



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP - UEMG



Dissertação de Mestrado

"Análise de viabilidade técnica, experimental e econômica do aproveitamento de energia térmica em uma siderúrgica"

Autor: Márcio Fernandes da Cunha Rodrigues



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP - UEMG

Márcio Fernandes da Cunha Rodrigues

Análise de viabilidade técnica, experimental e econômica do aproveitamento de energia térmica em uma siderúrgica

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Engenharia de Processos

Orientador: Prof. Prof. Dr. Paulo Santos Assis

Co-orientadora: Profa. Dra. Elisângela Martins Leal

Ouro Preto, agosto de 2021.

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R696a Rodrigues, Márcio Fernandes da Cunha.
Análise de viabilidade técnica, experimental e econômica do aproveitamento de energia térmica em uma siderúrgica. [manuscrito] / Márcio Fernandes da Cunha Rodrigues. - 2021.
123 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis.

Coorientadora: Profa. Dra. Elisângela Martins Leal.

Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Rede Temática em Engenharia de Materiais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Processos de Fabricação.

1. Energia elétrica e calor - Cogeração. 2. Siderurgia. 3. Sustentabilidade. 4. Termoeletricidade. I. Assis, Paulo Santos . II. Leal, Elisângela Martins . III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 621.31:669.1

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
PROGRAMA DE POS GRADUACAO EM ENGENHARIA DE
MATERIAIS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Márcio Fernandes da Cunha Rodrigues

Análise de viabilidade técnica, experimental e econômica do aproveitamento de energia térmica em uma siderúrgica

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais

Aprovada em 27 de agosto de 2021.

Membros da banca

Prof. Dr. Ing. Paulo Santos Assis - Orientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto
Profª Drª Edna Alves de Oliveira - Fundação Municipal para Educação Comunitária
Prof. Dr. Jorge Luiz Brescia Murta - Universidade Federal de Ouro Preto
Profª Drª Elisângela Martins Leal - Coorientadora - Universidade Federal de Ouro Preto

O Prof. Fernando Gabriel da Silva Araújo, Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 11 de novembro de 2021



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Gabriel da Silva Araujo, COORDENADOR(A) DE CURSO DE PÓS-GRADUACÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**, em 11/11/2021, às 11:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0243642** e o código CRC **9602DBAA**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, minha esposa Kelly Rodrigues, meus pais Antônio e Maria das Graças, meus irmãos: Leonardo, Ana Rita e Antônio José por me escutarem ao longo de todo esse período. Dedico este trabalho a vocês!

Agradeço ao Professor Dr. Paulo Santos Assis e a Professora Dra. Elisângela Martins Leal por todo o empenho e dedicação.

Agradeço também ao Professor Dr. Jorge Luiz Brécia Murta e à Professora Dra. Edna Alves Oliveira além de todos os amigos que fiz na REDEMAT.

Agradeço também ao Eder Quental que me ajudou na reta final do trabalho.

Um agradecimento especial a todos que de alguma forma ajudaram no meu desenvolvimento pessoal e profissional durante este período acadêmico.

Agradeço também o apoio das instituições de Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	5
2.1. Objetivo geral	5
2.2. Objetivos específicos	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3.1. Energia elétrica na siderurgia brasileira.....	6
3.2. Recuperação de energia a partir das escórias.....	9
3.3. Análise energética na indústria siderúrgica	10
3.4. Evolução da termoeletricidade.....	12
3.5. Efeito Seebeck	14
3.6. Efeito Peltier	16
3.7. Efeito Thomson.....	17
3.8. Figura de Mérito (ZT).....	17
3.9. Construção dos módulos termoelétricos	21
3.10. Refrigeração termoelétrica	22
3.11. Viabilidade Técnica.....	23
3.12. Viabilidade Econômica	26
3.13. Investimento	28
3.14. Investimento Inicial.....	28
3.15. Custo de Manutenção	29
3.16. Fluxo de Caixa	29
3.17. Payback	29
3.18. Valor Presente Líquido (VPL)	30
3.19. Taxa Interna de Retorno (TIR).....	30
3.20. Retorno de Investimento – <i>Return of Investment</i> (ROI)	31

3.21.	Aplicabilidade da tecnologia termoeétrica.....	31
3.22.	Mínimo Valor de Produto (MVP).....	32
3.23.	Produtos Desenvolvidos.....	33
	Lanterna Termoeétrica.....	33
	Forno Gerador	34
	Gerador de energia termoeétrico	36
	Recuperador de energia dos gases de exaustão	38
	Relógios de Pulso	39
	Pulseiras Termoeétrica	41
	Refrigeradores	42
	Dispositivo para Veículo	43
3.24.	Sustentabilidade	44
3.25.	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).....	46
4.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	47
4.1.	Levantamento da Viabilidade Técnica.....	47
4.2.	Funcionamento das Placas	48
4.3.	Especificação do módulo termoeétrico.....	50
4.4.	Desenvolvimento do Modelo.....	53
4.5.	Combustão	53
4.6.	Resfriamento	53
4.7.	Controle do Sistema.....	54
4.8.	Medidas de Temperatura	54
4.9.	Condições Simuladas	55
4.10.	Modelo para aplicação industrial	56
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5.1.	Estudo de Viabilidade Econômica	58
5.1.1	Levantamento de CAPEX	58

5.1.2	Encargos e Conversões.....	60
5.1.3	Levantamento de OPEX.....	61
5.1.4	Premissas	78
5.2.	Valor Presente Líquido (VPL).....	79
5.3.	Taxa Interna de Retorno (TIR)	80
6.	BENEFÍCIOS DE ORDEM NÃO-FINANCEIRA	81
6.1.	Social	81
6.2.	Comercial.....	81
6.3.	Ambiental.....	81
7.	CONCLUSÕES.....	83
8.	TRABALHOS FUTUROS	85
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
10.	APÊNDICE	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Consumo de energia em diferentes setores industriais.	3
Figura 1.2 - Faixa de temperatura de perdas térmicas em fábricas industriais de modo geral.	4
Figura 3.1 - Matriz energética de uma aciaria do tipo LD.	8
Figura 3.2 - Balanço energético básico de um forno FEA.	9
Figura 3.3 - Processo Sumitomo.	10
Figura 3.4 - Anel de Seebeck com o desvio de agulhas magnéticas após aquecimento de uma das junções de dois metais diferentes.	12
Figura 3.5 - Esquema do Efeito Seebeck.....	13
Figura 3.6 - Movimentação de elétrons de uma fonte quente para uma fonte fria.....	15
Figura 3.7 - Funcionamento do Efeito Peltier no módulo termoeletrico.....	16
Figura 3.8 - Relação da Figura de Mérito com a temperatura de algumas ligas.	18
Figura 3.9 - Figura de Mérito de alguns materiais termoeletricos.....	19
Figura 3.10 - Rendimento do módulo Termoeletrico em relação ao gradiente de temperatura e Figura de Mérito.	20
Figura 3.11 – Esquema dos Junções e Faces de um Módulo Termoeletrico.....	21
Figura 3.12 - Módulo Termoeletrico refrigerando – Efeito Peltier.	22
Figura 3.13 - Evolução da quantidade de depósitos de patentes.	25
Figura 3.14 - Campo de estudo dos trabalhos acadêmicos nos últimos anos.....	26
Figura 3.15 - Lanterna utilizando como fonte energia o calor da mão do usuário.....	34
Figura 3.16 – Características da Lanterna de led.....	34
Figura 3.17 - Fogão gerador com uma lanterna acoplada (a) e o ventilador utilizado...	35
Figura 3.18 - Gerador de energia elétrica (a) e o esquema de funcionamento (b) Esquema do gerador de e fluxo de entrada e saída.	37
Figura 3.19 - Recuperador de energia a partir de gases de exaustão (a) e o posicionamento dos módulos termoeletricos acoplados ao sistema (b).....	38
Figura 3.20 - Corte lateral relógio de pulso com utilização do módulo termoeletrico...	40
Figura 3.21 - Esquema e disposição da unidade de geração termoeletrica.	40
Figura 3.22 - Par de módulo termoeletrico (a) unidade termoeletrica com aumento de 1000x. Dimensão 80µm x 80µm x 600µm.....	41
Figura 3.23 - Pulseiras termoeletrica desenvolvida pela Dyson Energy.	41

Figura 3.24 - Refrigerador / aquecedor para garrafas, copos e latas com alimentação por porta USB.	42
Figura 3.25 - Carrinho de transporte alimentação quente / frio.....	43
Figura 3.26 - Assento climatizado utilizando módulos termoeletricos.	43
Figura 3.27 - Evolução de fornecimento de energia de baixo carbono como fonte primária ao longo dos anos para atingir as concentrações de CO ₂ equivalentes indicadas	44
Figura 3.28 - Matriz Elétrica Mundial.....	45
Figura 4.1 - Diagrama de blocos da montagem experimental.....	47
Figura 4.2 - Protótipo II para simular a cogeração de energia elétrica.....	48
Figura 4.3 - Esquema do módulo termoeletrico	49
Figura 4.4 - Picos e vales encontrados em escala microscópica entre as faces do módulo termoeletrico e a superfície quente sem pasta térmica.	50
Figura 4.5- Picos e vales em escala microscópica entre as faces do módulo termoeletrico e a superfície quente com adição de pasta térmica.....	50
Figura 4.6 - Taxa de conversão dos módulos termoeletricos de acordo com as temperaturas da face fria Vs face quente.....	51
Figura 4.7 - Dados de tensão do circuito aberto (a), resistência de carga combinada (b), tensão de carga combinada (c), corrente de carga combinada (d) e potência de saída de carga combinada de acordo com o fabricante (e).....	52
Figura 4.8 - Fogareiro de alta pressão.	53
Figura 4.9 - Condições de testes a serem realizados.	55
Figura 4.10 - Modelo do gerador termoeletrico resfriado a água (a) e o esquema da dimensão do gerador com os módulos termoeletricos.....	57
Figura 5.1 - Cálculo de imposto de importação.	60
Figura 5.2– Teste 1: Medições variando as distâncias da fonte de calor para a ligação em série.....	65
Figura 5.3 – Teste 2: Medições variando as distâncias da fonte de calor para a ligação em série.....	66
Figura 5.4 – Teste 3: Medições variando as distâncias da fonte de calor para a ligação em série.....	67
Figura 5.5 - Teste 1: Medições variando as distâncias da fonte de calor para a ligação em paralelo.....	70
Figura 5.6- Teste 2: Medições variando as distâncias da fonte de calor para a ligação em paralelo.....	71

Figura 5.7 - Teste 3: Medições variando as distâncias da fonte de calor para a ligação em paralelo.....	72
Figura 5.8 – Variação de temperatura das tubulações na saída das caldeiras.	75
Figura 5.9 - Estimativa de taxa de conversão de cogeração de energia elétrica.....	75
Figura 5.10 - Correlação da Tensão de Carga Correspondente do sistema gerador de energia elétrica e dados de temperatura encontrados em Siderúrgica de acordo com especificação do fabricante TEP1-1264-1.5.	76
Figura 5.11 - Correlação de Corrente de Carga Correspondente do sistema gerador de energia elétrica e dados de temperatura encontrados em Siderúrgica de acordo com especificação do fabricante TEP1-1264-1.5.	77
Figura 5.12 - Potência de Saída de Carga Correspondente (W) do sistema gerador de energia elétrica e dados de temperatura encontrados em Siderúrgica de acordo com especificação do fabricante TEP1-1264-1.5.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Consumo de energia elétrica nas siderúrgicas brasileiras em MWh.	6
Tabela 3.2 - Capacidade instalada de geração de energia elétrica em algumas siderúrgicas nacionais.	7
Tabela 3.3 - Balanço energético de produção de ferro gusa de usina siderúrgica integrada com capacidade de 600 mil toneladas de aço/ano.	11
Tabela 3.4 - Balanço energético de uma aciaria do tipo LD de usina siderúrgica integrada com capacidade de 600 mil toneladas de aço/ano.	11
Tabela 3.5 - Balanço energético de uma laminação de uma usina siderúrgica integrada com capacidade de 600 mil toneladas de aço/ano.	12
Tabela 3.6 - Coeficientes de Seebeck para metais/ligas e semicondutores (base de comparação: Platina).	15
Tabela 3.7 - Coeficiente e Figura de Mérito à temperatura ambiente.	20
Tabela 3.8 - Classificação da temperatura de perdas térmicas de acordo com a fonte. .	24
Tabela 3.9 - Custo estimado para implantação das fontes renováveis de energia.	27
Tabela 3.10 - Custos da geração de energia elétrica para diferentes fontes.	27
Tabela 3.11 - Especificações e características do fogão gerador com lanterna acoplada.	36
Tabela 3.12 - Especificações e características de gerador com uso de óleo.	37
Tabela 3.13 - Especificações e características de gerador com uso de óleo.	39
Tabela 4.1 - Especificações fornecidas pelo fabricante do módulo termoelétrico.	51
Tabela 4.2 - Tipos de termopares baseados em telureto de bismuto e antimônio e suas faixas de medição de temperatura.	55
Tabela 4.3 - Especificação do gerador termoelétrico resfriado a água.	57
Tabela 5.1 - Custo do MVP.	58
Tabela 5.2- CAPEX do sistema de cogeração de energia elétrica TEG-HL70-12V.	59
Tabela 5.3 - Despesas com mão de obra - CAPEX.	61
Tabela 5.4 – Consolidação de Investimento - CAPEX.	61
Tabela 5.5 - OPEX do sistema de cogeração de energia elétrica.	62
Tabela 5.6 - Despesas de mão de obra – OPEX.	62
Tabela 5.7 - Consolidação do OPEX (1 ano)	62
Tabela 5.8 - Dados de potência e eficiência médios do sistema no arranjo em série.	68

Tabela 5.9 - Média e desvio padrão de cada curva de acordo com os testes para a ligação em série.....	69
Tabela 5.10 - Dados de potência e eficiência médios do sistema no arranjo em paralelo. ..	73
Tabela 5.11 - Média e desvio padrão de cada curva de acordo com os testes para a ligação em série.....	74
Tabela 5.12 – Valor de investimento, faturamento e <i>payback</i> da tecnologia instalada..	79
Tabela 5.13 - Valor do VPL de acordo com a quantidade de sistemas cogeneradores de energia elétrica.....	80
Tabela 5.14 - Valor da TIR de acordo com a quantidade de sistemas cogeneradores de energia elétrica e tempo.....	80

SIGLAS

DC – *Direct Current* – Corrente Contínua

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

ICMS - Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

IOF - Imposto de Operações Financeiras

kWh - Quilowatt hora

MVP - Mínimo Valor de Produto

MW - MegaWatt

MWh - MegaWatt hora

P&D - Pesquisa e Desenvolvimento

PRI - Planejamento de Recursos Integrados

Q - Quantidade de Calor

REN - *Renewable Energy Policy Network*

ROI - Retorno de Investimento

TEM - Módulo Termoelétrico

T_f - Temperatura da Face Fria

TIR - Taxa Interna de Retorno

TMA - Taxa de Atratividade

T_q - Temperatura da Face Quente

VDC – Volt em Corrente Contínua

VPL - Valor Presente Líquido

FP – Fora de Ponta

P – Ponta

RESUMO

Rodrigues, Márcio Fernandes da Cunha. Análise de viabilidade técnica, econômica e experimental do aproveitamento de energia térmica em uma siderúrgica. Mestrado (dissertação), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT. 125 páginas, 2021.

Este trabalho visa estudar a aplicação técnica e econômica da termoeletricidade no meio siderúrgico, focando na cogeração de energia elétrica a partir da energia térmica em sistemas de exaustão. Já é sabido que a siderurgia requer um consumo elevado de combustíveis além de energia elétrica. Por isso, muitos sistemas de recuperação energética já estão implementados nas indústrias. Mas, sabe-se que ainda muita energia é dissipada e não aproveitada ao longo do processo siderúrgico principalmente a temperaturas mais baixas onde há maior dificuldade na recuperação. A aplicabilidade da tecnologia termoelétrica se torna interessante para a recuperação de energia térmica, transformando-a em energia elétrica minimizando os impactos ambientais e possíveis custos de geração. Neste sentido, desenvolveu-se um protótipo de transferência de calor, com possibilidades de vários arranjos para a captação de calor de forma a simular alguns parâmetros encontrados na indústria para a geração de dados. Baseados nos resultados, há necessidade de que todos os módulos estejam ligados em série para maximizar os ganhos energéticos recuperados, uma vez que a ligação em paralelo não se faz muito interessante devido aos baixos valores encontrados com eficiência média encontrada de 1,96% e 0,41% para ligações em série e paralelo respectivamente. O protótipo construído teve um custo de R\$ 186,82 alcançando valores de tensão superior a 5V e corrente elétrica de 0,5A. Ao longo do estudo apontou-se para possíveis perdas ao longo do processo aumentando o potencial de recuperação de energia para posterior geração de energia elétrica das empresas siderúrgicas além de elencar alguns sistemas para geração de energia elétrica que estão disponíveis comercialmente e outros que ainda estão em fase de testes, mas que já mostram a importância em processos mais sustentáveis. Também é apresentado correlação de dados obtidos em sistemas industriais onde podem ser entendidos como oportunidades para a aplicação da tecnologia termoelétrica podendo ser implantada em outros tipos de indústria e em diferentes locais de instalação aumentando a eficiência e até buscando créditos de carbono a partir de um Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Do ponto de vista econômico o trabalho apresenta a análise de viabilidade econômica para a aplicação de tal tecnologia na siderurgia levando em

consideração o cenário financeiro atual e a adição a um projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo na comercialização de créditos de carbono aumentando significativamente a competitividade.

Palavras-Chave: Cogeração, Energia, Siderurgia, Sustentabilidade, Termoeletricidade.

ABSTRACT

Rodrigues, Márcio Fernandes da Cunha. Technical, economic and experimental feasibility analysis of thermal energy utilization in a steelmaking industry. Master degree (dissertation), Graduate Program in Materials Engineering at REDEMAT. 125 pages, 2021.

This work aims to study the technical and economic application of thermoelectricity in the steel industry, focusing on the cogeneration of electrical energy from thermal energy in exhaust systems. It is already known that the steel industry requires a high consumption of fuels in addition to electricity. Therefore, many energy recovery systems are already implemented in industries. However, it is known that a lot of energy is still dissipated and not used throughout the steelmaking process, especially at lower temperatures, where recovery is more difficult. The applicability of thermoelectric technology becomes interesting for the recovery of thermal energy, transforming it into electrical energy, minimizing environmental impacts and possible generation costs. In this sense, a prototype of heat transfer was developed, with possibilities of several arrangements for the capture of heat in order to simulate some parameters found in the industry for data generation. Based on the results, there is a need for all modules to be connected in series to maximize the energy gains recovered, since the parallel connection is not very interesting due to the low values found with an average efficiency found of 1.96% and 0.41% for series and parallel connections respectively. The built prototype had a cost of R\$ 186.82 reaching voltage values above 5V and electric current of 0.5A. Throughout the study, possible losses along the process were pointed out, increasing the potential of energy recovery for subsequent generation of electricity by steel companies, in addition to listing some systems for generating electricity that are commercially available and others that are still in operation. testing phase, but which already show the importance of more sustainable processes. Correlation of data obtained in industrial systems is also presented, where they can be understood as opportunities for the application of thermoelectric technology, which can be implemented in other types of industry and in different installation locations, increasing efficiency and even seeking carbon credits from a Clean Mechanism Development. From an economic point of view, the work presents the economic feasibility analysis for the application of such technology in the steel industry, considering the current financial scenario and the addition to a Clean

Development Mechanism project in the commercialization of carbon credits, significantly increasing competitiveness.

Keywords: Cogeneration, Energy, Steel, Sustainability, Thermoelectricity

1. INTRODUÇÃO

Devido ao aumento da demanda mundial por energia elétrica faz-se necessário que o avanço tecnológico se torne sustentável, otimizando gastos com energia e aproveitando a energia excedente. Segundo a Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE, 2017), mesmo mantendo a previsão de expansão da capacidade instalada de produção de aço bruto de acordo com a demanda interna brasileira, haveria uma ociosidade próxima a 54% em 2026.

Em 2010, segundo relatório divulgado pela CNM/CUT (2012), a autoprodução de energia elétrica nas siderúrgicas chegou a 7.722 GWh, o que corresponde a 45,4% da geração própria de energia elétrica. Entretanto, em 2026, levando em consideração as oscilações de mercado que se instaurou no Brasil nos últimos anos e com as perspectivas contribuição do setor, a autoprodução poderá chegar apenas 5.735 GWh (EPE, 2017).

Com o recuo esperado na autoprodução de energia elétrica nos próximos anos, o uso de formas avançadas de cogeração, não só no Brasil, mas também em todo o mundo no setor siderúrgico, tem mostrado a necessidade de inovar. Há muitos anos se discute sobre novas rotas para cogeração de energia na siderurgia. Algumas, como por exemplo a geração de energia elétrica a partir do gás de topo do alto forno, já estão bem consolidadas e em fase de melhoria da eficiência. A utilização da própria escória de aciaria em leito fluidizado para cogeração via turbina, ciclo Rankine, também tem sido muito estudada e se mostra como uma rota interessante ao processo de cogeração.

Com o desenvolvimento de semicondutores mais eficientes, o efeito termoelétrico é uma nova rota promissora devido às inúmeras perdas térmicas ao longo do processo produtivo do aço podendo ser muito vantajoso em diversas áreas do meio siderúrgico e além do mais considerada uma energia limpa.

A termoeletricidade já é uma aposta favorável ao desenvolvimento de novas rotas. Desde a descoberta do efeito termoelétrico em 1821, seu uso em diversos processos tem aumentado principalmente na refrigeração e na transformação de energia elétrica baseados no efeito Peltier (RIFPAT, 2003).

A geração de energia elétrica a partir do efeito termoelétrico é explicada a partir da diferença de temperatura entre a face quente (emissor) e fria (coletor) da placa termoelétrica gerando um fluxo de elétrons entre os semicondutores obtendo assim uma corrente elétrica (CIT, 2017).

Inicialmente os estudos mostravam que a eficiência destas placas estava entre 2-5%. No entanto, estudos mais recentes mostram que com os avanços no desenvolvimento dos materiais que constituem as placas termoelétricas, como as terras raras, pode-se alcançar eficiência superior a 20% (NASCIMENTO, 2012). Estes dispositivos no estado sólido não têm partes móveis, são ambientalmente corretos, sem emissões de gases, baixo custo de manutenção e extremamente confiáveis podendo representar uma das principais tecnologias para a mudança no uso de combustíveis. Além disso, podem ter mais de 100.000 horas de operação estável quando ocorrer um controle de temperatura preciso (EWERT *et al*, 1998).

A viabilidade técnica e econômica está diretamente ligada ao uso de energia e a perda energética. A Figura 1.1 apresenta uma comparação entre o uso de energia e a perda de energia em alguns setores industriais incluindo refino de petróleo, produtos químicos, produtos florestais, ferro, aço e alimentos e bebidas representando mais de 80% de todas as entradas de energia. Em todos estes setores industriais, o uso de vapor e sistemas de combustão é muito intenso e a energia excedente ao processo é liberada ao ambiente gerando perdas e diminuído a eficiência de processos intermediários tornando viável, do ponto de vista técnico, a aplicação de tecnologia termoelétrica para cogeração de eletricidade a partir de uma fonte de calor de baixa e média temperatura (até 400°C). Aplicações em pequena e em grande escala foram desenvolvidas no Japão recuperando calor da queima de resíduos sólidos. A eficiência para o experimento em pequena escala foi estimada em 4,36% usando um módulo termoelétrico de 60W instalado perto da caldeira seção de uma planta incineradora. (ZHENG; YAN, SIMPSON, 2012).

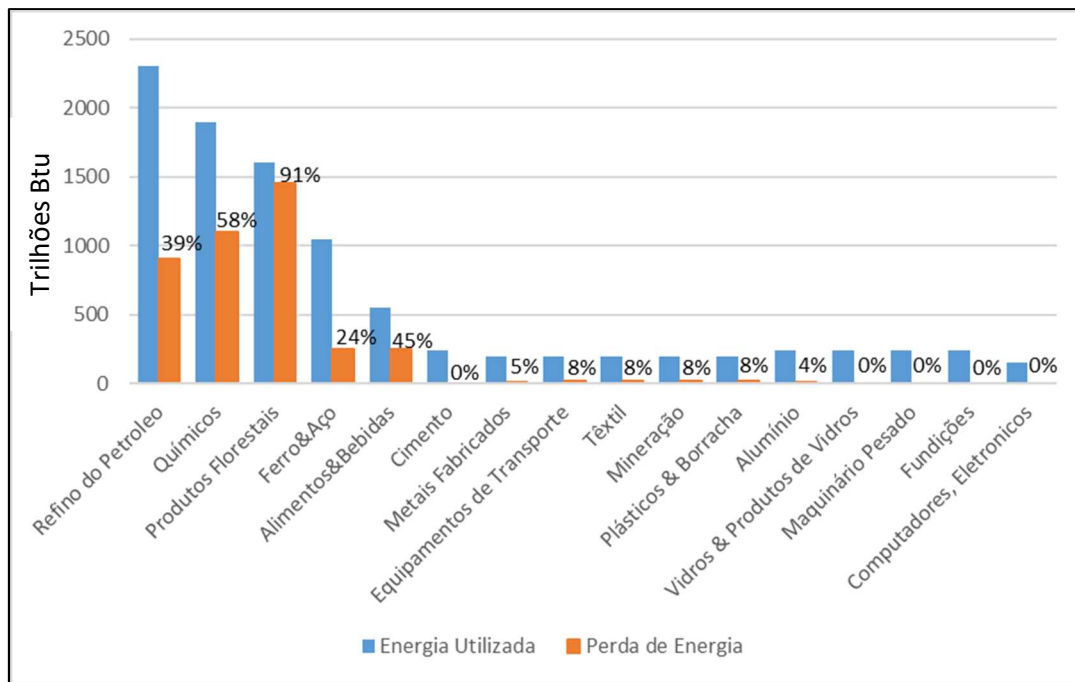


Figura 1.1 - Consumo de energia em diferentes setores industriais.
 Fonte: Adaptado de U.S. Department of Energy, 2012.

Para Naik-Dhungel (2012), a recuperação da perda térmica é mais viável e mais fácil quando as temperaturas estão no intervalo em que se intitula médio-alto, acima de 260°C. Para Wang (2013), o grande desafio está na recuperação do calor excedente à baixa temperatura, menor que 260°C, quando comparado ao calor excedente de média-alta temperatura devido aos problemas associados aos métodos de captação de calor. Mas mesmo assim existem inúmeras oportunidades para aplicações na recuperação de calor excedente em baixa temperatura em fábricas industriais de base uma vez que, a maior parte das perdas estão nesta faixa inferior a 300 °C como apresentado na Figura 1.2 de um modo geral. Para temperaturas mais elevadas não há viabilidade técnica do uso das placas termoelétricas devido às suas especificações mais restritas que interferiam no funcionamento das placas (HADDAD *et al*, 2014).

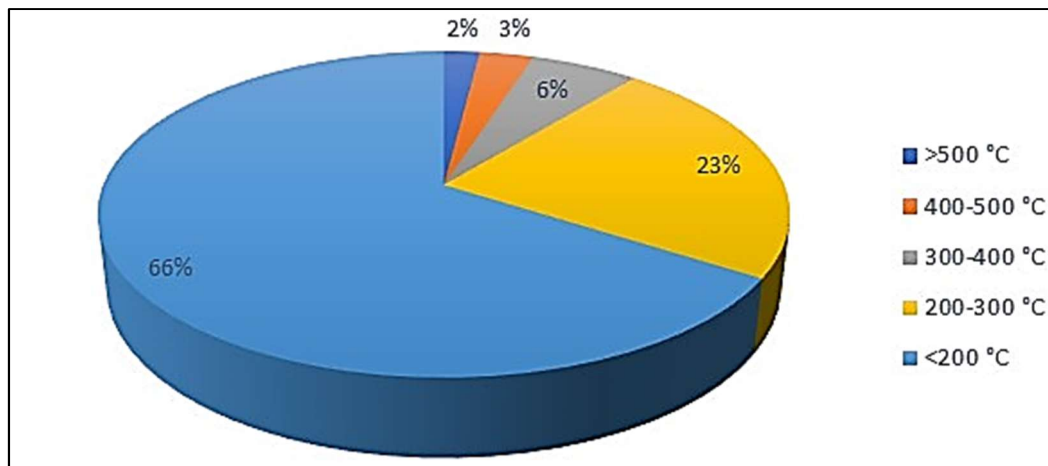


Figura 1.2 - Faixa de temperatura de perdas térmicas em fábricas industriais de modo geral.
Fonte: Adaptado de Jouhara *et al.*, 2018

Além disso, o sistema para recuperar energia à temperatura mais baixa requer grandes trocadores de calor devido à baixa taxa de transferência de calor. Isto inviabiliza este modo de recuperação em muitos casos por trabalhar em uma faixa de temperatura menor, pois o custo de equipamento usado para recuperar o calor deste processo precisa ser menor.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Analisar a viabilidade técnica, experimental e econômica do efeito termelétrico aplicado em área siderúrgica para cogeração de energia elétrica a partir da energia térmica excedente do processo.

2.2. Objetivos específicos

- Analisar o potencial de cogeração de energia elétrica a partir das perdas térmicas do processo através da superfície externa de equipamentos e tubulações;
- Avaliar o comportamento das placas termelétricas bem como sua eficiência na geração de energia elétrica baseado na simulação;
- Analisar a evolução dos estudos recentes sobre efeitos termoelétricos;
- Construir um protótipo para reproduzir o cenário encontrado na indústria;
- Verificar os aspectos de viabilidade econômica da aplicação de tal tecnologia;
- Avaliar por meio de modelagem teórica a aplicabilidade de sistema termoelétrico cogrador de energia através de dados reais de uma indústria de siderúrgica;
- Avaliar a aplicabilidade da tecnologia como um Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Energia elétrica na siderurgia brasileira

A energia elétrica é determinante ao longo de todo o processo de produção de aço, resultando em um dos insumos mais utilizados na produção siderúrgica. Assim, cada vez mais, as siderúrgicas têm investido na geração própria de energia elétrica com o objetivo de diminuir a dependência de outras empresas fornecedoras de energia elétrica.

No Brasil, nota-se que há uma tendência em investir na produção de insumos. Em 2017, houve um aumento de 8,7% no consumo de matérias primas quando comparado com 2016, ano este que representava queda em tal consumo segundo o Relatório de Sustentabilidade de 2018 divulgado pelo IABr. A Tabela 3.1 apresenta valores que demonstram que a partir de 2007 houve um aumento na geração própria de energia elétrica.

Tabela 3.1 - Consumo de energia elétrica nas siderúrgicas brasileiras em MWh.
Fonte: (CNM/CUT, 2012.)

Ano	Geração Própria	Consumo	Participação da Geração Própria (%)
2001	4.084.355	13.213.853	30,9
2002	4.314.159	13.889.673	31,1
2003	3.655.043	14.698.478	24,9
2004	3.828.777	15.393.751	24,9
2005	4.526.203	15.808.397	28,6
2006	4.193.129	14.931.695	28,1
2007	6.364.331	17.136.010	37,1
2008	7.697.519	16.592.152	46,4
2009	5.173.992	13.526.492	38,3
2010	7.722.291	17.013.145	45,4

Já em 2014, segundo o Relatório de Sustentabilidade do Instituto Aço Brasil (IABr, 2014), 48% de toda a energia elétrica consumida pelo setor siderúrgico nacional, era proveniente de geração própria. Dados mais recentes divulgados em 2018, apresentam que em 2017, 57% do consumo de energia elétrica das usinas foram supridos por meio da auto geração correspondendo a 49% em termelétrica e 8% em hidrelétrica, o que foi ligeiramente maior do que em 2016, totalizando 54% do consumo de energia elétrica nas usinas a partir de geração própria sendo que 45% oriundo de termelétricas e 9% por usinas hidrelétricas. (IABr, 2018). A Tabela 3.2 apresenta uma listagem de capacidade instalada de geração de energia elétrica em 2009, que operam com gases de processo.

Tabela 3.2 - Capacidade instalada de geração de energia elétrica em algumas siderúrgicas nacionais.
Fonte: (EPE, 2009).

Empresa	Capacidade Instalada (kW)	Usina	Localização
Açominas	102.890	Gerdau Açominas	Ouro Branco, MG
Barreiro	12.900	Usina Termelétrica Barreiro	Belo Horizonte, MG
Brasil Verde	1.200	Brasil Verde Agroindústrias	Conceição do Pará, MG
Calsete	2.000	Calsete Siderurgia	Sete Lagoas, MG
Cosipa	27.000	Companhia Siderúrgica Paulista	Cubatão, SP
Cosipar	10.000	Companhia Siderúrgica do Pará	Marabá, PA
CSA	490.000	Cia. Siderúrgica do Atlântico	Rio de Janeiro, RJ
CSN	235.200	Cia. Siderúrgica Nacional	Volta Redonda, RJ
CST	278.200	Cia. Siderúrgica de Tubarão	Serra, ES
Ipatinga	40.000	Usina Térmica Ipatinga	Ipatinga, MG
Siderpa	2.400	Siderúrgica Paulino	Sete Lagoas, MG
Sol	196.520	Cia. Siderúrgica de Tubarão	Serra, ES
Usiminas	18.810	Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais	Ipatinga, MG
Valinho	2.000	Siderúrgica Valinho	Divinópolis, MG
Vetorial	3.500	Vetorial Siderurgia	Ribas do Rio Pardo, MS

Dados mais recentes, fornecidos pela EPE através do Balanço Energético Nacional 2020, ano base 2019, apresentam que a autoprodução de energia elétrica no setor de ferro gusa e aço chegou a 12.691GWh em 2019 a partir das mais diversas fontes.

De acordo com a metodologia proposta pela ABM (2009), a aciaria é uma das áreas que mais consome esse insumo em uma usina siderúrgica. Uma aciaria a oxigênio conhecida como aciaria LD, corresponde a 40% da matriz energética de toda a aciaria como apresentado na Figura 3.1.

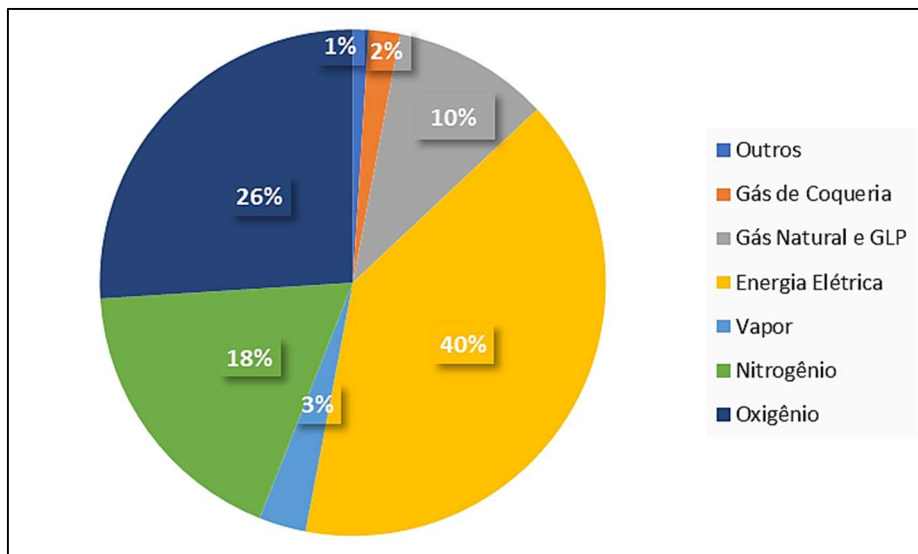


Figura 3.1 - Matriz energética de uma aciaria do tipo LD.
Fonte: Adaptado de Araújo, 2015.

Tanto em aciarias LD quanto aciarias elétricas, existem perdas de energia através da exaustão de gases dos fornos, vazamento de escórias, torres de refrigeração, dentre outras fontes (LAMBERTERIE, 2014; MALFA, 2014). A Figura 3.2 apresenta o balanço energético básico de um forno elétrico a arco (FEA). Observe que cerca de 22%, 140kWh/t, da energia total é dissipada pelos gases de exaustão.

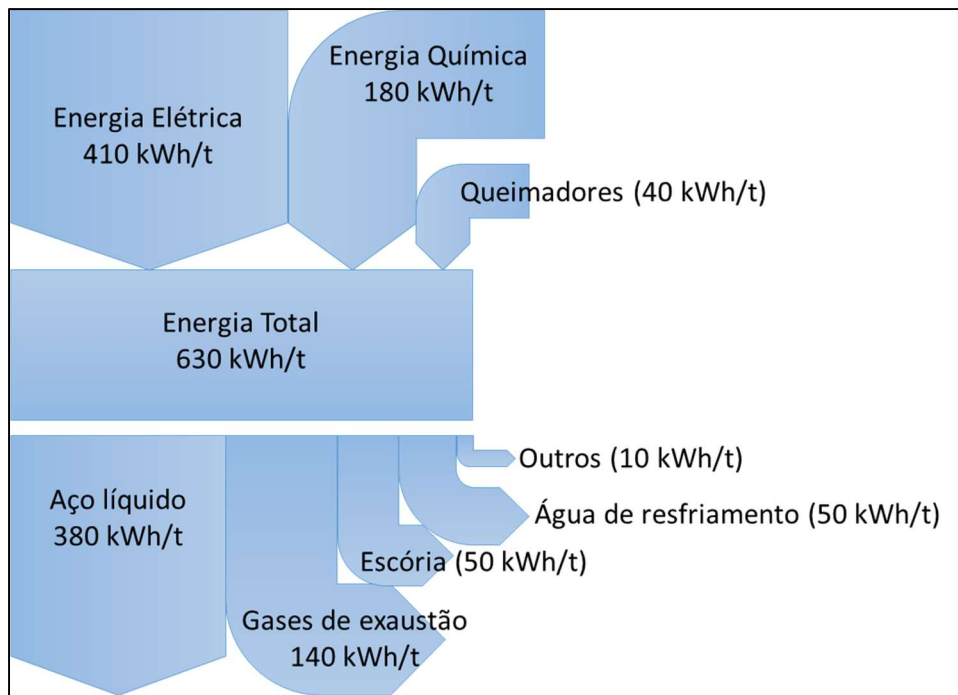


Figura 3.2 - Balanço energético básico de um forno FEA.
 Fonte: Adaptado de Sandberg, 2005

No setor siderúrgico a cogeração de energia elétrica a partir de gases provenientes do processo já está bem difundida. O arranjo mais usual nas usinas são as de turbinas que operam segundo o ciclo Rankine (algumas de acordo com o ciclo Rankine Regenerativo), com pressão próxima a 100 bar e temperatura de 500°C, aproximadamente. As usinas mais eficientes atingem uma eficiência de conversão próxima a 35% (ABM, 2009). Empresas como a Primetals® já possuem sistemas em operações para recuperação de energia elétrica acoplados ao sistema de lavagem e resfriamento dos gases do FEA recuperando energia a uma taxa de até 100 kWh/t de aço líquido. (PRIMETALS TECHNOLOGIES, 2016).

3.2. Recuperação de energia a partir das escórias

Devido ao alto valor de entalpia da escória em altas temperaturas, muitos estudos estão sendo realizados a partir da recuperação tanto da matéria-prima, quanto da energia contida na escória. Segundo Lambeterie (2014), a 1500 °C a escória contém cerca de 1,6 GJ/t chegando à recuperação energética com 65% de eficiência, aproximadamente (BARATI, 2011). A recuperação de energia a partir do calor da escória, caso fosse desenvolvida comercialmente, é estimada em cerca de 0,35 GJ/t. A Figura 3.3 apresenta,

esquemáticamente, o processo Sumitomo[®] o qual capta o calor retirado da escória para aquecimento de uma caldeira, para uma posterior geração de energia elétrica.

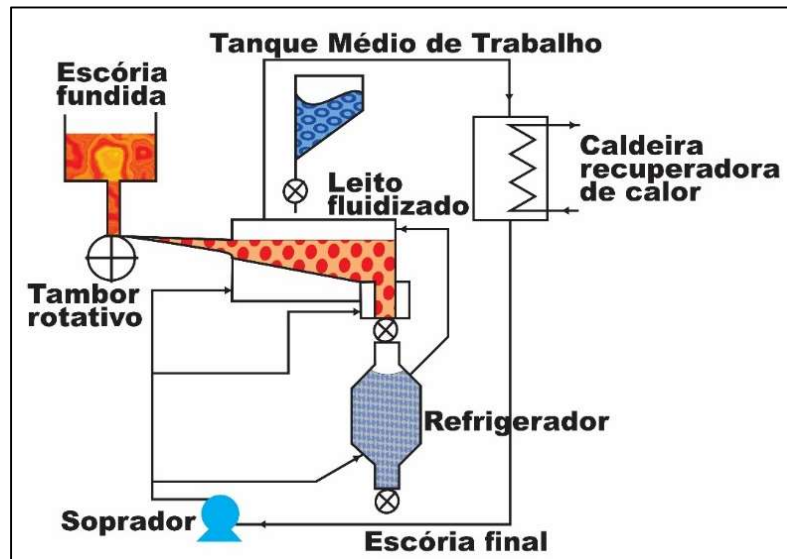


Figura 3.3 - Processo Sumitomo.
Fonte: Adaptado de Yu, 2016.

3.3. Análise energética na indústria siderúrgica

Diversos autores relatam que algumas irreversibilidades do processo siderúrgico são complexas e difíceis de identificar devido ao conjunto de reações químicas, combustão e transferência de calor, assim para reduzir as perdas energéticas, necessita-se reutilizar o calor dos processos.

A Tabela 3.3 apresenta um balanço energético simplificado, mostrando as perdas energéticas na produção do ferro gusa. Para esta usina integrada, as perdas são da ordem de 7,75 GJ/t de aço bruto, o que demonstra que há oportunidades para melhorias do processo.

Tabela 3.3 - Balanço energético de produção de ferro gusa de usina siderúrgica integrada com capacidade de 600 mil toneladas de aço/ano.

Fonte: Adaptado de Soares, 2011

Entradas	Energia (GJ/t)	Saídas	Energia (GJ/t)
Carvão	11,750	Gás de alto-forno	5,872
Finos de Carvão	4,106	Produtos de combustão	2,295
Gás de alto-forno	1,751	Finos de Carvão	1,232
Energia Elétrica	0,479	Ferro-gusa líquido	0,981
Gás natural	0,280	Pó coletor	0,250
Vapor	0,017	Água de reposição	0,044
		Perdas Térmicas	7,757
Total	18,385	Total	18,385

Para uma aciaria elétrica, segundo Soares (2011), têm-se perdas energéticas inferiores a 1 GJ/t de aço bruto conforme a Tabela 3.4. Neste processo de produção é sabido que existem diversos estudos com o objetivo de melhorar a eficiência. Contudo, ainda existem outros pontos onde a perda energética é significativa e ainda não há soluções conclusivas sobre a recuperação de calor no vazamento do aço para a panela ou no aquecedor de panelas.

Tabela 3.4 - Balanço energético de uma aciaria do tipo LD de usina siderúrgica integrada com capacidade de 600 mil toneladas de aço/ano.

Fonte: Adaptado de Soares, 2011

Entradas	Energia (GJ/t)	Saídas	Energia (GJ/t)
Gusa líquido	0,940	Gases do LD	0,928
Energia Elétrica	0,377	Produtos de combustão	0,251
Gás natural	0,365	Água de reposição	0,021
Gás de alto-forno	0,241		
Vapor	0,097	Perdas Térmicas	0,819
Total	2,020	Total	2,020

A Tabela 3.5 apresenta o balanço energético na laminação de uma usina siderúrgica integrada. Nota-se que assim como as demais áreas, há oportunidades de estudos para a geração de energia a partir de fontes de calor.

Tabela 3.5 - Balanço energético de uma laminação de uma usina siderúrgica integrada com capacidade de 600 mil toneladas de aço/ano.

Fonte: Adaptado de Soares, 2011

Entradas	Energia (GJ/t)	Saídas	Energia (GJ/t)
Gás de alto-forno	1,202	Produtos de combustão	0,489
Gás natural	0,968	Vapor	0,229
Energia Elétrica	0,211	Água de reposição	0,009
Vapor	0,003	Perdas Térmicas	1,657
Total	2,385	Total	2,385

3.4. Evolução da termoeletricidade

Descoberta em 1821 por Thomas Seebeck acidentalmente, a termoeletricidade, que é um fenômeno reversível, consiste na conversão de energia térmica em energia elétrica através de um gradiente de temperatura podendo ser dividido em três efeitos: efeito Seebeck, efeito Peltier e efeito Thomson (SANTOS, 2010; ALVES, 2008; MOURA, 2010).

Estudando a união nas pontas de dois condutores metálicos diferentes unidos pelas pontas ao aplicar uma diferença de temperatura entre eles, fazia com que uma agulha que estava entre os mesmos fosse deslocada como mostrado na Figura 3.4. Assim, Seebeck publicou seus resultados afirmando que condutores (ou semicondutores) diferentes produzem uma tensão quando as extremidades estão unidas e sob um gradiente de temperatura (ALVES, 2008; MARTINS *et al.*, 2011).



Figura 3.4 - Anel de Seebeck com o desvio de agulhas magnéticas após aquecimento de uma das junções de dois metais diferentes.

Fonte: Adaptado de Fernandes, 2012

Ao aplicar um gradiente térmico nas extremidades do condutor (semicondutor) ocorre um funcionamento como o de uma bomba de energia. Os elétrons se movem para região mais estável, ou seja, com menor nível de energia fazendo com que a concentração de íons positivos aumente na outra região gerando uma tensão elétrica proporcional à diferença de temperatura como mostrado Figura 3.5 Inicialmente Seebeck acreditou que a temperatura originava um campo magnético, uma vez que não se imaginava que a corrente elétrica poderia gerar um campo magnético (PIEIDADE, 1997).

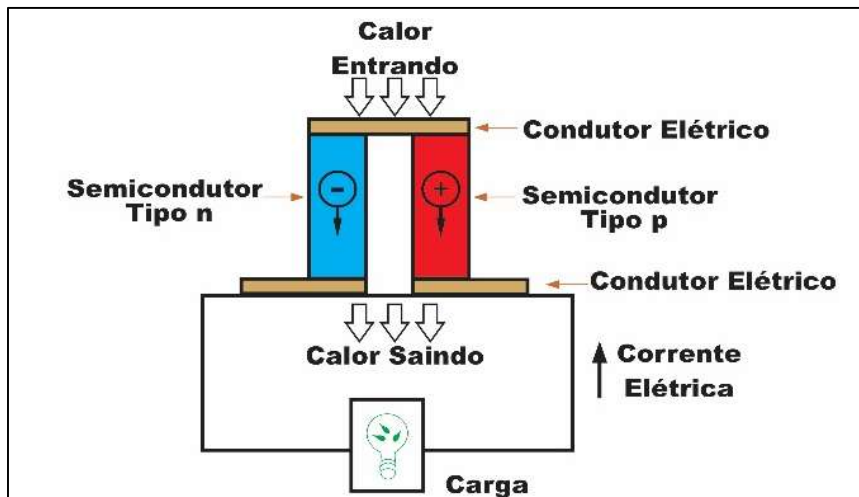


Figura 3.5 - Esquema do Efeito Seebeck.
 Fonte: Adaptado de Farias, 2009.

Alguns anos depois, Jean Charles Athanase Peltier, verificou um efeito contrário ao relatado por Seebeck. Utilizando uma montagem com a mesma configuração que Seebeck usara, Peltier inverteu o procedimento. Ele forneceu uma corrente elétrica ao sistema e constatou uma variação na temperatura, porém houve uma dificuldade em efetuar uma relação entre a corrente elétrica e dissipação por efeito joule entre o calor absorvido e calor liberado. (MARTINS, 2011)

Apenas em 1855, William Thomson, conhecido como Lord Kelvin, conseguiu relacionar as experiências conduzidas por Peltier e Seebeck através de coeficientes. Além disso, Thomson referenciou a existência de outro fenômeno para condutor homogêneo conhecido como efeito Thomson, que é dado pela reversibilidade de aquecimento ou arrefecimento quando há um gradiente de temperatura e fluxo de corrente elétrica ao mesmo tempo (FERNANDES, 2012).

3.5. Efeito Seebeck

O efeito de Seebeck pode ser descrito como um termopar por ter uma junção metálica de dois metais diferentes que geram diferença de potencial. De acordo com o gradiente térmico medido através da junção em circuito aberto haverá a produção de tensão elétrica caracterizando, assim, o efeito Seebeck como apresentado na Equação 3.1. Para se medir a eficiência de tal geração, quando a geração de tensão produzida em um gradiente térmico (ΔT) de 1 Kelvin (K), tem-se o coeficiente de Seebeck (α) como mostrado na Equação 3.1 em V/K ou em $\mu\text{V/K}$:

$$\Delta V = \alpha(T_1 - T_2) \quad \text{Equação 3.1}$$

Sendo: α o coeficiente de Seebeck [V/K]; T_1 e T_2 são as temperaturas em que o material está submetido [K].

O coeficiente de Seebeck pode ser calculado por:

$$\alpha = (\Delta V / \Delta T) \quad \text{Equação 3.2}$$

Para pequenas variações de temperatura, o coeficiente é praticamente linear podendo obter valores negativos e positivos de acordo com o sentido da força eletromotriz criada. Ou seja, no sentido horário α é positivo e no sentido anti-horário α é negativo. Há de se ressaltar que o coeficiente de Seebeck é uma propriedade do material e é apresentado nas Tabela 3.6 para metais, ligas e semicondutores (FERNANDES, 2012).

Ao considerar um bom material termoelétrico, o coeficiente de Seebeck deve estar entre 100mV/K e 300mV/K por isso é necessário ligar muitos pares termoelétricos em série para atingir tensões mais altas (UCHIDA *et al.*, 2008).

Ao aquecer uma das extremidades dos materiais termoelétricos, a energia transmitida faz com que os elétrons da última camada saltem das suas órbitas obtendo elétrons livres resultando em elétrons de cargas positivas mais próximas à extremidade quente e uma densidade maior de cargas negativas na extremidade fria como mostrado na Figura 3.6.

Tabela 3.6 - Coeficientes de Seebeck para metais/ligas e semicondutores (base de comparação: Platina).
 Fonte: Adaptado de Fernandes, 2012.

Metais/Ligas	Coef. de Seebeck (α)	Semicondutores	Coef. de Seebeck(α)
Antimônio	47	Se	900
Níquel Crômio	25	Te	500
Cádmio	7,5	Si	440
Tungstênio	7,5	Ge	300
Ouro	6,5	Bi ₂ Te ₃ (tipo n)	-230
Prata	6,5	Bi _{2x} Sb _x Te ₃ (tipo p)	300
Cobre	6,5	Sb ₂ Te ₃ (tipo p)	185
Rádio	6,0	PbTe	-180
Tântalo	4,5	Pb ₀₃ Ge ₃₉ Se ₅₈	1670
Chumbo	4,0	Pb ₀₆ Ge ₃₆ Se ₅₈	1410
Alumínio	3,5	Pb ₀₉ Ge ₃₃ Se ₅₈	-1360
Carvão	3,0	Pb ₁₃ Ge ₂₉ Se ₅₈	-1710
Mercúrio	0,6	Pb ₁₅ Ge ₃₇ Se ₅₈	-1990
Platina	0	SnBb ₄ Te ₇	25
Sódio	-2,0	SnBi ₄ Te ₇	120
KOH	-9,0	SnBi ₃ Sb ₁ Te ₇	151
Níquel Cu	-15	SnBi _{2,5} Sb _{1,5} Te ₇	110
NiMnFe (constantan)	-35	SnBi ₂ Sb ₂ Te ₇	90
Bismuto	-72	PbBi ₄ Te	-53

De acordo com a Figura 3.6, a movimentação de elétrons livres ocorrerá até que o equilíbrio dinâmico seja atingido, ou seja, quando as temperaturas de uma extremidade e a outra têm a mesma temperatura. Por este motivo, quando se fala em geração de energia elétrica a partir de módulos termoelétricos, um sistema acoplado para manter uma variação de temperatura é fundamental para manutenção da diferença de potencial. (FERNANDES, 2012)

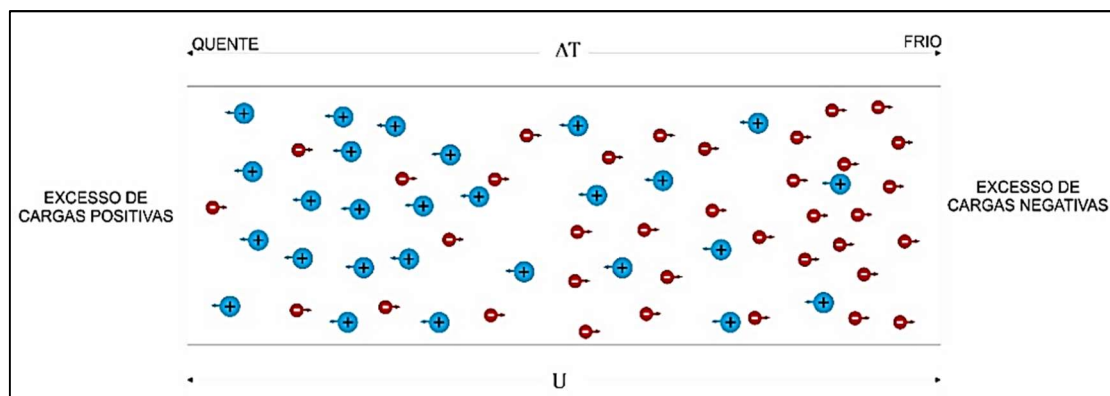


Figura 3.6 - Movimentação de elétrons de uma fonte quente para uma fonte fria.
 Fonte: Adaptado de Fernandes, 2012.

3.6. Efeito Peltier

Após a descoberta de Seebeck, Jean Charles Peltier propôs o efeito inverso ao de Seebeck: ao introduzir uma corrente elétrica contínua a uma junta bimetálica faz com que uma extremidade esfrie e a outra aqueça. O calor liberado na junção faz com que a corrente elétrica flua da esquerda para a direita. Se o contrário ocorresse, o calor absorvido na junção faz com que a corrente elétrica flua da direita para a esquerda, como mostrado na Figura 3.7.

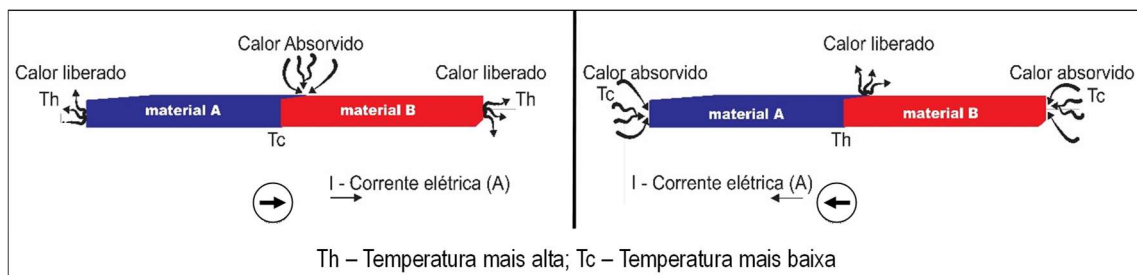


Figura 3.7 - Funcionamento do Efeito Peltier no módulo termoeletrico.
Fonte: Adaptado de Fernandes, 2012

Para Martins *et. al.* (2011), o calor absorvido na junção (Q_c) é a potência térmica transmitida através de uma área de uma espessura sob um gradiente de temperatura de acordo com a condutividade térmica como descrita na Equação 3.3:

$$Q_c = \pi I \quad \text{Equação 3.3}$$

Sendo: Q_c calor absorvido na junção, π coeficiente de Peltier [V] e I corrente elétrica [A].

Nota-se que há uma proporcionalidade entre a corrente elétrica que circula pelos condutores, sendo que a polaridade e tensão são dependentes do gradiente térmico e das propriedades dos materiais usados na confecção (GAO MIN, 2007; BASTOS, 2010).

No efeito Peltier, ocorre uma alteração de entropia das cargas majoritárias que se movimentam no semicondutor através da junção proporcional ao coeficiente de Seebeck para uma corrente constante, o que quer dizer que estão relacionados ao potencial na junção (FERNANDES, 2012).

3.7. Efeito Thomson

Descoberto em 1851, William Thomson relacionou a quantidade de calor gerado em um condutor com a diferença de temperatura simultaneamente ao passar uma corrente elétrica demonstrando que a quantidade de calor transferida é proporcional à corrente elétrica e a diferença de temperatura em um material termoelétrico. Para Thomson, em um condutor homogêneo, percorrido por uma corrente elétrica, existe uma liberação ou absorção de calor proporcional à intensidade de corrente além da liberação de calor por efeito Joule mantendo um gradiente de temperatura no material como descrito na Equação 3.4 (PIEDADE, 1997):

$$q = \beta I \Delta T \quad \text{Equação 3.4}$$

Sendo: β o coeficiente de Thomson [V/K], ΔT variação de temperatura

Com isso Thomson conseguiu relacionar os efeitos de Seebeck e Peltier. O coeficiente de Peltier será igual ao coeficiente de Seebeck multiplicado pela temperatura absoluta, excluindo, apenas, para supercondutores por apresentarem resistência igual a zero à passagem de corrente elétrica obtendo a Equação 3.5, que apesar de não ser considerado muito importante para componentes termoelétricos, segundo Fernandes (2012), o efeito Thomson, não deve ser desprezado em cálculos detalhados.

$$\pi = \alpha T \quad \text{Equação 3.5}$$

3.8. Figura de Mérito (ZT)

A Figura de Mérito foi representada primeiramente no estudo de Edmund Altenkirch no início dos anos de 1900 comparando várias propriedades dos materiais termoelétricos como o coeficiente de Seebeck e a condutividade térmica elétrica. Segundo Gonçalves (2008), para diversos materiais a Figura de Mérito foi quase sempre unitária à temperatura ambiente.

Para caracterizar os materiais termoelétricos foi criada a Figura de Mérito (ZT) que é estabelecida por três características: elevado coeficiente de Seebeck (α), para obter a máxima conversão de calor em eletricidade, alta condutividade elétrica (σ), minimiza o efeito Joule e baixa condutividade térmica (k), contribui para manter o calor numa única

junção mantendo o gradiente de temperatura (ΔT) (ALVES, 2008; HENDRIX, 2006; FLIPSE, 2012). Não há metal que possua as três características da Figura de Mérito (ZT) simultaneamente. Segundo Rowe (1995), a maioria dos metais com elevado coeficiente de Seebeck (α) apresenta um baixo rendimento em termos de conversão termoelétrica.

O trabalho de Bastos (2010) demonstra que há variação da ZT de acordo com a temperatura e a esta é uma característica intrínseca que determina o desempenho de um material termoelétrico, sendo obtida a partir da Equação 3.6.

$$ZT = \frac{\alpha^2}{kR} \quad \text{Equação 3.6}$$

Sendo: α o coeficiente de Seebeck [V/K]; k a condutividade térmica [W/m.K] e R a resistência elétrica [Ω].

O composto de telúrio e bismuto utilizados nos dispositivos termoelétricos possui um valor de (ZT) próximo a uma unidade à temperatura ambiente como apresentado na Figura 3.8.

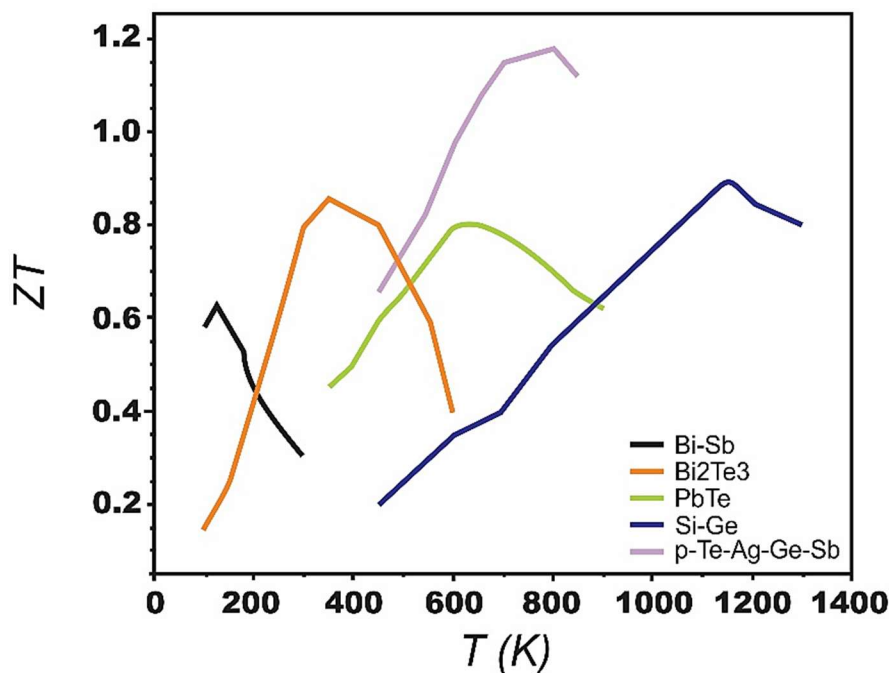


Figura 3.8 - Relação da Figura de Mérito com a temperatura de algumas ligas. Fonte: Adaptado de Fernandes, 2012

O desenvolvimento de novos materiais termoelétricos está intimamente ligado ao aumento do valor da Figura de Mérito dos materiais. A Figura 3.9 apresenta diversos materiais que alcançam valores da Figura de Mérito maiores que 1.

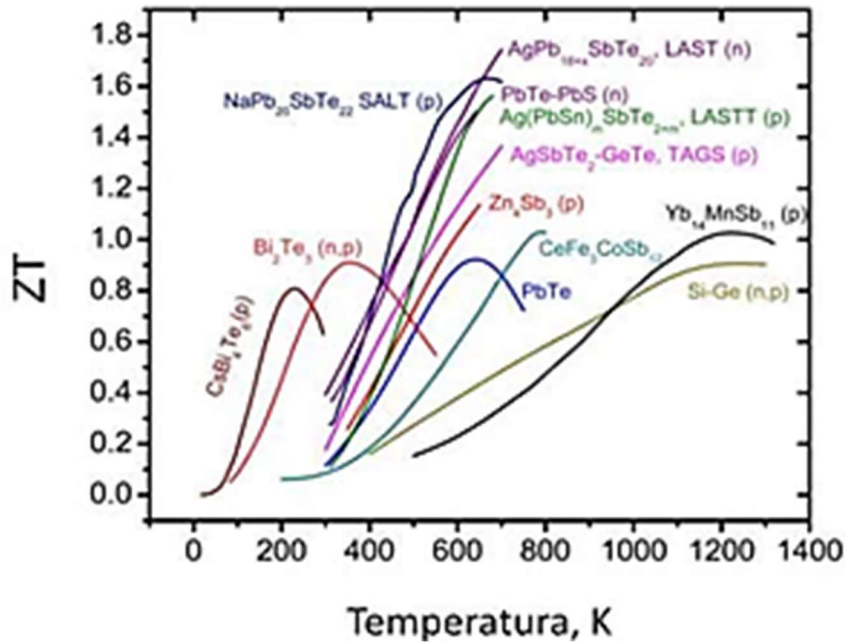


Figura 3.9 - Figura de Mérito de alguns materiais termoelétricos.
 Fonte: Fernandes, 2012

Segundo Fernandes (2012), os melhores valores de Figura de Mérito obtidos em materiais semicondutores dopados por ligas de Bi_2Te_3 , PbTe e SiGe . O telureto de bismuto (Bi_2Te_3) e outras ligas à base de telureto tem melhor resposta para dispositivos termoelétricos de baixa temperatura, inferiores a 260°C , já para temperaturas mais elevadas pode-se utilizar ligas de silício (Si) e silício-germânio (Si-Ge), superiores a 649°C . Para faixa de temperatura intermediária, temperatura entre 260 e 649°C o telureto de chumbo (PbTe). A Tabela 3.7 apresenta valores do coeficiente de Seebeck e Figura de Mérito de acordo com os elementos compostos.

Para Song (2008), utilizando de terras raras pode-se conseguir maiores valores de coeficiente de Seebeck associando a condutividade térmica e condutividade elétrica. A eficiência de conversão de energia térmica em energia elétrica de um módulo termoelétrico está diretamente relacionada à Figura de Mérito por meio da Equação 3.7:

$$\eta = \left\{ \left[\frac{(T_q + 273,15) - (T_f - 273,15)}{(T_f + 273,15)} \right] \cdot \left[\frac{(1 + ZT)^{1/2} - 1}{(1 + ZT)^{1/2} + 1} \right] \right\} \quad \text{Equação 3.7}$$

Sendo: T_q e T_f as temperaturas do lado quente e frio [$^\circ\text{C}$], respectivamente.

Tabela 3.7 - Coeficiente e Figura de Mérito à temperatura ambiente.

Fonte: Fernandes, 2012

Elemento / Composto	Coef. Seebeck α (10^{-4} V/K)	Figura de Mérito
$(\text{Bi}_{2x}\text{Sb}_x)\text{Te}_3$	210	1-3
Bi_2Te_3 (tipo p)	140	-
Si (tipo p)	1300	0.0001
Sb	48	0.03
Ni-Cr(80/20)	25	0.04
Cr	22	0.03
Ni	-20	0.04
Cu-Ni	-35	0.09
Bi	-68	0.3
Bi_2Te_3 (tipo n)	-110 a -250	1-3
$\text{Bi}_2(\text{Se}_x\text{Te}_{3-x})$	-250	-

A Figura 3.10 mostra a relação entre a variação de temperatura, em Kelvin, e o rendimento do módulo termoelétrico.

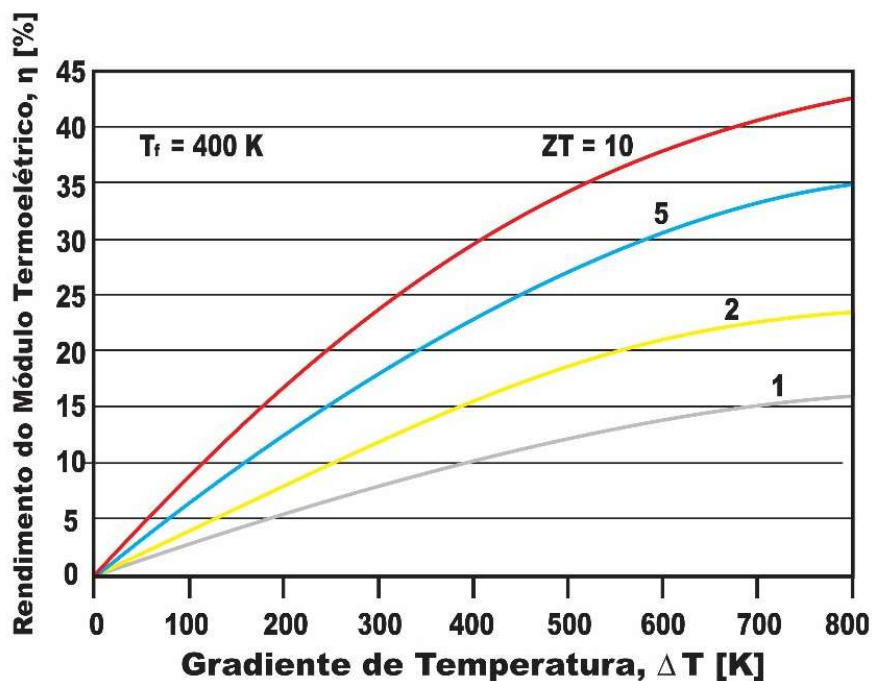


Figura 3.10 - Rendimento do módulo Termoelétrico em relação ao gradiente de temperatura e Figura de Mérito.

Fonte: Adaptado de Hendricks, 2006

A Figura 3.10 mostra que atingindo valores mais altos de conversão menores elementos radioativos serão necessários para manter a mesma produção de energia elétrica, ou seja, maior a eficiência, menor a quantidade de elementos dopantes tornando os módulos mais leves e com menores custos de produção (HENDRICKS, 2006).

3.9. Construção dos módulos termoeétricos

O módulo termoeétrico é constituído de uma matriz formada por diversas junções termoeétricas ligadas em série, para potencializar a tensão gerada na saída o que não ocorre em paralelo, apesar de ocorrer aumento na corrente de saída (HENDRICKS, 2006).

As junções são formadas por material do *tipo-n* e outro do *tipo-p* agrupados em pares formando um conjunto de 3 a 127 termopares, dependendo do módulo termoeétrico, envoltos por uma cerâmica constituídos de condutores a base de cobre que completam a união eletricamente em série e em paralelo gerando corrente contínua absorvendo calor ambiente em uma face enquanto do outro há irradiação (BASTOS, 2010). A Figura 3.11 apresenta o esquema do módulo termoeétrico.

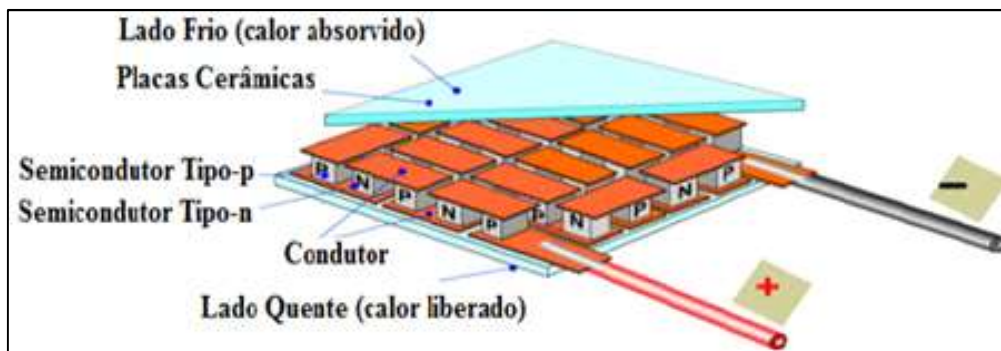


Figura 3.11 – Esquema dos Junções e Faces de um Módulo Termoeétrico.
Fonte: BASTOS, 2010

O desenvolvimento de estruturas chamadas de superredes que são camadas alternadas de duas substâncias contribuindo para a movimentação de elétrons reduzindo a condutividade térmica alcançando, assim, elevados valores de figura de mérito. (FERNANDES, 2012).

Para Ando Junior (2014), com a variação de temperatura com a qual os módulos termoelétricos são submetidos, além de um controle muito específico das variáveis de processo as especificações dos módulos também devem ser levadas em consideração no projeto do módulo. Um dos controles mais significativos é a faixa de temperatura de operação com gradiente térmico entre as faces com valores de até 200 °C dependendo da montagem. Outras especificações a respeito da tensão, corrente e potência que os módulos podem receber e fornecer, bem como as dimensões.

Os módulos termoelétricos encontrados no mercado podem variar de espessura de 3 a 5 mm com cerca de 60 mm de lado alcançando valores de potência que variam de 1 W à 125 W com expectativa de aumentar ainda mais este número (ANDO JUNIOR, 2014).

3.10. Refrigeração termoelétrica

A refrigeração termoelétrica é explicada pelo efeito *Peltier*, efeito oposto ao efeito *Seebeck*, quando ao aplicar uma corrente nos terminais do módulo, mantendo uma diferença entre as faces do módulo termoelétrico. A

Figura 3.12 mostra o esquema de funcionamento do módulo termoelétrico segundo o efeito Peltier (ANDO JUNIOR, 2014).

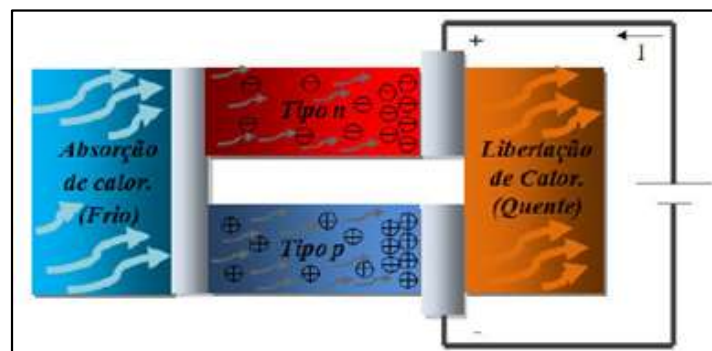


Figura 3.12 - Módulo Termoelétrico refrigerando – Efeito Peltier.
Fonte: ANTUNES, 2011.

Como dito anteriormente, os elétrons que estão distribuídos nos semicondutores *tipo-p* e *tipo-n*, iniciam a passagem de corrente movimentando-se no sentido da face fria para a face quente liberando calor para o ambiente (GAO MIN, 2007).

3.11. Viabilidade Técnica

Segundo Naik-Dhungel (2012), o uso da energia proveniente da indústria tem o maior potencial de geração de energia elétrica a partir do calor desperdiçado. Apenas em 2009 nos Estados Unidos, o setor industrial usou a maior parte de energia somando mais de 30% de toda a energia consumida no setor doméstico correspondendo à cerca de 28×10^{15} BTU, ou seja $8,206 \times 10^{12}$ kWh, sendo que 33% de toda a energia consumida na indústria é perdida como energia térmica para a atmosfera ou em processos de resfriamento tornando os processos menos eficientes e impossibilitando a recuperação do calor para ser usado em outros processos. Grande parte desta quantidade de energia perdida é de baixa qualidade, ou seja, disponível em fluxos a temperaturas abaixo de 149°C ou dissipadas como perda de calor, tornando-a mais difícil de recuperar com a tecnologia atual.

Sabe-se que a eficiência da geração de energia a partir da recuperação de calor excedente é fortemente dependente da temperatura da fonte de calor. De maneira geral, a geração de energia é economicamente viável a partir do calor excedente de média a alta temperatura, isto é, quando a temperatura das perdas alcançam valores superiores a 500F, que corresponde a 260°C de acordo com o citado anteriormente neste estudo. Algumas tecnologias emergentes, como os Ciclos de Rankine entre outras, estão começando a diminuir este limite além de outros avanços nos ciclos alternativos (NAIK-DHUNGEL, 2012).

Com a tecnologia atual, já é sabido que há possibilidade da cogeração de energia elétrica a partir da energia que hoje é dissipada. A Tabela 3.8 apresenta dados consolidados de acordo com a classificação de temperatura, a fonte de calor e a tecnologia comercial de recuperação do calor dissipado (NAIK-DHUNGEL, 2012).

Tabela 3.8 - Classificação da temperatura de perdas térmicas de acordo com a fonte.
 Fonte: Adaptado de NAIK-DHUNGEL, 2012

Temperatura	Fonte de perda térmica	Características	Tecnologias comerciais de cogeração a partir de calor residual
Alta (> 649 °C)	<ul style="list-style-type: none"> - Forno elétrico a arco (EAF) - Forno de reaquecimento de aço. - Forno a oxigênio (BOF) - Forno reverberatório para Alumínio e Cobre - Forno de refinamento de Níquel e Cobre - Forno de fusão de vidro - Forno cubilô - Forno de coque - Incineradores - Plantas de hidrogênio 	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada qualidade de calor - Elevada transferência de calor - Elevada eficiência de geração de energia - Contaminantes mecânicos e químicos 	<ul style="list-style-type: none"> - Caldeiras de calor residual e turbinas a vapor
Média (260 a 649 °C)	<ul style="list-style-type: none"> - Fluxos de escape do motor primário - Turbina a gás - Motor alternativo - Fornos de tratamento térmico - Fornos (Secagem, Cozimento, Cura) - Fornos de cimento 	<ul style="list-style-type: none"> - Geração de energia de média eficiência; - Contaminantes químico e mecânico (algumas correntes como fornos de cimento). 	
Baixa (< 260 °C)	<ul style="list-style-type: none"> - Caldeiras - Fornos de etileno - Condensado de vapor - Água de refrigeração - Portas do forno - Fornos de recozimento - Compressores de ar - Motores CI; - Condensadores de refrigeração. - Fornos de baixa temperatura - Líquidos ou sólidos a quente do processo 	<ul style="list-style-type: none"> - Energia contida em numerosas pequenas fontes; - Baixa geração de energia eficiências; - Recuperação de fluxos de combustão limitado devido à concentração de ácido se as temperaturas forem reduzidas abaixo 121 °C. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ciclo Rankine Orgânico (> 300 de fluxos gasosos, > 79 °C de fluxos de líquidos); - Ciclo de Kalina (> 93 °C).

Como uma tecnologia ainda em desenvolvimento, o uso de módulos termoelétricos na recuperação de calor ainda não pode ser considerado em um estudo como esse, porém, deve-se notar que para aplicações de baixas e médias temperaturas, o uso dos módulos termoelétricos pode ser viável.

Tomando como base a quantidade de depósito de patentes gerados desde que 1974 até 2020, pesquisando de maneira simples por “*seebeck effect*” na plataforma www.lens.org nota-se que houve um crescimento vertiginoso a partir do ano 2000 em diante como pode ser sintetizado na Figura 3.13, o que demonstra que tal tecnologia tem sido considerada como mais uma interessante alternativa para a cogeração de energia elétrica. A partir de 2015, aproximadamente, nota-se uma tendência de queda no número de depósitos, que pode ser visto como um momento de consolidação tecnologia.

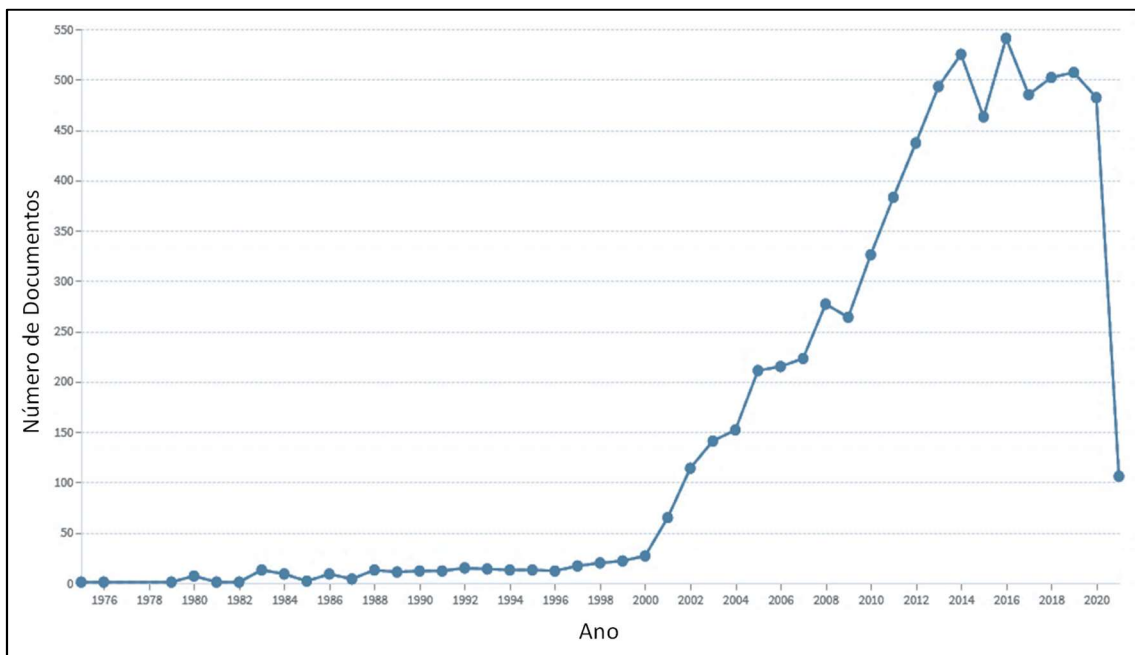


Figura 3.13 - Evolução da quantidade de depósitos de patentes.
Fonte: Lens, 2019.

Ao detalhar a busca dos trabalhos acadêmicos publicados, como mostrado na Figura 3.14, tem-se que a maior quantidade está relacionada à ciência dos materiais e efeito termoelétrico o que demonstra que estudos estão sendo direcionados para consolidar a tecnologia uma vez que apresenta muitas oportunidades para a aplicação da tecnologia tanto em escala industrial ou não.

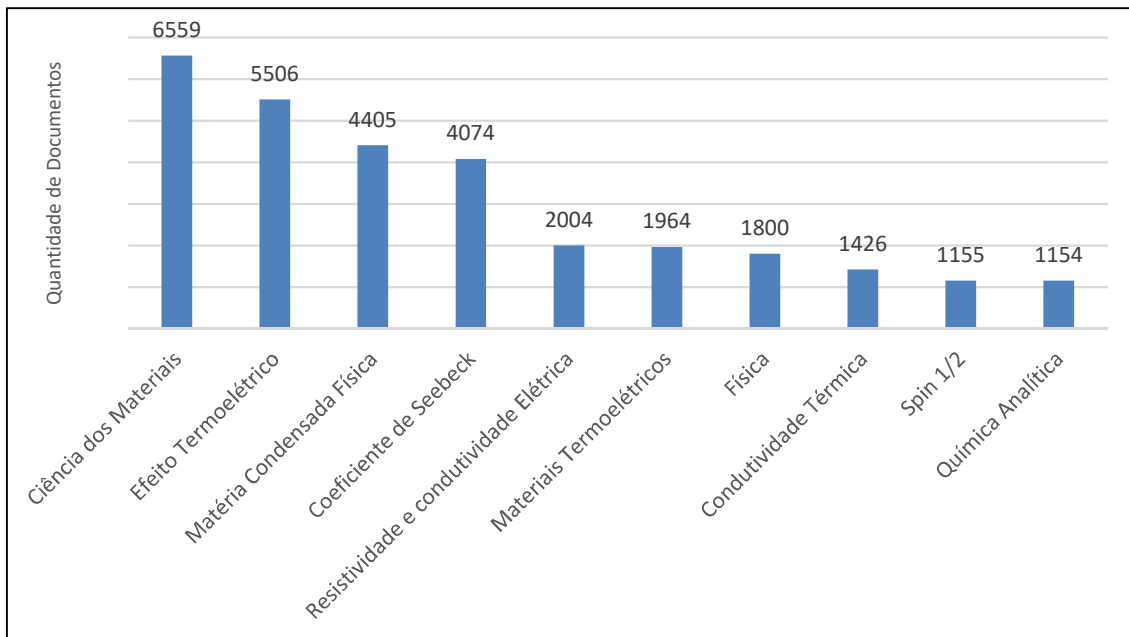


Figura 3.14 - Campo de estudo dos trabalhos acadêmicos nos últimos anos.
Fonte: LENS, 2019.

3.12. Viabilidade Econômica

Em uma análise de viabilidade econômica diversas estimativas devem ser realizadas desde o custo de implantação às tendências mercadológicas aliados à modelos preestabelecidos para obter-se indicadores com os quais auxiliam a tomada de decisão quanto a viabilidade ou não do projeto.

No Brasil existem inúmeras oportunidades e isso se torna uma vantagem muito grande em relação aos outros países no âmbito de alternativas renováveis para a geração de energia elétrica, porém como toda nova tecnologia existem dificuldades na aplicação e implantação uma vez que, ainda estão em desenvolvimento.

Segundo Nascimento e Alves (2016), que cita os relatórios da CEMIG e WWF (2012), em grande parte dos casos, um mercado consolidado junto a outras tecnologias de implantação destas fontes, como apresentado na Tabela 3.9, favorecem a importação de tecnologias de outros países.

Tabela 3.9 - Custo estimado para implantação das fontes renováveis de energia.
 Fonte: Adaptado de NASCIMENTO e ALVES, 2016

Fonte	Custos de Instalação (R\$/kW)	Tendência da evolução dos custos nos próximos 10-15 anos
Biomassa (cana-de-açúcar)	3000,00	↓ (Diminuir)
Eólica	3350,00	↓ (Diminuir)
Geotérmica	3000,00	→ (Manter-se)
Hidráulica - Usinas Hidrelétricas (UHEs) acima de 30MW instalada	3450,00	↑ (Aumentar)
Hidráulica – Pequena Central Hidrelétrica (PCH) 1 a 30 MW instalada	5000,00	→ (Manter-se)
Mar (Ondas)	9800,00	↓ (Diminuir)
Mar (Correntes Marítimas)	7770,00	↓ (Diminuir)
Solar (UFV)	5100,00	↓ (Diminuir)

A evolução da competitividade das fontes de energia renováveis tem aumentado desde 2010 e em 2016 apenas a energia solar tinha um custo médio maior que a banda de custos praticados pelas fontes de energia à base de combustíveis fósseis (IRENA, 2017). Para Siqueira (2018), de acordo com o estudo feito entre a *German Wind Energy Association* (BWE) e o *Greenpeace* (2012), dados corroboram para que os custos de energia elétrica a partir de fontes renováveis para a sociedade sejam menores quando comparado às fontes convencionais quando os subsídios diretos e indiretos do governo para as energias renováveis e convencionais são equalizados como apresentado na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Custos da geração de energia elétrica para diferentes fontes.
 Fonte: Adaptado de SIQUEIRA, 2018

Tipo de Geração	Custo
Energia Eólica	R\$ 376,65/MWh
Energia a partir de hidrelétricas	R\$ 353,40/MWh
Energia a partir de centrais a carvão convencionais	R\$ 688,20/MWh
Energia a partir de centrais termoeletricas	R\$ 762,60/MWh
Energia a partir de centrais a gás	R\$418,50/MWh

* Valor de conversão R\$ 1,00 = €4,65. (Referência dia 20/01/2020)

Equalizando os subsídios o governo daria mais competitividade às novas tecnologias para energias renováveis e seria mais adequado também uma vez que, a geração de energia elétrica a partir de fontes convencionais está anos à frente de desenvolvimento.

Há de se ressaltar que, para uma oferta de subsídios por parte de um governo existem muitas variáveis que são levadas em consideração buscado, principalmente, um balanço entre as necessidades do país e as perspectivas de crescimento de acordo com o cenário econômico, político, histórico, cultural e de impactos ambientais das alternativas de fonte energética além de um nível de retorno financeiro aceitável para o investidor (IRENA, GWEC, 2013).

3.13. Investimento

O investimento em um negócio é diluído em todas as fases do projeto e deve ser estimado no planejamento do negócio sendo a somatória de todas as despesas que serão realizadas desde os primeiros levantamentos até a iniciação do projeto. Para Cruz (2020), as ferramentas mais utilizadas na avaliação de projeto se baseiam no uso de indicadores de qualidade como valor presente líquido (VPL), tempo de recuperação de capital (*PAYBACK*), taxa interna de retorno (TIR) e fluxo de caixa. Ele ainda completa em seu estudo que, do ponto de vista do mercado financeiro, utiliza-se a taxa de atratividade (TMA), que é um referencial de rendimentos para comparar com os indicadores mencionados e verificar se a viabilidade está alinhada à expectativa do investidor. Neste trabalho a TMA não será levada em consideração. Entre todas as variáveis mencionadas há ainda os custos de manutenção e depreciação dos bens.

3.14. Investimento Inicial

O investimento inicial é a soma de todo o recurso necessário para a compra de equipamentos, matérias-primas e até a implantação das instalações. Muito se usa os termos CAPEX e OPEX, que designam a parte do capital de investimento em bens de capital e as despesas operacionais respectivamente.

CAPEX é a sigla em inglês da expressão "*Capital Expenditure*", que significa "investimento em bens de capital" e designa o montante de recursos investidos na aquisição ou melhoria de bens (máquinas, equipamentos, instalações, terrenos

e demais itens de investimento fixo) de uma determinada empresa. (LAURÍA, 2013).

3.15. Custo de Manutenção

Os custos de manutenção são determinados por todos os gastos vinculados a manter o negócio, ou seja, sistema operando. Neste contexto os custos são o OPEX, determinados por todas as despesas geradas, sejam elas custos fixos ou variáveis ao longo do tempo. Neste momento os valores da depreciação do bem não são levados em consideração e são contabilizados a parte.

OPEX é a sigla em inglês da expressão “*Operational Expenditure*”, que significa “despesas operacionais” e designa o montante de recursos gastos (custos ou despesas) necessários para o funcionamento de uma empresa. Portanto OPEX é o gasto cotidiano (custo ou despesa, conforme a destinação) realizado constantemente para manter tanto o funcionamento das atividades do negócio, envolvendo custos com manutenção de equipamentos, custos com empregados, combustíveis, entre outros, além das despesas gerais como as da alçada administrativa, comerciais e tributárias, quanto os gastos para realização dos serviços contratados com terceiros (LAURÍA, 2013).

3.16. Fluxo de Caixa

O fluxo de caixa é a projeção das as entradas e a saídas de despesas por um determinado período de tempo, seja baseado por tempo de execução de projeto ou por dias ou meses.

Por se tratar de um fluxo, a estrutura desta ferramenta financeira é flexível de acordo com a necessidade do negócio a fim de aumentar o controle em uma tomada de decisão com clareza quanto às possibilidades e do entendimento de como a saúde financeira do projeto empreendimento está. (SEBRAE, 2011)

3.17. Payback

O *payback* ou tempo de retorno é uma ferramenta utilizada para verificar o tempo de retorno do investimento inicial, ou seja, demonstra financeiramente os ganhos efetivos que o investimento trará. Segundo Abreu Filho et al., 2007 o *payback* é o tempo necessário para que todo o investimento realizado seja obtido através das operações do projeto.

3.18. Valor Presente Líquido (VPL)

O valor presente líquido (VPL) é uma das possíveis técnicas para realizar o orçamento de capital para uma empresa, ou seja, o VPL corresponde a um método sofisticado de análise de investimentos (GITMAN, 2001). O VPL de um projeto de investimento pode ser definido como a soma algébrica dos valores descontados do fluxo de caixa a ele associado como mostrado na Equação 3.8. Em outras palavras, é a diferença do valor presente das receitas menos o valor presente dos custos. Neste contexto, este indicador traz para o presente a expectativa de todos os fluxos de caixa a uma dada taxa de desconto após a subtração do investimento inicial. Para Zanin, Bugatini (2012) e Abreu Filho (2003), esse método é um dos mais utilizados na tomada de decisão, interpretando de maneira fácil os resultados por profissionais da área de investimento em projetos.

$$VPL = -CF_0 - \sum \frac{CF_j}{(1+i)^n} \quad \text{Equação 3.8}$$

Sendo: CF_0 - investimento inicial; CF_j - fluxo de caixa esperado; i - taxa de desconto; n - período do movimento do Fluxo de caixa.

Para Rossarola (2016) o VPL indica três possíveis cenários:

- **VPL < 0: projeto inviável, pois neste cenário os retornos do projeto não recuperam o valor investido no prazo considerado pelo investidor;**
- **VPL = 0: não há vantagem em se investir o capital nessa circunstância, pois o retorno apenas devolve o que foi investido, sem lucro;**
- **VPL > 0: projeto viável, pois o retorno gerado recupera o capital e ainda pode gerar valor extra.**

3.19. Taxa Interna de Retorno (TIR)

A Taxa Interna de Retorno é a taxa real de juros de operação financeira que faz com que o VPL seja igualado a zero, a qual o valor presente das receitas seja igual aos desembolsos realizados (CRUZ, 2020)

Para Cruz (2020, *apud* ROSS; WESTERFIELD; JORDAN, 2000) quando o VPL é zero, há um equilíbrio econômico de tal modo que não haverá valorização nem desvalorização do investimento.

O uso do termo interna se diz a respeito apenas dos fluxos de caixa de determinado investimento, não levando em consideração taxas oriundas de outras fontes. (LEMES JÚNIOR, RIGO e CHEROBIM, 2002).

Em resumo esta ferramenta é uma análise de previsibilidade que indica se o investimento é viável economicamente e para tanto deve-se conhecer todos os montantes e o fluxo de caixa. Para representar a rentabilidade do projeto em taxa é apresentado a Equação 3.9:

$$TIR = \frac{\sum(Lucro - Imposto)}{Investimento} \quad \text{Equação 3.9}$$

3.20. Retorno de Investimento – *Return of Investment* (ROI)

O tempo de retorno do investimento indica qual o tempo necessário para que os valores investidos sejam recuperados a partir das informações geradas de relatórios contábeis, ou seja, trata-se de uma análise a ser feita após a operação do projeto.

No trabalho de Cruz, 2020, o ROI é apresentado como sendo o tempo de retorno tempo necessário para o investidor recuperar todos os valores investidos no negócio, podendo ser considerado uma modalidade inversa à rentabilidade basicamente. A partir do *payback* o investimento passa a ter retorno financeiro.

Em outras palavras, entende-se por retorno de investimento o valor recebido do projeto após a consolidação do *payback*, ou seja, após o equilíbrio financeiro onde houveram todos os investimentos versus a entrada financeira que ocorre neste determinado instante. Neste caso, deve ser considerado após a implantação do projeto.

3.21. Aplicabilidade da tecnologia termoelétrica

É importante entender que além da viabilidade econômica e técnica, esta tecnologia traz consigo também, uma contribuição para a redução de emissão de gases do efeito estufa para a atmosfera, podendo aproveitar perdas de calor de baixas e médias temperaturas, sendo assim, um aditivo ao processo siderúrgico além da utilização do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) com a comercialização de créditos de carbono.

Para a discussão da viabilidade econômica do uso da termoelectricidade este trabalho irá se basear no trabalho do apresentado por Ando Júnior (2014), onde se estudou a construção de um protótipo termoelétrico para captação de Energias Residuais baseado no efeito Seebeck com um sistema de transferência intercambiável viabilidade utilizando um *payback* simples a partir dos custos estimados da montagem do protótipo. A estimativa de vida útil dos módulos termoelétricos é de 100.000 horas e um valor médio de potência fornecido para o mercado de baixa tensão no valor de R\$ 0,47/kWh. O custo de geração de energia é nulo pois há o aproveitamento de perdas térmicas.

Segundo seu estudo, considerando que um microgerador opera as 100.000 horas geraria 1.649kWh, e, supondo ainda que, toda a potência fosse despachada a o valor médio de mercado, R\$0,47/kWh haveria um retorno financeiro seria de R\$756,18 sem considerar juros e correções monetárias. O protótipo de microgerador custou ao longo da sua montagem e aplicação cerca de R\$4000.00 dentre todos os materiais incluindo os módulos termoelétricos. Assim, para um funcionamento de 24 horas/dia ao longo de toda a vida útil do módulo termoelétrico seriam necessários, aproximadamente, 57 anos para recuperar o investimento utilizando o modelo proposto em seu trabalho.

Segundo Ando Junior (2014), o custo de produção deste protótipo é muito maior quando comparado a um produto seriado e a falta de produtos nacionais, bem como a falta de desenvolvimento da tecnologia oneram os custos finais do projeto.

3.22. Mínimo Valor de Produto (MVP)

Abordagens metodológicas recentes para o desenvolvimento de produto inicial, ou seja, inicialização enxuta ou processos de desenvolvimento de novos produtos enfatizam a capacidade de aprender sobre os problemas reais dos primeiros clientes e a velocidade de aprendizagem. De acordo com o Lean Startup, toda startup deve começar com a construção de um produto mínimo viável (MVP) e usá-lo para validar suas hipóteses sobre as necessidades do cliente. MVP's definidos como produtos com recursos apenas suficientes para reunir aprendizado validado sobre os produtos, é um foco principal nas fases iniciais. Ele desempenha um papel importante não apenas para a equipe de uma startup, mas também para as partes externas interessadas na startup, como usuários em potencial, investidores e mentores. Hoje em dia, MVP é um artefato

fundamental a ser mostrado em uma reunião com um investidor podendo ser de diversos de variados tipos seja por esforços de desenvolvimento, objetivos e estágios em que ocorrem frequentemente. (AGILE PROCESSES IN SOFTWARE ENGINEERING AND EXTREME PROGRAMMING, 2016).

Neste sentido a construção de um protótipo, traz consigo uma facilidade e praticidade para o entendimento de tal tecnologia montada em escala maior na área industrial.

3.23. Produtos Desenvolvidos

Lanterna Termoelétrica

A empresa chinesa Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp., Ltd lançou no mercado diversos produtos incluindo uma lanterna que é alimentada apenas pelo calor do seu corpo sem a utilização de bateria interna. Os módulos termoelétricos incorporados transformam o calor do corpo em eletricidade para alimentar a lanterna quando a pessoa a segura. O calor da sua mão é suficiente para alimentar uma lanterna LED com três peças, nossos módulos de geração de energia em miniatura.

Assim a medida que ocorre a transferência de calor do corpo do usuário para o módulo termoelétrico, a lanterna fornece iluminação por, aproximadamente, 2 minutos a uma dada temperatura ambiente de 25 °C e ainda se leva de 2 a 3 minutos para a lanterna entrar em equilíbrio com o ambiente, ou seja, a lanterna pode ser utilizada até que ocorra o equilíbrio entre os corpos. Dessa maneira, quanto menor a temperatura ambiente maior será o tempo possível de utilização da lanterna. A Figura 3.15 apresenta a lanterna desenvolvida funcionando apenas com a mão do usuário como fonte de energia.

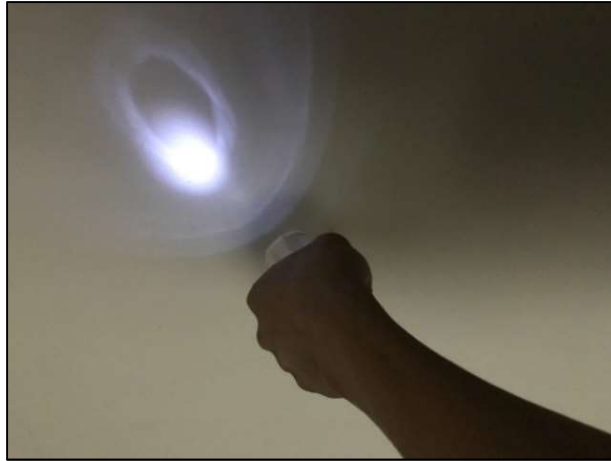


Figura 3.15 - Lanterna utilizando como fonte energia o calor da mão do usuário.
Fonte: Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp, Ltda.
<http://www.thermonamic.com.cn/pro_view.asp?id=879>

A lanterna é composta por um módulo termoeletrico fino acoplado na parede externa da lanterna de tal modo que fica diretamente em contato com a mão de quem a segura maximizando a transferência de calor. A Figura 3.16 mostra a posição do módulo termoeletrico na lanterna de led bem como sua dimensão.

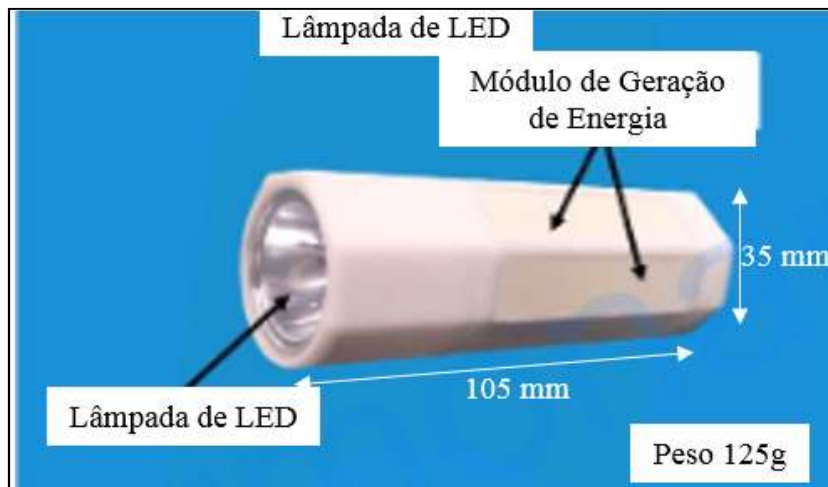


Figura 3.16 – Características da Lanterna de led.
Fonte: Adaptado de Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp, Ltda.
<<http://www.thermonamic.com.cn/FL-001-Colour-Enliish.pdf>>

Forno Gerador

O fogão gerador é o que é um modelo tecnológico do que grande parte do Brasil conhece como lampião. Este é um gerador termoeletrico para qualquer tipo de fogão de

cozinha ou fontes de calor de chama piloto. O gerador pode ser simplesmente colocado no fogão para gerar eletricidade de 5W / 8W / 10W em corrente contínua (DC), do inglês *direct current*, dependendo do arranjo convertendo a fonte de calor coletada da chama do fogão. O gerador está equipado com as saídas de 12VDC e 5VDC para alimentar produtos eletrônicos ou carregar a bateria.

O que difere entre os arranjos de montagem são as quantidades de módulos termoeletricos para o gerador de 5W e 12W, que utilizam 2 e 4 módulos respectivamente. Para o sistema cuja geração é de 8W utiliza-se um arranjo de 4 módulos com potência um pouco menor que aos demais.

Como não há viabilidade em resfriar o módulo termoeletrico com a utilização de água, dedica-se um dos módulos termoeletricos para acionar um ventilador resfriador. A Figura 3.17, apresenta o fogão gerador com uma lanterna acoplada (a) e o ventilador utilizado para resfriar o módulo termoeletrico (b) a fim de manter a maior variação possível de temperatura entre as faces do módulo.



(a)
Figura 3.17 - Fogão gerador com uma lanterna acoplada (a) e o ventilador utilizado para resfriar o módulo termoeletrico

Fonte: Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp, Ltda. <http://www.thermonamic.com.cn/TEG-ST5-5V-1-english.pdf>

A Tabela 3.11 apresenta algumas especificações do fogão gerador de energia elétrica e outras características o sistema.

Tabela 3.11 - Especificações e características do fogão gerador com lanterna acoplada.
 Fonte: Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp, Ltda. <http://www.thermonamic.com.cn/TEG-ST5-5V-1-English.pdf>

Potência de saída	10 Watts
Tensão de Saída	12 VDC adaptador de lanterna de veículo 5 VDC USB
Módulos Termoeletrônicos	4 peças TEHP1-12635-1.2
Dimensões do Sistema	200 mm x 200 mm x 95 mm
Peso	1,5kg

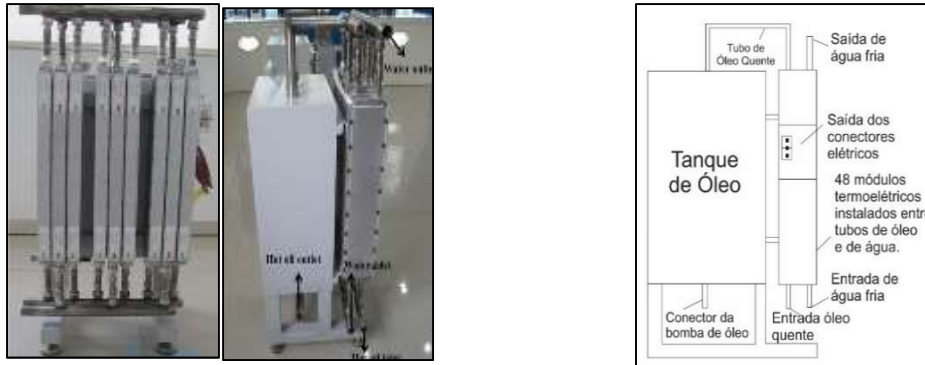
Gerador de energia termoeletrônico

O gerador termoeletrônico de 600Watts funciona com óleo de transferência de calor circulante que distribui o calor a cada módulo termoeletrônico (TEM) para gerar eletricidade. O resfriamento do gerador é feito com água, que produz o calor que passa pelos módulos de maneira eficaz.

O gerador de eletricidade termoeletrônico consiste na circulação de óleo a elevada temperatura dentro de tubos que estão em contato com os módulos termoeletrônicos que geram a energia elétrica. O óleo é bombeado do tanque de armazenamento para as fontes de calor para os locais onde estão os módulos termoeletrônicos e depois flui para os tanques de armazenagem já com temperatura inferior. No outro lado do módulo termoeletrônico, circula-se água para resfriar os módulos. A Figura 3.18 apresenta o esquema de montagem do gerador.

O gerador em pode fornecer 96V com circuito aberto e saída combinada de 48V podendo atingir a potência de 600W (potência esta suficiente para alimentar uma residência com 5 pessoas) caso a fonte de energia alcance valores superiores a 300 °C. A Figura 3.18 apresenta o gerador de energia elétrica (a) e o esquema de funcionamento (b).

A Tabela 3.12 que apresenta a especificação do gerador de energia elétrica com uso de óleo de acordo com o fabricante.



a)

b)

Figura 3.18 - Gerador de energia elétrica (a) e o esquema de funcionamento (b) Esquema do gerador de e fluxo de entrada e saída.

Fonte: Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp, Ltda. <<http://www.thermonamic.com.cn/TEG600W-48V-English.PDF>>

Tabela 3.12 - Especificações e características de gerador com uso de óleo.

Fonte: Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp, Ltda. <<http://www.thermonamic.com.cn/TEG600W-48V-English.PDF>>

Potência de saída (W)	600
Tensão do circuito aberto (VDC)	96
Tensão de saída de carga correspondente (V)	48
Resistência interna (Ohm)	4
Corrente carregada correspondente (A)	12
Temperatura de entrada de óleo quente (°C)	300
Taxa de fluxo (litro/min)	48
Temperatura de entrada da água(°C)	30
Fluxo de entrada de água (litros/minuto)	18
Pressão de trabalho do tanque de óleo (Mpa)	0,25
Pressão de trabalho do tanque de água (Mpa)	0,35
Dimensão (mm)	460 x 400 x 965
Peso (kg)	75

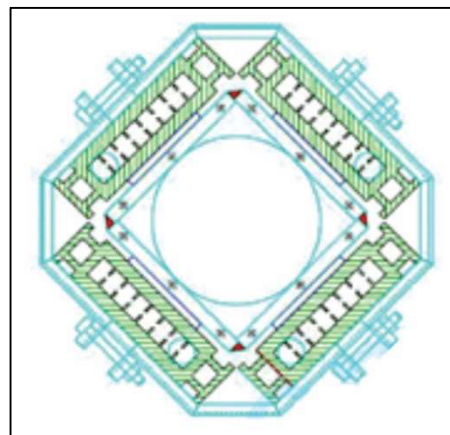
Recuperador de energia dos gases de exaustão

Este sistema consiste em um coletor de calor proveniente dos gases de combustão. Este sistema consiste em 36 peças e um sistema de refrigeração líquida. O coletor de calor captura o calor do gás quente que passa e transfere a energia térmica para cada módulo. Os módulos são resfriados por um sistema de refrigeração líquida circulada podendo gerar 350Watts se o gás quente puder aquecer o lado quente dos módulos a 300°C ou mais.

Segundo o fabricante, até 60% da energia criada por um motor de combustão interna é perdida no calor, sendo que metade vai para exaustão de calor e a outra metade para o sistema de refrigeração. Se capturar a energia térmica de exaustão e a transformá-la em energia elétrica, a eficiência de combustível de automóveis poderá ser melhorada, portanto, as emissões de exaustão poderão ser reduzidas. As Figura 3.19 apresenta o recuperador de energia a partir de gases de exaustão (a) e o posicionamento dos módulos termoeletrônicos acoplados ao sistema (b).



(a)



(b)

Figura 3.19 - Recuperador de energia a partir de gases de exaustão (a) e o posicionamento dos módulos termoeletrônicos acoplados ao sistema (b).

Fonte: Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp, Ltda. Jiangxi, China <<http://www.thermonamic.com.cn/TEG-HL350-24V-English.pdf>>

A Tabela 3.13 que apresenta a especificação do gerador de energia elétrica com uso de óleo de acordo com o fabricante.

Tabela 3.13 - Especificações e características de gerador com uso de óleo.
 Fonte: Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp, Ltda.< <http://www.thermonamic.com.cn/TEG600W-48V-English.PDF>>

Gás Quente	Temperatura > 400°C. Capaz de fornecer calor suficiente para aquecer o coletor acima de 300°C
Potência de saída correspondente (W)	350
Tensão circuito aberto (VDC)	96
Tensão de saída carregada correspondente (VDC)	48
Corrente de saída carregada correspondente (A)	7,2
Resistência carregada correspondente (Ohms)	6,7
Pressão de trabalho do tanque de óleo (Mpa)	0,25
Pressão de trabalho do tanque de água (Mpa)	0,35
Dimensão (mm)	650 x 220 x 215
Peso (kg)	27,8

Relógios de Pulso

A companhia Seiko lançou em dezembro de 1998 500 unidades de um relógio com o qual utilizava a termoeletricidade para gerar a eletricidade necessária para o movimento dos ponteiros. (FERNANDES, 2012).

Baseado na diferença da temperatura corporal do usuário e a temperatura do ambiente, o relógio, apresentado em esquema na Figura 3.20, gera sua própria energia elétrica. Para aproveitar ao máximo a transferência de calor, o dispositivo é composto por 104 módulos.

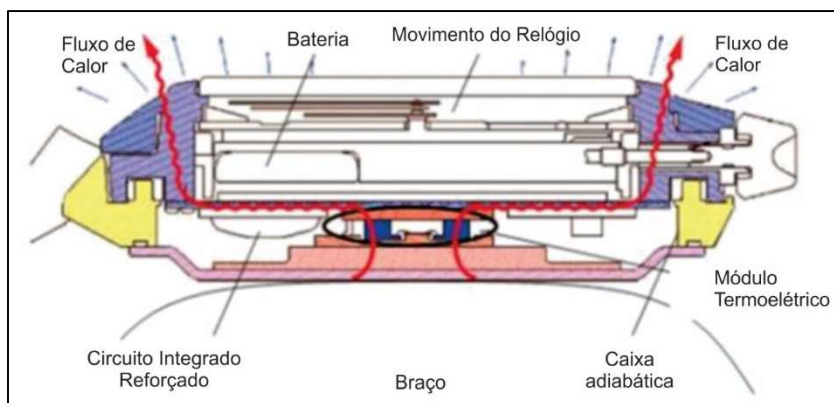


Figura 3.20 - Corte lateral relógio de pulso com utilização do módulo termoeletrico
 Fonte: FERNANDES, 2012.

A tampa traseira do relógio fica em contato constante com a pele do usuário, que no caso é a fonte de calor e na lateral, em contato direto com o ambiente, por onde os módulos termoeletricos são resfriados.

Logo acima dos módulos, fica instalada uma bateria para manutenção de funcionamento do relógio nos períodos quando o relógio não está em contato com a pele do usuário. Cada módulo tem a dimensão de 2,36 x 2,14 mm, alcançado a dimensão total do gerador de 15,4 x 10 mm. A Figura 3.21 apresenta a dimensão do gerador e a disposição dos módulos termoeletricos dentro do gerador. (Anthony, 2020 apud World Photo Press, 2000, pp.67-68).

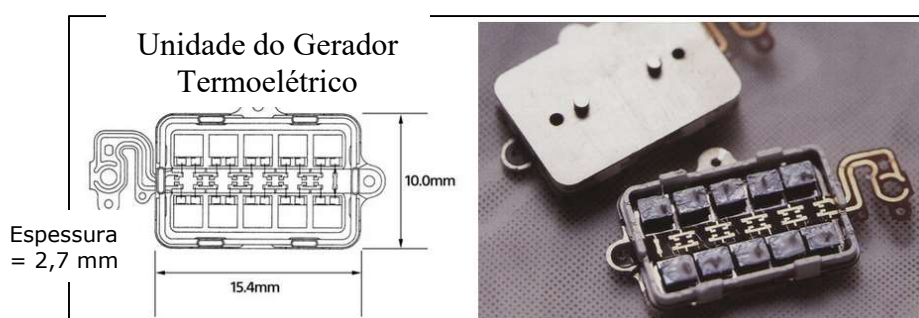


Figura 3.21 - Esquema e disposição da unidade de geração termoeletrica.
 Fonte: Adaptado de Anthony, 2020 apud SEIKO, 2000.

Segundo Fernandes, (2012), a pequena diferença de temperatura de 1-3 °C é suficiente para gerar no dispositivo termoeletrico uma corrente elétrica que fornece energia ao mecanismo elétrico do relógio. A miniaturização do dispositivo termoeletrico é essencial para o desenvolvimento do dispositivo, pois o torna mais

sensível a variação de temperatura e assim mais eficiente na geração de energia elétrica além de ser necessário para atender as especificações necessárias para o funcionamento do relógio de pulso. A Figura 3.22 apresenta o esquema do par termoeétrico (a) e unidade termoeétrica com aumento de 1000x.

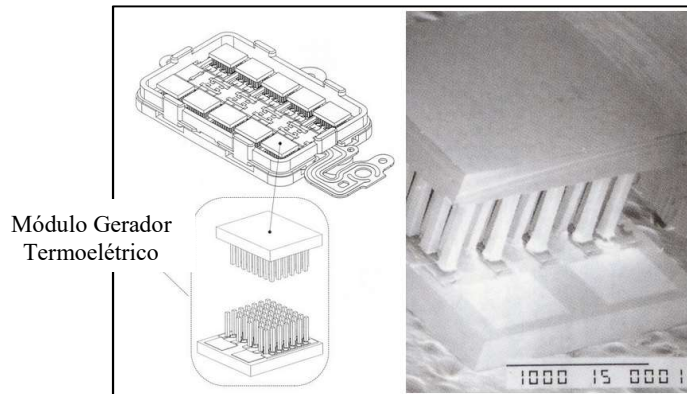


Figura 3.22 - Par de módulo termoeétrico (a) unidade termoeétrica com aumento de 1000x. Dimensão 80 μ m x 80 μ m x 600 μ m.

Fonte: Anthony, 2020 apud SEIKO, 2000 (Adaptado).

Pulseiras Termoeétrica

Para Fernandes, (2012 *apud* Mathieu Servais 2011), a pulseira desenvolvida pela Dyson Energy, armazena a energia e distribui a pequenos componentes eletrônicos por alguns minutos. O funcionamento é semelhante ao relógio de pulso, porém há baterias de Li-Po que armazenam a energia gerada e a partir de uma saída mini USB, pode-se conectar a dispositivos eletrônicos e recarregá-los. Uma maneira simplificada da pulseira é apresentada na Figura 3.23.

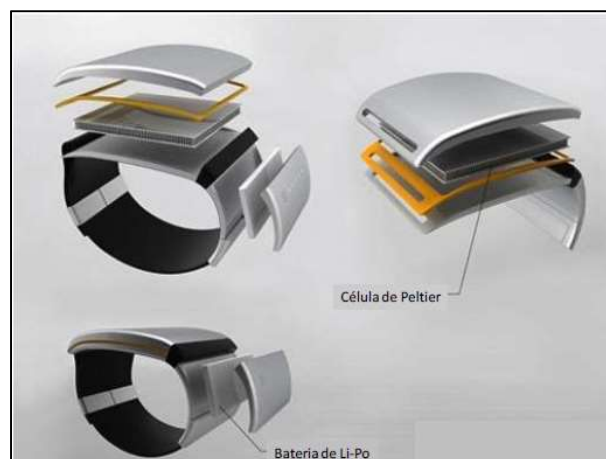


Figura 3.23 - Pulseiras termoeétrica desenvolvida pela Dyson Energy.

Fonte: FERNANDES, 2012 apud MATHIEU SERVAIS, 2011.

Refrigeradores

No caso dos refrigeradores, como dito anteriormente, o funcionamento se baseia no efeito Peltier. Neste caso há uma câmara na qual está em contato com a face fria do módulo termoelétrico que absorve o calor local e transfere ao dissipador, diminuindo assim a temperatura.

Hoje há certa facilidade em encontrar dispositivos refrigeradores que utilizam o efeito Peltier facilitando o transporte de materiais que precisam de resfriamento em locais específicos. O trabalho de Gizmodo (2007) apresenta o dispositivo mostrado na Figura 3.24 e é descrito como um dispositivo podendo alcançar variações de 18 a 20 graus centígrados para resfriamento de latas e garrafas bem como o aquecimento, que seria o efeito Seebeck, alcançando variações de 20 a 22 graus centígrados. A ligação do refrigerador pode ser feita através de ligação USB, podendo ligar a um computador ou até mesmo uma fonte de alimentação



Figura 3.24 - Refrigerador / aquecedor para garrafas, copos e latas com alimentação por porta USB.
Fonte: GIZMODO, 2007.

Outro dispositivo interessante é o carrinho de transporte de alimentos desenvolvido pela Electrolux, como mostrado na Figura 3.25 no qual permite a utilização tanto para refrigeração quanto para aquecimento de alimentos. Nestes tipos de carrinho de transporte há uma pequena bateria que fornece mais autonomia sem a necessidade de ligações elétricas mais robustas.



Figura 3.25 - Carrinho de transporte alimentação quente / frio.
Fonte: ELECTROLUX, 2010.

Dispositivo para Veículo

O dispositivo criado para aquecer e resfriar os assentos dos veículos. A partir de um sistema controlado por sensores e circuitos eletrônicos, o usuário pode ajustar a temperatura que deseja por determinado tempo e independente do período de ano. A este assento foi dado o nome de *Climate Control Seat* (CCS), em português Controle Climático do Assento. Ao longo de todo o assento estão distribuídos sensores que captam os dados térmicos locais que são processados em um microprocessador melhorando consideravelmente o conforto para os passageiros diminuindo, assim, a utilização do ar condicionado, uma vez que pode melhorar com mais agilidade a sensação térmica sentida pelo usuário tanto para dias mais quentes quanto mais frios. (FERNANDES, 2012). A Figura 3.26 apresenta o esquema da disposição dos módulos termoeletrônicos no assento bem como a distribuição de ar.

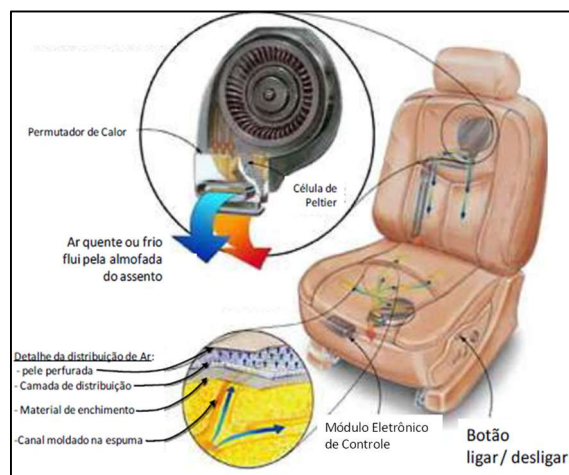


Figura 3.26 - Assento climatizado utilizando módulos termoeletrônicos.
Fonte: FERNANDES, 2012 apud AMERIGON, 2011.

Segundo Fernandes (2012), os primeiros assentos para automóveis que tinham a proposta de aquecimento ou resfriamento utilizavam sistema de resistências e ventilação forçada com aquecimento / refrigeração além de dedicar parte do sistema de ar condicionado quando se optava pela função de refrigeração. Os primeiros assentos desenvolvidos não eram silenciosos devido aos ventiladores e eram relativamente rígidos em relação aos assentos convencionais não climatizados, pois o sistema mecânico ocupava grande parte do assento que antes era ocupado por espuma gerando menor conforto ao usuário.

3.24. Sustentabilidade

Com a crescente aceleração por busca de fontes alternativas de energia renováveis a nível mundial devido às condições climáticas que tem mudado rapidamente nos últimos anos pelo uso de fontes de energia não renováveis e por ser o viés mais forte contra o aquecimento global, muitos esforços estão sendo tomados a fim de minimizar os impactos. Para Aguilar *et al.* (2012), o grande desafio nos próximos anos será o aumento da demanda por energia emitindo menos gases do efeito estufa. A Figura 3.27 mostra a evolução de fornecimento de energias de baixo carbono como fonte primária ao longo dos anos para atingir as concentrações de CO₂ equivalentes indicadas.

Os países em desenvolvimento têm mostrado uma tendência à diversificação de sistemas de produção com o uso de energias a partir de fontes renováveis (BARNWAL e SHARMA 2005).

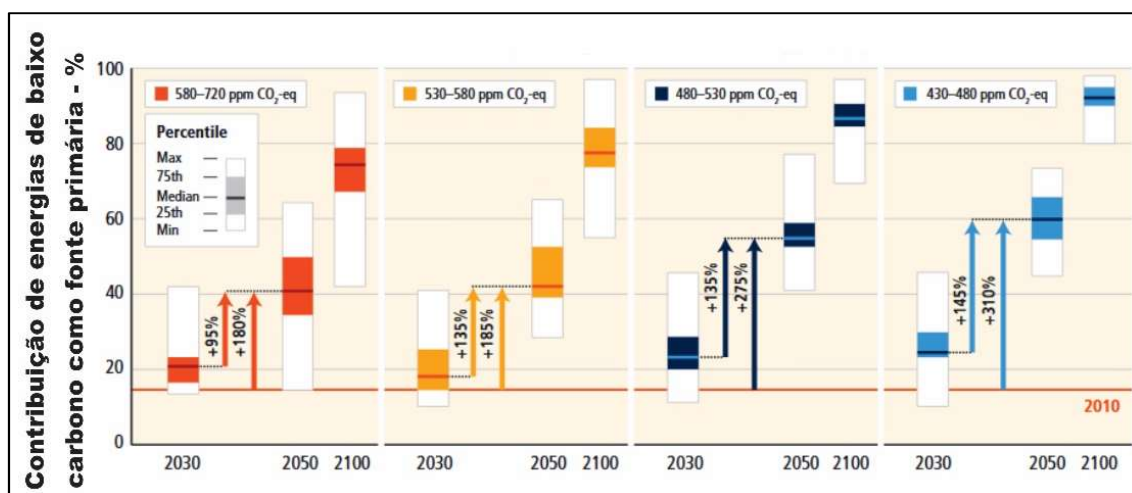


Figura 3.27 - Evolução de fornecimento de energia de baixo carbono como fonte primária ao longo dos anos para atingir as concentrações de CO₂ equivalentes indicadas

Fonte: IPCC, 2015.

Com o objetivo de minimizar os custos e os impactos socioambientais das energias renováveis, o Planejamento de Recursos Integrados (PRI) avalia as dimensões sociais, políticas, ambientais, técnica e econômicas a curto e longo prazo. (TUNDISI & MATSUMURA-TUNDISI, 2011). Segundo Guardabassi (2006), comparando os impactos ambientais de geração de energia elétrica quando se trata de fontes renováveis é menor do que quando comparado ao uso de combustíveis fósseis. Para atendimento às comunidades que estão distantes de fontes energéticas a partir de combustíveis, a energia renovável é uma alternativa muito válida para geração de energia elétrica, entretanto, para manter a utilização contínua e segura deve-se garantir que o uso seja sustentável.

O uso de novas tecnologias tem aumentado consideravelmente mesmo com um desafio muito grande. De acordo com a Figura 3.28, nota-se um aumento no uso de fontes primárias com fontes de baixo carbono já notado quando comparado os anos de 1973 e 2015. Dados divulgados pelo IEA, 2017 mostra que este aumento no uso de fontes de baixo carbono correspondeu, em 2015, a um aumento de 18,5%.

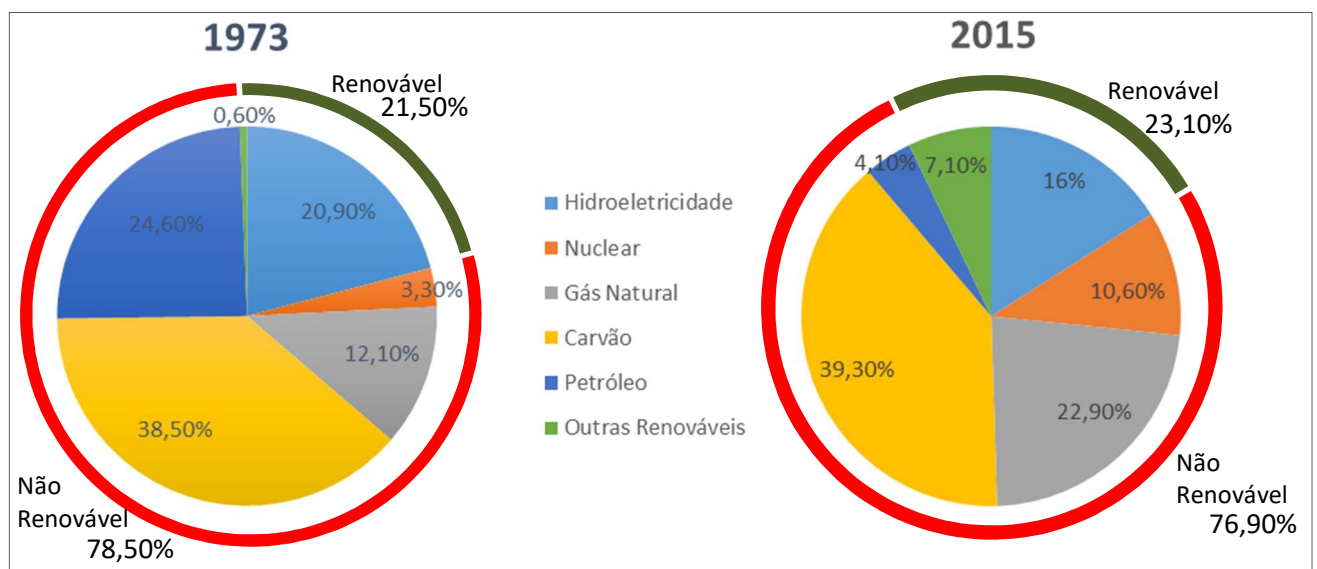


Figura 3.28 - Matriz Elétrica Mundial.
Fonte: Adaptado de IEA, 2017.

Comparando os dados de 1973, ano da grande crise de petróleo, e 2015, nota-se que houve uma evolução no uso de fontes de energia renováveis. Deve-se levar em consideração que assim como o houve um aumento do uso de energia renovável, o consumo por fontes de energia a partir de combustíveis fósseis diminuiu, mas a demanda por energia elétrica mundialmente teve um aumento de cerca de quatro vezes (IEA, 2017).

Segundo o *Renewable Energy Policy Network* (REN, 2013), entre os anos de 2010 para 2011 houve crescimento no mercado mundial de energias renováveis da ordem de 74% em relação a 2009, quando houve uma recessão global, no setor eólico crescimento de 20% e no biodiesel 16% de aumento. Já o Brasil apresenta uma disposição da utilização de energias renováveis muito relevante quando comparada ao cenário mundial sobretudo pela vantagem natural evidenciada na sua matriz energética.

3.25. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)

O MDL tem como objetivo de promover a redução de emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) em países em desenvolvimento, possibilitando a comercialização de créditos de carbono com países que têm a necessidade de reduzir suas emissões. Neste caso, países desenvolvidos onde teriam dificuldades em atender as metas de emissão de gases iriam investir em novas rotas tecnológicas em países em desenvolvimento com o objetivo de reduzir emissão de CO₂, sendo que o país investidor poderia adquirir parte dos créditos de carbono gerados. Tal mecanismo é o único que permite a participação voluntária de países em desenvolvimento como o Brasil que foi concebido através do Protocolo de Quioto em 1997 e entrando em vigor em 2005 após ratificação da Rússia (Ministério do Meio Ambiente, 2019). Este mecanismo foi criado pela Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (UNFCCC), em inglês *United Nations Framework Convention on Climate Change*, para reduzir a emissão de gases de efeito estufa dos países para cumprirem as metas do Protocolo de Quioto. Para cada tonelada de CO₂ equivalente deixada de ser emitida ou retirada da atmosfera transforma-se em uma unidade de crédito de carbono, chamada Redução Certificada de Emissão (RCE), que pode ser negociada no mercado mundial (AGOPYAN; 1998).

Segundo Lazaro e Gremaud (2017), muitos países têm elaborado próprios critérios para avaliar o MDL para o desenvolvimento sustentável, com critérios gerais para a geração de emprego – desenvolvimento econômico, para a melhoria na qualidade de vida – desenvolvimento social e conservação da biodiversidade ou recursos naturais – desenvolvimento ambiental.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados e descritos os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho. Serão fornecidas informações a respeito dos procedimentos do estudo: construção do protótipo - para simular a perda térmica a baixa temperatura encontrada na área siderúrgica, captação de dados e análise dos dados obtidos bem como a avaliação de desempenho dos módulos termoeletricos de acordo com o gradiente térmico.

4.1. Levantamento da Viabilidade Técnica

Inicialmente, para validar a utilização da tecnologia termoeletrica na área siderúrgica, foi necessário um estudo mais aprofundado sobre a utilização da mesma. Assim, a construção e validação do protótipo em escala laboratorial foi de suma importância para a continuidade do trabalho. O modelo experimental pode ser dividido em 3 partes: combustão, módulos termoeletricos e o sistema de resfriamento.

A fonte de calor fornecerá uma quantidade de calor (Q) a partir combustão do gás GLP para aquecer a face quente do módulo termoeletrico transferindo por condução através de duas chapas de alumínio, dois módulos termoeletricos, que estão com uma face em contato direto com uma das chapas de alumínio e a outra com o trocador de calor de alumínio, que é um sistema de resfriamento em contato com o lado frio do módulo, garantindo um gradiente térmico para funcionamento adequado dos módulos auxiliados pelo sistema de monitoramento do modelo experimental: termopares e multímetro que foram utilizados para adquirir dados gerados no protótipo. O modelo da montagem experimental é apresentado na Figura 4.1.

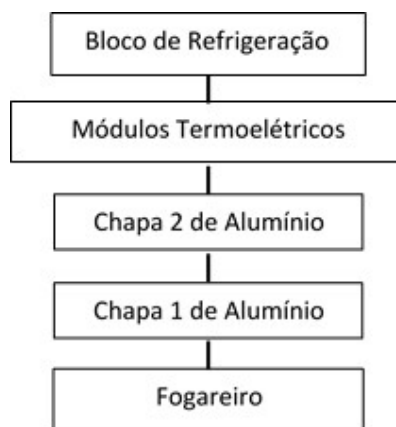


Figura 4.1 - Diagrama de blocos da montagem experimental.

A Figura 4.2 ilustra o protótipo incluindo os sistemas da combustão do gás GLP, resfriamento das placas, saída dos termopares e multímetro para medições da tensão e corrente elétrica com indicação das 3 partes.

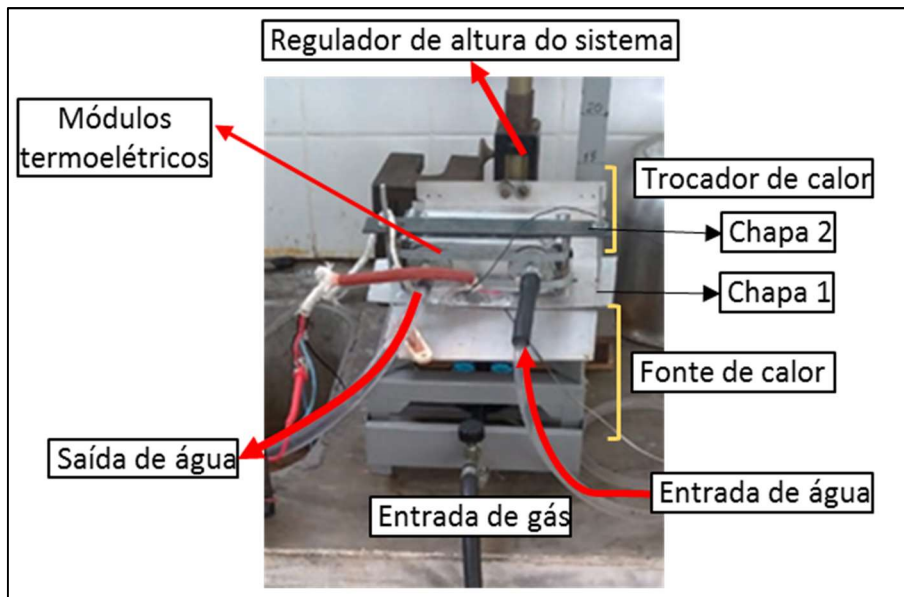


Figura 4.2 - Protótipo II para simular a cogeração de energia elétrica.

O protótipo é baseado na queima de gás GLP, que por radiação irá aquecer a chapa 1 de alumínio e por condução transferirá a energia térmica para a chapa 2 e posteriormente ao módulo termoelétrico. Esta primeira chapa, que receberá o calor diretamente da chama, está acoplada em um sistema de tremonha onde é possível variar, facilmente, a distância entre a chama e a placa. É sabido que a condutividade térmica do alumínio é menor do que a do cobre e da prata, porém esses outros materiais têm custo mais elevado o que inviabiliza o uso mesmo em ponto de prototipagem, assim optou-se por usar alumínio em todo o sistema.

4.2. Funcionamento das Placas

De acordo com a Especificação do Fabricante do modelo TELP1-12662-0 (2021), o módulo gerador de energia possui grande expansão térmica quando o módulo está funcionando em elevada diferença de temperatura, assim, a montagem adequada é imprescindível para garantir uma pressão uniforme aplicada no módulo. O que faz sentido, uma vez que quanto maior o contato das faces do módulo termoelétrico maior será a eficiência do mesmo.

A temperatura no lado quente do módulo pode funcionar continuamente a 500 °C (932 °F) ou abaixo e de forma intermitente até 600 °C (1112 °F). Mas a temperatura no lado frio do módulo pode funcionar apenas até 250 °C (482 °F). Então se a montagem é invertida e o lado frio do módulo é conectado à fonte de calor acima de 250 °C (482 °F), o módulo irá se degradar rapidamente ou falhar imediatamente.

A Figura 4.3 apresenta o esquema para mostrar o lado do módulo quente e frio, onde a direção do fio está voltada para baixo. (Usualmente, pode-se ver uma marcação "Lado quente" na placa de cerâmica). A saída positiva ficará no fio vermelho se a instalação estiver correta. A instalação reversa levará a saída negativa do fio de cor vermelha.

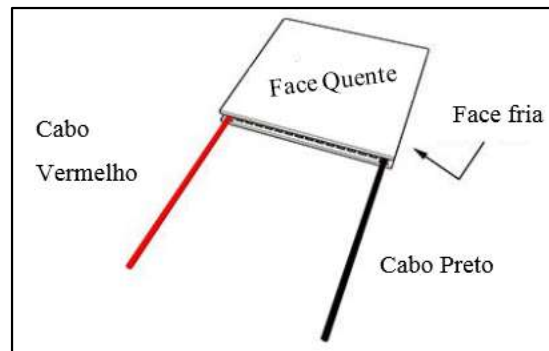


Figura 4.3 - Esquema do módulo termoeletrico

Fonte: Adaptado de <<http://www.thermonamic.com/TELP1-12662-0.9-English.pdf>> Acesso 10/03/2021

Apesar das superfícies parecerem planas e lisas, quando examinadas sob ampliação, elas consistem em “colinas”, “picos” e “vales”. O fabricante reforça ainda que, quando essas duas superfícies são colocadas em contato uma com a outra, apenas o picos entram em contato e uma proporção de apenas 5% da superfície se mantém em contato e os outros 95% são vazios. Estes vazios fazem com que a taxa de transferência de calor seja diminuída, uma vez que é gerada uma região de isolamento entre a superfície do módulo termoeletrico e da superfície quente. A Figura 4.4, apresenta de maneira ilustrativa, os picos e vales encontrados em escala microscópica entre as faces do módulo termoeletrico e a superfície quente.

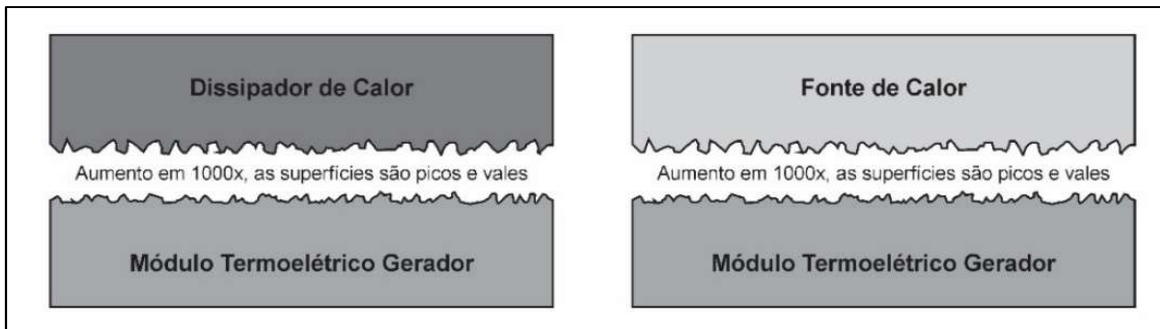


Figura 4.4 - Picos e vales encontrados em escala microscópica entre as faces do módulo termoelétrico e a superfície quente sem pasta térmica.

Fonte: Adaptado de <<http://www.thermonamic.com/TELP1-12662-0.9-English.pdf>> Acesso 10/03/2021

O objetivo da pasta térmica é preencher os vales e vãos com um material compressível que tenha uma condutividade térmica muito maior (capacidade de transferir calor) do que as lacunas de ar que substituiu. Isso essencialmente faz com que toda a interface transfira calor em vez de apenas onde os picos estavam em contato. A Figura 4.5 mostra como a situação melhorou drasticamente.

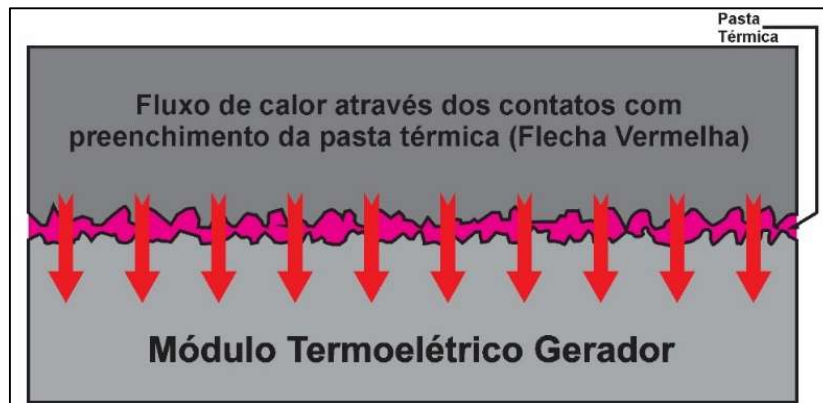


Figura 4.5- Picos e vales em escala microscópica entre as faces do módulo termoelétrico e a superfície quente com adição de pasta térmica.

Fonte: Adaptado de <<http://www.thermonamic.com/TELP1-12662-0.9-English.pdf>> Acesso 10/03/2021

4.3. Especificação do módulo termoelétrico

Para a construção do protótipo, na realização da análise experimental, foi utilizado o módulo termoelétrico modelo TEHP1-1264-0.8 oriunda do fabricante Thermonamic Module composto de bismuto e telúrio (Bi-Te), modelo este comumente utilizado na cogeração de energia elétrica. A Tabela 4.1 apresenta as especificações fornecidas pelo fabricante do módulo termoelétrico.

Tabela 4.1 - Especificações fornecidas pelo fabricante do módulo termoeétrico.

Fonte: Adaptado de <<http://www.thermonamic.com/TELP1-12662-0.9-English.pdf>> Acesso 10/03/2021

Temperatura face quente (°C)	300
Temperatura face fria (°C)	30
Tensão de circuito aberto (V)	9,4
Resistência de carga correspondente (Ohms)	2,8
Tensão de saída de carga (V)	4,7
Corrente de saída de carga (A)	1,56
Potência de saída (W)	7,3
Fluxo de calor do módulo (W)	~133
Fluxo de densidade de calor (Wcm ⁻²)	~8,4
Resistência medida com menos de 27°C a 1000Hz	1,3 ~1,8

As curvas de performance do módulo termoeétrico estão descritas nas figuras de acordo com os dados do fabricante. A Figura 4.6 apresenta a taxa de conversão de acordo com a temperatura do lado frio em relação a temperatura do lado quente.

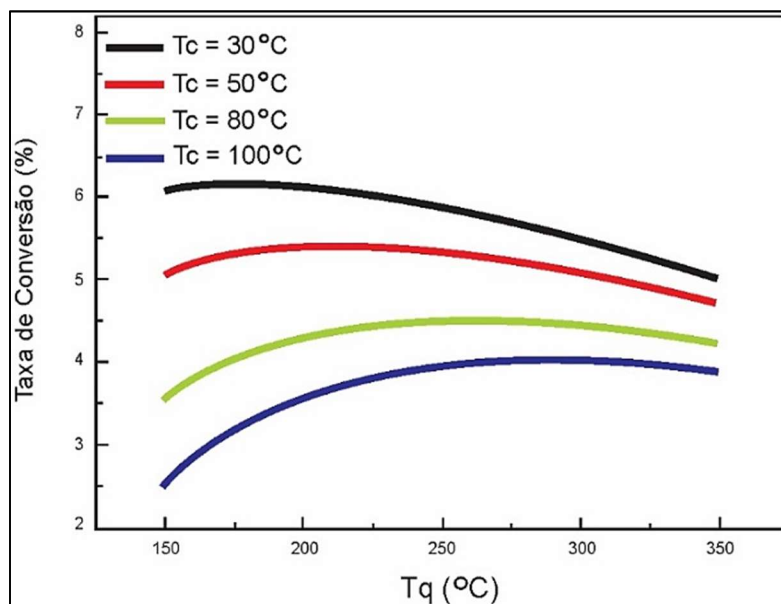


Figura 4.6 - Taxa de conversão dos módulos termoeétricos de acordo com as temperaturas da face fria Vs face quente.

Fonte: Adaptado de <<http://www.thermonamic.com/TELP1-12662-0.9-English.pdf>> Acesso 10/03/2021

Já a Figura 4.7 apresenta dados tais como: tensão do circuito aberto (a), resistência de carga combinada (b), tensão de carga combinada (c), corrente de carga combinada(d) e potência de saída de carga combinada de acordo com o fabricante(e).

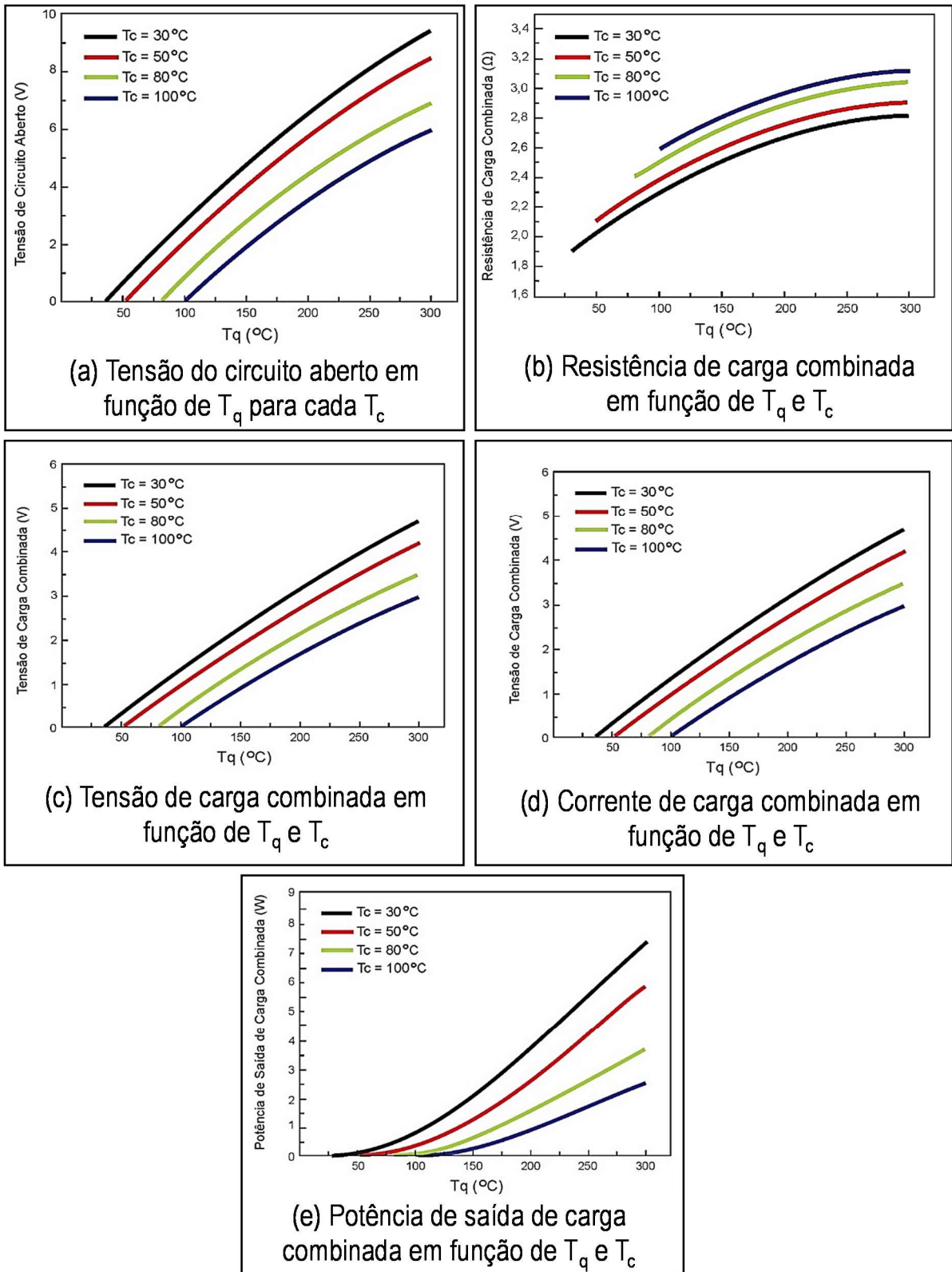


Figura 4.7 - Dados de tensão do circuito aberto (a), resistência de carga combinada (b), tensão de carga combinada (c), corrente de carga combinada (d) e potência de saída de carga combinada de acordo com o fabricante (e).

Fonte: Adaptado de <<http://www.thermonamic.com/TELP1-12662-0.9-English.pdf>> Acesso 10/03/2021

4.4. Desenvolvimento do Modelo

Para a construção de um modelo que retrate as condições encontradas na área siderúrgica os seguintes itens foram utilizados: 1 tubo retangular de alumínio; 1 fogareiro de alta pressão; 1 botijão de gás GLP; 1 silicone de alta temperatura; 2 conexões de aço; 4 arruelas; 4 juntas de borrachas; 2 tubos de pasta térmica; 4 metros de mangueira; 2 placas termoelétricas; 20 cm de cabos de cobs e 2 abraçadeiras metálicas.

4.5. Combustão

Para fornecer a quantidade de energia necessária para gerar energia elétrica, utiliza-se um fogão de alta pressão de trempe única, como mostrado na Figura 4.8, onde há uma válvula para controle da vazão de gás controlando assim, indiretamente, a temperatura da chama.



Figura 4.8 - Fogareiro de alta pressão.
Fonte: Painelas e CIA, 2019.

4.6. Resfriamento

O resfriamento do sistema utiliza da circulação de água no interior de um tubo retangular de alumínio onde a água, a temperatura ambiente, entrará e retirará calor da placa e sairá pela outra extremidade do tubo. Há de se ressaltar que pelo volume de água que transitará dentro do trocador de calor será relativamente grande levando em

consideração à vazão de água provavelmente o trocador de calor está superdimensionado para o teste.

4.7. Controle do Sistema

Para criar um sistema de controle para proteção dos módulos termoeletricos será utilizado duas placas de alumínio sendo que uma delas, chapa 1, estará em contato direto com a chama como explicado anteriormente.

Com esta chapa 1 a mais no protótipo é possível monitorar as principais variáveis da geração termoeletrica, como tensão gerada, corrente, temperatura do lado quente e do lado frio do módulo termoeletrico o que dará tempo para tomar qualquer ação, caso haja algum imprevisto ao longo dos testes, e tornará mais fácil a coleta de dados, uma vez que toda a transferência de energia é dinâmica fazendo com que o operador possa não ser hábil o suficiente nesta coleta o que poderá impactar, diretamente, os resultados do desempenho do sistema. A chapa 2 de alumínio, além de auxiliar no controle na realização dos testes, também tem a função de manter o maior contato das placas na chapa 2 e o trocador de calor. É muito importante garantir que os módulos termoeletricos estejam devidamente em contato com a chapa 2 e o trocador de calor por isso é importante que em ambos os lados do módulo termoeletrico haja pasta térmica para melhorar a eficiência na transferência de calor.

4.8. Medidas de Temperatura

Os dados de temperatura serão obtidos através de um par de termopares do tipo “K”. Este tipo de termopar possui composição níquel-cromo/níquel-alumínio e a faixa de temperatura em que pode ser utilizado varia de -200 °C a 1260 °C, onde serão devidamente posicionados entre as chapas de alumínio 1 e 2 e o outro termopar posicionado entre o módulo termoeletrico e a chapa de alumínio 2 como mostrado na Tabela 4.2. Ocasionalmente este segundo termopar será utilizado para a medida de temperatura da água na entrada e saída do circuito de resfriamento.

Tabela 4.2 - Tipos de termopares baseados em telureto de bismuto e antimônio e suas faixas de medição de temperatura.

Fonte: (GONÇALVES, 2008)

Tipo	Material	Faixa de temperatura para medição [K]
B	Pt+30%Rh vs. Pt+6%Rh	1640-1970
C	W+5%Re vs. W+26%Re	1920-2590
E	90%Ni+10%Cr vs. 55%Cu+45%Ni	370-1170
J	99,5%Fe vs. 55%Cu+45%Ni	370-1030
K	90%Ni+10%Cr vs. 95%Ni+2%Al+2%Mn+1%Si	370-1530
N	84%Ni+14%Cr+1,5%Si vs. 95%Ni+4,5%Si+0,1%Mg	920-1530
R	Pt+13%Rh vs. Pt	1140-1720
S	Pt+30%Rh vs. Pt	1250-1720
T	Cu vs. 55%Cu+45%Ni	70-620

4.9. Condições Simuladas

Inicialmente foram realizados testes em 6 condições variando a distância e o tipo de ligação dos módulos termoeletrônicos como apresentado na Figura 4.9.

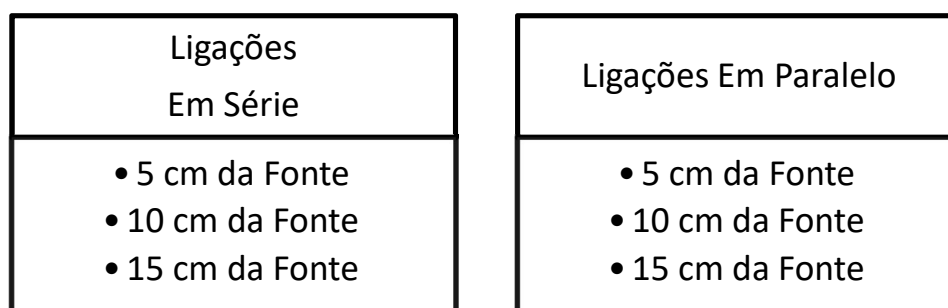


Figura 4.9 - Condições de testes a serem realizados.

O comportamento dos módulos termoeletricos pode ter arranjos elétricos em série ou em paralelos. Em série, soma-se a tensão gerada e mantém-se a corrente gerada já a associação em paralelo, acontece o oposto, a tensão gerada se mantém e soma-se a corrente gerada.

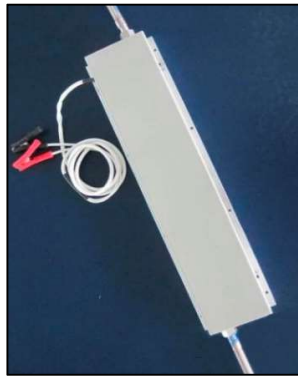
É importante ressaltar que ao fazer arranjos com os módulos termoeletricos, estes devem estar com a mesma resistência interna. caso o contrário ocorra, uma diferença de potencial entre os módulos será gerada e haverá uma corrente circulante entre módulos, ou seja, haverá perdas diminuindo a eficiência na cogeração de energia elétrica.

4.10. Modelo para aplicação industrial

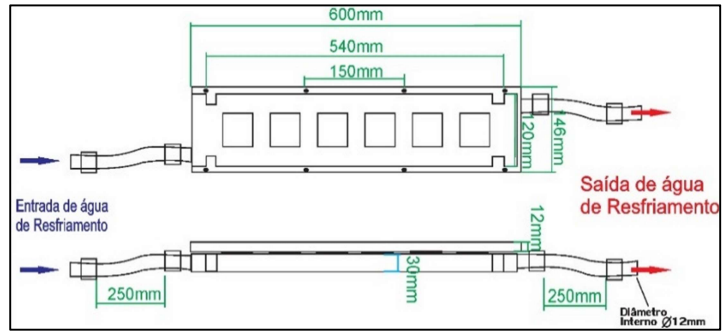
Há no mercado geradores de energia elétrica a partir do efeito termoeletrico já prontos para a utilização o que faz com que o custo do produto reduzido. Assim, para o estudo da aplicabilidade desse mecanismo em uma siderúrgica foi considerado neste estudo o modelo TEG-HL70-12V produzido na China pela empresa Thermonamic.

O gerador de energia TEG-HL70-12V foi projetado para montagem em uma superfície plana e quente para gerar eletricidade podendo ser conectado à placa quente externa de um aquecedor para converter o calor residual em gerar eletricidade. O resfriamento do gerador é feito por água circulada.

Tal modelo é constituído por 06 módulos termoeletricos, 56 mm por 56 mm, ligados em série gerando potência de 70W, uma placa de alumínio usada para coletar calor e um bloco de resfriamento de líquido. Assim como no protótipo, a placa de alumínio tem a função de conduzir o calor da superfície da Fonte de calor para o lado quente do módulo termoeletrico. O calor que flui através dos módulos termoeletricos do gerador é dissipado por líquido como água. Maior temperatura da Fonte de calor. A Figura 4.10 apresenta o gerador termoeletrico e seu esquema.



(a)



(b)

Figura 4.10 - Modelo do gerador termoelétrico resfriado a água (a) e o esquema da dimensão do gerador com os módulos termoelétricos.

Fonte: <<http://www.thermonamic.com.cn/TEG-HL70-English.pdf>> (Adaptado). Acesso 05/11/2020.

Assim, a Tabela 4.3 apresenta a especificação do gerador termoelétrico TEG-HL70-12V.

Tabela 4.3 - Especificação do gerador termoelétrico resfriado a água.

Fonte: <http://www.thermonamic.com.cn/TEG-HL70-English.pdf>. (Adaptado). Acesso 05/11/2020

Número do componente	TEG-HL70-12V
Temperatura face quente (T _q)	270°C (518F)
Potência de saída de carga combinada	70W
Tensão de circuito aberto	36VDC
Tensão de carga combinada de saída	18VDC
Corrente de carga combinada	4A
Dimensão	600mm x 146 mm x 57 mm
Peso	7.8Kgs

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo será apresentado e comentados todos os resultados obtidos nos testes além de interpretações dos resultados de acordo com os estudos relacionados ao tema estudado.

5.1. Estudo de Viabilidade Econômica

Neste estudo apresenta uma série de análises com o intuito de aprimorar a aplicação da tecnologia termoelétrica ao mercado em escala industrial expandindo as variáveis a fim de formar um diagnóstico para implantação do negócio.

5.1.1 Levantamento de CAPEX

A partir da montagem do protótipo em escala laboratorial, foi possível estimar um funcionamento adequado dentro da empresa com o uso de corrente contínua e materiais necessários para a montagem.

A Tabela 5.1 apresenta os materiais utilizados no protótipo desse estudo juntamente com os materiais estimados para a instalação de um mecanismo similar ao protótipo na tubulação de saída de uma caldeira de uma usina siderúrgica.

Tabela 5.1 - Custo do MVP

MATERIAL	CUSTO (R\$)
Placas termoelétricas (com frete de importação) (2 Und)	R\$ 37,00
Pasta térmica (1 bisnaga 20g)	R\$ 7,00
Tubo retangular de alumínio 10x 5 x 5 cm (1Und)	R\$ 10,00
Chapa de alumínio 20 x 10 cm (1 Und)	R\$ 4,00
Chapas de Alumínio (5 x 5 cm) (2 Und)	R\$ 4,00
Abraçadeira galvanizada (1 Und)	R\$ 1,50
Bico para engate (2 Und)	R\$ 12,00
Mangueiras (2m)	R\$ 5,00
Silicone de alta temperatura (1 bisnaga)	R\$ 9,00
Manta térmicos de revestimento 50x50cm (1 Und)	R\$ 15,00

MATERIAL	CUSTO (R\$)
Arruelas (4 Und)	R\$ 1,80
Fogareiro (1 Und)	R\$ 6,00
Chapa de alumínio 20 x 20 cm (1 Und)	R\$ 5,00
Haste com tremonha (1 Und)	R\$ 25,00
Parafusos 3/16x1 com porca e arruela (2 Und)	R\$ 4,50
Ventoinha (cooler) (2 Und)*	R\$ 28,00
Barra chata 30 cm (1 Und)	R\$ 1,00
Gás GLP (1,8Kg)	R\$ 10,52
Cabo flexível colorido 30cm	R\$ 0,50
Total:	R\$ 186,82

***Valor estimado**

Para escala industrial, a Tabela 5.2 apresenta os custos para cobrir uma área de 1m² sobre a tubulação aquecida por vapor dentro de uma siderúrgica. Para a montagem em uma escala, já existe no mercado sistemas de melhor performance para a cogeração de energia elétrica a partir do efeito Seebeck. Assim, considerando a montagem utilizando este sistema já encontrado no mercado tem-se a descrição do CAPEX na Tabela 5.2.

Tabela 5.2- CAPEX do sistema de cogeração de energia elétrica TEG-HL70-12V.

Descrição	Quantidade	Valor Unitário	Preço
Sistemas de geração de energia elétrica (72 módulos)*	12	\$ 380,00	R\$ 52.465,47
Locação de andaimes	10m	R\$ 15,00	R\$ 150,00
Montagem dos equipamentos	200horas	R\$ 70,47	R\$ 14.094,00
mangueiras 1/2" de polietileno	100m	R\$ 39,00	R\$ 390,00
Engate rápido de aço 1/2"	64	R\$ 8,90	R\$ 569,60
Parafusos Philips sextavado	96	R\$ 0,48	R\$ 46,08
Tê de aço rígido 1/2"	32	R\$ 1,99	R\$ 63,68
Registros esfera de aço 1/2"	16	R\$ 12,03	R\$ 192,48
abraçadeira de aço tipo D	100	R\$ 0,96	R\$ 96,80
Pasta térmica (50g/pote)	4	R\$ 12,90	R\$ 51,60
	Subtotal:		R\$ 68.119,71

*valor acrescido de frete, conversão de moeda, taxa de importação de produto e ICMS.

5.1.2 Encargos e Conversões

Baseado na taxa tributária bem como a política de importação de produtos e a conversão de moedas de dólar americano (USD) para real (R\$), a Figura 5.1 apresenta os custos de importação, imposto de operações financeiras (IOF), imposto de conversão de moeda, Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) e frete referente a importação dos módulos geradores de energia elétrica conforme quantidade descrita na Tabela 5.2.

1. COTAÇÕES		
USD - Dólar:	5.47	
EUR - Euro:	6.65	
GBP - Libra Esterlina:	7.70	
2. ALÍQUOTA DE ICMS		
Tipo de envio:	Courier	
Unidade federativa:	MG	
Valor da alíquota:	18%	
3. TAXAS		
Conversão monetária:	5.47	
Imposto de importação (%):	60	
ICMS (%):	18	
IOF (%):	6.38	
4. IMPOSTO DE IMPORTAÇÃO		
VALORES		
Valor do produto (USD):	4560	
Custo do frete (USD):	200	
Valor do produto (BRL):	24943.20	
Custo do frete (BRL):	1094.00	
TOTAL DA COMPRA (BRL):	26037.20	
TRIBUTOS		
<input checked="" type="checkbox"/> Incluir frete no cálculo do imposto	<input checked="" type="checkbox"/> Incluir IOF	
Imposto de importação (BRL):	15622.32	
ICMS (BRL):	9144.77	
IOF (BRL):	1661.17	
TOTAL DE TRIBUTOS (BRL):	26428.27	
TOTAIS		
Valor final com impostos (BRL):	52465.47	

Figura 5.1 - Cálculo de imposto de importação.

Fonte: <<https://tributado.net/#>> (Acesso em 23 de fevereiro de 2021 às 15:23)

Já a Tabela 5.3 apresenta as despesas com mão de obra para a implantação do projeto de acordo com as premissas e na Tabela 5.4 apresenta a consolidação dos investimentos.

Tabela 5.3 - Despesas com mão de obra - CAPEX

Mão de Obra			
Cargo	Quantidade	Salário	Custo do func. com impostos
1 operador	1	R\$ 1.200,00	R\$ 2.640,00
1 eletromecânico	1	R\$ 1.700,00	R\$ 3.740,00
Subtotal de investimento de mão de obra - CAPEX			R\$ 6.380,00

Premissas	
Encargos	2,2
Período (meses)	13

Tabela 5.4 – Consolidação de Investimento - CAPEX

Investimento - CAPEX	
Sub-Total:	R\$ 68.119,71
Sub-total de investimento de mão de obra - CAPEX	R\$ 6.380,00
Total de investimento CAPEX	R\$ 74.499,71

5.1.3 Levantamento de OPEX

Foi realizado também um estudo para estimar o custo de manutenção do sistema afim de garantir o funcionamento pleno do equipamento conforme apresentado na Tabela 5.5. Apenas os gastos fixos mensais, para fins de cálculo de viabilidade do projeto e o custo de manutenção foram considerados neste trabalho. A depreciação não foi levada em consideração uma vez que não foi contabilizado o imposto de renda, pois o objetivo desse trabalho está voltado apenas para custos.

A fim de simplificar o estudo, as Tabelas 5.5, 5,6 e 5,7 aumento do custo de manutenção de operação será considerado linear de acordo com o aumento dos módulos termoelétricos instalados ao longo das tubulações exceto para mão de obra que pode ser considerada de acordo com a instalação de 10m² de sistema gerador de energia elétrica.

Tabela 5.5 - OPEX do sistema de cogeração de energia elétrica.

Descrição	Quantidade	Valor Unitário	Preço
Limpeza manutenção periódica(semestral)	16 horas	R\$ 713,76	R\$ 1427,52
Estoque de materiais			
Sistemas de geração de energia elétrica	2	\$ 380,00	R\$ 8.376,84
Mangueiras 1/2" de polietileno	10m	R\$ 39,00	R\$ 390,00
Engate rápido de aço 1/2"	7	R\$ 8,90	R\$ 62,30
Parafusos Philips sextavado	10	R\$ 0,48	R\$ 4,80
Tê de aço rígido 1/2"	4	R\$ 1,99	R\$ 7,96
Registros esfera de aço 1/2"	2	R\$ 12,03	R\$ 24,06
abraçadeira de aço tipo D	10	R\$ 0,96	R\$ 9,60
Pasta térmica	4	R\$ 12,90	R\$ 51,60
Total			R\$ 10.354,68

Tabela 5.6 - Despesas de mão de obra – OPEX

Mão de obra				
Cargo	Quantidade	Salário	Custo do func. com impostos	Custo Anual
eletromecânico	1	R\$ 1.700,00	R\$ 3.740,00	R\$ 48.620,00

Premissas	
Encargos	2,2
Período (meses)	13

Tabela 5.7 - Consolidação do OPEX (1 ano)

OPEX (1 ano)	
Subtotal de investimento na limpeza de manutenção anual	R\$ 1.427,52
Subtotal de investimento em estoque	R\$ 10.354,68
Subtotal de investimento de mão de obra – OPEX	R\$ 48.620,00
Total do OPEX	R\$ 60.402,20

Tomando como base os experimentos realizados no protótipo, em escala laboratorial, cujos resultados são apresentados entre as Tabelas A à R, no Apêndice deste trabalho. Tratam-se de resultados encontrados nas 3 séries reproduzidas nas alturas da Fonte preestabelecidas. As medidas foram obtidas a cada 3 minutos de operação do sistema. De posse desses dados foram esboçados os gráficos apresentados nas Figuras 5.2, 5.3 e 5.4

de acordo com os testes 1, 2 e 3 de acordo com as distâncias de 15, 10 e 5 cm da Fonte de calor, respectivamente, com referência a ligação em série. Nessas figuras é possível avaliar, de modo geral, o comportamento da geração de energia elétrica de acordo com a temperatura 2 da chapa aquecida. Quanto maior a temperatura da chama, maior é a eficiência para geração de energia elétrica ao manter uma maior variação de temperatura entre a chapa aquecida e a temperatura da face do módulo. Nota-se um aumento da potência do equipamento bem como a proximidade dos módulos à fonte de calor. Para o teste 2, apresentado na Figura 5.3, pode-se notar a influência da vazão de água afim de retirar calor dos módulos aumentando a variação de temperatura entre as faces, assim, por consequência, alcançando valores mais expressivos de potência e tensão o que não ocorre no teste 3, apresentado da Figura 5.4, a 5 cm da fonte. Nesta configuração a variação da temperatura entre as faces do módulo foi menor o que incidiu em baixos valores de potência. Já no mesmo teste 3, a uma distância de 15cm da fonte de calor, valores de cogeração mais satisfatórios foram alcançados devido a maior variação de temperatura das entre as faces e maior vazão de água refrigerando o sistema.

Por se tratar de um sistema analógico, ou seja, toda a intervenção realizada poderia retratar em grandes variações, o sistema de resfriamento dos módulos termoeletricos foi ligado diretamente à um reservatório de água, controlado por um registro. Assim, para todas as medidas, a vazão de água foi superdimensionada para o tamanho do sistema. Durante todos os testes não houve variações de temperatura da água na entrada e a saída do sistema, mesmo na vazão mais baixa, ou seja, a retirada de calor do sistema ocorria rapidamente devido ao grande volume de água transitando no trocador de calor.

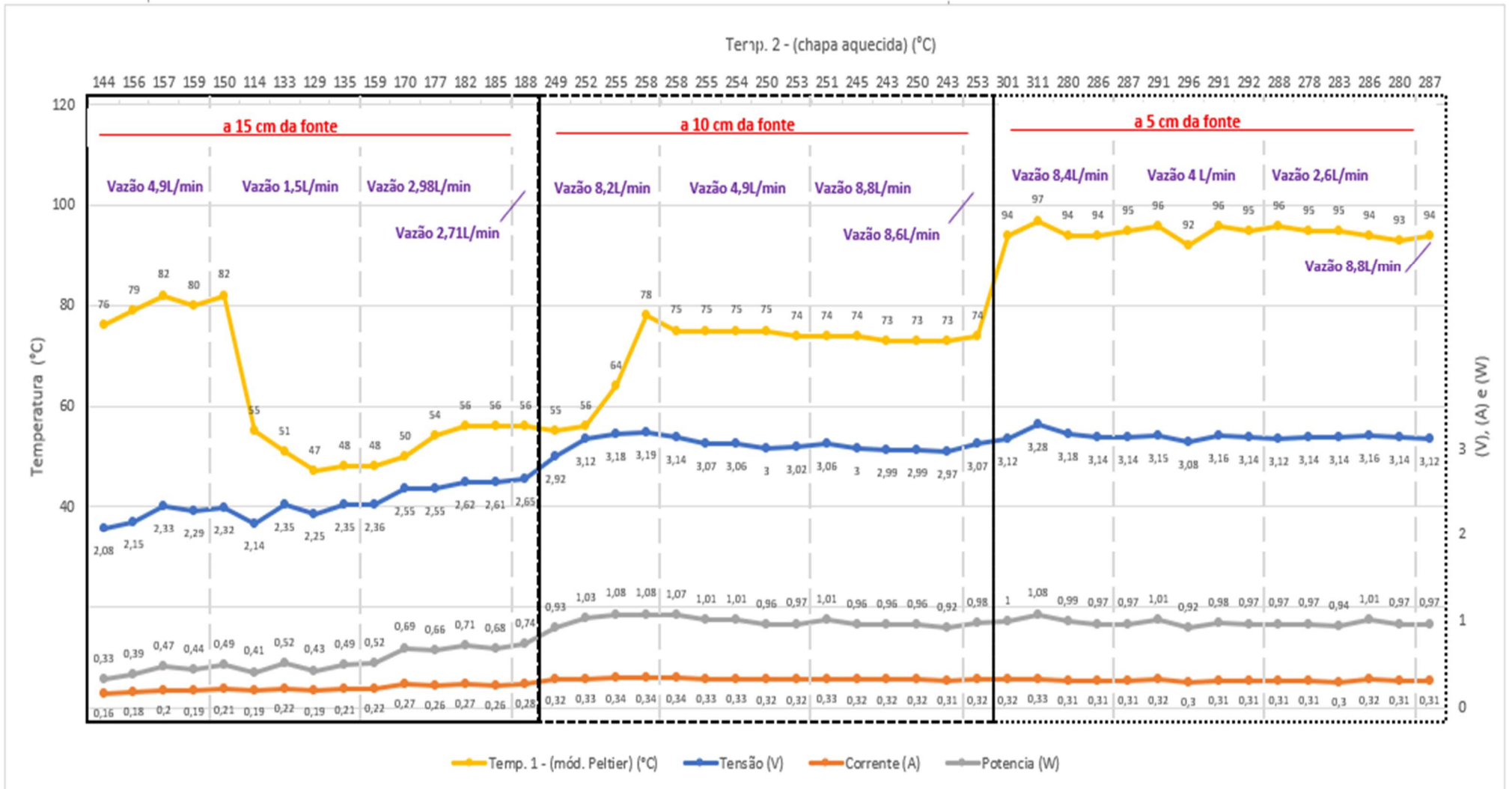


Figura 5.2– Teste 1: Medições variando as distâncias da fonte de calor para a ligação em série.

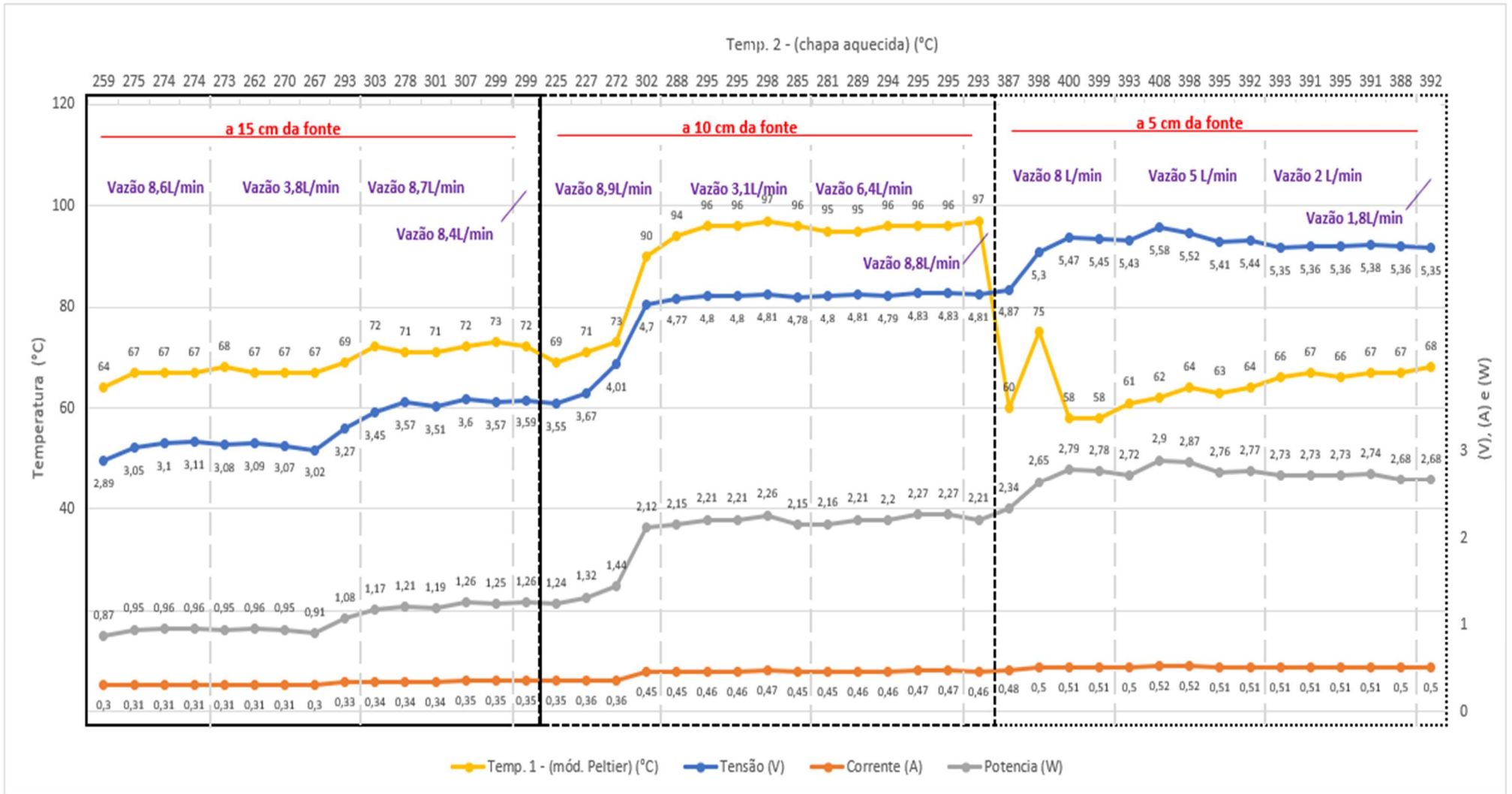


Figura 5.3 – Teste 2: Medições variando as distâncias da fonte de calor para a ligação em série.

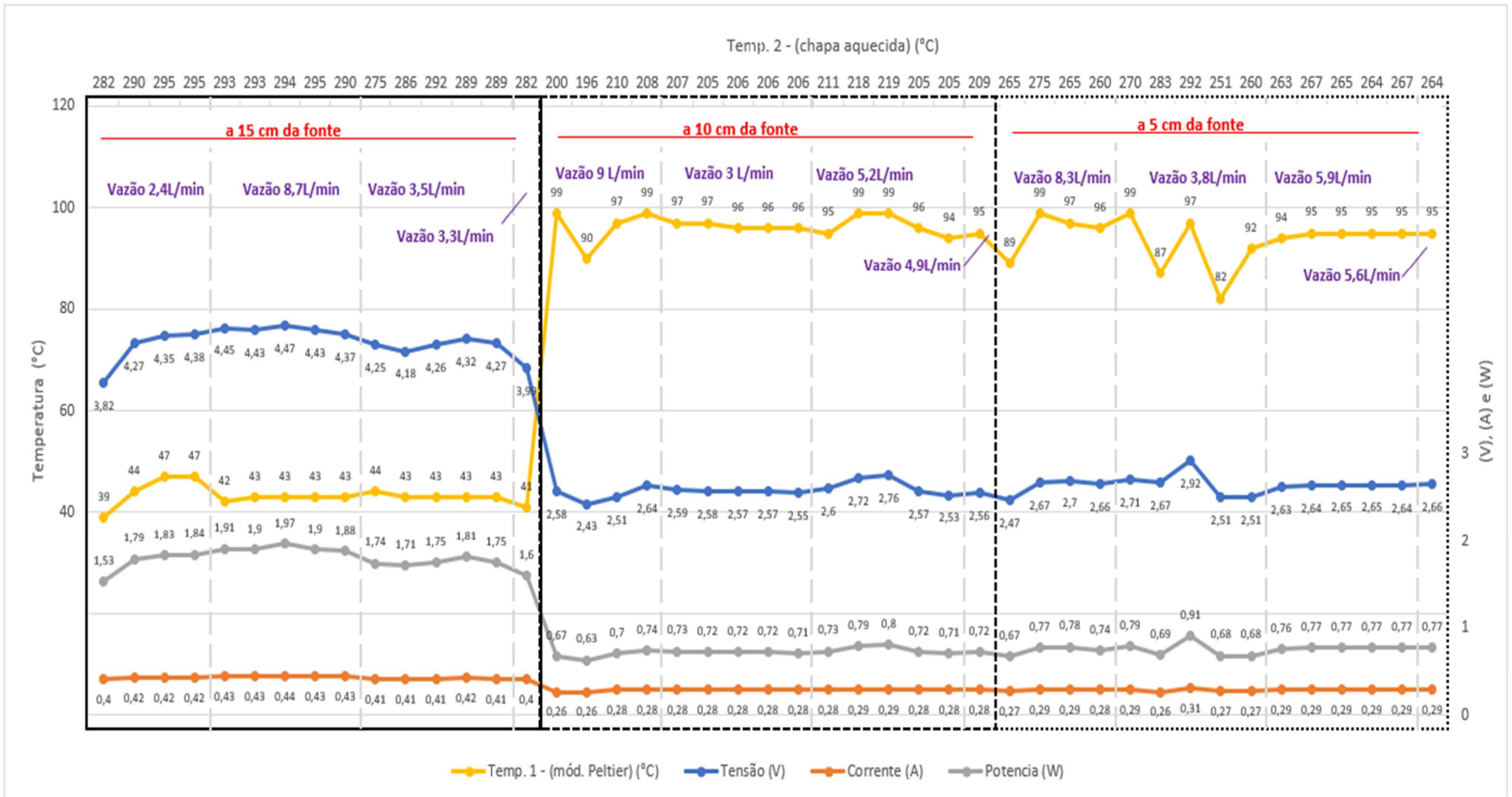


Figura 5.4 – Teste 3: Medições variando as distâncias da fonte de calor para a ligação em série.

A partir dos valores consumidos GLP nos testes, foi calculada a potência fornecida ao sistema a partir da Equação 5.1 assim, chegou-se à eficiência média dos testes na ligação em série conforme apresentado na Tabela 5.8. Considerando que as medidas foram realizadas a cada 03 minutos tem-se que cada teste teve a duração de 45 minutos (2700 segundos).

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad \text{Equação 5.1}$$

Em que ΔE é a variação de energia e Δt é a variação do tempo.

Tabela 5.8 - Dados de potência e eficiência médios do sistema no arranjo em série

	SÉRIE 1			SÉRIE 2			SÉRIE 3		
Distância da Fonte de Calor	15 cm	10 cm	5 cm	15 cm	10 cm	5 cm	15 cm	10 cm	5 cm
Consumo de GLP (g)	98	102	80	95	112	85	80	68	65
Potência média fornecida ao sistema (W)	1685,69	1754,49	1376,07	1634,08	1926,50	1462,08	1376,07	1169,66	1118,06
Potência média gerada (W)	7,95	14,93	14,73	15,93	30,43	40,87	26,92	10,81	11,31
Eficiência média (%)	0,47	0,85	1,07	0,97	1,58	2,80	1,96	0,92	1,01

De acordo com os dados fornecidos pelo fabricante do sistema de cogeração de energia elétrica, mesmo para os pontos onde a eficiência média foi mais elevada nos testes realizados, ela ainda é considerada baixa. Uma das possíveis causas para essa diminuição na eficiência de cogeração de energia elétrica seriam perdas térmicas associadas ao tipo de material do trocador de calor e das placas 1 e 2. Note-se que uma dada temperatura da face fria (T_f) a temperatura da face quente (T_q), a taxa de conversão do sistema seria próxima de 5% como apresentado na Figura 5.6.

Após a obtenção dos dados com ligação em série, foram realizados outra bateria de testes com o arranjo dos módulos ligados em paralelo para que a performance do sistema fosse testada neste arranjo conforme apresentado nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7. Os dados obtidos em escala laboratorial para o arranjo em paralelo obedeceram a

mesma dinâmica para obtenção de dados em série, entretanto a vazão de água fixada em 8,4L/minuto. As tabelas com os dados obtidos estão apresentadas nas tabelas J à R, no apêndice. De acordo com os gráficos pode-se notar que a eficiência do arranjo em paralelo é proporcional à proximidade da fonte de calor, mas mesmo assim os valores ainda são muito baixos quando comparados ao arranjo em série.

Na Tabela 5.9, é apresentado a média e o desvio padrão obtidos nos testes em escala para a ligação em série de acordo com a distância da fonte de calor. A partir desses dados é possível atestar quanto da homogeneidade dos dados obtidos da amostra quando os módulos estão mais próximos da fonte de calor. Para todos os testes realizados quanto mais próximos da fonte de calor melhor é o comportamento do sistema afim de cogear energia elétrica lembrando que deve manter a retirada de calor.

Tabela 5.9 - Média e desvio padrão de cada curva de acordo com os testes para a ligação em série.

			Tensão (V)	Corrente (A)	Potencia (W)
Teste 1	a 15 cm	média	2,373	0,221	0,531
		Desv. padrão	0,184	0,038	0,131
	a 10 cm	média	3,052	0,326	0,995
		Desv. padrão	0,079	0,009	0,052
	a 5 cm	média	3,147	0,312	0,981
		Desv. padrão	0,043	0,008	0,036
Teste 2	a 15 cm	média	3,265	0,324	1,062
		Desv. padrão	0,253	0,019	0,145
	a 10 cm	média	4,584	0,437	2,028
		Desv. padrão	0,445	0,043	0,364
	a 5 cm	média	5,375	0,507	2,725
		Desv. padrão	0,158	0,010	0,125
Teste 3	a 15 cm	média	4,283	0,417	1,794
		Desv. padrão	0,178	0,019	0,119
	a 10 cm	média	2,584	0,279	0,721
		Desv. padrão	0,079	0,008	0,041
	a 5 cm	média	2,646	0,285	0,755
		Desv. padrão	0,104	0,012	0,060

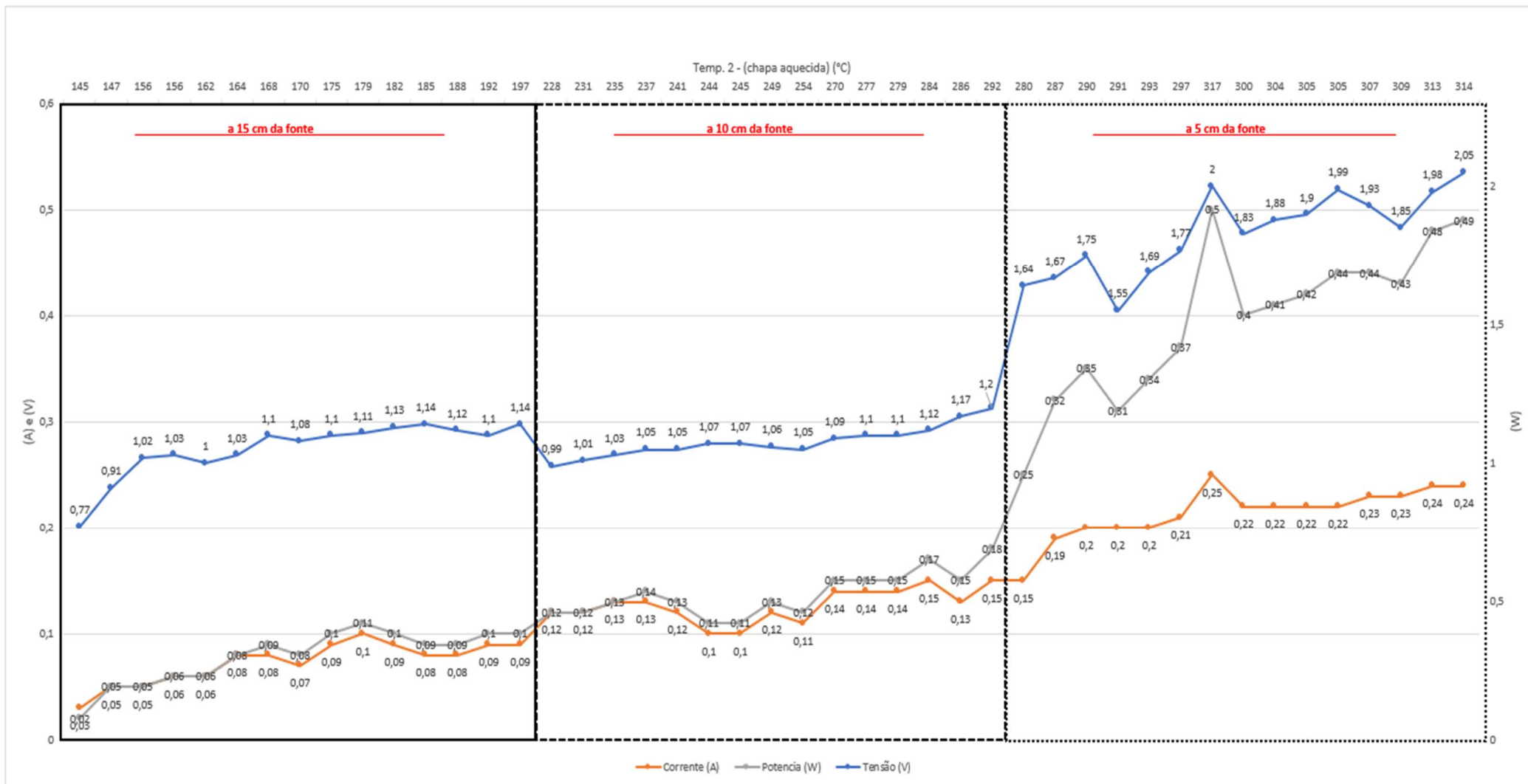


Figura 5.5 - Teste 1: Medições variando as distâncias da fonte de calor para a ligação em paralelo

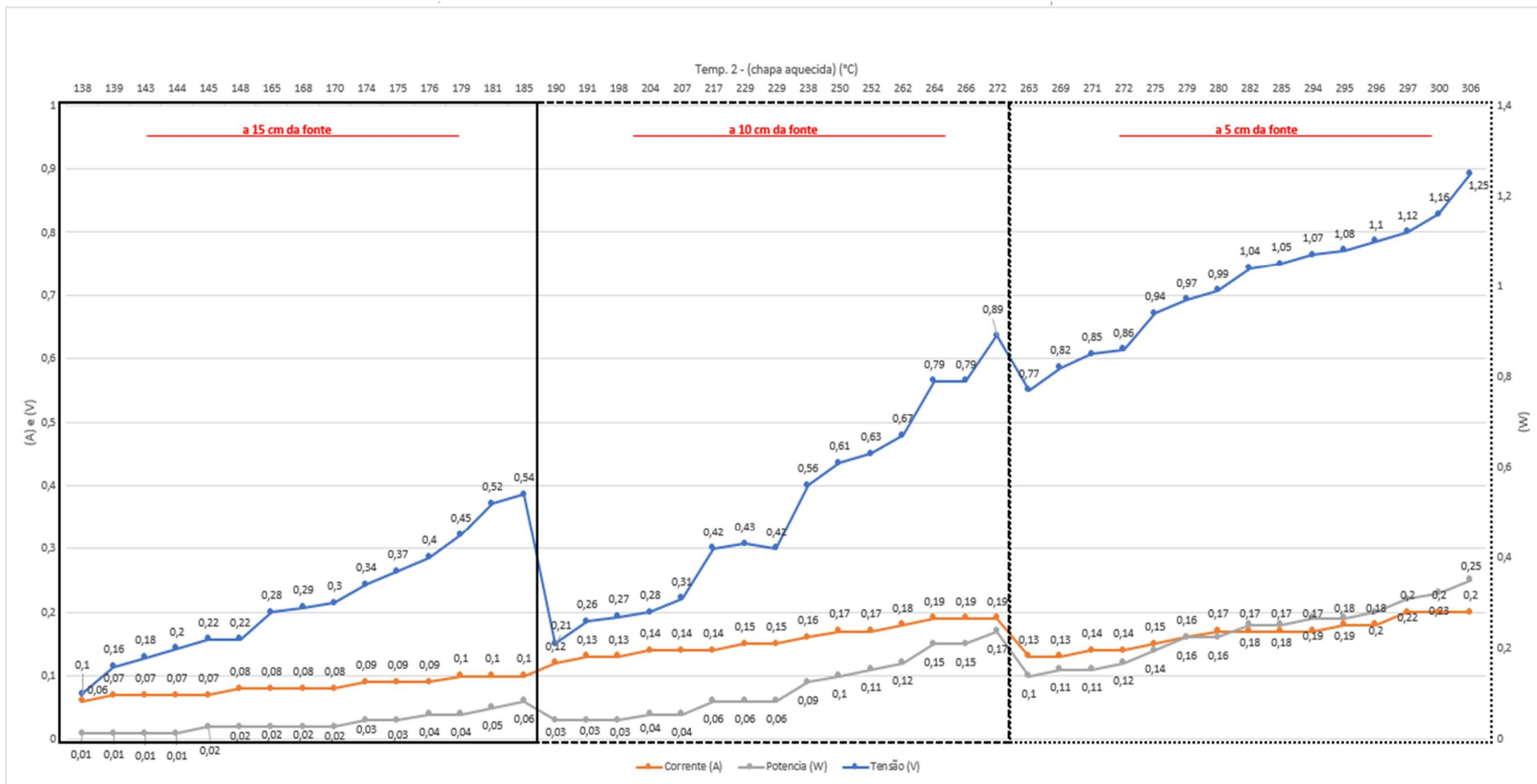


Figura 5.7 - Teste 3: Medições variando as distâncias da fonte de calor para a ligação em paralelo

A Tabela 5.10 apresenta os valores médios de potência fornecida e potência média gerada pelo sistema. Como apresentado anteriormente, baseado na referência bibliográfica, sabe-se que a eficiência dos módulos termoeletricos ligados em paralelo é menor quando comparada ao arranjo ligado em série.

Tabela 5.10 - Dados de potência e eficiência médios do sistema no arranjo em paralelo.

	SÉRIE 1			SÉRIE 2			SÉRIE 3		
	15 cm	10 cm	5 cm	15 cm	10 cm	5 cm	15 cm	10 cm	5 cm
Distância da Fonte de Calor	15 cm	10 cm	5 cm	15 cm	10 cm	5 cm	15 cm	10 cm	5 cm
Consumo de GLP (g)	90	93	85	106	95	87	80	68	65
Potência média fornecida ao sistema (W)	1548,08	1599,68	1462,08	1823,29	1634,08	1496,48	1376,07	1169,66	1118,06
Potência média gerada (W)	1,18	2,05	5,94	1,18	2,47	5,32	0,4	1,25	2,55
Eficiência média (%)	0,08	0,13	0,41	0,06	0,15	0,36	0,03	0,11	0,23

De acordo com a Tabela 4.3, que apresenta a especificação do módulo termoeletrico, os dados obtidos em escala piloto estão distantes dos especificados. Uma justificativa para tal observação seja perdas térmicas por convecção, condução e radiação da fonte de calor até os módulos termoeletricos, uma vez que, as chapas e o trocador de calor foram fabricados de alumínio, material esse com coeficiente de condutibilidade térmica menor do que a do cobre por exemplo.

A Tabela 5.11 apresenta a média e o desvio padrão obtidos nos testes em escala para a ligação em paralelo de acordo com a distância da fonte de calor. Para os testes com o arranjo em paralelo, diferentemente dos dados obtidos pelo arranjo em série, houve maior dispersão dos dados coletados independentemente da proximidade dos módulos termoeletricos à fonte de calor bem como significativas variações das médias obtidas nos diferentes testes para a mesma distância.

Tabela 5.11 - Média e desvio padrão de cada curva de acordo com os testes para a ligação em série.

			Tensão (V)	Corrente (A)	Potencia (W)
Teste 1	a 15 cm	média	1,074	0,089	0,095
		Desv. padrão	0,053	0,021	0,020
	a 10 cm	média	1,213	0,138	0,174
		Desv. padrão	0,250	0,028	0,074
	a 5 cm	média	1,868	0,223	0,419
		Desv. padrão	0,144	0,015	0,058
Teste 2	a 15 cm	média	0,825	0,123	0,103
		Desv. padrão	0,062	0,027	0,028
	a 10 cm	média	1,375	0,189	0,241
		Desv. padrão	0,316	0,029	0,049
	a 5 cm	média	1,872	0,224	0,421
		Desv. padrão	0,074	0,028	0,068
Teste 3	a 15 cm	média	0,349	0,107	0,036
		Desv. padrão	0,098	0,023	0,013
	a 10 cm	média	0,733	0,16	0,117
		Desv. padrão	0,173	0,021	0,033
	a 5 cm	média	1,095	0,182	0,2
		Desv. padrão	0,077	0,014	0,028

Tomando como base a aplicação na área industrial, foram obtidos dados de uma tubulação aquecida na saída de uma caldeira térmica em uma Usina Siderúrgica Integrada, levando em consideração às seguintes características como: limpeza, fácil acesso para instalação do sistema e manutenção, além do controle constante de temperatura do processo já existente.

Em anexo, na Tabela S, estão os dados obtidos na indústria. Baseado nos dados fornecidos pelo fabricante do equipamento, será simulado a taxa de conversão, corrente elétrica e tensão elétrica que pode ser obtida a partir da ligação industrial. De acordo com as caldeiras 1, 2 e 3, as variações de temperaturas de cada caldeira em um período de 130 horas como mostrado na Figura 5.8.

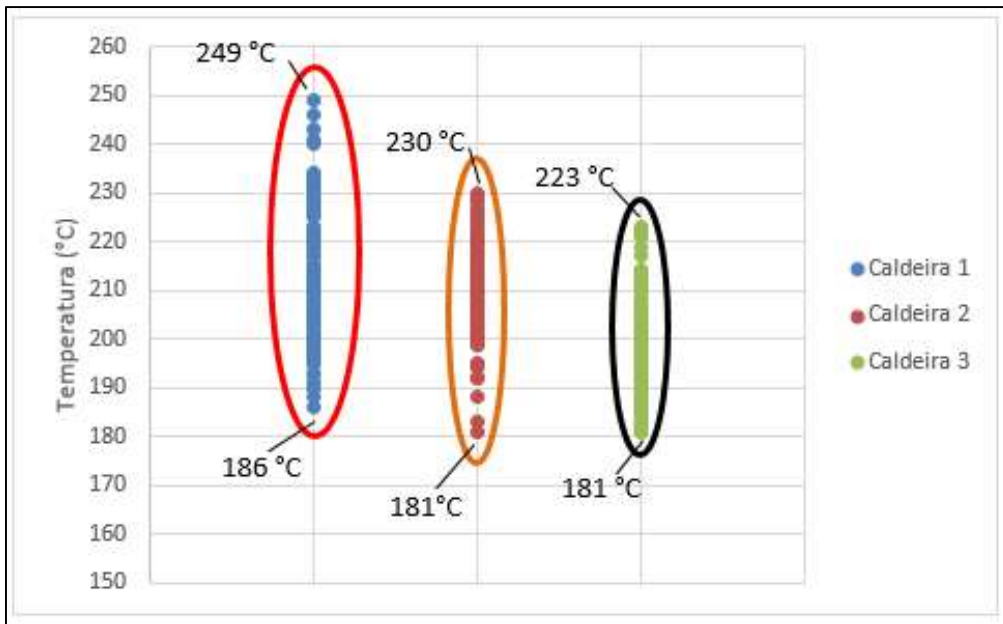


Figura 5.8 – Variação de temperatura das tubulações na saída das caldeiras.

De acordo com os dados obtidos em escala piloto, a taxa de conversão indicada pelo cliente estaria entre 4,1% e 4,9% para uma variação, aproximada, entre T_q e T_f de 80 °C conforme apresentado no retângulo amarelo marcado na

Figura 5.9. De acordo com a (ESPECIFICAÇÃO DO FABRICANTE TEP1-1264-1.5, 2021) para a especificação do sistema TEP1-1264-1.5 em que a variação entre T_q e T_f é de 30°C, a taxa de conversão é elevada para 5,6% a 6,4%, aproximadamente, conforme apresentado pelo retângulo marrom na Figura 5.9.

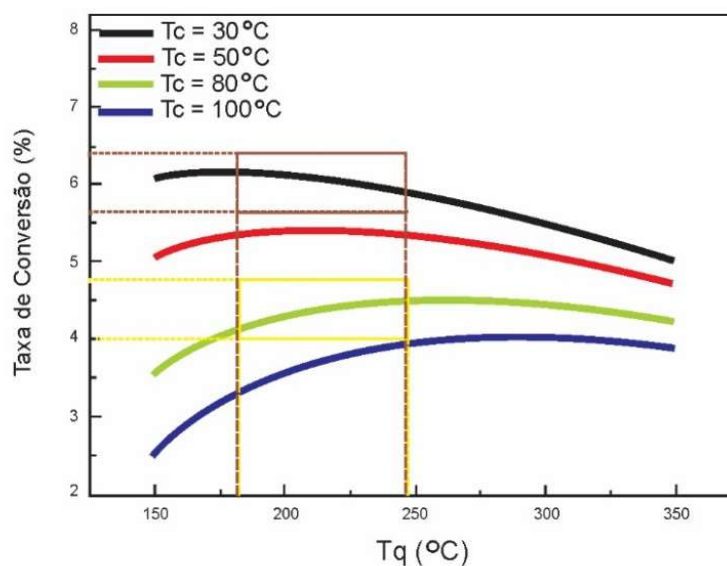


Figura 5.9 - Estimativa de taxa de conversão de cogeração de energia elétrica.

Fonte: Adaptado de <<http://www.thermonamic.com.cn/TEP1-1264-1.5-English.pdf>> Acesso em 10/03/2021

Tomando como base as especificações fornecidas pelo fabricante do sistema de gerar energia elétrica tem-se a tensão de carga correspondente apresentada na Figura 5.10. Em uma simulação ao cruzar os dados industriais, que é a variação de temperatura de trabalho de 181°C à 249°C com os dados do fabricante, obtém-se uma janela cujo a variação da tensão seria de 7,5V a 11V, aproximadamente, o que na prática dependendo do sistema elétrico pode ser mantido a partir dessas condições.

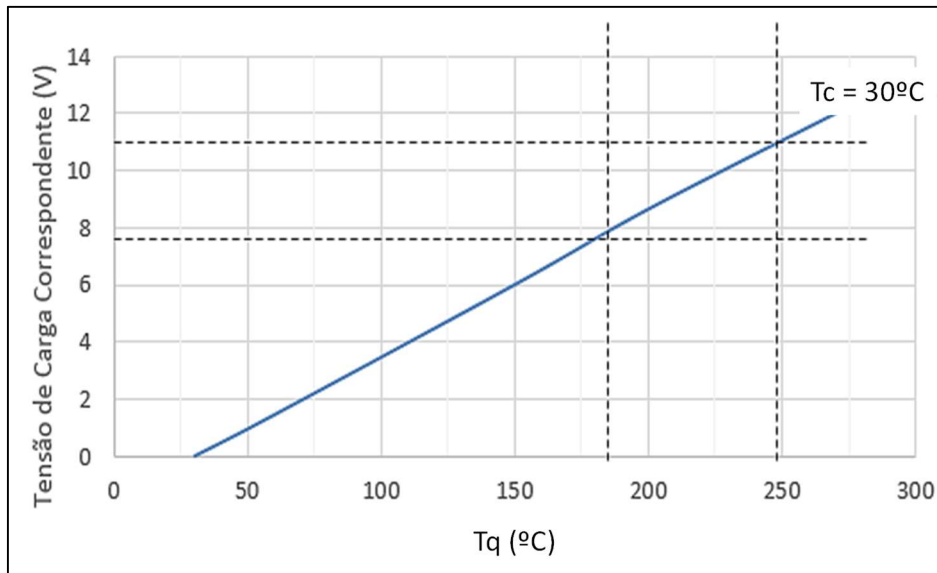


Figura 5.10 - Correlação da Tensão de Carga Correspondente do sistema gerador de energia elétrica e dados de temperatura encontrados em Siderúrgica de acordo com especificação do fabricante TEP1-1264-1.5.

Assim, como a análise realizada para os dados de tensão elétrica, foi realizada a mesma análise para a obtenção da corrente elétrica. Ao realizar a interseção no gráfico entre a temperatura obtida na siderurgia, a corrente possível de ser obtida no sistema de geração de energia elétrica estaria entre 2,9 e 4,0A conforme a especificação do fabricante tem-se a Figura 5.11.

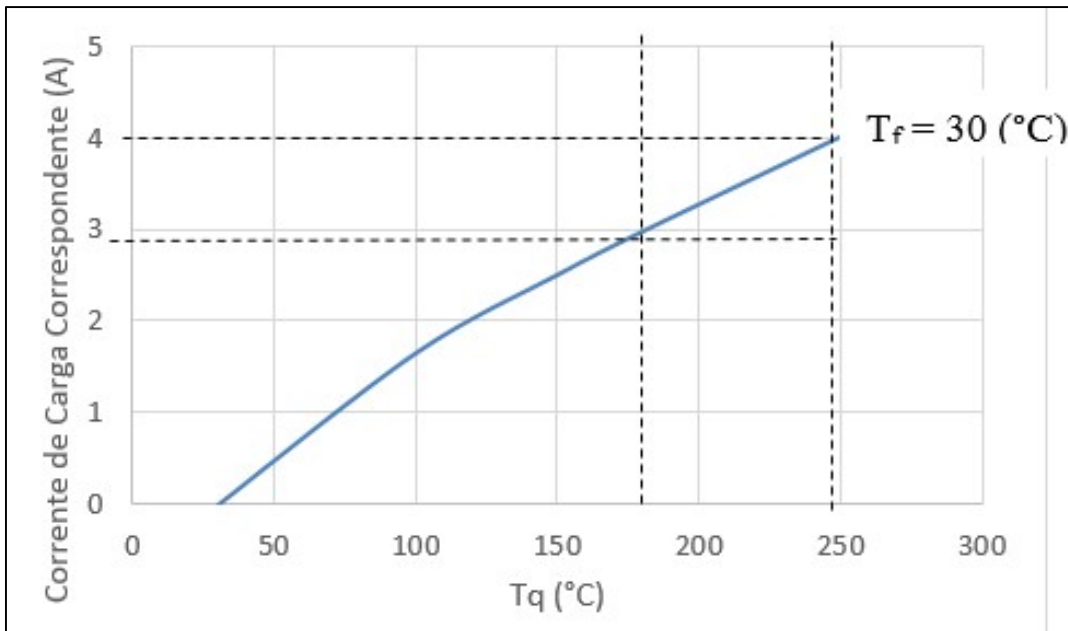


Figura 5.11 - Correlação de Corrente de Carga Correspondente do sistema gerador de energia elétrica e dados de temperatura encontrados em Siderúrgica de acordo com especificação do fabricante TEP1-1264-1.5.

Ao realizar a correlação para a análise da potência elétrica da especificação do sistema e baseado nos dados industriais tem-se que a potência do sistema de cogeração de energia elétrica poderia alcançar, aproximadamente, de 35 a 60 W de acordo com a janela de interseção baseado na variação de temperatura de 181 °C até 249 °C apresentada na Figura 5.12.

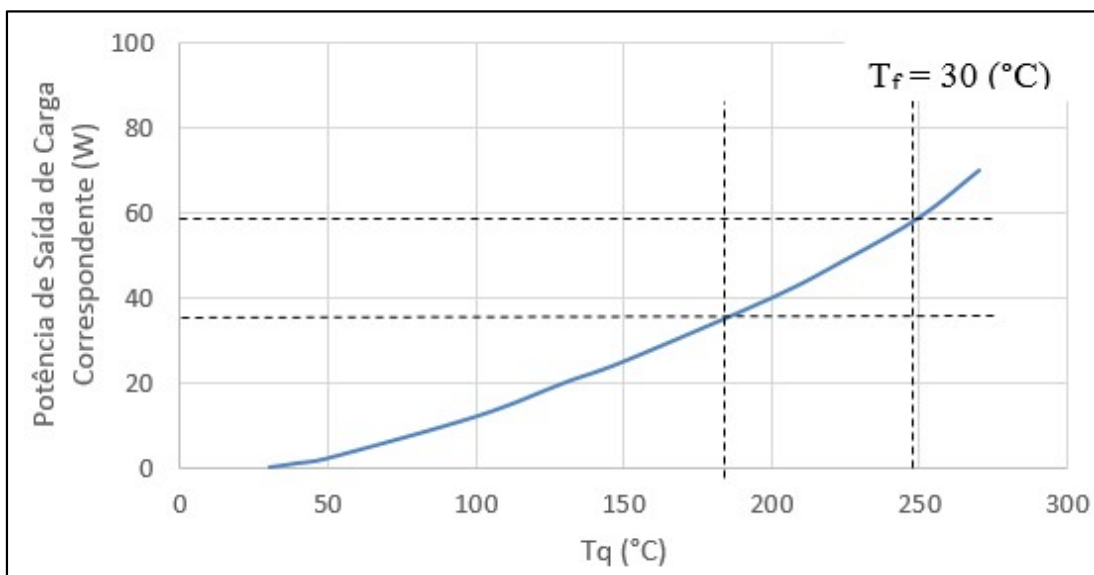


Figura 5.12 - Potência de Saída de Carga Correspondente (W) do sistema gerador de energia elétrica e dados de temperatura encontrados em Siderúrgica de acordo com especificação do fabricante TEP1-1264-1.5.

Nesta parte é apresentado a técnica que utiliza o prazo de retorno do investimento da aplicação da tecnologia em escala industrial.

5.1.4 Premissas

Para simplificar os cálculos, será estimado um valor de 10% do valor do estoque revertido na manutenção e operação do sistema gerador de energia elétrica e a inflação acumulada nos últimos 12 meses, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no dia 14/04/2021 é de 6,10%. As Tabelas U, V, X e W, contidas no apêndice apresentam os fluxos de caixa para projetos de instalação de 12, 50, 150 e 1000 unidades de módulos termoeletrônicos respectivamente.

Para o cálculo do *payback*, será tomado como base o reajuste tarifário regulamentado através da Resolução Homologatória N° 2.884 de 22 de junho de 2021, emitido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para subgrupo A. A aplicação da tarifa de aplicação é dividida para R\$ 490,02 por MWh para horário de ponta (P), que é o período de 3 horas consecutivas normalmente das 18h às 21h excluindo sábados, domingos e feriados e R\$ 298,63 por MWh para o horário fora de ponta (FP) que compreende as demais horas do dia. (ANEEL,2021). Com o objetivo de simplificar cálculos será utilizado um valor de referência de R\$ 322,55 por MWh que é a média ponderada entre os valores em horário de (P) e (FP) ao longo de um ano.

Adicionando o MDL ao cálculo de *payback* do investimento, a cotação considerada do crédito de carbono do dia 01/07/2021 foi de R\$58,05 por cada ton. de CO₂ de acordo com a plataforma de investimento Investing.com. (INVESTING.COM, 2021)

Também de acordo com a especificação do sistema gerador de energia elétrica, conforme a Figura 5.12, considera-se um valor médio de 47W gerado pelo equipamento instalado, assim, considerando 30 dias de funcionalidade do equipamento ininterruptamente por 365 dias, ou seja, 8760 horas, tem-se a geração de 411,7kWh para cada sistema, então considerando a instalação de 12 unidades tem-se a geração anual de 4,9406MWh conforme apresentado na Tabela 5.12 assim como a extrapolação para o aumento do número de módulos geradores instalados.

Levando em consideração também o MDL, cuja cotação do crédito de carbono do dia 01/07/2021 em R\$58,05 por cada ton. de CO₂ de acordo com a plataforma de investimento investing.com.

Tabela 5.12 – Valor de investimento, faturamento e *payback* da tecnologia instalada.

Num. de sistemas geradores	12	50	150	1000
Valor investido (R\$)	74.499,71	193.271,60	499.897,21	3.165.197,75
Energia gerada no sistema (MWh/ano)	4,94064	20,586	61,758	411,72
Faturamento anual (R\$)	1.733,28	7.221,99	21.665,96	144.439,75
<i>Payback</i> (anos)	34,9	22,3	19,8	19,3
Quantidade ton.CO ₂ não emitida	2,41	20,05	30,08	200,51
Ganhos com Crédito de Carbono (R\$)	139,67	1.163,95	1.745,92	11.639,47

Nestas configurações de instalação do sistema gerador o *pay back* seria menor quando implantados um maior número de módulos ao longo das tubulações, ou seja, haveria uma maior área para instalação, aumentando, assim, a cogeração de energia elétrica.

Adicionalmente, para que o *pay back* fosse reduzido, a potência gerada deveria ser aumentada mesmo com o aumento da área coberta por módulos termoeletricos. Outra maneira possível seria aumentar o gradiente térmico entre os módulos termoeletricos, ou seja, aumentando a eficiência da cogeração. O custo de instalação dos sistemas é diretamente proporcional à quantidade de módulos, o que faz com que valor recebido da geração de energia elétrica não supere o custo de implantação do projeto. No mercado já existem sistemas que podem alcançar 600 W de potência elétrica, entretanto, a temperatura de trabalho dos módulos é mais elevada.

5.2. Valor Presente Líquido (VPL)

Para estas 4 configurações de investimento foi calculado um VPL de acordo com o tempo necessário mínimo para que fosse possível o cálculo da TIR. A Tabela 5.13 apresenta o VPL de acordo com a instalação da quantidade de módulos.

Tabela 5.13 - Valor do VPL de acordo com a quantidade de sistemas cogeneradores de energia elétrica.

Num. de sistemas cogeneradores (Und.)	12	50	150	1000
VPL (R\$)	-28.150,60	-43.519,31	-188.227,69	-613.627,20
Tempo (anos)	41	28	25	24

Em todos os casos o VPL é menor que zero, ou seja, neste caso as despesas são maiores que as receitas tornando o projeto inviável para qualquer dessas configurações de instalação, uma vez que os retornos do projeto não recuperam o valor investido no prazo considerado.

5.3.Taxa Interna de Retorno (TIR)

Assim como ocorre com o VPL, a TIR desse projeto apresenta-se negativa em todas as configurações de instalação dos módulos. A Tabela 5.14 apresenta os valores da TIR encontrados de acordo com a quantidade de módulos e tempo para retorno do investimento.

Tabela 5.14 - Valor da TIR de acordo com a quantidade de sistemas cogeneradores de energia elétrica e tempo

Num. de sistemas geradores	12	50	150	1000
TIR (%)	-11,22	-13,60	-13,77	-13,91
Tempo (anos)	41	28	25	24

Mesmo não aplicando os descontos referente aos impostos do projeto a somatória do lucro não sobressai o valor do investimento, confirmando assim que não há viabilidade para implantação do projeto nessa configuração.

6. BENEFÍCIOS DE ORDEM NÃO-FINANCEIRA

Como resultado adicional a esse trabalho, alguns benefícios e retornos não financeiros à implantação do projeto foram apontados.

6.1.Social

A implantação de mais um sistema de cogeração dentro de uma área siderúrgica reforça ainda mais a cultura de desperdício zero, algo que é muito adotado hoje para mudanças de comportamento de colaboradores dentro das empresas.

Com o início da utilização de tecnologia ainda não explorada aqui no Brasil, faz com que a mesma seja difundida no Brasil, e assim popularizada uma vez que poderá haver mais estudos em torno de sua aplicação em outros setores e áreas industriais.

6.2.Comercial

Com as crescentes ações com relação aos aspectos climáticos, a utilização da geração de energia elétrica a partir do efeito termoelétrico dentro da área siderúrgica pode gerar boa visibilidade para a empresa ao adotar políticas alinhadas à preocupação com o meio ambiente. Tal adoção, além das demais que tem sido tomadas nos últimos anos, podem contribuir para negociações com outras empresas e/ou países que valorizam tais ações.

6.3.Ambiental

Do ponto de vista de ambiental, a utilização dessa tecnologia não gera emissão gases ou emissão sonora durante a cogeração de energia elétrica, bem como propicia o aumento da eficiência dos equipamentos, uma vez que a quantidade de energia que hoje é liberada sem nenhuma utilização adequada.

Neste mesmo sentido a utilização do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo pode impactar positivamente na cogeração de energia elétrica por meio do efeito termoelétrico com geração de créditos de carbono trazendo, assim mais benefícios da sua utilização. Ao incluir a negociação de créditos de carbono ao projeto, faz com que o tempo de retorno do investimento seja reduzido, demonstrando que a aplicação do Mecanismo

de Desenvolvimento Limpo se faz muito significativa neste projeto de cogeração de energia elétrica a partir do efeito termoelétrico.

7. CONCLUSÕES

Como exposto nos capítulos anteriores, este trabalho demonstra de maneira técnica e econômica e experimental da aplicação do efeito termoelétrico na área siderúrgica afim de cogeração de energia elétrica a partir do embasamento teórico e prático.

Para finalizar as análises propostas a partir do desenvolvimento de um protótipo do Microgerador Termoelétrico pôde ser realizada a simulação encontrando valores de eficiência considerados baixo para a cogeração de energia elétrica, mas confirmando maior efetividade quanto a ligação em série além de projetar os custos do MVP para implantação em escala industrial. .

Com o protótipo pode-se constatar a baixa eficiência tanto para a ligação em série quanto em ligação em paralela dos módulos termoelétricos sendo a eficiência média encontrada de 1,96% e 0,41% respectivamente, confirmando o que era esperado com relação à maior eficiência quando ligado em série. Além disso, dados do MVP puderam ser levantados e projetados à escala industrial além da fácil adaptabilidade do sistema a qualquer Fonte de perdas térmicas como citado por Ando Júnior, 2014. Com um custo relativamente baixo de R\$ 186,82 do protótipo, levando em consideração a ligação em série, o sistema chegou a gerar tensão superior a 5V e corrente elétrica de 0,5A, especificações estas capazes de carregar um aparelho celular facilmente.

Com a análise da evolução de estudos e aplicação a cerca dessa tecnologia em áreas industriais constatou-se que empresas, majoritariamente chinesas, já disponibilizam ao mercado sistemas completos para geração de energia a partir de módulos termoelétricos trazendo mais eficiência na geração de energia elétrica quando comparada ao protótipo construído. Assim, correlacionando estes sistemas com os dados industriais, há viabilidade técnica para a utilização dos mesmos, entretanto do ponto de vista econômico não há viabilidade para a aplicação desta tecnologia neste cenário atual. Mesmo simulando o aumento da quantidade de módulos termoelétricos instalados ao longo das tubulações aquecidas, o VPL e TIR apresentam-se negativos assim como o *pay back* se mantém elevado para implantação do projeto, ou seja, não há viabilidade econômica. Dentre os motivos da inviabilidade econômica destaca-se o alto custo para importação dos sistemas, devido principalmente à taxa cambial e à taxa de impostos de importação. Para que o *pay back* diminuísse, favorecendo a implantação do projeto, a

busca por incentivo fiscal para utilização do mesmo deve ser realizada junto aos órgãos competentes aliando o projeto a um Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, uma vez que isso não foi levado em consideração no estudo.

Mesmo chegando a conclusão da falta de viabilidade econômica, destaca-se neste trabalho o desenvolvimento técnico e experimental inédito para a aplicação da termoelectricidade a partir do Efeito Seebeck na geração de energia elétrica dentro de uma siderúrgica no Brasil podendo ser aplicado em outros pontos da indústria de modo geral a fim de buscar maior eficiência energética dos processos além gerar créditos de carbono.

8. TRABALHOS FUTUROS

Estudar a aplicabilidade da geração de energia elétrica em sistemas isolados, como por exemplo um sistema isolado em um carro torpedo para a medição de temperatura constante e online do gusa.

Análise de viabilidade econômica de sistema gerador termoelétrico para operar em locais cujo gradiente térmico seja superior a 500 °C e que seja avaliada a vida útil do sistema em área industrial.

Estudar a taxa de resfriamento dos módulos termoelétricos acoplados a ventiladores e/ou com a utilização de água afim de buscar um ponto ótimo;

Estudar sistemas Arduínos acoplados aos sistemas termoelétricos para manutenção e segurança dos módulos termoelétricos.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABM - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO. **Eficiência Energética na Siderurgia – Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico**. Campinas, 2009. 32 p

Agile Processes in Software Engineering and Extreme Programming - 17th International Conference, XP,2016-Edinburgh, UK, May 24–27, 2016 Proceedings <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-33515-5_10> Acesso em 23/02/2021.

AGOPYAN, V.; SOUZA, U. E. L.; PALIARI, J. C.; ANDRADE, A. C. **Alternativas para a redução de desperdício de materiais nos canteiros de obras**. São Paulo: PCC/EPUSP, v. 5, 1998.

AGUILAR, R.S; OLIVEIRA, L.C.S; ARCANJO, G.L.F. **Energia Renovável: Os Ganhos e os Impactos Sociais, Ambientais e Econômicos nas Indústrias Brasileiras**. XXXII Encontro Nacional De Engenharia De Produção. Bento Gonçalves-RS. UFRGS, 2012.

ALVES, P. P. **A Experiência de Joule Revistada**. 2008. 95f. Dissertação (Mestrado) Universidade Nova de Lisboa, Lisboa 2008.

ANDO JUNIOR, O. H. **Microgerador termoelétrico para captação de energia baseado no efeito Seebeck com sistema de transferência de calor intercambiável**. BR n BR1020130279471, 30/12/2013. Revista de Propriedade Industrial, v1, n 2254. Acesso em 04 /04/2019.

ANDO JUNIOR, O. H. **Protótipo de um microgerador termoelétrico para captação de energias residuais baseado no efeito Seebeck com sistema de transferência de calor intercambiável**. Porto Alegre, 2014.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **RESOLUÇÃO HOMOLOGATÓRIA Nº 2.884 DE 22 DE JUNHO DE 2021**. ANEEL,2021. <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20212884ti.pdf>> Acesso em 07/07/2021.

ANTUNES, J. A. A. **Reaproveitamento de calor para geração de energia no automóvel.** Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho Guimarães, Portugal, 2001.

ARAÚJO, E. Q. **Modelo de Balanço Energético para Gerenciamento e Previsão de Demandas para uma Planta Siderúrgica Típica Brasileira.** São João Del Rei, 2015.

BARATI, M.S.; ESFAHANI, T. A.; **Energy recovery from high temperature slags.** Energy. Volume 36, Issue 9, pp, 5440-5449; 2011.

BARNWAL, B. K.; SHARMA, M. P. Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 9, p. 363-378, 2005.

BASTOS, Sérgio André Machado. **Pulseira para Geração de Energia.** 2010. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Minho, Braga, 2010.

KABLE, Anthony. **Body Heat Powered Watches - Seiko Thermic & Citizen Eco-Drive Thermo.** 2020. <<https://www.plus9time.com/blog/2020/5/30/body-heat-powered-watches-seiko-thermic#ftnt3a>> Acesso em 10/08/20 às 22:08

CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, **Brief History of Thermoelectrics,** 2017. Disponível: <<http://www.thermoelectrics.caltech.edu/thermoelectrics/history.html>> Acesso em: 10/12/2017.

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. **Alternativas energéticas: Uma visão da Cemig.** Belo Horizonte: CEMIG, 2012.

CHEN *et. al.* **Energy efficiency analysis and impact evaluation of the application of thermoelectric power cycle to today's CHP systems.** Institute of Energy Technology, Aalborg University, Denmark, 2009.

CNM/CUT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS METALÚRGICOS DA CENTRAL ÚNICA DOS TRABALHADORES - **A indústria siderúrgica e da metalurgia básica no Brasil - Diagnóstico e Propostas elaboradas pelos Metalúrgicos da CUT.** Taubaté, 2012.

CRUZ *apud* ROSS, Stephen A.; WESTERFIELD, Randolph W.; JORDAN, Brandford D. **Princípios de administração financeira.** 2.ed. São Paulo: Atlas, 2000.

CRUZ, RENAN ALVES DA. **Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica para Geração de Eletricidade Através do Uso de Células Fotovoltaicas em uma Cerâmica Vermelha**. Fundação Getúlio Vargas, Vitória da Conquista, Brasil. 2020.

D.M. ROWE. **CRC Handbook of Thermoelectric**. CRC Press, 1995.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanco Energético Nacional – BEN**. Oferta Interna de Energia: ano base 2008. Rio de Janeiro, EPE, 2009.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **O compromisso do Brasil no combate às mudanças climáticas: produção e uso de energia**. Brasília, 2016. Disponível em: <https://goo.gl/zAoHjD>. Acesso em 04/04/2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2017-2026)**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em <[http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-261/DEA%20001_2017%20-%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202017-2026_VF\[1\].pdf#search=dea%202017](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-261/DEA%20001_2017%20-%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202017-2026_VF[1].pdf#search=dea%202017)>. Acesso em: 04/05/2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanco Energético Nacional 2020: Ano base 2019**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf>

ESPECIFICAÇÃO DO FABRICANTE – **Módulo Termoelétrico Modelo TEG-HL350-24V**. Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp, Ltda. Jiangxi, China <<http://www.thermonamic.com.cn/TEG-HL350-24V-English.pdf>> Acesso em: 25/06/20 às 23:01

ESPECIFICAÇÃO DO FABRICANTE – **Módulo Termoelétrico Modelo TEG-ST5-5V-1**. Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp, Ltda. Jiangxi, China <<http://www.thermonamic.com.cn/TEG-ST5-5V-1-English.pdf>> Acesso em: 25/06/20 às 22:10.

ESPECIFICAÇÃO DO FABRICANTE – **Módulo Termoelétrico Modelo TELP1-12662-0.9** Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp, Ltda. Jiangxi. Disponível em: <<http://www.thermonamic.com/TELP1-12662-0.9-English.pdf>> Acesso 10/03/2021 às 16:10

ESPECIFICAÇÃO DO FABRICANTE – **Módulo Termoelétrico Modelo TEP1-1264-**

1.5. Disponível em: <<http://www.thermonamic.com.cn/TEP1-1264-1.5-English.pdf>>

Acesso 10/03/2021 às 16:00

FARIAS, Sandro Ricardo Alves. **Protótipo De Um Microgerador Termoelétrico De Estado Sólido: Cogeração A Gás**, 2009 98F. Dissertação (Mestrado) – UFRN, 2009.

FERNANDES, A. E. S. S. **Conversão de Energia com Células de Peltier**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008.

FLIPSE, J.; BAKKER, F. L.; SLACHTER, A.; DEJENE, F. K. and VAN WEES, **Direct Observation of the Spin-Dependent Peltier Effect**, Nature Nanotech 7, 166 (2012)

GAO M.; ROWE, D.M. **Conversion Efficiency of Thermoelectric Combustion Systems**. IEEE Transactions on Energy, v. 22, n. 2, p. 528-534, jun. 2007.

GITMAN, L. J. **Princípios da administração financeira**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

GIZMODO. **Peltier USB Can Cooler/Heater is a Cup Holder Too**. Disponível em: <<http://gizmodo.com/277642/peltier-usb-cancoolerheater-is-a-cup-holder-too>> Acesso em 15/08/2020 às 14:10

GONÇALVES, L. M. **Microsistema Termoelétrico Baseado em Teluretos de Bismuto e Antimônio**. 2008. 200 p. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Electrónica Industrial e Computadores, Departamento de Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2008.

GUARDABASSI, P. M. **Sustentabilidade da biomassa como Fonte de energia: perspectivas para países em desenvolvimento**. Dissertação (Mestrado) – Energia.

HADDAD, *et al.* **Some Efficient Solutions to Recover Low and Medium Waste Heat: Competitiveness of the Thermoacoustic Technology**, Artigo em: Energy Procedia-the International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES14, pp. 1057–1069, 2014

HENDRICKS, T.; CHOATE, W. T. **Engineering Scoping Study of Thermoelectric Generator Systems for Industrial Waste Heat Recovery**. 2006. 74 f U.S. Department of Energy, Industrial Technologies Program, novembro 2006.

INSTITUTO AÇO BRASIL - IABr. **Relatório de Sustentabilidade 2018**. 9ª ed. Rio de Janeiro - RJ: 2014. 49 p.

INSTITUTO AÇO BRASIL - IABr. **Relatório de Sustentabilidade 2018**. 11ª ed. Rio de Janeiro - RJ: 2018. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/assets/pdfs/Aco-Brasil-Completo.pdf>. Acesso 28/06/2021.

INTERNATIONAL PANELS ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Change 2014 – Synthesis Report for Policy Makers**. Genebra, 2015. Disponível em: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf. Acesso em 27/06/19.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY - IRENA & GWEC – **Global Wind Energy Council. 30 Years of Policies for Wind Energy: Lessons from 12 Wind Energy Markets**. Abu Dhabi, 2013.

IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Perspectives for the Energy Transition: Investments Needs for a Low-Carbon Energy System**. IEA – International Energy Agency & IRENA. Paris, 2017. Disponível em <<http://www.irena.org/publications/2017/Mar>>. Acesso: em 07/08/2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Inflação**. IBGE, 2021. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php> > Acesso: em 14/04/2021.

INVESTING.COM - Disponível em <<https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>> Acesso: em 05/08/2021

JOUHARA, H. *et al.* **Waste heat recovery technologies and applications**. Institute of Energy Futures, College of Engineering Design and Physical sciences, Brunel University London, UK, 2018.

K. UCHIDA, S.; TAKAHASHI, K.; HARM J. IEDA, W.; KOSHIBAE, K.; ANDO, S. MAEKAW, and E. SAITOR **Observation of the Spin Seebeck Effect**, Nature 455, 778 (2008).

KAJIKAWA T. *et al*, **Development of Thermoelectric Power Generation Utilizing Heat of Combustible Solid Waste**. B. Mathiprakasam (Ed.), Proc. of the 13th Int. Conf. on Thermoelectrics, Kansas City-Mo (1994), pp. 314e318.

LAMBERTERIE, B. **Steel Production - Energy Efficiency Working Group**. ESTEP - EUROFER WG Energy Efficiency; 2014.

LAURÍA, L.C. **Decisões de custos em épocas de crise: aspectos relevantes em orçamentos de investimentos**. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil. 2013. Disponível em: <<http://www.occ.pt/news/PENCUSTOS/pdf/052.pdf>>. Acesso em 24/06/2020.

LAZARO, L. L. B; GREMAUD, A. P. **Contribuição para o desenvolvimento sustentável dos projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo na américa latina**. O&S - salvador, v. 24, n. 80, p. 53-72, jan./mar. 2017. Disponível em: < <https://www.scielo.br/j/osoc/a/9sKdMvHzBhMfZRR3JTCH6gn/?format=pdf&lang=pt>>

LEMES JUNIOR, Antônio Barbosa; CHEROBIM, Ana Paula; RIGO, Cláudio Miessa. **Administração Financeira: princípios, fundamentos e práticas brasileiras**. 5ª reimpressão. Rio de Janeiro: Elsevier, 2002.

LENS. Disponível em: <<https://link.lens.org/3P2QVRXLdmge>> Acesso em 07/05/2021 as 15:07.

M.K. EWERT, **Terrestrial and Aerospace Solar Heat Pump Development: Past, Present and Future**, ASME artigo em Solar '98, Albuquerque-NM, 1998.

MALFA, E. **Electric Arc Furnace (EAF) - New R&D areas for energy savings**. CSM. ESTEP - EUROFER WG Energy Efficiency. 2014.

MARTINS, J; BRITO, F. P.: GONÇALVES; ANTUNES. J. **Thermoelectric Exhaust Energy Recovery with Temperature Control Through Heat Pipes**. SAE International, p. 1-23, 2011.

MOURA, J. A. S. **Filmes Nanométricos de Fen e Aln Crescidos Por Sputtering e Aplicações do Efeito Peltier**. 2010. 140f. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE **Protocolo de Quioto**. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto.html>>.

Acesso em: 06/06. 2021.

N. NAIK-DHUNGEL, **Waste Heat to Power Systems**, U. S. Environmental Protection Agency. EPA, 2012. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/waste_heat_to_power_systems.pdf. Acesso: 08/08/2018.

NASCIMENTO, A. L. E. S.; LUBANCO, J. C.; MOREIRA, T. A. **Fontes Alternativas de Energia Elétrica: Potencial Brasileiro, Economia e Futuro**. *Revista de Divulgação do Projeto Universidade Petrobras e Instituto Federal Fluminense*, Rio de Janeiro, p.23-36, 2012.

NASCIMENTO, R. S.; ALVES, G. M. **Fontes Alternativas e Renováveis de Energia no Brasil: Métodos E Benefícios Ambientais**. Maringá-PR. p12016.

NOGUEIRA, E. **Análise de investimentos**. In: BATALHA, M. O. *Gestão agroindustrial*. 2.ed. São Paulo: Atlas, 2001. v.1. 692 p.

PANELAS E CIA. Disponível em: <<https://www.panelasecia.com.br/fogaofogareiro-alta-pressao-portatil-de-1-boca-baby-albasan.html>> Acesso em: 16/10/2019.

PIEIDADE, P. M. **Efeitos Termoelétricos e suas aplicações**. *Aquisição e Processamento de Sinais*. 1ST – Lisboa, 1997.

PRIMETALS TECHNOLOGIES - **Eco Solutions - Saving Resources, Creating Value a Comprehensive Range of Future Oriented Environmental Solutions for Ironmaking Plants**. Disponível em: <https://www.primetals.com/fileadmin/user_upload/content/01_portfolio/17_eco-solutions/gas-cleaning/ECO_SOLUTIONS_FOR_IRONMAKING.pdf>. Acesso em 16/03/2018.

RENEWABLE ENERGY. **Bioenergy production and use in Italy: Recent developments, perspectives and potential**, v. 57, p. 448-461, 2013.

RIFFAT, S. B.; XIAOLI, M. **Thermoelectrics: A Review of Present and Potential Applications**. *Applied Thermal Engineering*, 2003, v.23, n.8, p.913-935.)

ROSSAROLA, Adriane. **Análise econômico-financeira de investimento em energia solar e externalidades: estudo de caso de uma empresa industrial em Santa Catarina**. Santa Catarina 2016.

SANDBERG, E. **Energy and scrap optimization of electric arc furnaces by statistical analysis of process data**. Lulea University of Technology. 2005.

SANTOS, L. P. **Análise de Desempenho de um Gerador Termoelétrico Baseado no Efeito Seebeck**. 2010. 45 f. Dissertação (Mestrado) -Universidade de Taubaté. Taubaté, 2010.

SEBRAE. **Análise e Planejamento Financeiro – Manual do Participante. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresa**. Sebrae, Brasília, 2011. Disponível em: <https://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/Anexos/0_fluxo-de-caixa.pdf> Acesso em 23/07/2020.

SIQUEIRA, L. S. C., **Análise da Competitividade de Fontes Renováveis de Energia Elétrica ao Acesso a Capital de Bancos de Desenvolvimento: O Papel dos Padrões de Sustentabilidade**, 2018.

SISTEMA DISTRIBUIÇÃO ALIMENTOS ELECROLUX. Electrolux. (2010). Disponível em: <http://www.comeca.pt/Catalogos_electrolux_PDF/MDS_folheto.pdf> Acesso em 11/04/2019 às 14:10

SOARES, L. N. **A Exergia e a Sustentabilidade Aplicadas a uma Usina Siderúrgica Integrada a Carvão Vegetal – Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte**, 2011.

SONG, Yang. **Oxide based thermoelectric materials for large scale power generation**. Dissertação (Mestrado) - Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2008.

SURESH, N. S.; RAO, B. S. **Solar energy for process heating: A case study of select Indian industries**. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 151, p. 439–451, 2017. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095965261730416X>. Acesso em: 06/06/2018.

Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp, Ltda. Jiangxi, China <http://www.thermonamic.com.cn/pro_view.asp?id=879> Acesso em 25/06/20 às 21:06.

TUNDISI, J.G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Recursos hídricos no Século XXI**, São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, **Energy Loss Reduction and Recovery in Industrial Energy Systems**. USA, 2012. Disponível em: <http://www1.eere.energy.gov>. Acesso em 09/06/2018.

WANG D., **Energy and Water Recovery with Transport Membrane Condenser, California Energy Commission**, Publication Number: CEC-5002013-001, 2013.

WENDY, C. Y. LI e BRONWYN, H. HALL. **Depreciation of Business R&D Capital**. WWF - Fundo Mundial para a Natureza. **Além de Grandes Hidrelétricas: Políticas para Fontes Renováveis de Energia Elétrica no Brasil. Relatório Técnico**. Brasília, 2012.

XI, L. *et al.* **Band Engineering and Rational Design of High-Performance Thermoelectric Materials by First-Principles**. China, 2016.

YU, P.; WANG, S.; LI, Y.; GUIXI XU, G. **A Review of Granulation Process for Blast Furnace Slag** MATEC Web of Conferences. ICIEA. 2016

ZANIN, A; BAGATINI, F. M. **The economic and financial feasibility of a biodigester: A sound alternative for reducing the environmental impact of swine production**. In: CURKOVIC, S. (Org). Sustainable Development –Authoritative and leading edge content for environmental management. Rijeka, Croatia: Intech. P. 371-388, 2012.

ZHENG, X. F.; YAN, Y. Y.; SIMPSON, K.; **A Potential Candidate for the Sustainable and Reliable Domestic Energy Generation - Thermoelectric cogeneration system**, University of Nottingham, UK, 2012.

CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, **Brief History of Thermoelectrics**, 2017. Disponível em: <http://www.thermoelectrics.caltech.edu/thermoelectrics/history.html>. Acesso em 10/12/2019.

10. APÊNDICE

Tabela A - Teste 1: Medições a 15 cm da Fonte de calor – Ligação em série.

Tempo (medidas) (min.)	Temp. 1 - (mód. Peltier) (°C)	Temp. 2 - (chapa aquecida) (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potencia (W)	Temp. Entrada Água (°C)	Temp. Saída Água (°C)	Vazão de água [L/min]
3	76	144	2,08	0,16	0,33	26	26	4,9
6	79	156	2,15	0,18	0,39			
9	82	157	2,33	0,2	0,47			
12	80	159	2,29	0,19	0,44			
15	82	150	2,32	0,21	0,49	26	25	1,5
18	55	114	2,14	0,19	0,41			
21	51	133	2,35	0,22	0,52			
24	47	129	2,25	0,19	0,43			
27	48	135	2,35	0,21	0,49			
30	48	159	2,36	0,22	0,52	26	25	2,98
33	50	170	2,55	0,27	0,69			
36	54	177	2,55	0,26	0,66			
39	56	182	2,62	0,27	0,71			
42	56	185	2,61	0,26	0,68			
45	56	188	2,65	0,28	0,74			2,71
Massa do botijão (kg)		Inicial	26,534					
		Final	26,362					

Tabela B - Teste 1: Medições a 10 cm da Fonte de calor – Ligação em série.

Tempo (medidas) (min.)	Temp. 1 - (mód. Peltier) (°C)	Temp. 2 - (chapa aquecida) (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Temp. Entrada Água (°C)	Temp. Saída Água (°C)	Vazão de água [L/min]		
3	55	249	2,92	0,32	0,93	25	25	8,2		
6	56	252	3,12	0,33	1,03					
9	64	255	3,18	0,34	1,08					
12	78	258	3,19	0,34	1,08			4,9		
15	75	258	3,14	0,34	1,07					
18	75	255	3,07	0,33	1,01					
21	75	254	3,06	0,33	1,01			8,8		
24	75	250	3	0,32	0,96					
27	74	253	3,02	0,32	0,97					
30	74	251	3,06	0,33	1,01			8,6		
33	74	245	3	0,32	0,96					
36	73	243	2,99	0,32	0,96					
39	73	250	2,99	0,32	0,96					
42	73	243	2,97	0,31	0,92					
45	74	253	3,07	0,32	0,98					
Massa do botijão (kg)		Inicial		26,302						
		Final		26,198						

Tabela C - Teste 1: Medições a 05 cm da Fonte de calor – Ligação em série.

Tempo (medidas) (min.)	Temp. 1 - (mód. Peltier) (°C)	Temp. 2 - (chapa aquecida) (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Temp. Entrada Água (°C)	Temp. Saída Água (°C)	Vazão de água [L/min]
3	94	301	3,12	0,32	1,00	25	25	8,4
6	97	311	3,28	0,33	1,08			
9	94	280	3,18	0,31	0,99			
12	94	286	3,14	0,31	0,97			
15	95	287	3,14	0,31	0,97			4
18	96	291	3,15	0,32	1,01			
21	92	296	3,08	0,3	0,92			
24	96	291	3,16	0,31	0,98			
27	95	292	3,14	0,31	0,97			
30	96	288	3,12	0,31	0,97			2,6
33	95	278	3,14	0,31	0,97			
36	95	283	3,14	0,3	0,94			
39	94	286	3,16	0,32	1,01			
42	93	280	3,14	0,31	0,97			
45	94	287	3,12	0,31	0,97			8,8
Massa do botijão (kg)		Inicial		26,19				
		Final		26,086				

Tabela D - Teste 2: Medições a 15 cm da Fonte de calor – Ligação em série.

Tempo (medidas) (min.)	Temp. 1 - (mód. Peltier) (°C)	Temp. 2 - (chapa aquecida) (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potencia (W)	Temp. Entrada Água (°C)	Temp. Saída Água (°C)	Vazão de água [L/min]
3	64	259	2,89	0,3	0,87	25	25	8,6
6	67	275	3,05	0,31	0,95			
9	67	274	3,1	0,31	0,96			
12	67	274	3,11	0,31	0,96			
15	68	273	3,08	0,31	0,95			3,8
18	67	262	3,09	0,31	0,96			
21	67	270	3,07	0,31	0,95			
24	67	267	3,02	0,3	0,91			8,7
27	69	293	3,27	0,33	1,08			
30	72	303	3,45	0,34	1,17			
33	71	278	3,57	0,34	1,21			
36	71	301	3,51	0,34	1,19			
39	72	307	3,6	0,35	1,26			
42	73	299	3,57	0,35	1,25			
45	72	299	3,59	0,35	1,26			8,4

Tabela E - Teste 2: Medições a 10 cm da Fonte de calor – Ligação em série.

Tempo (medidas) (min.)	Temp. 1 - (mód. Peltier) (°C)	Temp. 2 - (chapa aquecida) (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potencia (W)	Temp. Entrada Água (°C)	Temp. Saída Água (°C)	Vazão de água [L/min]
3	69	225	3,55	0,35	1,24	25	25	8,9
6	71	227	3,67	0,36	1,32			
9	73	272	4,01	0,36	1,44			
12	90	302	4,7	0,45	2,12			3,1
15	94	288	4,77	0,45	2,15			
18	96	295	4,8	0,46	2,21			
21	96	295	4,8	0,46	2,21			
24	97	298	4,81	0,47	2,26			
27	96	285	4,78	0,45	2,15			
30	95	281	4,8	0,45	2,16			6,4
33	95	289	4,81	0,46	2,21			
36	96	294	4,79	0,46	2,20			
39	96	295	4,83	0,47	2,27			
42	96	295	4,83	0,47	2,27			
45	97	293	4,81	0,46	2,21			8,8
Massa do botijão (kg)		Inicial	28,003					
		Final	27,891					

Tabela F - Teste 2: Medições a 5 cm da Fonte de calor – Ligação em série.

Tempo (medidas) (min.)	Temp. 1 - (mód. Peltier) (°C)	Temp. 2 - (chapa aquecida) (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potencia (W)	Temp. Entrada Água (°C)	Temp. Saída Água (°C)	Vazão de água [L/min]
3	60	387	4,87	0,48	2,34	25	25	8
6	75	398	5,3	0,5	2,65			
9	58	400	5,47	0,51	2,79			
12	58	399	5,45	0,51	2,78			
15	61	393	5,43	0,5	2,72			
18	62	408	5,58	0,52	2,90			
21	64	398	5,52	0,52	2,87			
24	63	395	5,41	0,51	2,76			
27	64	392	5,44	0,51	2,77			
30	66	393	5,35	0,51	2,73			
33	67	391	5,36	0,51	2,73			
36	66	395	5,36	0,51	2,73			
39	67	391	5,38	0,51	2,74			
42	67	388	5,36	0,5	2,68			
45	68	392	5,35	0,5	2,68			
Massa do botijão (kg)		Inicial	27,891					
		Final	27,793					

Tabela G - Teste 3: Medições a 15 cm da Fonte de calor – Ligação em série.

Tempo (medidas) (min.)	Temp. 1 - (mód. Peltier) (°C)	Temp. 2 - (chapa aquecida) (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potencia (W)	Temp. Entrada Água (°C)	Temp. Saída Água (°C)	Vazão de água [L/min]
3	39	282	3,82	0,4	1,53	25	25	2,4
6	44	290	4,27	0,42	1,79			
9	47	295	4,35	0,42	1,83			
12	47	295	4,38	0,42	1,84			
15	42	293	4,45	0,43	1,91			
18	43	293	4,43	0,43	1,90			
21	43	294	4,47	0,44	1,97			
24	43	295	4,43	0,43	1,90			
27	43	290	4,37	0,43	1,88			
30	44	275	4,25	0,41	1,74			
33	43	286	4,18	0,41	1,71			
36	43	292	4,26	0,41	1,75			
39	43	289	4,32	0,42	1,81			
42	43	289	4,27	0,41	1,75			
45	41	282	3,99	0,4	1,60			
Massa do botijão (kg)		Inicial	27,827					
		Final	27,667					

Tabela H - Teste 3: Medições a 10 cm da Fonte de calor – Ligação em série.

Tempo (medidas) (min.)	Temp. 1 - (mód. Peltier) (°C)	Temp. 2 - (chapa aquecida) (°C)	Tensão(V)	Corrente (A)	Potencia (W)	Temp. Entrada Água (°C)	Temp. Saída Água (°C)	Vazão de água [L/min]
3	99	200	2,58	0,26	0,67	24	24	9
6	90	196	2,43	0,26	0,63			
9	97	210	2,51	0,28	0,70			
12	99	208	2,64	0,28	0,74			
15	97	207	2,59	0,28	0,73			
18	97	205	2,58	0,28	0,72			
21	96	206	2,57	0,28	0,72			
24	96	206	2,57	0,28	0,72			
27	96	206	2,55	0,28	0,71			
30	95	211	2,6	0,28	0,73			
33	99	218	2,72	0,29	0,79			
36	99	219	2,76	0,29	0,80			
39	96	205	2,57	0,28	0,72			
42	94	205	2,53	0,28	0,71			
45	95	209	2,56	0,28	0,72			
Massa do botijão (kg)	Inicial	27,542						
	Final	27,474						

Tabela I - Teste 3: Medições a 5 cm da Fonte de calor – Ligação em série.

Tempo (medidas) (min.)	Temp. 1 - (mód. Peltier) (°C)	Temp. 2 - (chapa aquecida) (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potencia (W)	Temp. Entrada Água (°C)	Temp. Saída Água (°C)	Vazão de água [L/min]
3	89	265	2,47	0,27	0,67	24	24	8,3
6	99	275	2,67	0,29	0,77			
9	97	265	2,7	0,29	0,78			
12	96	260	2,66	0,28	0,74			
15	99	270	2,71	0,29	0,79			
18	87	283	2,67	0,26	0,69			
21	97	292	2,92	0,31	0,91			
24	82	251	2,51	0,27	0,68			
27	92	260	2,51	0,27	0,68			
30	94	263	2,63	0,29	0,76			
33	95	267	2,64	0,29	0,77			
36	95	265	2,65	0,29	0,77			
39	95	264	2,65	0,29	0,77			
42	95	267	2,64	0,29	0,77			
45	95	264	2,66	0,29	0,77			
Massa do botijão (kg)	Inicial	27,472						
	Final	27,403						

Tabela J - Teste 1: Medições a 15 cm da Fonte de calor – Ligação em paralelo.

Tempo (medidas) (min.)	Temp. 2 - (chapa aquecida) (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
3	145	0,77	0,03	0,02
6	147	0,91	0,05	0,05
9	156	1,02	0,05	0,05
12	156	1,03	0,06	0,06
15	162	1	0,06	0,06
18	164	1,03	0,08	0,08
21	168	1,1	0,08	0,09
24	170	1,08	0,07	0,08
27	175	1,1	0,09	0,10
30	179	1,11	0,1	0,11
33	182	1,13	0,09	0,10
36	185	1,14	0,08	0,09
39	188	1,12	0,08	0,09
42	192	1,1	0,09	0,10
45	197	1,14	0,09	0,10

Tabela K - Teste 1: Medições a 10 cm da Fonte de calor – Ligação em paralelo.

Tempo (medidas) (min.)	Temp. 2 - (chapa aquecida) (°C)	Tensão(V)	Corrente(A)	Potência (W)
3	228	0,99	0,12	0,12
6	231	1,01	0,12	0,12
9	235	1,03	0,13	0,13
12	237	1,05	0,13	0,14
15	241	1,05	0,12	0,13
18	244	1,07	0,1	0,11
21	245	1,07	0,1	0,11
24	249	1,06	0,12	0,13
27	254	1,05	0,11	0,12
30	270	1,09	0,14	0,15
33	277	1,1	0,14	0,15
36	279	1,1	0,14	0,15
39	284	1,12	0,15	0,17
42	286	1,17	0,13	0,15
45	292	1,2	0,15	0,18

Tabela L - Teste 1: Medições a 5 cm da Fonte de calor – Ligação em paralelo.

Tempo (medidas) (min.)	Temp. 2 - (chapa aquecida) (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
3	280	1,64	0,15	0,25
6	287	1,67	0,19	0,32
9	290	1,75	0,2	0,35
12	291	1,55	0,2	0,31
15	293	1,69	0,2	0,34
18	297	1,77	0,21	0,37
21	317	2	0,25	0,50
24	300	1,83	0,22	0,40
27	304	1,88	0,22	0,41
30	305	1,9	0,22	0,42
33	305	1,99	0,22	0,44
36	307	1,93	0,23	0,44
39	309	1,85	0,23	0,43
42	313	1,98	0,24	0,48
45	314	2,05	0,24	0,49

Tabela M - Teste 2: Medições a 15 cm da Fonte de calor – Ligação em paralelo.

Tempo (medidas) (min.)	Temp. 2 - (chapa aquecida) (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
3	140	0,65	0,08	0,05
6	146	0,67	0,08	0,05
9	147	0,67	0,08	0,05
12	157	0,73	0,09	0,07
15	167	0,74	0,09	0,07
18	170	0,76	0,1	0,08
21	173	0,79	0,1	0,08
24	176	0,79	0,1	0,08
27	177	0,78	0,1	0,08
30	182	0,80	0,11	0,09
33	185	0,81	0,11	0,09
36	201	0,87	0,12	0,10
39	204	0,88	0,11	0,10
42	207	0,89	0,12	0,11
45	208	0,89	0,1	0,09

Tabela N - Teste 2: Medições a 10 cm da Fonte de calor – Ligação em paralelo.

Tempo (medidas) (min.)	Temp. 2 - (chapa aquecida) (°C)	Tensão(V)	Corrente(A)	Potência (W)
3	200	0,73	0,11	0,08
6	205	0,75	0,11	0,08
9	206	0,74	0,1	0,07
12	219	0,78	0,15	0,12
15	231	0,87	0,17	0,15
18	232	0,88	0,17	0,15
21	237	0,91	0,17	0,15
24	244	0,97	0,19	0,18
27	254	0,99	0,2	0,20
30	258	1,01	0,21	0,20
33	271	1,12	0,22	0,22
36	278	1,12	0,2	0,20
39	280	1,17	0,22	0,22
42	281	1,18	0,22	0,22
45	283	1,21	0,22	0,22

Tabela O - Teste 2: Medições a 5 cm da Fonte de calor – Ligação em paralelo.

Tempo (medidas) (min.)	Temp. 2 - (chapa aquecida) (°C)	Tensão(V)	Corrente(A)	Potência (W)
3	277	1,65	0,13	0,21
6	281	1,66	0,14	0,23
9	285	1,68	0,16	0,27
12	288	1,69	0,17	0,29
15	290	1,69	0,17	0,29
18	296	1,73	0,19	0,33
21	296	1,75	0,19	0,33
24	296	1,74	0,19	0,33
27	301	1,78	0,19	0,34
30	303	1,88	0,21	0,39
33	307	1,89	0,22	0,42
36	308	1,89	0,22	0,42
39	311	1,92	0,24	0,46
42	315	1,93	0,25	0,48
45	318	1,95	0,27	0,53

Tabela P - Teste 3: Medições a 15 cm da Fonte de calor – Ligação em paralelo.

Tempo (medidas) (min.)	Temp. 2 - (chapa aquecida) (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
3	138	0,1	0,06	0,01
6	139	0,16	0,07	0,01
9	143	0,18	0,07	0,01
12	144	0,2	0,07	0,01
15	145	0,22	0,07	0,02
18	148	0,22	0,08	0,02
21	165	0,28	0,08	0,02
24	168	0,29	0,08	0,02
27	170	0,3	0,08	0,02
30	174	0,34	0,09	0,03
33	175	0,37	0,09	0,03
36	176	0,4	0,09	0,04
39	179	0,45	0,10	0,04
42	181	0,52	0,10	0,05
45	185	0,54	0,10	0,06

Tabela Q - Teste 3: Medições a 10 cm da Fonte de calor – Ligação em paralelo.

Tempo (medidas) (min.)	Temp. 2 - (chapa aquecida) (°C)	Tensão (V)	Corrente(A)	Potência (W)
3	190	0,21	0,12	0,03
6	191	0,26	0,13	0,03
9	198	0,27	0,13	0,03
12	204	0,28	0,14	0,04
15	207	0,31	0,14	0,04
18	217	0,42	0,14	0,06
21	229	0,43	0,15	0,06
24	229	0,42	0,15	0,06
27	238	0,56	0,16	0,09
30	250	0,61	0,17	0,10
33	252	0,63	0,17	0,11
36	262	0,67	0,18	0,12
39	264	0,79	0,19	0,15
42	266	0,79	0,19	0,15
45	272	0,89	0,19	0,17

Tabela R - Teste 3: Medições a 5 cm da Fonte de calor – Ligação em paralelo.

Tempo (medidas) (min.)	Temp. 2 - (chapa aquecida) (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
3	263	0,77	0,13	0,10
6	269	0,82	0,13	0,11
9	271	0,85	0,14	0,11
12	272	0,86	0,14	0,12
15	275	0,94	0,15	0,14
18	279	0,97	0,16	0,16
21	280	0,99	0,17	0,16
24	282	1,04	0,17	0,18
27	285	1,05	0,17	0,18
30	294	1,07	0,17	0,19
33	295	1,08	0,18	0,19
36	296	1,10	0,18	0,20
39	297	1,12	0,20	0,22
42	300	1,16	0,20	0,23
45	306	1,25	0,20	0,25

Tabela S - Dados da Siderurgia – Temperatura das Tubulação Caldeiras (°C)

Caldeira 1	Caldeira 2	Caldeira 3	Caldeira 1	Caldeira 2	Caldeira 3	Caldeira 1	Caldeira 2	Caldeira 3
234	226	223	219	215	202	207	209	196
229	220	222	215	213	202	186	181	196
214	212	222	212	211	202	219	215	195
220	216	221	203	206	202	196	200	195
215	214	219	202	205	202	195	195	195
225	217	217	198	202	202	231	222	194
233	225	214	241	228	201	215	213	194
212	211	214	229	221	201	213	212	194
230	221	213	226	218	201	209	210	194
198	202	213	214	212	201	207	208	194
228	220	212	211	211	201	209	210	193
215	214	212	210	210	201	209	210	193
205	207	212	203	205	201	206	208	193
198	202	212	201	203	201	206	208	193
196	199	212	233	225	200	204	206	193
210	210	211	227	218	200	211	211	192
205	207	211	223	217	200	203	206	192
202	204	211	214	212	200	199	203	192
232	224	210	211	211	200	212	211	191
231	223	210	204	206	200	246	229	190
211	211	210	240	227	199	243	229	190
215	213	208	232	225	199	211	211	190
207	210	208	228	220	199	207	209	190
231	222	207	226	217	199	211	211	189
227	218	207	220	215	199	205	207	189
213	212	207	220	215	199	200	203	189
207	209	207	207	209	199	205	207	188
221	216	206	226	218	198	201	204	188
206	208	206	222	217	198	200	203	188
217	215	205	217	214	198	200	203	188

208	210	205	203	205	198	198	202	188
202	204	205	198	202	198	208	210	187
202	204	205	196	199	198	206	208	187
229	221	204	195	195	198	209	210	186
227	219	204	213	212	197	207	210	186
207	209	204	207	209	197	203	206	186
201	203	204	207	209	197	208	210	185
222	216	203	205	206	197	198	203	185
214	213	203	197	201	197	197	201	185
197	202	203	197	200	197	201	204	183
188	183	203	193	194	197	190	188	183
228	219	202	249	230	196	191	192	182
227	219	202	217	214	196	202	205	181
						193	192	181

Tabela U – Fluxo de Caixa para investimento de 12 módulos termoeletricos*

ANO	FLUXO DE CAIXA
0	-R\$ 74.499,71
1	-R\$ 72.626,76
2	-R\$ 70.735,08
3	-R\$ 68.824,48
4	-R\$ 66.894,78
5	-R\$ 64.945,78
6	-R\$ 62.977,29
7	-R\$ 60.989,11
8	-R\$ 58.981,06
9	-R\$ 56.952,92
10	-R\$ 54.904,50
11	-R\$ 52.835,60
12	-R\$ 50.746,01
13	-R\$ 48.635,52
14	-R\$ 46.503,93
15	-R\$ 44.351,02
16	-R\$ 42.176,58
17	-R\$ 39.980,40
18	-R\$ 37.762,26
19	-R\$ 35.521,93
20	-R\$ 33.259,20
21	-R\$ 30.973,85
22	-R\$ 28.665,64
23	-R\$ 26.334,35
24	-R\$ 23.979,74

25	-R\$ 21.601,59
26	-R\$ 19.199,66
27	-R\$ 16.773,71
28	-R\$ 14.323,50
29	-R\$ 11.848,78
30	-R\$ 9.349,32
31	-R\$ 6.824,87
32	-R\$ 4.275,17
33	-R\$ 1.699,97
34	R\$ 900,97
35	R\$ 3.527,93
36	R\$ 6.181,16
37	R\$ 8.860,92
38	R\$ 11.567,47
39	R\$ 14.301,10
40	R\$ 17.062,06
41	R\$ 19.850,62
42	R\$ 22.667,08
43	R\$ 25.511,70
44	R\$ 28.384,76
45	R\$ 31.286,56
46	R\$ 34.217,37
47	R\$ 37.177,49
48	R\$ 40.167,21
49	R\$ 43.186,83
50	R\$ 46.236,65

* Foi levado em consideração da utilização de 10% na troca de componentes do sistema. O reajuste salarial de funcionários não foi levado em consideração.

Tabela V – Fluxo de Caixa para investimento de 50 módulos termoeletricos*

ANO	FLUXO DE CAIXA
0	-R\$ 193.271,60
1	-R\$ 185.467,64
2	-R\$ 177.585,64
3	-R\$ 169.624,82
4	-R\$ 161.584,39
5	-R\$ 153.463,56
6	-R\$ 145.261,51
7	-R\$ 136.977,45
8	-R\$ 128.610,55
9	-R\$ 120.159,98
10	-R\$ 111.624,90
11	-R\$ 103.004,47
12	-R\$ 94.297,84
13	-R\$ 85.504,14
14	-R\$ 76.622,50
15	-R\$ 67.652,05
16	-R\$ 58.591,90
17	-R\$ 49.441,14
18	-R\$ 40.198,87
19	-R\$ 30.864,18
20	-R\$ 21.436,15
21	-R\$ 11.913,83
22	-R\$ 2.296,29
23	R\$ 7.417,42
24	R\$ 17.228,27
25	R\$ 27.137,23
26	R\$ 37.145,28
27	R\$ 47.253,41
28	R\$ 57.462,62
29	R\$ 67.773,93
30	R\$ 78.188,34
31	R\$ 88.706,90
32	R\$ 99.330,65
33	R\$ 110.060,63
34	R\$ 120.897,92
35	R\$ 131.843,57
36	R\$ 142.898,69
37	R\$ 154.064,35
38	R\$ 165.341,67
39	R\$ 176.731,76
40	R\$ 188.235,76
41	R\$ 199.854,79
42	R\$ 211.590,02
43	R\$ 223.442,60
44	R\$ 235.413,70
45	R\$ 247.504,51
46	R\$ 259.716,24
47	R\$ 272.050,07
48	R\$ 284.507,25
49	R\$ 297.089,00
50	R\$ 309.796,57

Tabela X – Fluxo de Caixa para investimento de 150 módulos termoeletricos*

ANO	FLUXO DE CAIXA		
0	-R\$ 499.897,21	43	R\$ 750.245,38
1	-R\$ 476.485,32	44	R\$ 786.158,69
2	-R\$ 452.839,32	45	R\$ 822.431,13
3	-R\$ 428.956,86	46	R\$ 859.066,30
4	-R\$ 404.835,57	47	R\$ 896.067,82
5	-R\$ 380.473,07	48	R\$ 933.439,35
6	-R\$ 355.866,95	49	R\$ 971.184,60
7	-R\$ 331.014,76	50	R\$ 1.009.307,30
8	-R\$ 305.914,05		
9	-R\$ 280.562,34		
10	-R\$ 254.957,10		
11	-R\$ 229.095,82		
12	-R\$ 202.975,92		
13	-R\$ 176.594,83		
14	-R\$ 149.949,92		
15	-R\$ 123.038,56		
16	-R\$ 95.858,09		
17	-R\$ 68.405,82		
18	-R\$ 40.679,02		
19	-R\$ 12.674,96		
20	R\$ 15.609,15		
21	R\$ 44.176,10		
22	R\$ 73.028,71		
23	R\$ 102.169,86		
24	R\$ 131.602,41		
25	R\$ 161.329,29		
26	R\$ 191.353,44		
27	R\$ 221.677,83		
28	R\$ 252.305,46		
29	R\$ 283.239,37		
30	R\$ 314.482,62		
31	R\$ 346.038,30		
32	R\$ 377.909,54		
33	R\$ 410.099,49		
34	R\$ 442.611,34		
35	R\$ 475.448,31		
36	R\$ 508.613,65		
37	R\$ 542.110,64		
38	R\$ 575.942,60		
39	R\$ 610.112,89		
40	R\$ 644.624,87		
41	R\$ 679.481,97		
42	R\$ 714.687,65		

Tabela W – Fluxo de Caixa para investimento de 1000 módulos termoeletricos*

ANO	FLUXO DE CAIXA
0	-R\$ 3.165.197,75
1	-R\$ 3.009.118,53
2	-R\$ 2.851.478,51
3	-R\$ 2.692.262,10
4	-R\$ 2.531.453,52
5	-R\$ 2.369.036,85
6	-R\$ 2.204.996,02
7	-R\$ 2.039.314,78
8	-R\$ 1.871.976,73
9	-R\$ 1.702.965,29
10	-R\$ 1.532.263,75
11	-R\$ 1.359.855,18
12	-R\$ 1.185.722,53
13	-R\$ 1.009.848,56
14	-R\$ 832.215,84
15	-R\$ 652.806,80
16	-R\$ 471.603,67
17	-R\$ 288.588,51
18	-R\$ 103.743,19
19	R\$ 82.950,58
20	R\$ 271.511,28
21	R\$ 461.957,60
22	R\$ 654.308,37
23	R\$ 848.582,66
24	R\$ 1.044.799,69
25	R\$ 1.242.978,88
26	R\$ 1.443.139,87
27	R\$ 1.645.302,47
28	R\$ 1.849.486,70
29	R\$ 2.055.712,76
30	R\$ 2.264.001,09
31	R\$ 2.474.372,30
32	R\$ 2.686.847,23
33	R\$ 2.901.446,90
34	R\$ 3.118.192,57
35	R\$ 3.337.105,70
36	R\$ 3.558.207,95
37	R\$ 3.781.521,23
38	R\$ 4.007.067,65
39	R\$ 4.234.869,52
40	R\$ 4.464.949,42
41	R\$ 4.697.330,11
42	R\$ 4.932.034,62
43	R\$ 5.169.086,16
44	R\$ 5.408.508,22
45	R\$ 5.650.324,51
46	R\$ 5.894.558,95
47	R\$ 6.141.235,74
48	R\$ 6.390.379,30
49	R\$ 6.642.014,29
50	R\$ 6.896.165,64

asd