,00030
Nº Amostras	107045	107045

Como o histograma referentes ao delta já foi apresentado na Figura 77, é apresentado na Figura 81 apenas o histograma referente a tensão gerada a vazio (Va).

Figura 81 – Histograma Va



Fonte: próprio autor

5.2.3 Análise da tensão gerada a vazio

Para que se obter o coeficiente Seebeck e a resistência interna do módulo termoeletrônico utiliza-se a tensão gerada a vazio (V_a) e as temperaturas que compõem o delta entre as faces do módulo termoeletrônico e, através da Equação 24, tem-se:

$$\alpha = \frac{V}{\Delta T}$$

Equação 24

Onde:

α = ? [V/° C];

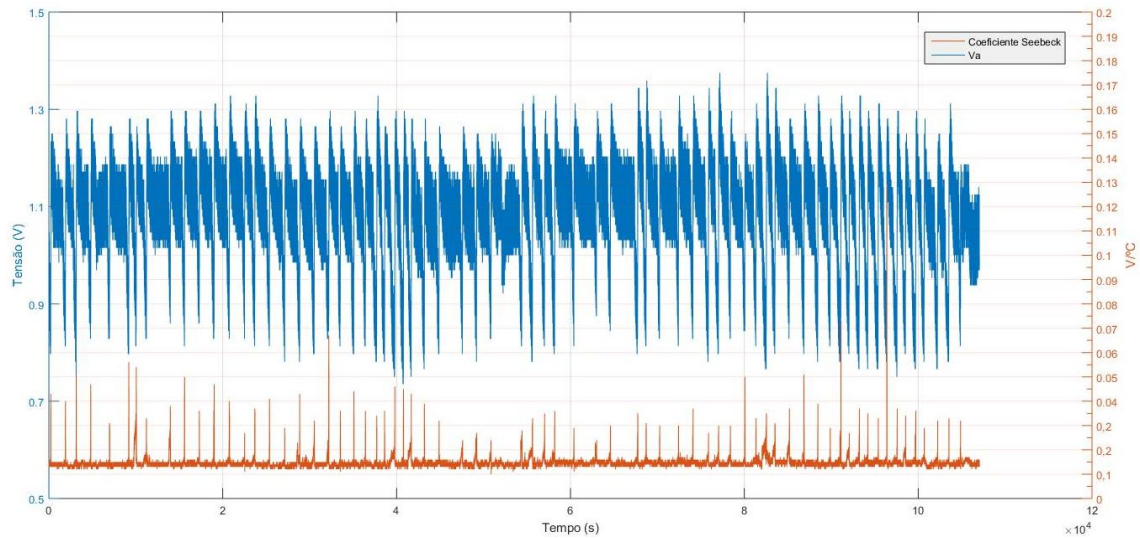
V = V_a [V];

ΔT = $T_1 - T_2$ [° C];

$$\alpha = \frac{V_a}{T_1 - T_2}$$

O valor médio calculado do coeficiente Seebeck (α) é de 0,014 V/° C como observa-se juntamente com o valor médio de V_a que é de 1,067 V, apresentado na Figura 82.

Figura 82 – Va e Coeficiente Seebeck



Fonte: próprio autor

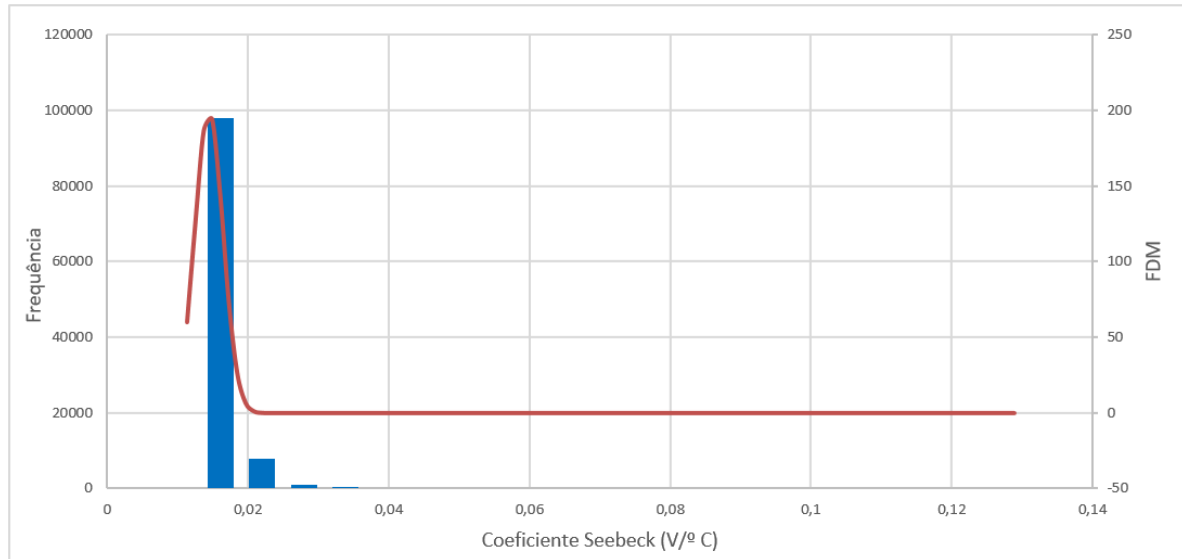
Os dados estatísticos referente a cada variável apresentada na Figura 82 são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Estatística Va e Coeficiente Seebeck

Estatística	Va	α
Mínimo	0,73	0,0102
Máximo	1,38	0,129
Média	1,067	0,014
Variância	0,0099	0,0000040
Desvio padrão	0,0997	0,0020
Moda	1,062	0,0136
Erro Padrão	0,00030	0,0000061
Nº Amostras	107045	107045

Como o histograma referentes a tensão gerada a vazio (Va) já foi apresentado na Figura 81, é apresentado na Figura 83 apenas o histograma referente ao Coeficiente Seebeck.

Figura 83 – Histograma Coeficiente Seebeck



Fonte: próprio autor

5.2.4 Análise da potência gerada sobre a carga

O *datalogger* efetuou o registro de tensão (V_L) e da corrente elétrica (I_L) sobre a carga, possibilitando a obtenção do valor médio da potência produzida (P_{pro}). Como o módulo termoeletrico é um gerador de energia contínua e a carga utilizada tem o valor fixo de 7 ohms, obtém-se a potência produzida através da Equação 25:

$$P_{pro} = V \cdot I$$

Equação 25

Onde:

 P_{pro} = Potência gerada [W]; V = Tensão na carga [V]; I = Corrente na carga [A];

Agora, de posse do valor médio do coeficiente Seebeck (α) e da potência produzida (P_{pro}) é possível calcular o valor médio da resistência interna do módulo termoeletrico (R_{in}), através da Equação 20 e da Equação 25, obtém-se a Equação 26:

$$P_{pro} = V_L \cdot I_L = \alpha I_L (T_H - T_C) - R_{in} I_L^2$$

Equação 26

Onde:

P_{pro} = Potência gerada [W];

α = 0,014 V/° C;

T_H = T1 ° C;

T_c = T2 ° C;

I_L = Corrente elétrica na carga [A];

V_L = Tensão elétrica na carga [V];

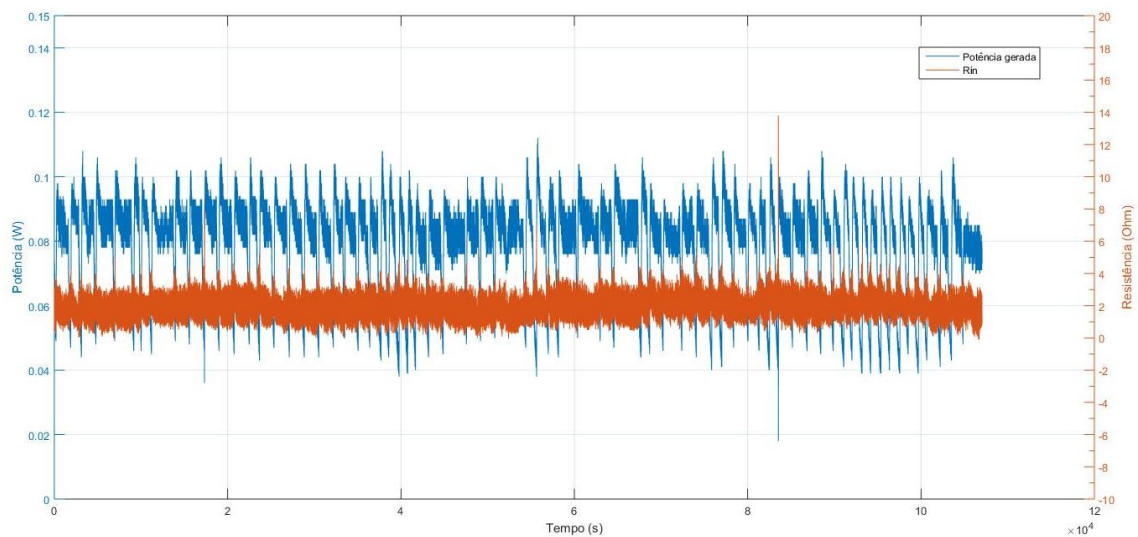
R_{in} = Resistência interna do módulo termoeletrico [Ω]

Isolando R_{in} , obtém-se:

$$R_{in} = \left(\frac{-(V_L \cdot I_L) + \alpha \cdot I_L (T_1 - T_2)}{I_L^2} \right)$$

O valor médio da resistência interna (R_{in}) é de 1,860 ohms (Figura 84).

Figura 84 – R_{in} e Potência gerada



Fonte: próprio autor

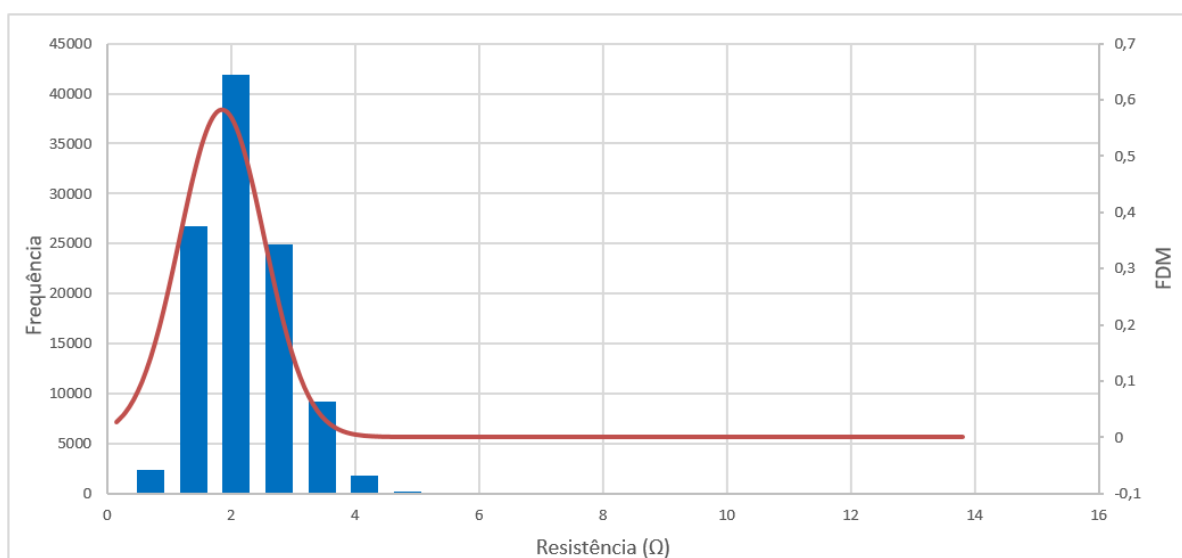
Os dados estatísticos referente a cada variável apresentada na Figura 84 são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Estatística Potência e Resistência Interna

Estatística	Potência	Rin
Mínimo	0,018	0,019
Máximo	0,112	13,80
Média	0,079	1,859
Variância	0,0002	0,467
Desvio padrão	0,0134	0,683
Moda	0,085	1,287
Erro Padrão	0,000041	0,00209
Nº Amostras	107045	107045

Como o histograma referentes a potência já foi apresentado na Figura 79, é apresentado na Figura 85 apenas o histograma referente a resistência interna (Rin).

Figura 85 – Histograma Resistência Interna (Rin)



Fonte: próprio autor

5.2.5 Análise da quantidade de calor fornecido ao módulo termoeletrônico

Calculou-se a quantidade de calor Q_H que foi fornecida para o módulo termoeletrônico, utilizando-se a constante de condutividade térmica do módulo termoeletrônico de $2,02 \text{ W/}^\circ\text{C m}$, segundo Carvalho (2012), e com a Equação 27:

$$Q_H = \alpha T_H I_L - \frac{1}{2} R_{in} I_L^2 + K(T_H - T_C)$$

Equação 27

Onde:

Q_H = calor recebido pelo módulo termoeletrico [W];

α = 0,014 [V/° C];

T_H = T1 [° C];

T_c = T2 [° C];

I_L = Corrente elétrica na carga [A];

R_{in} = 1,860 [Ω]

K = 2,02 [W/° Cm]

Reescrevendo a Equação 27 e substituindo os valores:

$$Q_H = 0,014 \cdot T_1 \cdot I_L - \frac{1}{2} \cdot 1,860 \cdot I_L^2 + 2,02 \cdot (T_1 - T_2)$$

O calor médio fornecido ao módulo termoeletrico (Q_H) é de 151,834 W.

5.2.6 Análise da quantidade de calor dissipado pelo módulo termoeletrico

E de igual modo, para se obter o calor removido do módulo termoeletrico, Q_C , utiliza-se a Equação 28.

$$Q_C = \alpha T_C I_L + \frac{1}{2} R_{in} I_L^2 + K(T_H - T_C)$$

Equação 28

Onde:

Q_C = calor dissipado pelo módulo termoeletrico [W];

α = 0,014 [V/° C];

T_H = T1 [° C];

T_c = T2 [° C];

I_L = Corrente elétrica na carga [A];

R_{in} = 1,860 [Ω]

K = 2,02 [W/° Cm]

Reescrevendo a equação e substituindo os valores:

$$Q_C = 0,014 \cdot T_2 \cdot I_L - \frac{1}{2} \cdot 1,860 \cdot I_L^2 + 2,02 \cdot (T_1 - T_2)$$

O calor médio dissipado pelo módulo termoeletrico (Q_C) é de 151,755 W.

5.2.7 Análise do rendimento térmico

Para que seja possível calcular o rendimento térmico é necessário conhecer a quantidade de calor que foi fornecida ao módulo termoeletrico (Q_H), como também a quantidade de calor dissipada (Q_C). Visto que estes valores já foram obtidos, pode-se utilizar a

Equação 29:

$$\eta_{T\acute{e}rmico} = W_{Liq}/Q_H$$

Equação 29

Ou também através da

Equação 30

$$\eta_{T\acute{e}rmico} = 1 - Q_C/Q_H$$

Equação 30

Onde:

W_{Liq} = Trabalho líquido realizado pela máquina térmica [J];

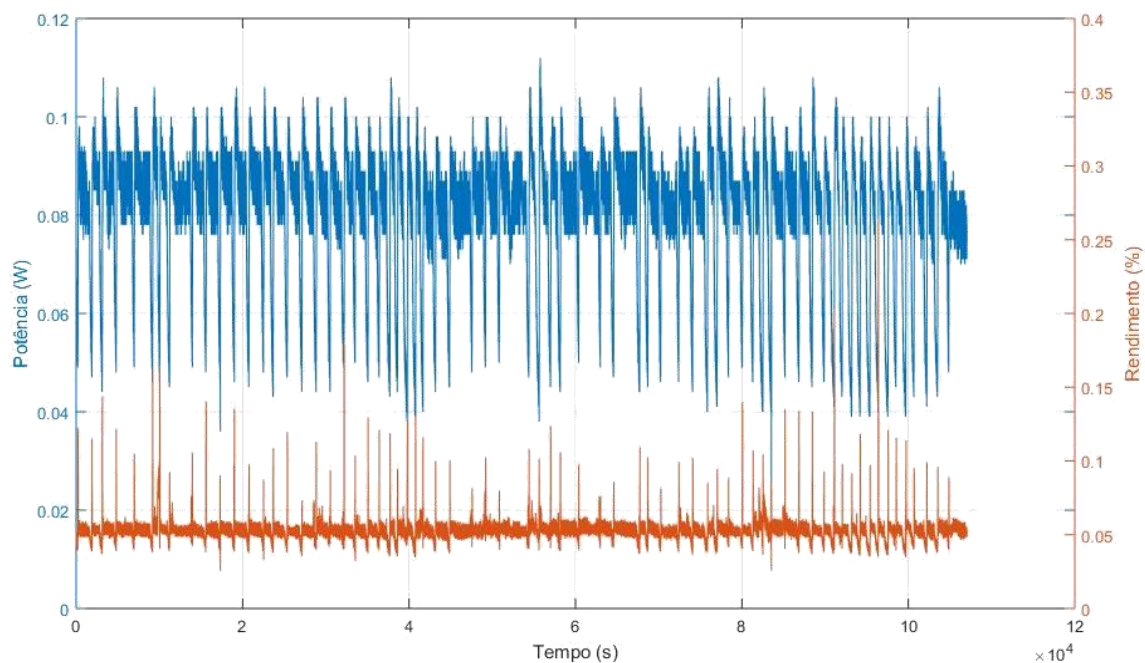
Q_H = Taxa de calor recebido pelo módulo termoeletrico, ou, calor transferido da fonte à alta temperatura [W];

Q_C = Calor transferido para a fonte à baixa temperatura, ou ambiente externo [W];

η = Rendimento teórico [adimensional]

Como resultado, foi gerada a potência média de 0,079W com o rendimento térmico médio de 0,052%, como pode ser observado na Figura 86.

Figura 86 – Potência gerada e rendimento



Fonte: próprio autor

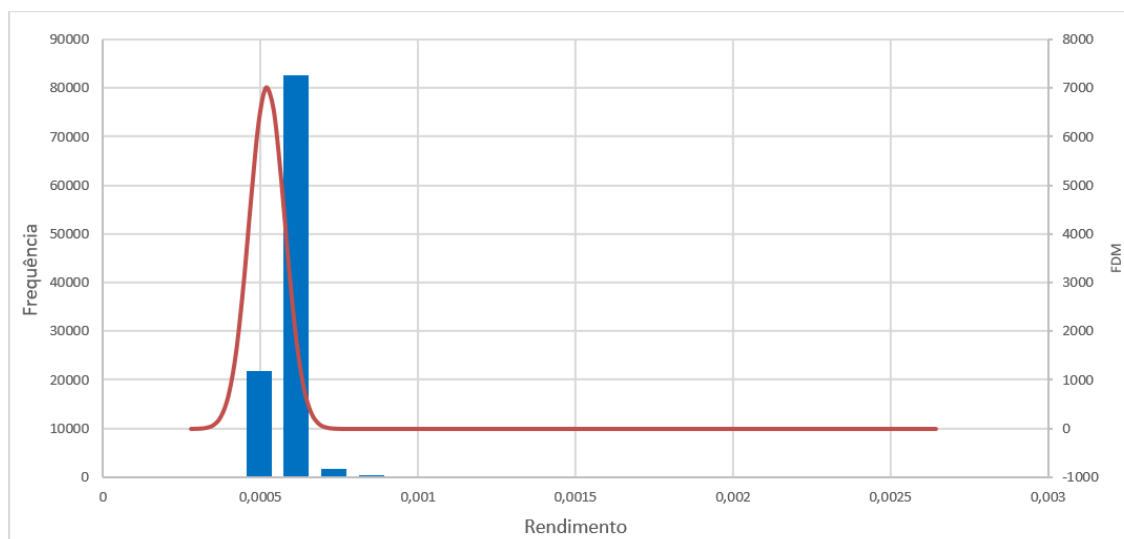
Os dados estatísticos referente a cada variável apresentada na Figura 86 são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Estatística Potência e Rendimento

Estatística	Potência	Rendimento
Mínimo	0,018	0,00026
Máximo	0,112	0,00264
Média	0,079	0,00052
Variância	0,0002	0,000000003
Desvio padrão	0,0134	0,000057
Moda	0,085	0,00053
Erro Padrão	0,000041	0,00000017
Nº Amostras	107045	107045

Como o histograma referentes a potência já foi apresentado na Figura 79, é apresentado na Figura 87 apenas o histograma referente ao rendimento.

Figura 87 – Histograma Rendimento



Fonte: próprio autor

6 Discussão

São apresentadas as discussões relacionadas aos resultados obtidos na realização deste projeto.

6.1 Análise dos resultados

Serão apresentadas discussões utilizando os valores médios apresentados no capítulo de resultados juntamente com uma breve revisão dos resultados e conceitos.

Durante vários dias foi efetuada instrumentação sobre o protótipo de cogeração junto a caldeira que apresentou um comportamento padrão, este foi salvo em vários arquivos no *datalogger*. Um arquivo com o período total de 30 horas foi utilizado para extrair os dados de funcionamento do projeto proposto junto a caldeira. O arquivo utilizado contém os dados de 4 diferente sensores de temperaturas, potência gerada em um módulo termoeletrico com carga de 7 Ohms, tensão gerada por outro módulo termoeletrico a vazio e temperatura ambiente.

A partir do módulo termoeletrico com carga, que ocupa uma área de $0,0016 \text{ m}^2$ de toda a área externa da caldeira, foi possível obter uma eficiência média na ordem de 0,052%.

Sabe-se que quanto maior for a diferença de temperatura entre as faces do módulo termoeletrico, maior será a potência gerada e maior a sua eficiência. Dessa maneira foram instalados dois sensores de temperatura T1 e T2, através deles foi possível obter o valor da diferença ou delta das temperatura entre as faces do módulo termoeletrico.

Observa-se que através das temperaturas obtidas por instrumentação em T1 e T2 o protótipo atingiu o gradiente necessário para o Efeito Seebeck e manteve um delta médio de temperaturas na ordem de $74,91^\circ \text{ C}$, a partir deste delta o protótipo gerou a potência elétrica média de 0,079 W.

O protótipo demonstrou que apesar de possuir baixa eficiência, é possível cogerar energia em uma caldeira através do calor irradiado por suas paredes. A partir desses dados pode-se estabelecer que é factível criar um protótipo maior, que tenha suporte a cobrir toda a área externa da caldeira com módulos termoeletricos para efetuar cogeração de energia. Porém ainda é necessário avaliar se é economicamente viável a construção de um protótipo e esta discussão é apresentada no tópico seguinte.

6.2 Análise da viabilidade econômica

O potencial de cogeração de energia na caldeira está diretamente ligado à quantidade de área utilizável para a alocação de módulos termoelétricos, estas áreas são as que não possuem conexões de tubulação, portas de inspeção e similares. A caldeira possui área externa utilizável total de 52 m², o sistema de exaustão da caldeira possui área total de 7,48 m². A soma das duas áreas é de 59,48 m², que podem abrigar um total de 37.173 módulos termoelétricos, como é descrito na Tabela 12.

Tabela 12 – Área utilizável da caldeira e sistema de exaustão

Área total utilizável da Caldeira	52,00	m ²
Área total utilizável do sistema de exaustão	7,48	m ²
Área total utilizável (caldeira + sistema de exaustão)	59,48	m ²
Área ocupada por um módulo termoelétrico	0,0016	m ²
Quantidade total de módulos termoelétricos	37173	módulos

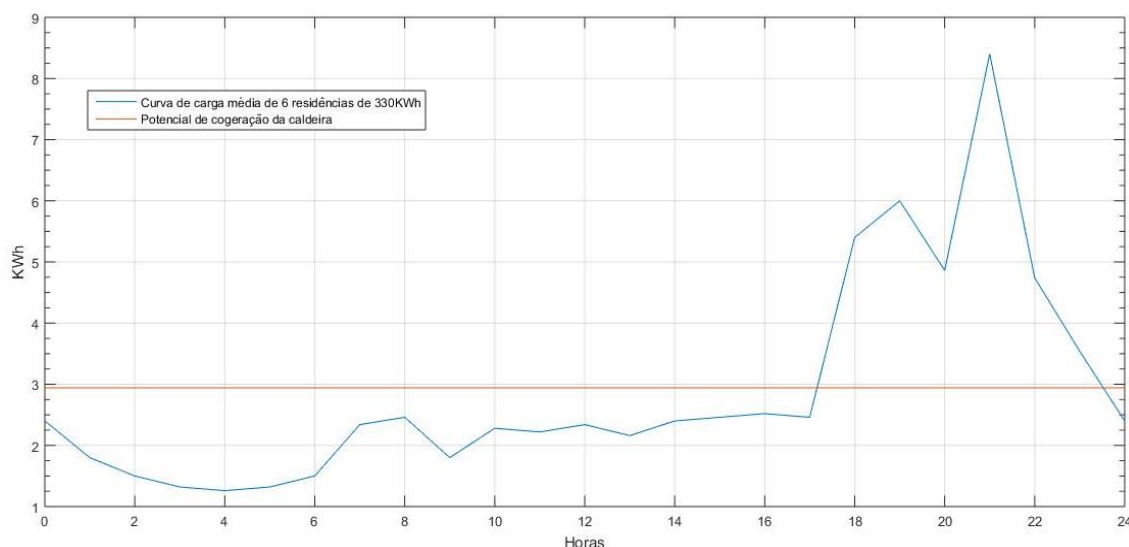
Ao multiplicar a quantidade total de módulos termoelétricos por sua capacidade de geração termoelétrica individual, é possível obter como resultado um potencial de cogeração para a caldeira na ordem de 2,9 kW/h e de 2,1 MWh/mês, como é descrito na Tabela 13.

Tabela 13 – Potencial de cogeração termoelétrica

Potência média de um módulo termoelétrico	0,079	W
Potencial de cogeração de 37.173 módulos termoelétricos	2.936,68	W
Potencial de cogeração da caldeira por hora	2,937	kWh
Potencial de cogeração da caldeira em 30 dias	2.114	MWh/mês

Para obter-se uma melhor percepção do potencial de cogeração, pode-se efetuar uma simples comparação, onde seria possível prover energia para aproximadamente 6 residências, inferindo um consumo médio de 330 kWh/mês para cada casa (FRANCISQUINI 2006).

Figura 88 – Potencial de cogeração da caldeira e curva de carga de 6 residências de 330KWh



Fonte: próprio autor

Devido ao pico de demanda entre às 17h00min e 23h00min, este cenário seria possível somente se o sistema de cogeração de energia da caldeira contasse com um banco de baterias. Este, armazenaria toda a energia não consumida das 00h00min às 17h00min e a forneceria de volta nos horários de pico.

6.3 Análise de viabilidade econômica

Através dos dados obtidos percebe-se que a caldeira possui potencial para atuar como fonte de energia limpa através de cogeração termoelétrica. Deve-se ainda analisar, porém, se é economicamente viável implementar o sistema de cogeração proposto em uma caldeira.

6.3.1 Valores utilizados nos cálculos de viabilidade

Para todos os cálculos de viabilidade econômica, foi definido o valor de 5% para a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), com base no valor anual da poupança que é atualmente 4,458 % ao ano (BANCO CENTRAL DO BRASIL 2018).

O custo da energia define o a economia que será gerada a partir do primeiro ano, neste trabalho, o custo do kWh foi definido como R\$ 0,492, consumidor BT, sem considerar os impostos (GRUPO ENERGISA S.A. 2018).

Como o projeto proposto demonstra ter o potencial de cogeração de 2.114,41 kWh/mês, a cada ano, considerando 30 dias o mês, o gerador produzirá 25.372,88 kWh/ano, correspondendo a uma economia de energia no primeiro ano de R\$ 12.483,46.

O reajuste anual do valor da energia é outro item muito importante a se considerar para os cálculos de viabilidade econômica, neste trabalho, será utilizado o valor de 4,8 % ao ano (Rabuske, 2016).

Para estimar o tempo de vida útil de um módulo termoelétrico será utilizada como referência o tempo de vida das espaçonaves *Voyager 1* e *2*, que estão operando a 41 anos com esta tecnologia desde seu lançamento em 1977 (NASA 2018).

Para estabelecer o valor do investimento para a construção de um protótipo em uma caldeira similar à utilizada neste projeto, foi orçado o valor de 37.173 módulos termoelétricos e 5.719 dissipadores de calor. O valor para cada módulo termoelétrico é de R\$ 6,09 e o valor de cada dissipador é de R\$ 18,77, foi ainda atribuído um valor de R\$ 10.000,00, idealizado como o custo para a fabricação do protótipo. Desta maneira foi obtido o valor total de R\$ 343.728,83 referente ao investimento para a criação do protótipo.

6.3.2 Payback descontado

O cálculo do *payback* descontado utiliza a TMA de 5% e é obtido através da soma dos valores recebidos ao saldo do investimento, quando o valor do saldo torna-se positivo, obtém-se o ano em que o investimento termina de se pagar. Observa-se que o investimento é pago em 30 anos (Tabela 14).

Os cálculos para determinar a VPL e a TIR, utilizam também a Tabela 14 como fonte de dados para obtenção de seus resultados.

Tabela 14 – Payback descontado

Anos	Fluxo de Caixa	Valor Presente	Saldo
0	-R\$ 343.728,83	-R\$ 343.728,83	-R\$ 343.728,83
1	R\$ 12.483,46	R\$ 11.889,01	-R\$ 331.839,82
2	R\$ 13.082,67	R\$ 11.866,36	-R\$ 319.973,45
3	R\$ 13.710,63	R\$ 11.843,76	-R\$ 308.129,69
4	R\$ 14.368,74	R\$ 11.821,20	-R\$ 296.308,49
5	R\$ 15.058,44	R\$ 11.798,68	-R\$ 284.509,81
6	R\$ 15.781,25	R\$ 11.776,21	-R\$ 272.733,60
7	R\$ 16.538,75	R\$ 11.753,78	-R\$ 260.979,82
8	R\$ 17.332,61	R\$ 11.731,39	-R\$ 249.248,43
9	R\$ 18.164,57	R\$ 11.709,05	-R\$ 237.539,38
10	R\$ 19.036,47	R\$ 11.686,74	-R\$ 225.852,64
11	R\$ 19.950,22	R\$ 11.664,48	-R\$ 214.188,16
12	R\$ 20.907,83	R\$ 11.642,26	-R\$ 202.545,89
13	R\$ 21.911,41	R\$ 11.620,09	-R\$ 190.925,80
14	R\$ 22.963,16	R\$ 11.597,96	-R\$ 179.327,85
15	R\$ 24.065,39	R\$ 11.575,86	-R\$ 167.751,98
16	R\$ 25.220,53	R\$ 11.553,81	-R\$ 156.198,17
17	R\$ 26.431,11	R\$ 11.531,81	-R\$ 144.666,36
18	R\$ 27.699,81	R\$ 11.509,84	-R\$ 133.156,52
19	R\$ 29.029,40	R\$ 11.487,92	-R\$ 121.668,60
20	R\$ 30.422,81	R\$ 11.466,04	-R\$ 110.202,56
21	R\$ 31.883,10	R\$ 11.444,20	-R\$ 98.758,37
22	R\$ 33.413,49	R\$ 11.422,40	-R\$ 87.335,97
23	R\$ 35.017,34	R\$ 11.400,64	-R\$ 75.935,33
24	R\$ 36.698,17	R\$ 11.378,93	-R\$ 64.556,40
25	R\$ 38.459,69	R\$ 11.357,25	-R\$ 53.199,15
26	R\$ 40.305,75	R\$ 11.335,62	-R\$ 41.863,53
27	R\$ 42.240,43	R\$ 11.314,03	-R\$ 30.549,51
28	R\$ 44.267,97	R\$ 11.292,48	-R\$ 19.257,03
29	R\$ 46.392,83	R\$ 11.270,97	-R\$ 7.986,06
30	R\$ 48.619,68	R\$ 11.249,50	R\$ 3.263,44
31	R\$ 50.953,43	R\$ 11.228,07	R\$ 14.491,51
32	R\$ 53.399,19	R\$ 11.206,68	R\$ 25.698,19
33	R\$ 55.962,36	R\$ 11.185,34	R\$ 36.883,53
34	R\$ 58.648,55	R\$ 11.164,03	R\$ 48.047,56
35	R\$ 61.463,68	R\$ 11.142,77	R\$ 59.190,33
36	R\$ 64.413,94	R\$ 11.121,54	R\$ 70.311,87
37	R\$ 67.505,80	R\$ 11.100,36	R\$ 81.412,23
38	R\$ 70.746,08	R\$ 11.079,22	R\$ 92.491,45
39	R\$ 74.141,89	R\$ 11.058,11	R\$ 103.549,56
40	R\$ 77.700,71	R\$ 11.037,05	R\$ 114.586,61
41	R\$ 81.430,34	R\$ 11.016,03	R\$ 125.602,64

6.3.3 Valor Presente Líquido (VPL)

O tempo de vida útil conhecido para os módulos termoeletrônicos é de pelo menos 41 anos, e através da análise da coluna fluxo de caixa da Tabela 14 é possível encontrar o VPL positivo no valor de R\$125.602,64. O tempo em que o investimento demora para gerar retorno torna-o economicamente inviável. Porém se este tempo for aceitável, o projeto torna-se economicamente viável quando idealizado que o equipamento irá funcionar 24 horas por dia todos os dias em plena carga durante 41 anos.

6.3.4 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A TIR é um importante indicador econômico para tomada de decisão. O valor obtido da TIR para um total de 41 anos é de 7%, que é maior que o valor estipulado para a TMA de 5%, determinando que é viável investir no projeto proposto.

6.3.5 Análise de investimentos

Uma poupança ou fundo de investimento possui a vantagem da liquidez, o dinheiro pode ser sacado e atribuído a outro fundo com maior rentabilidade em um período menor que 41 anos. Quando comparado o projeto proposto, isso não é possível, e o investimento é totalmente pago em 30 anos e só a partir deste tempo começa a dar retorno.

Dessa maneira pode-se dizer que devido ao tempo em que o projeto proposto demora para retornar o investimento e gerar lucratividade é economicamente inviável.

No futuro, é possível que a tecnologia dos módulos termoeletrônicos possuam melhor eficiência e um custo menor, isto poderia tornar o projeto proposto economicamente viável, diminuindo o tempo de retorno do dinheiro. Assim como outras tecnologias, a geração de energia por efeito fotovoltaico possui em seu histórico de evolução o aumento de sua eficiência e a diminuição de seu custo ao longo dos anos (VALLÊRA e BRITO 2006).

6.4 Semelhanças com um sistema de geração fotovoltaico

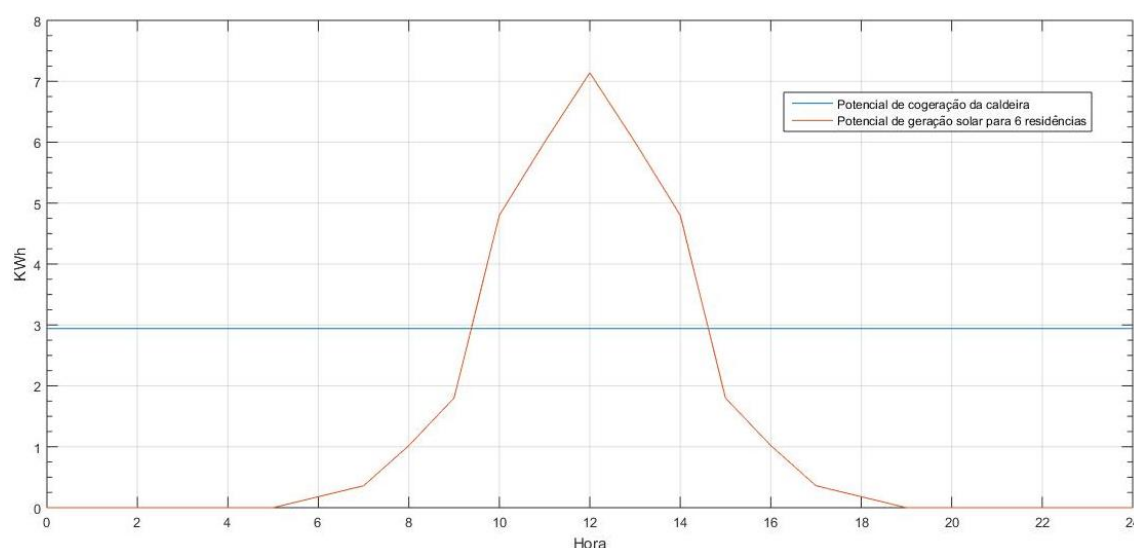
Assim como as células fotovoltaicas, os módulos termoeletrônicos são geradores de corrente contínua, logo o sistema de geração de energia por Efeito Seebeck possui funcionamento semelhante ao das placas fotovoltaicas. Através da lei Kirchhoff, sabe-se que este tipo de gerador pode ser arranjado em série ou em paralelo para que possa fornecer a tensão e corrente desejada (GERTHSEN 1998).

A semelhança na geração de energia entre as tecnologias termoelétrica e fotovoltaica permite o compartilhamento de tecnologias, validadas e em uso, pelo sistema de geração fotovoltaico, como o banco de baterias, conversores de corrente contínua para corrente alternada e outros.

6.4.1 Diferenças com sistema de geração solar

Os módulos termoelétricos não absorvem fótons e sim calor, logo o sistema de cogeração termoelétrica proposto tem a capacidade de fornecer energia enquanto a caldeira estiver irradiando calor de suas paredes externas, seja dia ou noite. O que diferencia do sistema de geração solar que somente gera energia nos horários em que há incidência de luz do sol, como pode ser observado na Figura 89.

Figura 89 – Potencial de cogeração da caldeira e potencial de geração solar para 6 residências



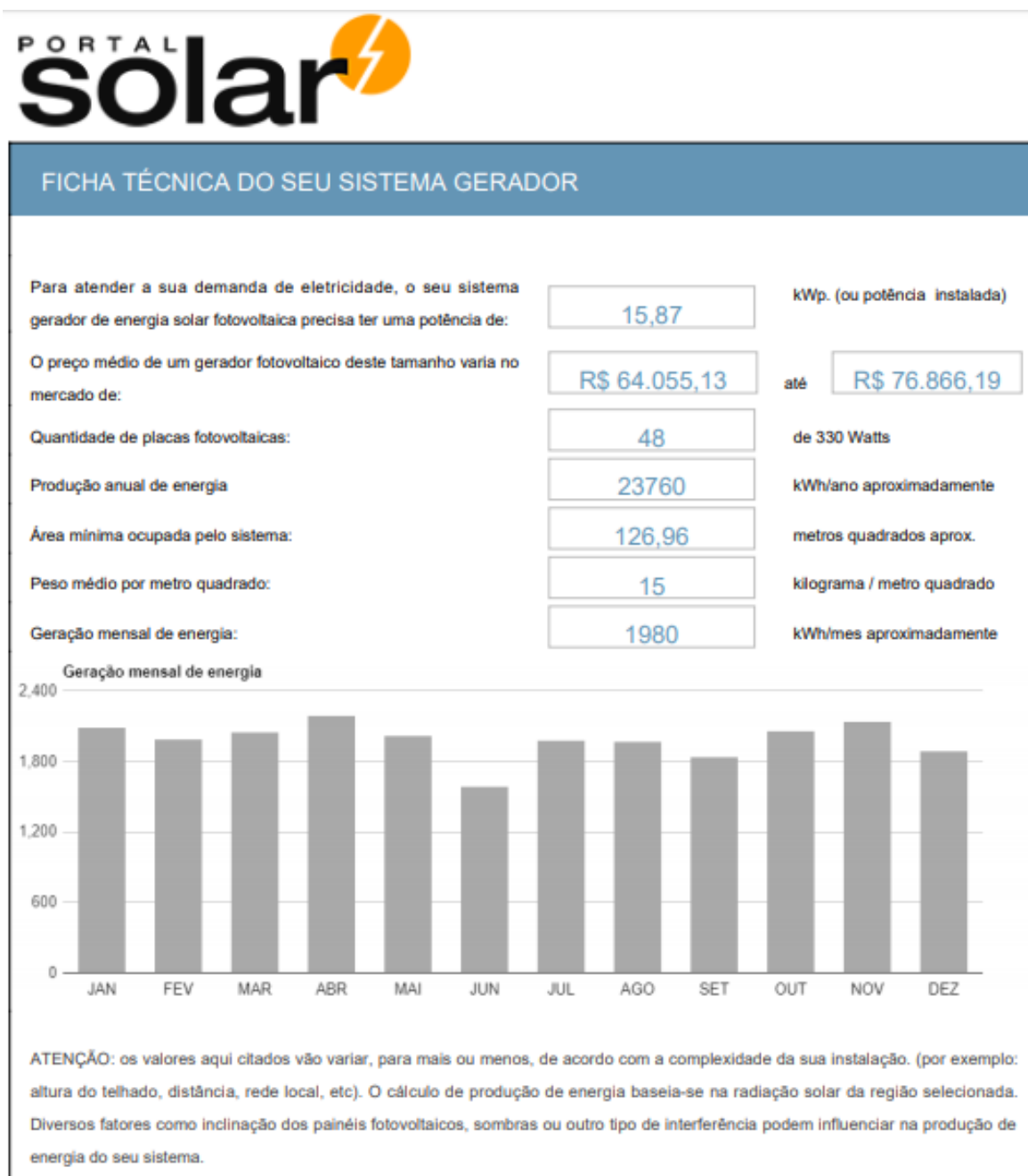
Fonte: próprio autor

6.5 Comparação do sistema proposto com um kit de geração solar

Será apresentado um comparativo de um gerador solar para suprir a demanda de 6 residências, cada uma com o consumo médio de 330 kWh/mês, totalizando 1980 kWh/mês, com o sistema de cogeração de energia termoelétrica proposto.

Através de uma ferramenta denominada calculadora solar, disponível em um sítio da internet, foi possível identificar a ficha técnica do gerador solar capaz de prover esta demanda conforme é demonstrado na Figura 90 (PORTAL SOLAR LTDA. – ME 2018).

Figura 90 – Ficha técnica do gerador solar consultado na internet



Fonte: próprio autor

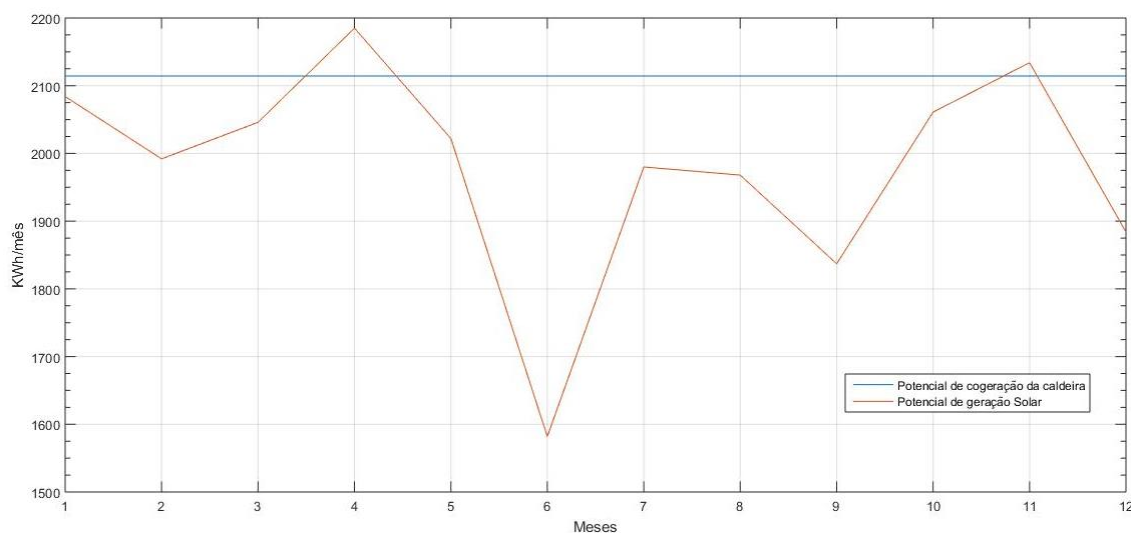
O gerador solar deve ser composto por 48 placas fotovoltaicas, ter a potência de 15,87 kWp, para que possa atender a demanda de aproximadamente 1980 KWh/mês, o necessário para suprir 330 KWh/mês para cada uma das 6 residências. A comparação com o potencial de geração termoelétrica do sistema proposto é apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 – Potencial de geração solar e potencial de cogeração na caldeira

Meses	Kit solar de 15,87 kWp (KWh/mês)	Potencial de Cogeração na Caldeira (KWh/mês)
Janeiro	2.084,00	2.114,41
Fevereiro	1.992,00	2.114,41
Março	2.046,00	2.114,41
Abril	2.185,00	2.114,41
Maio	2.022,00	2.114,41
Junho	1.582,00	2.114,41
Julho	1.980,00	2.114,41
Agosto	1.968,00	2.114,41
Setembro	1.837,00	2.114,41
Outubro	2.061,00	2.114,41
Novembro	2.134,00	2.114,41
Dezembro	1.884,00	2.114,41
Produção anual de energia (KWh/ano)	23.775,00	25.372,88

Os dados apresentados na Tabela 15 podem ser visualizados na Figura 91.

Figura 91 – Potencial de cogeração da caldeira e potencial de geração solar para 6 residências

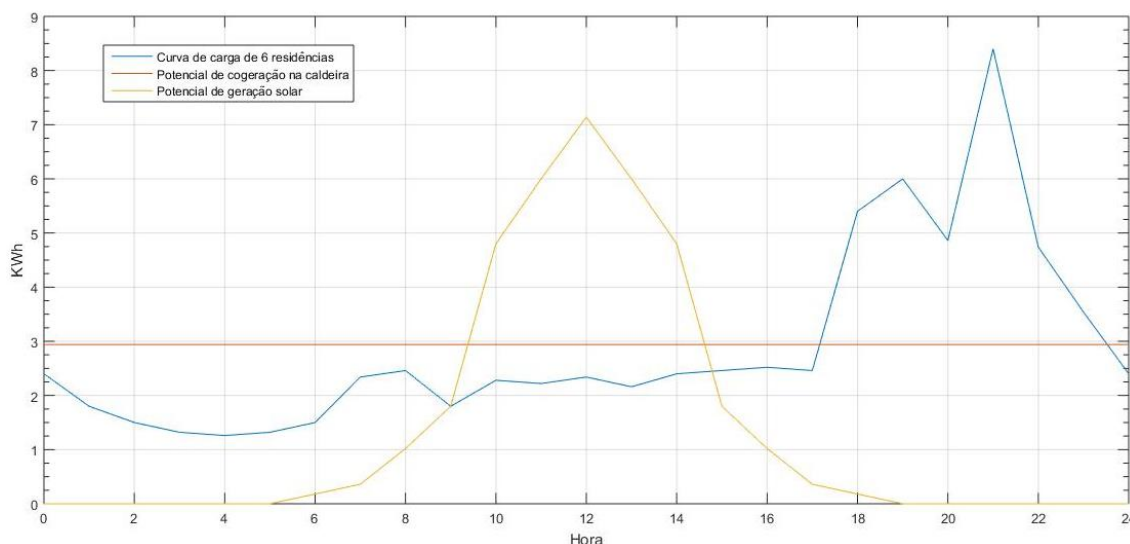


Fonte: próprio autor

Através da curva de carga residencial obtida no trabalho de Francisquini (2006), pode-se efetuar comparação com a curva de geração solar obtida no trabalho de Santos (2009), juntamente com o potencial de cogeração na caldeira proposto neste trabalho. Os dados da curva de carga e do sistema de geração solar foram multiplicados pelo número de residências para

totalizar o consumo de 1980 KWh. Da mesma maneira foi feito com a curva de geração do sistema solar, todas estas comparações são apresentadas na Figura 92.

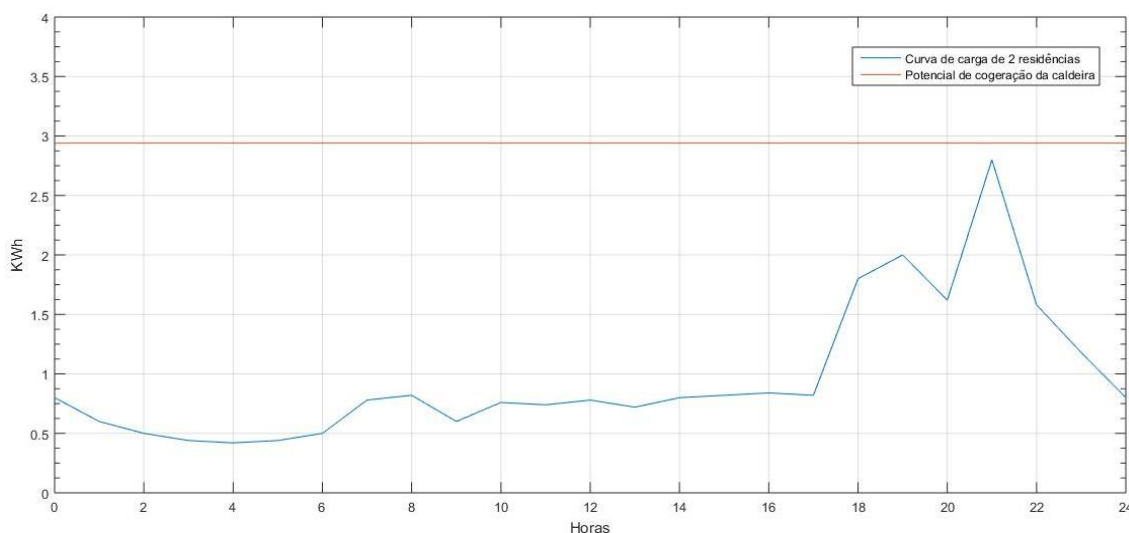
Figura 92 – Potencial de cogeração da caldeira, potencial de geração solar e curva de carga



Fonte: próprio autor

O sistema de cogeração de energia proposto é insuficiente para fornecer energia nos horários de pico. Porém, este cenário pode ser totalmente revertido, e o sistema pode ser suficiente para atender aos horários de pico. Idealizando que o sistema proposto similar ao sistema solar, onde existe um banco de baterias que armazena toda a energia não consumida nos outros horários de baixo consumo e a forneça nos momentos necessários. Outra maneira de tornar o sistema de cogeração proposto totalmente suficiente sem o uso de banco de baterias, seria se o sistema provesse energia para apenas 2 clientes residenciais com consumo médio de 330 KWh, como é apresentado na Figura 93.

Figura 93 – Potencial de cogeração da caldeira e curva de carga de 2 residências



Fonte: próprio autor

Como pode-se observar, é possível que o sistema de cogeração proposto possa fornecer energia sem a utilização de banco de baterias para 2 residências com consumo médio de 330 KWh. Em contrapartida um grande potencial de geração de energia é desperdiçado.

6.6 Proposta de trabalhos futuros

Os resultados obtidos nos ensaios realizados aconteceram em um único ponto instrumentado, assim, a partir desses resultados foi elaborado um cenário com a expectativa de que toda a área externa da caldeira seja revestida com os módulos termoeletrônicos. Este cenário permite a investigação científica com novos projetos no futuro, onde caldeiras de diferentes tipos e outros equipamentos industriais de pequeno ou grande porte, possam ser utilizados para efetuar este tipo de cogeração.

A criação de um novo tipo de revestimento para isolamento térmico para caldeiras ou para diferentes equipamentos, pode dar início a diversas linhas de investigação científica. Como por exemplo, a observação dos dados de temperatura obtidos neste projeto de T1 a T4 podem ser utilizados para a criação de um sistema de controle automático que gerencie todo o sistema de cogeração e neste caso a própria caldeira, otimizando-o para elevar ainda mais seu potencial.

6.7 Dificuldades

Foi identificada dificuldade, durante a montagem, instrumentação e desmontagem do protótipo no final do trabalho. O ambiente onde encontra-se a caldeira é insalubre, vazamentos de vapor geram ondas sonoras agudas e de alta amplitude e facilitam as variações bruscas de temperatura ambiente.

7 CONCLUSÃO

Neste projeto foi instrumentado apenas um ponto que representa 0,0027% da área total da caldeira e seu sistema de exaustão. Não foi possível criar um protótipo que contemplasse 100% da área utilizável de 59,48m², devido a limitação financeira.

Neste ponto isolado, um módulo termoeletrico que ocupa uma área de 0,0016 m² gerou a potência média de 0,079 W. Esta energia recuperada é parte do calor residual que flui através da parede da caldeira e é a diferença entre a quantidade de calor Q_H que é captada por uma das faces do módulo e Q_C que é o calor rejeitado pela outra face do módulo termoeletrico.

O rendimento do módulo termoeletrico foi de 0,052%, que apesar de baixo, obteve boa estimativa no desempenho de cogeração de energia na caldeira, isso idealizando que toda a caldeira e sistema de exaustão seja revestida por módulos termoeletricos. Foi possível estimar em condições ideais de funcionamento e transferência de calor, que o potencial de cogeração na caldeira utilizada neste trabalho é de 2,1 MWh/mês, representando uma economia de energia de 25,3 MWh/ano. Através destes resultados, pode-se concluir que o potencial de cogeração na caldeira é bastante promissor, apesar do elevado custo para a criação do protótipo.

É esperado que um protótipo tenha um custo elevado quando calculado o custo para a fabricação de apenas um equipamento, caso seja posto sobre fabricação em massa, o custo de cada equipamento diminui, o que pode torna-lo viável economicamente.

No futuro, acredita-se que uma nova geração de módulos termoeletricos tenha melhor desempenho, contribuindo para uma melhora da quantidade de energia cogorada e do custo da fabricação do projeto proposto.

Os resultados apresentados podem resultar em benefício no uso da cogeração de energia através do Efeito Seebeck em caldeiras, porém, dependem ainda da continuidade desta e de outras investigações científicas.

Este trabalho apresentou um novo potencial de cogeração que promove novas discussões a explorar o seu uso. Novos trabalhos que utilizem a cogeração de energia termoeletrica através do Efeito Seebeck, podem resultar na minimização do custo da energia e na redução da emissão de gases que provocam o efeito estufa.

8 REFERÊNCIAS

- ANACLETO, A. M. C. **Temperatura e sua medição**. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto - Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2007. 218 p.
- ANDO JUNIOR, OSWALDO IDEO. **Protótipo de um micro gerador termoeletrico para captação de energias residuais baseado no efeito seebeck com sistema de transferência de calor intercambiável**. Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Programa de pós graduação em engenhariaa de minas, metalúrgica e de materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.
- AUDIFFRED, DIEGO BONKOWSKI DE LA SIERRA. **Utilização de dispositivos termoeletricos para geração de energia elétrica em nanosatélites**. Joinville, Santa Catarina: Centro de Engenharias da Mobilidade Curso de Engenharia Aeroespacial da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2015.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Banco Central do Brasil**. 2018. <http://www.bcb.gov.br/> (acesso em 22 de Junho de 2018).
- BARROS, BENJAMIM FERREIRA DE, REINALDO BORELLI, e RICARDO LUIS GEDRA. **Eficiência Energética: Técnicas de Aproveitamento, Gestão de Recursos e Fundamentos**. São Paulo: Érica, 2015.
- BEGA, E.A. **Instrumentação aplicada ao controle de caldeiras**. Rio de Janeiro, 2003.
- BENNETT, G., DM Rowe. **Capítulo 41 Aplicações Espaciais**. em *CRC Handbook of Thermoelectrics*, CRC Press. 2005.
- BERGMAN, et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. Sexta. Rio de Janeiro RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2008.
- BOHN, M. S., F. KREITH. **Princípios de transferência de calor**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.
- BOLES, M. A., Y. A. ÇENGEL. **Termodinâmica**. Quinta. Tradução: Katia Aparecida Roque. São Paulo: McGraw Hill, 2006.
- BORGNAKKE, C., R. E. SONNTAG, G. J. V. WYLEN. **Fundamentos da Termodinâmica**. Sexta. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2003.
- BOTELHO, M.H.C., H.M. BIFANO. **Operação de caldeira**. São Paulo, SP, 2011.
- CARVALHO, C. A. R. **Estudo da viabilidade do aproveitamento do calor de escape para a geração de energia elétrica em automóveis**. São Paulo: Universidade de Taubaté, 2012.

- COSTA, V. A. **Estudo das Propriedades Termoelétricas de Fios Quânticos de Telureto de Chumbo**. São José dos Campos: Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2010.
- FARIAS, SANDRO RICARDO ALVES. **Protótipo de um microgerador termoelétrico de estado sólido a gás**. Natal, Rio Grande do Norte: Programa de pós Graduação em ciência e Engenharia do Petróleo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Julho de 2009.
- FERNANDES, A. E. S. S. **Conversão de Energia com Células de Peltier**. Lisboa, Portugal: FCT - Faculdade de Ciência e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- FRANCISQUINI, AISLAN ANTONIO. **Estimação de Curvas de Carga em Pontos de Consumo e em Transformadores de Distribuição**. Ilha Solteira, SP: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Março de 2006.
- GERTHSEN, C, et al. **Física**. Segunda. Lisboa, Portugal: Fundação Calouste Gulbenkian, 1998.
- GOUPIL, C., SEIFERT W., ZABROCKI, K., MULLER, E., G. JEFFREY SNYDER. **Thermodynamics of Thermoelectric Phenomena and Applications**. Entropy, 2011: 1481-1517.
- GRUPO ENERGISA S.A. **TIPOS DE TARIFAS - Energisa**. 2018. <https://www.energisa.com.br/Paginas/informacoes/taxas-prazos-e-normas/tipos-tarifas.aspx> (acesso em 22 de Junho de 2018).
- KREITH, F., M. S. BOHN. **Princípios de transferência de calor**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.
- MINGJIE GUAN, KUNPENG WANG, DAZHENG XU, WEI-HSIN LIAO. **Design and experimental investigation of a low-voltage thermoelectric energy harvesting system for wireless sensor nodes**. Energy Conversion and Management, 2017: 30-37.
- MOURA, J. A. S. **Filmes Nanométricos de FeN E AlN Crescidos por Sputtering e Aplicações do Efeito Peltier**. NATAL-RN: Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte, 2010.
- NASA. Power and Thermal Systems. **Power and Thermal Systems**. 2018. <https://rps.nasa.gov/> (acesso em 25 de Junho de 2018).

- NOGUEIRA, LUIZ AUGUSTO HORTA, FÁBIO JOSÉ HORTA NOGUEIRA, CARLOS ROBERTO ROCHA. **Eficiência Energética no Uso de Vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.
- PORTAL SOLAR LTDA. – ME. **Portal solar**. 2018. www.portalsolar.com.br (acesso em 20 de Junho de 2018).
- RABUSKE, RODRIGO, LAERCIO ROGERIO FRIEDRICH, FERNANDO BATISTA BANDEIRA DA FONTOURA. **Análise da Viabilidade para Implantação de Energia para Sombreamento de Estacionamento**. XXXVI Encontro Nacional De Engenharia de Produção, 03 a 06 de Outubro de 2016: 14.
- SAKATSUME, FÁBIO HIDEKI. **Uso da cogeração no setor residencial: A aplicação de mini e micro-cogeradores a gás natural**. Rio de Janeiro: Programas de pós-graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Maio de 2004.
- SANTANA, J. J. B. **Estudo de um isolante térmico para tubos fabricado de material compósito**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.
- SANTOS, LEONARDO PAIVA. **Análise de desempenho de um gerador termoelétrico baseado no efeito seebeck**. Taubaté, São Paulo: Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté, 2010.
- SANTOS, PORTOLAN DOS ÍSIS. **Integração de Painéis Solares Fotovoltaicos em Edificações Residenciais e sua Contribuição em um Alimentador de Energia de Zona Urbana Mista**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - PPGEC, Fevereiro de 2009.
- TELLES, P.C.S. **Tubulações Industriais**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.
- VALLÊRA, ANTÓNIO M., MIGUEL CENTENO BRITO. **Meio século de história fotovoltaica**. Gazeta de Física - Faculdade Ciências Universidade de Lisboa, 2006: 10-15.
- VÉRAS, JULIO CÉSAR CERQUEIRA. **Análise experimental dos efeitos de ciclos térmicos em geradores termoelétricos**. João Pessoa, Paraíba: Programa de pós graduação em engenharia elétrica - Universidade Federal da Paraíba UFPB, 2014.