

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA
E DE COMPUTAÇÃO

**GEOMETRIA DE DUTOS DE ESCAPE OTIMIZADA
PARA APLICAÇÃO NA COGERAÇÃO DA PRODUÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA**

Pedro Henrique Garcia Gomes

[UFG] & [EMC]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
28 de dezembro de 2017

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

Nome completo do autor: Pedro Henrique Garcia Gomes

Título do trabalho: Geometria de dutos de escape otimizada para aplicação na cogeração da produção de energia elétrica

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento **SIM** **NÃO**¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.



Assinatura do(a) autor(a)²

Ciente e de acordo:



Assinatura do(a) orientador(a)²

Data: 05 / 12 / 17

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

² A assinatura deve ser escaneada.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA
E DE COMPUTAÇÃO

**GEOMETRIA DE DUTOS DE ESCAPE OTIMIZADA
PARA APLICAÇÃO NA COGERAÇÃO DA PRODUÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA**

Pedro Henrique Garcia Gomes

Dissertação apresentada à Banca Examinadora como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação pela Universidade Federal de Goiás (UFG), Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), sob a orientação do Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto e co-orientação do Prof. Dr. Aylton José Alves

[UFG] & [EMC]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
28 de dezembro de 2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Gomes, Pedro Henrique Garcia

Geometria de dutos de escape otimizada para aplicação na cogeração da produção de energia elétrica [manuscrito] / Pedro Henrique Garcia Gomes. - 2017.
cxx, 120 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto; co-orientador Dr. Aylton José Alves.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia, 2017.

Bibliografia.

Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Termoeletricidade. 2. Transferência de calor. 3. Geometria. 4. Otimização. 5. TEG. I. Calixto, Wesley Pacheco, orient. II. Título.

CDU 621



Ata de Defesa de Dissertação de Mestrado

Ata da sessão de julgamento da Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação, área de concentração Engenharia Elétrica, do(a) candidato(a) **Pedro Henrique Garcia Gomes**, realizada em 05 de dezembro de 2017.

Aos 05 dias do mês de dezembro de dois mil e dezessete, às 14:00 horas, na sala Caryocar brasiliensis, bloco "A" da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Universidade Federal de Goiás (UFG), reuniram-se os seguintes membros da Comissão Examinadora designada pela Coordenadoria do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação: os Doutores Wesley Pacheco Calixto – Orientador(a) (EMC/UFG), Aylton José Alves – ECA/IFG, Elder Geraldo Domingues – ECA/IFG, Eider Lúcio de Oliveira – EM/IFG e Marco Antônio Assfalk de Oliveira – EMC/UFG para julgar a Dissertação de Mestrado de **Pedro Henrique Garcia Gomes**, intitulada "**Geometria de dutos de escape otimizada para aplicação na cogeração da produção de energia elétrica**", apresentada pelo(a) candidato(a) como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre, em conformidade com a regulamentação em vigor. O(A) Professor(a) Doutor(a) Wesley Pacheco Calixto, Presidente da Comissão, abriu a sessão e apresentou o(a) candidato(a) que discorreu sobre seu trabalho, após o que, foi arguido(a) pelos membros da Comissão na seguinte ordem: Aylton José Alves, Elder Geraldo Domingues, Eider Lúcio de Oliveira e Marco Antônio Assfalk de Oliveira. A parte pública da sessão foi então encerrada e a Comissão Examinadora reuniu-se em sessão reservada para deliberar. A Comissão julgou então que o(a) candidato(a), tendo demonstrado conhecimento suficiente, capacidade de sistematização e argumentação sobre o tema de sua Dissertação, foi considerado(a) **aprovado(a)** e deve satisfazer as exigências listadas na Folha de Modificação, em anexo a esta Ata, no prazo máximo de 60 dias, ficando o(a) professor(a) orientador(a) responsável por atestar o cumprimento dessas exigências. Os membros da Comissão Examinadora descreveram as justificativas para tal avaliação em suas respectivas Folhas de Avaliação, anexas a esta Ata. Nada mais havendo a tratar, o(a) presidente da Comissão declarou encerrada a sessão. Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de Pós-graduação desta Universidade, a presente Ata foi lavrada, lida e, julgada conforme, segue assinada pelos membros da Comissão supracitados e pelo(a) candidato(a). Goiânia, 05 de dezembro de 2017.

Comissão Examinadora designada:

Wesley Pacheco Calixto – Orientador(a) (EMC/UFG) (Avaliação: Aprovado)

Aylton José Alves – ECA/IFG (Avaliação: Aprovado)

Elder Geraldo Domingues – ECA/IFG (Avaliação: Aprovado)

Eider Lúcio de Oliveira – EM/IFG (Avaliação: Aprovado)

Marco Antônio Assfalk de Oliveira – EMC/UFG (Avaliação: Aprovado)

Candidato(a):

Pedro Henrique Garcia Gomes

"A simplicidade é o último grau de sofisticação".

LEONARDO DA VINCI

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por permitir a realização deste trabalho.

À minha mãe Jaci pelo apoio e incentivo durante todo o curso.

Agradeço imensamente meu pai pelo suporte em todas dúvidas que sua vasta experiência de vida lhe ensinou e pôde me repassar.

Ao Professor Dr. Wesley Pacheco Calixto pela orientação, incentivo, e ajuda no direcionamento dos trabalhos e elaboração dos artigos.

Ao Professor Dr. Aylton José Alves pelo apoio e pela co-orientação deste projeto.

Ao discente Antônio Pereira Arantes Neto, pelo suporte durante a aplicação do *software* de elementos finitos e demais detalhamentos computacionais.

Ao corpo docente do Programa de Mestrado da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação da Universidade Federal de Goiás pelo suporte institucional.

A CAPES e CNPq pelo contínuo e importante apoio ao desenvolvimento intelectual com suporte financeiros aos projetos de pesquisas, em especial pelo Processo CNPq nº. 8485, intitulado *Produção de aparato tecnológico e de software para estudos de recuperação de perdas de energia em motogerador elétrico*.

Aos demais professores desta banca de avaliação, pela disposição de tempo à correção e ao esclarecimento de dúvidas.

Aos amigos e alunos que aqui contribuíram das mais variadas formas, em particular aos mestrandos Priscila Araújo Juá Stecanella e Messias Anain Almeida Faria.

Ao auxiliar administrativo da UFG, Sr. João Antônio dos Reis, pela maestria nos procedimentos acadêmicos.

Pedro Henrique Garcia Gomes

RESUMO

O objetivo deste trabalho é buscar maior eficiência na conversão energética através dos módulos Seebeck, a partir da otimização da geometria do duto de exaustão de gases quentes. Diferentes materiais e geometrias são testadas. A espessura do duto é variada segundo o escoamento longitudinal do fluido e parâmetros otimizados são obtidos heurísticamente. Após o desenvolvimento do modelo otimizado do duto, é construído protótipo para ensaio no sistema real. A partir da camada de ar resistiva, obtém-se a equalização do gradiente de temperatura na superfície, melhorando a eficiência do sistema.

GEOMETRY OPTIMIZED EXHAUST DUCTS FOR APPLICATION IN COGENERATION OF ELECTRICITY PRODUCTION

ABSTRACT

The objective of this work is to seek greater efficiency in energy conversion using the Seebeck modules, from the duct geometry optimization exhaust hot gases. Different materials and geometries are tested. The duct thickness was varied along the longitudinal fluid flow and optimized parameters are obtained heuristically . After the development of optimized duct model, a prototype is built for testing in the actual system. From the resistive air layer, the surface temperature gradient equalization is obtained, improving the efficiency of the system.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	27
CAPÍTULO 2 MODELAGEM TERMOELÉTRICA E TRANSFERÊNCIA DE CALOR	35
2.1 Gerador elétrico e a cogeração	35
2.2 Motor a óleo diesel	36
2.3 Termoeletricidade	36
2.3.1 Efeito Seebeck	37
2.3.2 Efeito Peltier	38
2.3.3 Efeito Thomson	38
2.3.4 Eficiência dos materiais termoelétricos	39
2.4 Mecanismos de transferência de calor	39
2.5 Condutividade térmica	41
2.6 Número de Reynolds	41
2.7 Efeito convectivo	42
2.7.1 Determinação do coeficiente convectivo	42
2.7.2 Regime convectivo natural	43
2.7.3 Regime convectivo forçado	44
2.7.4 Regime duplo convectivo	45
2.8 Cálculo da vazão do fluido para refrigeradores	45
2.9 Resistividades térmicas	46
2.10 Área de Contato Térmico	47
2.11 Considerações	48
CAPÍTULO 3 OTIMIZAÇÃO E SIMULAÇÃO	49

3.1	Processo de otimização	49
3.1.1	Método de otimização	50
3.1.2	A função de avaliação	50
3.1.3	Restrições	51
3.1.4	Métodos determinísticos	51
3.1.5	Métodos heurísticos	51
3.2	Processo de modelagem matemática	52
3.3	Simulador	54
3.3.1	Introdução aos métodos aproximados	55
3.3.2	Método das diferenças finitas	56
3.3.3	Método dos elementos finitos	57
3.3.4	Análise não-linear	62
3.3.5	Simulações fluidodinamicas	62
3.3.6	Simulação com método de elementos finitos	63
3.4	Considerações	64
CAPÍTULO 4 METODOLOGIA		67
4.1	Avaliação do potencial de energia	67
4.2	Projeto do protótipo	67
4.3	Simulação	68
4.4	Construção do protótipo	70
4.5	Validação do modelo	70
4.6	Avaliação do efeito da pressão e da superfície de contato	72
4.6.1	Acabamento superficial	73
4.7	Sistema de controle e supervisão dos dados	73
4.8	Processo de otimização do protótipo	73
4.9	Considerações	74
CAPÍTULO 5 RESULTADOS		75
5.1	Análise do sistema de cogeração	75
5.2	Construção do protótipo	76
5.2.1	Gerador termoelétrico	77
5.2.2	Simulação de geometrias	78
5.2.3	Análise da proposta hexagonal	82
5.2.4	Simulação do modelo hexagonal com camada de ar resistiva	83
5.2.5	Análise de superfície estendida	84

5.2.6	Construção do protótipo	86
5.3	Validação experimental	89
5.3.1	Análise do TEG	90
5.3.2	Conexão do aparato ao conjunto moto-gerador diesel	91
5.3.3	Controle da temperatura no resfriador	93
5.4	Resultados obtidos nos experimentos	93
5.5	Eficiência × contato físico e pressão	96
5.5.1	Influência da pressão de contato	96
5.5.2	Influência da superfície	98
5.6	Processo de otimização aplicada	100
5.6.1	Otimização com quase-Newton e algoritmo genético	102
5.7	Comentários	104
CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO		107
6.1	Contribuições do trabalho	108
6.1.1	Artigos em anais de congresso	108
6.1.2	Artigos completos publicados em periódicos:	109
6.1.3	Patente	109
6.2	Continuação do trabalho	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		111

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Módulo termoeétrico de efeito Seebeck.	37
2.2 Modelo de resistências térmicas.	47
2.3 Fluxo de calor no duto.	47
3.1 Fluxograma do processo de otimização.	49
3.2 Fluxograma do processo de modelagem matemática.	53
3.3 Flexibilização do sistema em problema mais simples.	53
3.4 Discretização do problema com mudança do domínio contínuo (x, y) para o discreto (i, j)	56
3.5 Comportamento linear nos nós.	59
3.6 Comportamento não-linear nos nós.	59
3.7 Malha com elementos de diferentes geometrias.	60
3.8 Variações da geometria dos elementos no objeto.	60
3.9 Conexão entre elementos e compatibilidade.	61
3.10 Fluxograma da solução pelo método dos elementos finitos.	64
3.11 Fluxograma do processo de simulação.	65
4.1 Propostas: (1) variação do diâmetro interno e (2) variação da espessura da casca do duto.	68
4.2 Seções geométricas básicas simuladas: (a) triângulo, (b) quadrado, (c) hexágono e (d) círculo.	69
4.3 Proposta de superfície interna do duto de exaustão.	69
4.4 Fluxograma da fabricação do protótipo até a validação.	70
4.5 Modelo de acoplagem do duto de captação no moto gerador.	71
4.6 Teste com módulo de Seebeck no protótipo.	72
4.7 Protótipo de prensa para estudo tribológico.	72
5.1 Conjunto moto-gerador a diesel.	75
5.2 TEG da <i>Thermonamics</i> utilizado: (a) visualização interna e (b) superfície de contato.	77
5.3 Distribuição de: (a) calor [$^{\circ}C$] e (b) Reynolds, no duto triangular.	79
5.4 Distribuição de: (a) calor [$^{\circ}C$] e (b) Reynolds, no duto quadrangular.	79
5.5 Distribuição de: (a) calor [$^{\circ}C$] e (b) Reynolds, no duto hexagonal.	79
5.6 Distribuição de: (a) calor [$^{\circ}C$] e (b) Reynolds, no duto circular.	80

5.7	Linhas de fluxo e temperatura [$^{\circ}C$]: (a) modelo circular e (b) modelo triangular.	81
5.8	Distribuição de temperatura [$^{\circ}C$]: (a) modelo circular e (b) modelo triangular.	81
5.9	Modelo hexagonal: (a) com variação interna e (b) com variação externa.	82
5.10	Projeto da camada de ar resistiva no duto.	83
5.11	Relação da espessura da entrada da camada de ar \times temperatura equalizada.	85
5.12	Interior do duto: (a) sem superfície estendida helicoidal e (b) com superfície estendida helicoidal.	86
5.13	Linhas de fluxo: (a) sem superfície estendida helicoidal e (b) com superfície estendida helicoidal.	87
5.14	Distribuição de temperatura: (a) sem superfície estendida helicoidal e (b) com superfície estendida helicoidal.	87
5.15	Vista em perspectiva do protótipo para captação de energia térmica.	88
5.16	Vista em perspectiva do protótipo.	88
5.17	Vista explodida do protótipo.	89
5.18	Equalização térmica em chapa de cobre.	89
5.19	Montagem laboratorial para teste do TEG.	90
5.20	Imagem térmica do teste laboratorial dos TEG.	91
5.21	Curvas experimental \times fabricante do TEG.	91
5.22	Protótipo acoplado no conjunto moto-gerador diesel.	92
5.23	Comparativo: (a) imagem térmica do aparato quente sem TEG; (b) localização dos sensores no aparato.	93
5.24	Sistema de resfriamento acoplado ao conjunto moto-gerador.	94
5.25	Aparato conectado ao dispositivo de resfriamento.	94
5.26	Dispositivo para análise de contato e pressão.	97
5.27	Distribuição de temperatura no dispositivo para análise de contato e pressão.	99
5.28	Rugosímetro para avaliação de superfícies.	99
5.29	Zona de efeito convectivo do meio externo.	101
5.30	Duto com indicação das temperaturas t_i , t_o e das espessuras E e e	101
5.31	Desempenho do algoritmo genético.	103
5.32	Vista isométrica após construção da malha de elementos.	103

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Condutividade térmica de alguns metais de fabricação mecânica.	41
5.1 Temperaturas médias no escape do conjunto moto-gerador a diesel. . . .	76
5.2 Dados do conjunto moto-gerador.	76
5.3 Dados técnicos do TEG da <i>Thermonamics</i> utilizado.	78
5.4 Características básicas das geometrias simuladas.	78
5.5 Fluxo de calor \times geometria.	80
5.6 Características do protótipo hexagonal com camada de ar resistiva. . . .	83
5.7 Valores dos parâmetros para construção da expressão (5.2).	84
5.8 Resultados experimentais do uso da superfície estendida.	95
5.9 Resultados simulados \times experimentais.	95
5.10 Geração da planta termoelétrica \times ramo.	95
5.11 Geração da planta termoelétrica.	96
5.12 Relação quilopascal \times quilograma-força.	97
5.13 Relação força \times tensão.	98
5.14 Rugosidades das superfícies analisadas.	100
5.15 Acabamento superficial \times tensão.	100
5.16 Resultados da otimização.	102

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔT	–	Variação da temperatura
ΔT_h	–	Temperatura média encontrada na superfície quente
ϵ	–	Emissividade
μ	–	Viscosidade do fluido
ρ	–	Densidade do fluido
Δ_x	–	Variação de espaço
Δ_t	–	Variação de tempo
σ	–	Condutividade elétrica
∇T	–	Gradiente de temperatura
A	–	Área da seção
C	–	Matriz de amortecimento
C_p	–	Calor específico do fluido
D	–	Comprimento (diâmetro)
D	–	Dimensão x, y, z do fenômeno convecção
D_e	–	Diâmetro de entrada
D_h	–	Diâmetro hidráulico
D_s	–	Diâmetro de saída
$\frac{dT}{dx}$	–	Variação da temperatura no espaço
E	–	Espessura de entrada
e	–	Espessura de saída
E_b	–	Poder emissivo
F	–	Força nodal
F_a	–	Forças aplicadas
$f(x)$	–	Função
$f(x^*)$	–	Função otimizada
g	–	Aceleração da gravidade
G_r	–	Número de Grashof
h	–	Coefficiente convectivo
h_1	–	Coefficiente convectivo da parede interna do duto
h_2	–	Coefficiente convectivo da parede externa do duto
I	–	Corrente elétrica no TEG
I_{TEG}	–	Tensão no TEG
i	–	Corrente elétrica
I_{cc}	–	Corrente de curto circuito
I_{mpp}	–	Corrente na máxima potência
k	–	Condutividade térmica
K	–	Matriz de rigidez
L_L	–	Relação do perímetro por número de lados
m	–	Massa

M	–	Matriz de massa
N_u	–	Número de Nusselt
P	–	Perímetro
P_1	–	Peça 1
P_2	–	Peça 2
P_3	–	Peça 3
P_o	–	Potência
P_{ge}	–	Potência das perdas de exaustão no geradora
P_{ee}	–	Potência energia elétrica disponível para utilização
P_{max}	–	Potência máxima
P_r	–	Número de Prandtl
\dot{Q}	–	Fluxo de Calor
q_c	–	Calor de condução na parede do duto
q_{h1}	–	Calor de convecção 1
q_{h2}	–	Calor de convecção 2
R_a	–	Rugosidade Média
R_{cond}	–	Resistência térmica associada a condução
R_{conv}	–	Resistência térmica associada a convecção
R_e	–	Número de Reynolds
R_{max}	–	Número de Reynolds máximo
R_q	–	Rugosidade Quadrática Média
R_z	–	Rugosidade Total
r_1	–	Raio interno 1
r_2	–	Raio interno 2
S	–	Coefficiente de Seebeck
T	–	Temperatura absoluta
T_e	–	Temperatura limite dos TEG
T_i	–	Temperatura interna do fluido
T_∞	–	Temperatura do meio externo
T_c	–	Temperatura fonte fria
T_h	–	Temperatura fonte quente
T_{se}	–	Temperatura superfície externa
T_{si}	–	Temperatura superfície interna
$TT01$	–	Termopar refrigerador
$TT02$	–	Termopar superfície quente
$\overline{T_m}$	–	Termopar média do conjunto moto-gerador
T_h	–	Temperatura limite do TEG
T_e	–	Temperatura média na superfície
t_i	–	Temperatura da superfície na entrada
t_o	–	Temperatura da superfície na saída

u	–	Vetor de deslocamento nodal
V	–	Tensão elétrica
V	–	Velocidade do fluido
V_{mpp}	–	Tensão na máxima potência
V_{out}	–	Tensão de circuito aberto
V_{TEG}	–	Tensão no TEG
\bar{V}	–	Velocidade média do fluido
\underline{x}	–	Vetor de parâmetros a serem otimizados
ZT	–	Figura de mérito

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	–	Computer-Aided Design
CFD	–	Computational Fluid Dynamics
CNPq	–	Conselho Nacional de Pesquisas
CLP	–	Controlador Lógico Programável
GLP	–	Gás Liquefeito de Petróleo
IEEE	–	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INPI	–	Instituto Nacional de Propriedade Privada
IPEA	–	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MDF	–	Método das Diferenças Finitas
MEF	–	Método dos Elementos Finitos
PEG	–	Polietilenoglicol
PIB	–	Produto Interno Bruto
TEG	–	Thermoelectric Generator

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O crescimento demasiado do consumo de energia, embora reflita o desenvolvimento econômico e a melhoria da qualidade de vida, tem aspectos negativos. Um deles é a possibilidade do esgotamento dos recursos utilizados para a produção de energia, outro é o impacto ao meio ambiente produzido por esta atividade. Ainda devem ser considerados os elevados investimentos exigidos na pesquisa de novas fontes e construção de novas usinas (ENERGIA, 2007).

Existe relação direta e concreta entre desenvolvimento econômico e a necessidade de energia para o desenvolvimento. Esta associação parte do descobrimento da energia elétrica, passando pelas revoluções industriais e atinge os dias atuais. A economia mundial viveu o ciclo de vigorosa expansão, refletida pela variação crescente do PIB, 43,6% de 2003 a 2007, segundo série histórica produzida pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). No mesmo período, a variação acumulada da demanda energia foi de 13% (ENERGIA, 2007). Tão juntamente aos índices financeiros, ampliam-se o número de habitantes, demandantes de conforto e trabalho energético. Para 2030, a população mundial é projetada para 8,3 bilhões, indicando adicional de 1,2 bilhões de pessoas que necessitam de energia e, se a renda for o dobro da existente em 2011, resultará no crescimento de 1,6% ao ano no consumo de energia primária, adicionando 36% ao consumo mundial (BP, January 2013).

A expansão crescente da demanda por energia elétrica para apoiar o crescimento dos países tem esbarrado em algumas questões em função particular do aquecimento global e das limitações das fontes de energias existentes, o que tem resultado em extensivas pesquisas no desenvolvimento de tecnologias verdes (ENERGIA, 2007).

O aumento da demanda por energia no passado ocorreu nos países industrializados e 90% dela foi satisfeita por combustíveis fósseis. Contudo, prevê-se que nos próximos anos, a maior parte do acréscimo na demanda por energia virá dos países em desenvolvimento, como o Brasil, provocada pela economia crescente e pelos aumentos populacionais. O cenário atual não permite aos países em desenvolvimento trilharem o mesmo caminho das nações industrializadas que galgaram seu avanço alimentado prioritariamente por combustíveis fósseis (ANEEL, 2002). Atualmente, cerca de 66,7% da energia mundial é de fonte fóssil (CIA, 2013) e esta redução se

deu graças à adoção de políticas energéticas mais sustentáveis, a curto e a longo prazos, viabilizado pelo uso planejado dos recursos energéticos e aplicação de novas tecnologias mais eficientes e menos impactantes.

No mundo, a participação das fontes renováveis na oferta interna de energia, saltou de 12,8% em 1973 para 13,3% em 2003, aumento de 3,9%, e a biomassa segue sendo a fonte de energia renovável mais utilizada no mundo ([ENERGIA, 2008](#)).

O aumento da eficiência energética no uso da biomassa pode ser atingido por diversos meios. Uma das formas para isto, é a chamada cogeração, processo no qual se promove o reaproveitamento da energia térmica, por exemplo, garantindo aumento na eficiência. O aquecimento de ar de combustão pode aumentar a eficiência da caldeira em cerca de 1% por cada 22°C de aumento da temperatura com o pré-aquecimento na admissão ([SAPKAL et al., 2011](#)). Novos processos como a utilização de trocadores de calor, módulos termoelétricos, motores *stirling*, entre outros, aumentam a eficiência do sistema quando incorporados à estas fontes de energia.

O aquecimento residencial, o sistema de exaustão de veículos, os processos industriais, e várias outras máquinas térmicas, todos dispõem e perdem calor para o meio externo ([TERVO J.; MANNINEN A.; ILOLA, 2009](#)).

[Bergman et al. \(2011\)](#) afirmam que 60% da energia consumida no mundo é rejeitada na forma de calor, principalmente, por meio dos escapamentos dos automóveis. Destas fontes, 40% são fontes residuais de calor maiores que 200°C e que tem enorme aplicação na cogeração de energia ([HSIAO et al., 2010](#)).

Nesta modalidade, os geradores termoelétricos oferecem potencial aplicação na conversão direta de calor em energia elétrica. Trata-se de dispositivo sólido que promove a conversão direta do calor (rejeitado por estas fontes), a partir de gradiente de temperatura, em energia elétrica baseado no efeito Seebeck.

A desvantagem desta tecnologia é a relativa baixa eficiência na conversão, tipicamente 5%, o que tem restringido a aplicação desta tecnologia a usos específicos onde a confiabilidade tem maior importância que os custos embarcados. Por se tratar de tecnologia aceita diante das novas políticas eco-ambientais, há amplo interesse científico e várias empresas interessadas na ampliação desta eficiência ([ISMAEL BASEL I.; AHMED, 2009](#)).

Partes das inovações referentes às fontes de energia renovável concentraram-se no descobrimento e desenvolvimento de novos materiais. É observada a necessidade acadêmica de trabalhar outras maneiras para redução do custo/Watt desta tecnologia, que não o desenvolvimento de novas ligas, uma vez que, raro desenvolvimento científico fora concentrado nestes aspectos (ISMAEL BASEL I.; AHMED, 2009).

Nas últimas três décadas, numerosos trabalhos tentaram conceber o gerador termoelétrico eficaz. As indústrias automotivas alcançaram eficiência suficiente para substituir o alternador elétrico (VÁZQUEZ J.; ARENAS, 2002) e (SAQR; MUSA, 2008). Algumas destas pesquisas, focadas em explorar novos materiais termoelétricos, podem ser analisadas no trabalho realizado pelos centros de pesquisas da Nissan (KERN; KRAUS, 1972) e Porsche (IKOMA K.; SHINOHARA, 1998).

Saqr e Musa (2009) realizam pesquisas focadas no desenvolvimento de geometrias otimizadas para os geradores termoelétrico. Eles discutem que a máxima eficiência da geometria dos dutos de escape está em proporcionar área suficiente para montar os módulos termoelétricos e manter a velocidade do gás de escape em valor elevado. Mantendo a velocidade de escape elevada, assegura-se o coeficiente de transferência de calor por convecção alto. A diminuição da diferença da temperatura da superfície entre a entrada e a saída da região de captação é importante. Esta diferença, quando elevada, faz com que o fornecimento de energia seja instável nos módulos termoelétricos.

Webb et al. (1994) trazem projeto inovador de cogeração termoelétrica em veículo 2,0L com motor V6. Bergles A. E. e Cho (1998) realizam análise de desempenho da geometria do trocador de calor do duto de escape utilizando a dinâmica computacional de fluido (*Computational Fluid Dynamics - CFD*). Eles validam a simulação numérica de massa e transferência de calor com experimentos práticos, obtendo diversos resultados de interesses acadêmicos.

Yang (2005) realiza diversas aplicações de módulos termoelétricos. O trabalho discute sobre o aproveitamento de calor rejeitado tanto no escape quanto no circuito de arrefecimento de motores, como forma de reduzir o consumo de combustível. Niu et al. (2009) constroem unidade de geração de energia elétrica utilizando módulos termoelétricos comerciais em trocador de calor de placas paralelas. O experimento permite avaliar a influência das principais condições de operação, como as temperaturas de entrada dos fluidos quente e frio, as taxas de fluxo e a carga resistiva. Os

resultados de simulação numérica foram comparados com os resultados experimentais, demonstrando que a simulação pode ser utilizada no processo de otimização.

Rodríguez et al. (2009) avaliam o comportamento térmico e elétrico dos geradores termoelétricos e desenvolvem modelo analítico. Os parâmetros de saída analisados foram desempenho, potência elétrica, tensão e corrente, todos em função da temperatura. Para validação e determinação da precisão do modelo em relação ao sistema, foi construída bancada de teste. O erro obtido entre o modelo e o sistema de bancada foi de aproximadamente 5%.

Hsiao et al. (2010) propõem modelo de resistências térmicas unidimensional para comparar a eficiência da utilização de geradores termoelétricos localizados no duto de escape de gases, com a eficiência de geradores termoelétricos localizados no radiador de arrefecimento. Os resultados de simulação foram corroborados com dados experimentais, apresentando que a potência gerada em sistema instalado no tubo de escapamento é maior que a do sistema instalado no sistema de arrefecimento. Yu e Chau (2009) desenvolvem trabalho que descreve a forma de produzir energia elétrica utilizando módulos termoelétricos para maximizar a energia armazenada em baterias automotivas, aproveitando o calor rejeitado dos motores de combustão interna.

Bass et al. (1995) desenvolvem gerador termoelétricos de $1kW$ a partir de 72 módulos de Seebeck posicionados no interior do duto aletado, na saída do motor de ciclo Diesel. O intuito é o de substituir o alternador do veículo pelo gerador termoelétrico. O sistema economiza cerca de $3HP$ a $5HP$ na potência do motor. Palacios et al. (2009), desenvolvem metodologia para estimar parâmetros internos dos módulos de Peltier para aplicações diversas, a partir das curvas de performance dos catálogos dos fabricantes. A metodologia desenvolvida permite a previsão do desempenho e do comportamento dos módulos em diferentes condições de trabalho.

Farias (2009) constrói protótipo de microgerador termelétrico de estado sólido utilizando calor da queima de gás liquefeito de petróleo (GLP). Este estudo determina a eficiência térmica, elétrica e global do sistema. O estudo apresenta a influência da diferença de temperatura em cada parte do sistema e as limitações dos módulos informadas pelo fabricante. Farias discute a importância da temperatura limite dos módulos de Seebeck e que este limite deve ser levado em conta nos projetos. Caso o sistema opere em temperatura superior a especificada no catálogo do fabricante, da-

nos elétricos aos módulos ocorrerão. Santos (2010) também desenvolve estudo sobre a temperatura limite dos módulos. Ele analisa o desempenho do gerador termoelétrico a partir dos gases de escape de motor de 10HP. O estudo de Santos conclui que os parâmetros importantes neste tipo de geração são: i) diferença de temperatura entre os lados quente e frio, ii) tensão gerada, iii) influência da carga resistiva e iv) temperatura máxima admitida pelos módulos. A temperatura máxima se apresenta como fator limitante na geração com células termoelétricas.

Gou et al. (2010) estudam a influência da irreversibilidade térmica na transferência de calor na geração termoelétrica e a utilização de vários módulos em série. Como forma de aumentar a eficiência dos geradores termoelétricos (TEG), além de aumentar a temperatura da face quente e utilizar série de módulos, é importante aumentar a capacidade de troca térmica do lado frio. De fato, a potência gerada pelo TEG é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura existente entre a face quente e a face fria.

O aumento da troca de calor através de recursos mecânicos (aletas) ou convecção forçada, pode aumentar a troca de calor entre as superfícies. O modelo desenvolvido por Lavric (2010), permite análise da sensibilidade da performance do módulo em relação a geometria, resistências elétrica e térmica, qualidade das fontes e dissipadores de calor, como temperatura e condutância térmica. O desempenho dos módulos termoelétricos pode ser aumentado melhorando o coeficiente de transferência de calor, especialmente do lado quente.

Champier et al. (2011) desenvolvem modelo de gerador termoelétrico para reaproveitar o calor de fogões à lenha utilizando módulos de Telureto de Bismuto (Bi_2Te_3) e ∇T menor que $120^\circ C$. O gerador produz potência de saída de $7,6W$ por módulo, sendo a potência gerada por cada módulo é de $9,5W$. Cerca de 20% foi perdido no regulador de tensão. Foram realizados estudos sobre a influência da pressão entre as placas e os contatos térmicos, observa-se que a partir de $5bar$ é possível conseguir potência elétrica de saída suficiente. Os TEG com baixa compressão na superfície de contato apresentam perdas na captação da energia térmica, diminuindo a eficiência.

Hsu et al. (2011) introduzem o conceito de **Coefficiente de Seebeck Efetivo**, isto é, discutem sobre as diferenças do coeficiente medido e o coeficiente teórico. Tal diferença ocorre devido ao efeito de contato e a rede de resistências térmicas do próprio módulo.

Sano et al. (2003) abordam a otimização da geometria do gerador termoelétrico acoplado ao concentrador solar e reportam desafios referentes ao contato dos TEG com a superfície de troca de calor. Sano et al. (2003) ainda comparam os custos de diversas tecnologias de produção de energia elétrica em diversos aspectos, como: i) custo de aquisição e ii) custo operacional e durabilidade do sistema. Embora o estudo aponte para o alto custo de investimento dos TEG, com eficiência global indicada em 6%, esta tecnologia apresenta oportunidades, uma vez que se utiliza do calor que seria perdido para a atmosfera. No Japão, este uso representaria a recuperação de aproximadamente 171MW.

Kumar et al. (2013) estudam o uso de topologias longitudinais, transversais, hexagonais e cilíndricas para a obtenção de energia elétrica a partir de gases de escape de veículos. Os estudos apresentam baixa influência da geometria na eficiência global para sistemas com menos de 40 TEG. Acima deste valor, as topologias hexagonais e cilíndricas apresentam queda de pressão. Ressalta-se que a topologia cilíndrica sobressai à hexagonal no sentido de potência gerada por volume e número de geradores termoelétricos.

Bélanger e Gosselin (2011) utilizam método de otimização heurístico para simular o comportamento e otimizar a utilização de módulos em trocadores de calor com arranjo de fluxo cruzado. Os autores determinam a quantidade e a localização dos módulos no trocador de calor. Como forma de aperfeiçoar o sistema de geração, os autores determinam a melhor topologia elétrica para montagem dos módulos. Na literatura não há volume expressivo de publicação sobre processo de otimização de dutos para aplicação em geração termoelétrica. Não há, após pesquisa realizada, trabalhos que utilizem métodos dos elementos finitos e otimização heurística, relacionada à geometria de duto de escape na cogeração de energia elétrica, justificando assim este trabalho. Desta forma, pode-se produzir a hipótese: se a geometria de duto de escape pode ser simulada utilizando o método dos elementos finitos e otimizada para obter temperatura adequada com o menor gradiente, logo é possível construir a geometria otimizada com o menor custo/Watts.

De maneira geral, o custo da termoeletricidade consiste no custo do dispositivo e no custo operacional. No aproveitamento de gases quentes no escape de máquinas térmicas, os custos operacionais são negligenciados, uma vez que o custo da energia de entrada (calor) é barato ou gratuito. Portanto, um dos objetivos importante ao estudar a geração termoelétrica através do calor perdido, é reduzir o custo/Watts

do dispositivo. Este custo pode ser reduzido basicamente nas formas: i) otimizando a geometria do dispositivo (parte de saída do gás), ii) melhorando a qualidade no processo construtivo, operando em altas temperaturas com baixo gradiente e iii) melhorando os materiais para obtenção de alto coeficiente de Seebeck.

Este trabalho tem como objetivo geral projetar a geometria que maximize a transformação da energia térmica em energia elétrica no duto de exaustão. Ainda como objetivos tem-se: i) simular o sistema de cogeração utilizando o métodos dos elementos finitos, ii) utilizar método de otimização heurístico para otimizar a geometria do duto de exaustão, iii) limitar a temperatura máxima do sistema, em atenção a temperatura limite dos TEG e iv) obter a temperatura na superfície do duto constante para diversos valores de temperatura de fluxo de gás.

O trabalho esta estruturado da seguinte forma: o Capítulo 2 aborda a termoelectricidade, o efeito Seebeck, os mecanismos de transferência de calor e massa, considerações sobre escoamentos e sobre o modelo matemático para equacionamento e modelagem do sistema proposto. No Capítulo 3 é apresentado o processo de simulação, o simulador (método dos elementos finitos) e o processo de otimização. O Capítulo 4 descreve a metodologia proposta no trabalho, no Capítulo 5 são dispostos os resultados obtidos. No Capítulo 6 é apresentada a conclusão.

CAPÍTULO 2

MODELAGEM TERMOELÉTRICA E TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Neste capítulo são apresentados assuntos que permitem a compreensão física e matemática da modelagem desenvolvida no trabalho. Desta forma necessita-se definir algumas propriedades e quantidades físicas relacionadas à energia térmica e a termoeletricidade com suas respectivas leis físicas.

2.1 Gerador elétrico e a cogeração

Nos tempos atuais, o conceito de geração tomou novo rumo. As unidades de geração próprias não estão sendo mais adquiridas apenas para suprir as cargas prioritárias na falta de energia da concessionária, mas sim com capacidade superior à necessária e conectada em paralelo à rede elétrica para que, caso a energia vendida pelo fornecedor esteja com valor superior à unidade própria de geração, a indústria pode deixar de comprar do fornecedor e consumir a própria energia produzida, ou seja, podendo escolher, conforme legislação vigente e expectativa de mercado, quando e qual energia utilizar. Ou, caso a geração própria esteja muito cara, utilizá-la apenas no horário de ponta de carga, que é o período do dia de maior valor cobrado pela concessionária para a compra de energia pelos grandes consumidores ([BOYCE, 2002](#)).

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

O gerador de energia é o dispositivo responsável pela conversão de energia cinética ou térmica em energia elétrica. Esta conversão apresenta série de irreversibilidades e portanto parte da energia é perdida, não havendo conversão total da energia.

Por mais eficiente que seja o gerador termelétrico, a maior parte da energia contida no combustível, usado para seu acionamento, é transformada em calor e perdida para o meio ambiente. Trata-se de limitação física (rendimento máximo de Carnot) que independe do tipo de combustível (diesel, gás natural, carvão, etc.) ou do motor

(a explosão, turbina a gás ou a vapor etc.). A eficiência do sistema sempre está relacionada com às temperaturas entre a fonte quente e fria ([BERGMAN et al., 2011](#)).

A cogeração é o processo de produção e utilização combinada de calor e eletricidade, proporcionando o aproveitamento da parcela da energia térmica proveniente da queima dos combustíveis. Embora utilize processos de aproveitamento de calor que normalmente vem dos gases de escape, com pressão constante (ciclo Brayton) e semelhante aos sistemas com ciclo combinado, o processo de cogeração é distinto na prática e na aplicação. O processo de ciclo combinado possui dois ciclos termodinâmicos, normalmente Brayton-Rankine, obtendo como produto final a eletricidade. Na cogeração, o sistema parte do recurso normalmente perdido, com um ciclo termodinâmico, obtendo-se dois produtos finais, calor e eletricidade ([KAYS, 2012](#)).

Sendo tecnologia que permite racionalizar eficazmente o consumo dos combustíveis necessários à produção de energia útil, a cogeração pode assegurar o aproveitamento elevado da energia primária e, por essa razão, responde favoravelmente aos objetivos das políticas energéticas comunitárias e nacionais.

2.2 Motor a óleo diesel

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

O motor diesel é também chamado de motor de ignição por compressão. Este nome é devido ao seu funcionamento em que, o ar é comprimido com alta pressão em cilindros e, quando partículas de óleo são injetadas neste fluido comprimido e quente, a mistura se inflama. O ar que foi comprimido tem sua temperatura elevada devido à sua compressão praticamente adiabática, sem troca de calor com o meio externo, realizada pelo pistão do motor ([BASS et al., 1995](#)).

2.3 Termoeletricidade

A termoeletricidade tem a sua origem com Alessandro Volta, em 1795, quando concluiu que a eletricidade causadora dos espasmos nas pernas do sapo, que estavam sendo estudados por Luigi Galvani em 1780, era devido a contato entre dois metais dissimilares. Esta conclusão foi precursora do princípio do termopar ([ANATYCHUK, 2004](#)).

A partir de então, outros cientistas buscaram compreender mais dos efeitos termoelétricos, dos quais se destacam Thomas Seebeck em 1821, Jean Peltier em 1834 e Joseph Thomson em 1848, cujos efeitos termoelétricos descobertos estão associados aos seus respectivos nomes (MACDONALD, 2006).

2.3.1 Efeito Seebeck

Através dos módulos de Seebeck, a energia térmica (calor) é transformada em energia elétrica, sem a presença de partes móveis, utilizando pontes $p-n$ de semicondutores.

O princípio fundamental de funcionamento destes módulos é baseado no Efeito Seebeck. Quando o físico Thomas Johann Seebeck, uniu dois fios metálicos diferentes (C_u e B_i) para formar o circuito, como ilustra a Figura 2.1, descobriu que quando havia diferença de temperatura entre os dois lados, o campo elétrico era gerado ao redor do circuito (MACDONALD, 2006).

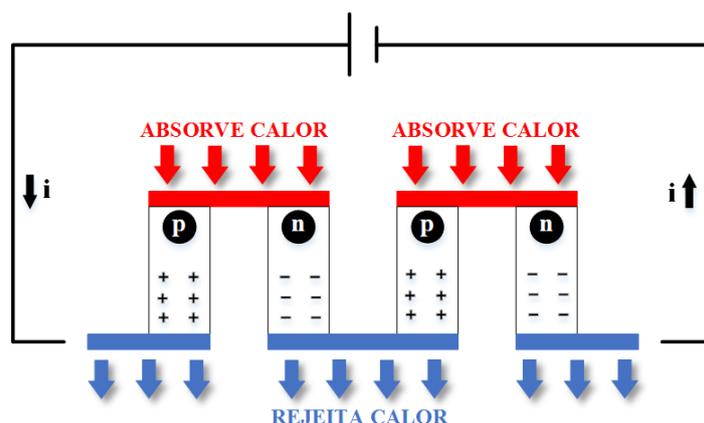


Figura 2.1 - Módulo termoelétrico de efeito Seebeck.

Os módulos termoelétricos são constituídos por materiais semicondutores, sendo mais utilizadas as ligas de Telureto de Bismuto e Telureto de Antimônio, selados entre as duas placas, (Figura 2.1), obtendo-se corrente elétrica proporcional ao gradiente térmico existente (POUDEL et al., 2008). São formados por elementos semicondutores tipo p e n eletricamente ligados em série, e termicamente em paralelo, formando arranjo com vários pares de semicondutores. Este arranjo é então montado sobre dois substratos de cerâmica, um em cada lado dos elementos. Tem-se assim um lado cerâmico a ser acoplado a fonte de calor e o outro lado cerâmico a ser acoplado

a fonte fria. O conjunto de pares de semicondutores e placas cerâmicas é chamado de gerador termoelétrico (TEG).

2.3.2 Efeito Peltier

O efeito Peltier foi observado 13 anos após o físico Thomas Seebeck ter descoberto o efeito Seebeck em 1821 e consiste na produção de gradiente de temperatura a partir da ligação de dois condutores (ou semicondutores) de diferentes materiais quando submetidos a tensão elétrica em circuito fechado (ROWE, 1995).

Ference Junior et al. (1973) acrescentam que este efeito também é conhecido como Força eletromotriz de Peltier e é o efeito reverso do efeito Seebeck, em que ocorre produção de diferença de potencial térmico devido à diferença de potencial elétrico. A união destes dois efeitos é denominado efeito Peltier-Seebeck ou efeito termelétrico. Isto é, são dois efeitos que podem ser considerados como diferentes manifestações do mesmo fenômeno físico.

2.3.3 Efeito Thomson

Em 1854, William Thomson apresenta a interferência das forças eletromotrizes de Peltier nas soldagens do circuito fechado e conclui que a força eletromotriz resultante ou força eletromotriz de Seebeck, deveria depender linearmente da temperatura (FERRENCE JUNIOR et al., 1973).

McLean et al. (1997) afirmam que em muitos materiais, o coeficiente de Seebeck não é constante de acordo com a variação da temperatura. Desta forma, dada variação de temperatura pode resultar em mudança no coeficiente de Seebeck, e isto é denominado de gradiente do coeficiente Seebeck. Se a corrente é conduzida na direção deste gradiente, ocorrerá, então, a versão contínua do efeito Peltier. Este efeito descreve o aquecimento ou arrefecimento do condutor, percorrido por corrente elétrica, de acordo com o gradiente de temperatura.

Em suma, qualquer condutor submetido a corrente elétrica (com exceção de supercondutores), com diferença de temperatura em suas extremidades, pode emitir ou absorver calor, dependendo da diferença de temperatura e da intensidade e direção da corrente elétrica.

2.3.4 Eficiência dos materiais termoelétricos

A eficiência do material termoelétrico é definida por sua figura de mérito ZT , dada por (LEE, 2016):

$$ZT = \frac{S^2 \cdot \sigma}{k} \quad (2.1)$$

onde S é o coeficiente Seebeck [$V \cdot K$], σ a condutividade elétrica [$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$], k a condutividade térmica [$W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$] ou [$V \cdot A \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$] em unidades de [$1/K$].

Na temperatura ambiente é difícil obter materiais e/ou ligas com ZT próximos da unidade. Nesta condição, os compostos de telúrio (Te), bismuto (Bi), antimônio (Sb) e selênio (Se) apresentam as maiores figuras de mérito (GONCALVES, 2008).

2.4 Mecanismos de transferência de calor

Mecanismo de transferência de calor é o processo pelo qual o calor flui de um corpo de alta temperatura para outro de baixa temperatura. O corpo quente é denominado fonte e o corpo frio receptor. Naturalmente, a transmissão de calor se dá da fonte para o receptor, e são três os modos de transmissão: i) condução, ii) convecção e iii) radiação. Nos processos de troca térmica quase sempre ocorre combinação de dois ou três destes modos. É possível quantificar processos de transferência de calor em termos de equações e taxas apropriadas (BERGMAN et al., 2011). O calor é o fenômeno transitório, que cessa quando não existe mais a diferença de temperatura.

Anderson et al. (1984) definem radiação como o processo pelo qual o calor é transferido de uma superfície em alta temperatura para outra superfície em temperatura mais baixa, quando tais superfícies estão separadas no espaço, ainda que exista vácuo entre elas. A energia transferida é chamada radiação térmica e é realizada a transferência sob a forma de ondas eletromagnéticas.

A taxa na qual a energia é liberada por unidade de área [$W \cdot m^{-2}$] ou poder emissivo, é prevista pela Lei de Steffan-Boltzmann, onde a temperatura de superfície deve ser considerada em unidade absoluta [K]. Em (2.2) pode-se obter a quantidade de fluxo de calor transferido por radiação (BERGMAN et al., 2011). A emissividade (ϵ) é a propriedade radiante da superfície que define relação entre a capacidade de emissão do material comparado com o componente ideal, conhecido como corpo negro. Ela

depende do tipo de material usado na superfície, seu acabamento e sua cor.

$$E_b = \epsilon \cdot T^4 \quad (2.2)$$

onde E_b é o fluxo de calor transferido por radiação por unidade de área [$W \cdot m^{-2}$], ϵ é emissividade térmica da superfície [$W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$] e T a temperatura da fonte [K].

A condução é definida como o processo de troca de calor pelo qual a energia é transferida da região de maior temperatura para outra de temperatura mais baixa, dentro do meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes em contato direto. Este mecanismo pode ser compreendido como a transferência de energia de partículas mais energéticas para partículas menos energéticas de dada substância, devido a interações entre elas (ANDERSON et al., 1984).

A expressão da taxa de condução é conhecida como lei de Fourier e é dada por (2.3). Ela é utilizada para se obter o fluxo de calor transferido por condução através de uma parede unidimensional (MURTHY et al., 2006).

$$\dot{Q} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$

onde \dot{Q} é o fluxo de calor [$W \cdot m^{-2}$], k é o coeficiente de condutividade térmica [$W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$], A a área [m^2], e $\frac{dT}{dx}$ a derivada da temperatura no espaço [K/m].

A razão do sinal menos na expressão (2.3) é que a direção do aumento da distância deve ser a direção do fluxo de calor positivo. Como o calor flui do ponto de temperatura mais alta para o de temperatura mais baixa (gradiente negativo), o fluxo será positivo quando o gradiente estritamente positivo.

A transferência de calor por convecção ocorre entre fluidos em movimento e uma superfície, quando os dois se encontram a diferentes temperaturas. A transferência acontece tanto pelo movimento molecular aleatório quanto pelo movimento global do fluido. Ela pode ser natural (ou livre), mista ou forçada, dependendo das condições de escoamento do fluido (ROHSENOW et al., 1985). A quantidade do fluxo de calor transferido por convecção é obtido por (2.4), independentemente da natureza

particular do processo de convecção (KAYS, 2012).

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.4)$$

onde \dot{Q} é o fluxo de calor [$W \cdot m^{-2}$], h é o coeficiente de convecção térmica [$W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$], A a área [m^2], e ΔT a variação da temperatura [K].

2.5 Condutividade térmica

O tipo de material do duto influencia diretamente na condutividade térmica. A Tabela 2.1, retirada de Bergman et al. (2011), dispõe a condutividade térmica dos principais metais para fabricação de dutos.

Tabela 2.1 - Condutividade térmica de alguns metais de fabricação mecânica.

Material	Condutividade Térmica [$\frac{W}{m \cdot K}$]
Ferro	80,3
Alumínio	237
Cobre	398
Prata	426

Para o máximo aproveitamento do calor, utiliza-se em geral, materiais com alto coeficiente de troca de calor por condução, para que não haja dissipação de energia, neste mecanismo de troca. Assim, segundo a Tabela 2.1, a prata e o cobre seriam os materiais mais indicados para o uso. Porém, deve-se levar em conta o custo benefício do ferro (ligas de aço), uma vez que sua usinabilidade, disponibilidade e custo é acessível quando comparado às ligas de maior custo dispostas na Tabela 2.1.

2.6 Número de Reynolds

No transporte de fluidos ou cinemática dos fluidos, cita-se o Teorema de Transporte de Reynolds. Este foi criado com o propósito de facilitar a descrição das leis que modelam o movimento dos fluidos em tubulações, ou recipiente onde o fluido é confinado. O fluido agirá de acordo com o formato da tubulação, a não ser em condições extremas. O teorema considera o volume de controle, região particular onde é realizada toda a análise do sistema. Dentro deste volume de controle existe dada quantidade de partículas onde o objetivo é entender o comportamento do volume de partículas (ANDERSON et al., 1984).

O regime de escoamento no tubo (laminar ou turbulento) é determinado pelo número de Reynolds R_e . Para o cálculo do número adimensional de Reynolds utiliza-se a expressão dada por:

$$R_e = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} \quad (2.5)$$

onde ρ , é a densidade do fluido [$kg \cdot m^{-3}$], \bar{V} é a velocidade média [$m \cdot s^{-1}$], D é o comprimento [m] e μ a viscosidade [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$].

Através da expressão (2.6), pode-se calcular o diâmetro hidráulico para geometrias não circulares.

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2.6)$$

onde A , é a área da seção transversal do duto [m^2] e P , o perímetro do duto [m].

2.7 Efeito convectivo

Se o sistema está incluído em ambiente térmico confinado (como uma sala), o ar no entorno deste sistema promoverá o resfriamento por meio do mecanismo de transferência de calor por convecção. Dada a diferença de densidade do fluido presente na sala, há movimentação das partículas (as mais quentes e de menor densidade sobem e as mais frias e de maior densidade descem), ocasionando assim resfriamento natural.

2.7.1 Determinação do coeficiente convectivo

O coeficiente convectivo h , também chamado de coeficiente de película, é descrito em função do escoamento do fluido, das propriedades físicas do meio e da geometria do sistema (ROHSENOW et al., 1985). Quando se conhece o fluxo de calor, a área de troca de calor e a diferença de temperatura, o coeficiente convectivo pode ser dado por (2.7), [$W/m^2 \cdot K$].

$$h = \frac{\dot{Q}}{A \cdot \Delta T} \quad (2.7)$$

onde \dot{Q} é o fluxo de calor [$W \cdot m^{-2}$], A é a área da seção transversal do duto [m^2] e ΔT é a diferença de temperatura em [K]. Porém, quando estas variáveis são desconhecidas, o coeficiente convectivo h pode ser definido como:

$$h = f(D, \mu, \rho, C_p, \kappa, \delta, V, g, \Delta T) \quad (2.8)$$

onde D , é a dimensão x , y ou z [m] do fenômeno da convecção, μ a viscosidade dinâmica do fluido [$m^2 \cdot s^{-1}$], ρ a densidade do fluido [$kg \cdot m^{-3}$], C_p o calor específico do fluido [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$], κ a condutividade térmica do fluido [$W \cdot K^{-1}$], δ o coeficiente de expansão volumétrica, g a aceleração da gravidade [$m \cdot s^{-2}$], V a velocidade do fluido [$m \cdot s^{-1}$] e ΔT o gradiente de temperatura entre a superfície e o fluido [K]. Desta forma, o coeficiente h pode ser determinado seguindo estudos de casos particulares para o regime de convecção natural ou forçada.

2.7.2 Regime convectivo natural

Convecção natural é o mecanismo, ou tipo de transporte de calor, no qual o movimento do fluido não é gerado por qualquer fonte externa (tal como uma bomba, ventilador, dispositivo de sucção, etc.) mas somente por diferenças de densidade no fluido ocorrendo devido a gradientes de temperatura (BEJAN, 2003). Neste regime, o coeficiente convectivo h pode ser encontrado a partir do número de Nusselt.

O número de Nusselt N_u é a grandeza utilizada para determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção, baseada na análise dimensional, a partir de relações de similaridade. O número de Nusselt também é função de outro número adimensional, o número de Reynolds, assim como o número de Prandtl (BERGMAN et al., 2011).

O número de Prandtl P_r é o número adimensional que aproxima a razão de difusividade de momento (viscosidade cinemática) e difusividade térmica do fluido, expressando a relação entre a difusão de quantidade de movimento e a difusão da quantidade de calor dentro do próprio fluido, sendo a medida da eficiência destas transferências nas camadas limites hidrodinâmica e térmica. É medida adimensional importante para o estudo dos processos de transferência de calor por convecção. É nomeado em homenagem ao físico alemão Ludwig Prandtl (MURTHY et al., 2006).

O coeficiente convectivo h , o número de Nusselt N_u e o número de Prandtl P_r podem

ser obtidos através de (2.9), (2.10) e (2.11) respectivamente.

$$h = \frac{N_u \cdot \kappa}{D} \quad (2.9)$$

$$N_u = f(G_r, P_r) \quad (2.10)$$

sendo o número de Nusselt N_u , a função do número de Grashof G_r e P_r o número de Prandtl.

$$P_r = \frac{C_p \cdot \mu}{\kappa} \quad (2.11)$$

sendo C_p o calor específico do fluido em $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$, μ a viscosidade dinâmica do fluido $[N \cdot s \cdot m^{-2}]$ e κ é a condutividade térmica do fluido $[W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}]$.

O número de Nusselt também depende do número de Grashof, denotado por G_r , assim denominado em homenagem ao engenheiro alemão Franz Grashof, é o número adimensional da mecânica dos fluidos, que relaciona a sustentação do fluido em relação a sua viscosidade (BERGMAN et al., 2011), dado por:

$$G_r = \frac{D^3 \cdot \delta \cdot g \cdot \Delta T}{\mu^2} \quad (2.12)$$

onde D é a dimensão x, y ou z do fenômeno da convecção $[m]$, δ é o coeficiente de expansão volumétrica $[^\circ C^{-1}]$, g é aceleração da gravidade $[m \cdot s^{-2}]$, ΔT é a diferença de temperatura em $[K]$, e μ a viscosidade dinâmica do fluido $[N \cdot s \cdot m^{-2}]$.

2.7.3 Regime convectivo forçado

Convecção forçada é o mecanismo ou tipo de transporte de calor no qual o movimento do fluido é gerado por fonte externa (como bomba, ventilador, dispositivo de sucção, etc) (BEJAN, 2003). O cálculo do coeficiente convectivo h para este regime depende do número de Reynolds.

O coeficiente, número ou módulo de Reynolds R_e , dado por (2.13), é o número

adimensional usado em mecânica dos fluidos para o cálculo do regime de escoamento de determinado fluido sobre determinada superfície. Uma vez calculado o número de Reynolds, obtém-se então o número de Nusselt para o escoamento convectivo forçado.

$$Re = \frac{D \cdot V \cdot \rho}{\mu} \quad (2.13)$$

2.7.4 Regime duplo convectivo

No interior do duto, há fluxo de convecção forçada devido à saída dos gases sobre pressão dos cilindros do motor de combustão. No meio externo do duto, há regime de convecção natural, cujo coeficiente convectivo h depende unicamente da variação de densidade do fluido presente no ambiente, uma vez que não há excitação externa (sistema de refrigeração). Devido às elevadas temperaturas que o sistema pode atingir, existe ainda calor de radiação orientada do duto para o meio externo.

Existem portanto dois coeficientes de troca de calor por convecção no sistema de escoamento de gases por dutos. Partindo do princípio de que o fluxo de calor sai do ponto mais quente em sentido ao ponto mais frio do sistema, o fluido quente no interior do tubo transfere calor por convecção h_1 para a parede interna do duto. Após a transferência de calor por condução na espessura do duto, o calor é transferido ao meio externo através da segunda convecção h_2 .

2.8 Cálculo da vazão do fluido para refrigeradores

Para que o TEG atinja a máxima eficiência, é necessário que o seu lado frio trabalhe na temperatura mínima de operação. A refrigeração deste sistema pode ser efetuada de várias maneiras. A forma mais utilizada de refrigeração é através de água que circula em caixas de resfriamento. Para isto, faz-se necessário o cálculo do volume de água utilizado para manter o TEG na temperatura mínima de operação. Para o cálculo da massa de água, é necessário o cálculo do calor específico, dado por (2.14) e (2.15). Da substituição das expressões anteriores, tem-se (2.16), que apresenta a massa de água necessária para resfriamento dos TEG.

$$\phi = \frac{Q}{\Delta t} \quad (2.14)$$

sendo Q a quantidade de calor [J] e Δt a variação do tempo em [s].

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2.15)$$

onde m é a massa em [kg].

$$m = \frac{\phi \cdot \Delta t}{c_p \cdot \Delta T} \quad (2.16)$$

onde ϕ é o calor específico em [$J \cdot s^{-1}$].

2.9 Resistividades térmicas

Os diversos mecanismos de trocas presentes no sistema de duto podem ser expressos e simplificados através do modelo de resistências térmicas (modelo análogo ao sistema de resistências elétricas). As resistências térmicas associadas à condução e a convecção são expressas, respectivamente, em (2.17) e (2.18).

$$R_{cond} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{K \cdot 2 \cdot \pi \cdot L} \quad (2.17)$$

onde r_1 e r_2 [m], K a condutibilidade térmica [$J \cdot s^{-1} \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] e L é o comprimento do duto [m].

$$R_{conv} = \frac{1}{A \cdot h} \quad (2.18)$$

O modelo simplificado apresentado na Figura 2.2 descreve o comportamento do sistema segundo o somatório de resistências em série. T_i é a temperatura interna no fluido, q_{h1} é o calor de convecção do fluido, T_{si} é a temperatura da superfície interna do duto, q_c é o calor de condução na parede do duto, T_{se} é a temperatura na superfície externa, q_{h2} é o calor de convecção do ambiente externo e T_∞ a temperatura do meio externo.

Na Figura 2.3 tem-se que o calor em trânsito no sistema q tem o gradiente orientado para fora do duto e depende de h_1 o índice convectivo interno, h_2 o índice convectivo

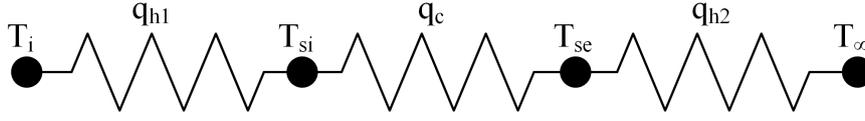


Figura 2.2 - Modelo de resistências térmicas.

do meio externo, k a condutividade térmica do material do duto e dos raios r_1 e r_2 do duto, além das temperaturas pontuais médias do fluido interno T_i e do meio externo T_∞ .

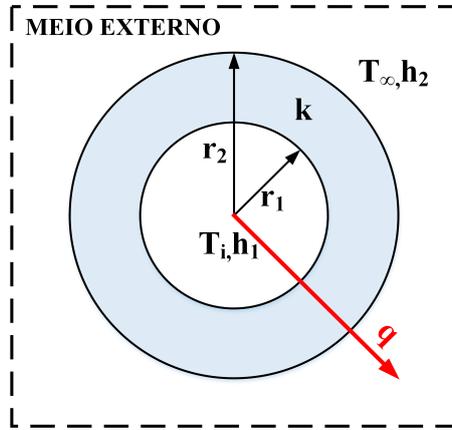


Figura 2.3 - Fluxo de calor no duto.

$$q = \frac{T_i - T_\infty}{\frac{1}{A_1 \cdot h_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2k\pi L} + \frac{1}{A_2 \cdot h_2}} \quad (2.19)$$

onde q é o fluxo de calor $[W]$, as temperaturas T_i e T_∞ interna e externa respectivamente $[K]$, r_1 e r_2 os raios interno e externo $[m]$, A_1 e A_2 são as área em $[m^2]$, h_1 e h_2 são os coeficientes convectivos interno e externo $[W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}]$, K a condutibilidade térmica $[J \cdot s^{-1} \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ e L é o comprimento do duto $[m]$.

2.10 Área de Contato Térmico

O calor transmitido da superfície do duto quente para o TEG é realizado através do mecanismo de condução. Há portanto a necessidade do contato físico entre os objetos

para efetiva troca de calor. Na prática, a área real de contato físico é inferior a área geométrica. O estudo desta relação de área é abordado pela Tribologia (ramo da ciência que estuda o atrito) e está relacionado diretamente ao acabamento superficial do objetos em contato. Quanto melhor o acabamento superficial, mais próximo é a área real da área desejada (SINATORA; TSCHIPTSCHIN, 2004).

Há relação direta entre contato térmico e acabamento superficial. A rugosidade da superfície pode ser avaliada através de parâmetros como o R_a , R_q e R_z . O R_a é a rugosidade média [μm], e é o parâmetro determinado pelo valor médio aritmético de todos os desvios do perfil de rugosidade da linha média dentro do comprimento de medição. O R_q é a rugosidade média quadrática e tem a função de avaliar o valor médio quadrático de todos os desvios do perfil de rugosidade, da reta média dentro do comprimento de medição. O R_z corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação (ALVES, 2011).

Além do contato térmico, a eficiência da transferência de calor por condução está ligada aos altos coeficientes de condutividade térmica dos materiais em contato. Outros fatores importantes para o aumento da eficiência de troca, são o uso de pasta térmica entre as superfícies e a pressão do contato.

As pastas térmicas são predominantemente baseadas em polímeros, particularmente silicone ou silicatos de sódio, além de nano partículas de óxidos de cobre ou prata. O uso de pastas a base de carbono, como o polietilenoglicol (PEG), têm ganhado ênfase devido à baixa viscosidade, aumentando a conformidade entre as superfícies em troca de calor (CHUNG, 2000).

A pressão de contato influencia na relação de área aparente e área real das superfícies em contato. Ela define ainda a espessura de camadas de gás entre às superfícies. A presença de gases, que na maioria são isolantes térmicos, prejudicam a troca de calor (SONG; YOVANOVICH, 1988).

2.11 Considerações

Neste Capítulo foram abordados conceitos sobre termodinâmica aplicada que dão base ao estudo do comportamento mecânico do sistema e também foram discutidos conceitos sobre novas ferramentas de troca de calor através de semicondutores, itens primordiais ao desenvolvimento deste trabalho.

CAPÍTULO 3

OTIMIZAÇÃO E SIMULAÇÃO

Neste capítulo é apresentado o processo de otimização e as partes que o compõem. Será realizada breve descrição sobre modelagem matemática, simulador e a configuração dos parâmetros necessários para executar a simulação a partir do método dos elementos finitos. Serão apresentados ainda os métodos de otimização determinística e heurística.

3.1 Processo de otimização

O processo de otimização trata-se do estudo para solucionar problema em que se busca encontrar valores ótimos ou otimizados de parâmetros. Busca-se, na maioria das vezes, minimizar a função objetivo $f(x)$, através da escolha sistemática de parâmetros dentro do conjunto Ω de soluções viáveis. O problema, modelado matematicamente, é simulado na busca por valores ótimos ou otimizados. A Figura 3.1 ilustra os três elementos básicos do processo de otimização (CARVALHO et al., 2016) (CALIXTO et al., 2015).

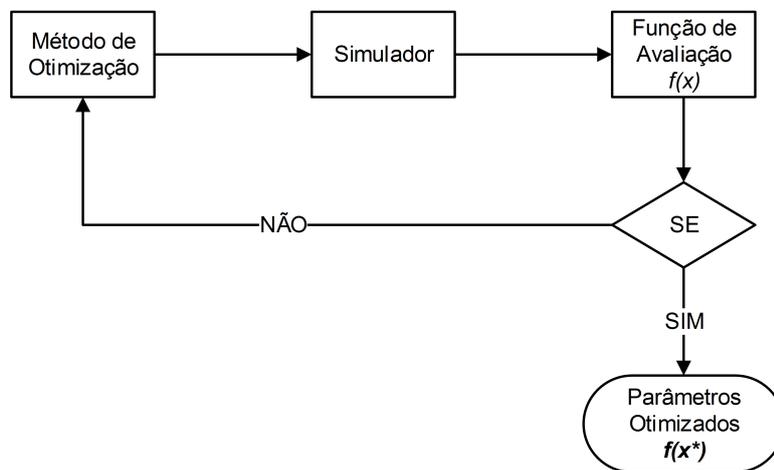


Figura 3.1 - Fluxograma do processo de otimização.

onde $f(x^*)$ com x sendo o vetor de parâmetros otimizados ou ótimo. Dado problema de otimização pode ser classificado como restrito (com restrições) ou irrestrito (sem restrições). Em alguns casos, problemas originalmente restritos têm as

restrições transformadas em penalidade na função de avaliação, tornando-se irrelevantes. Quanto as variáveis do problema, quando estas assumem valores no conjunto finito, trata-se de otimização discreta. Em contraste, o termo otimização contínua se refere a problemas cujas variáveis podem assumir valores no conjunto infinito não enumerável.

3.1.1 Método de otimização

Os algoritmos de otimização são procedimentos iterativos que, a partir de valores iniciais de x , buscam o melhor valor da função de avaliação $f(x^*)$ dentro do conjunto possível aceitável. Se $f(x)$ têm vários mínimos locais, a escolha inicial de x determina qual delas será calculado. Não há, portanto, nenhuma maneira garantida de encontrar o ponto ótimo global. A saída é fazer várias execuções no computador usando diferentes pontos de partida ou aplicar métodos heurísticos para a solução.

[Martinez e Santos \(1995\)](#) afirmam que o método escolhido não deve influenciar no resultado, já que o mínimo da função objetivo independe do método usado para encontrá-lo. Entretanto, a frequente não linearidade dos modelos, a presença de mínimos locais e a alta correlação entre os parâmetros podem dificultar a tarefa de otimização da função de avaliação.

[Schwaab \(2005\)](#) afirma que os algoritmos determinísticos buscam soluções através de derivadas ou buscas nas vizinhanças. Já os algoritmos heurísticos ou estocásticos são caracterizados pela realização de elevado número de avaliações da função objetiva em todo espaço de busca, de forma a aumentar a probabilidade de encontrar o ótimo global da função objetivo. Para não ficar preso no ótimo local, o caráter aleatório do procedimento de busca é elevado. Tais métodos não necessitam da semente ou estimativa inicial e não utilizam-se de derivadas.

3.1.2 A função de avaliação

A função de avaliação é definida como a nota dada para a qualidade de cada solução do problema. Nesta, deverá estar embutido todo o conhecimento que se possui sobre o problema a ser resolvido. A função de avaliação, também chamada de função custo, calcula o valor que reflete quão importante são as variáveis representadas em possível solução para o problema.

3.1.3 Restrições

[Pierre \(1969\)](#) afirma que toda relação que precisa ser necessariamente satisfeita é uma restrição. São classificadas em constantes de igualdades e de desigualdades. Restrições estão diretamente ligadas à definição do modelo e portanto relacionam ao campo de possíveis soluções do sistema. Se partes do sistema são fixas, as expressões que caracterizam estas partes fixas são expressões de restrição.

As restrições aproximam os modelos físicos dos processos reais. Assim, sistemas físicos são construídos para satisfazerem necessidades reais pontuais, se o ganho do amplificador é abaixo do nível pré-determinado aceitável, ele deve ser rejeitado ou ainda, se a confiabilidade do sistema está abaixo do nível padrão, este não deverá ser aceito.

3.1.4 Métodos determinísticos

O método de otimização é chamado de determinístico se for possível prever todos os seus passos conhecendo seu ponto de partida. Em outras palavras, o método determinístico sempre leva à mesma resposta se partir do mesmo ponto inicial.

Os métodos determinísticos, baseados no cálculo de derivadas, produzem bons resultados quando as funções são contínuas, convexas e unimodais. No entanto, na maioria das vezes, são ineficientes quando aplicados a problemas que apresentam não diferenciabilidade ou descontinuidade. Há algumas dificuldades comuns entre as técnicas diretas e indiretas: i) a convergência à solução ótima depende da escolha da solução inicial; ii) os algoritmos tendem a ficarem presos em solução sub-ótima (mínimos locais); iii) algoritmo eficiente na solução de um problema de otimização pode não ser eficiente na solução de outro; iv) não são eficientes em tratar problemas onde o espaço de busca é discreto e v) não são adequados para serem usados em computação paralela ([SARAMAGO; STEFFEN, 2008](#)).

3.1.5 Métodos heurísticos

Em engenharia, os problemas geralmente são complexos, não lineares, de difícil representação e descritos por funções nem sempre diferenciáveis, necessitando de métodos numéricos para sua solução. Nesta perspectiva, surgem como ferramenta os chamados métodos heurísticos, estocásticos ou ainda aleatórios, onde o caráter aleatório da variável de teste impulsiona a solução ótima do sistema ([ARROYO, 2002](#)).

Nestes métodos, várias escolhas são realizadas com base em números aleatórios, sorteados no momento de execução do código. Uma vez que a cada execução do código, os números sorteados serão diferentes (aleatórios), o método não executará a mesma sequência de operações em duas execuções sucessivas. Partindo do mesmo valor inicial, cada execução do código seguirá o seu próprio caminho, e possivelmente levará a resposta final diferente (COOPER, 1964).

Os métodos heurísticos podem reduzir algumas das dificuldades apresentadas nos métodos determinísticos. Tais métodos utilizam apenas as informações da função de avaliação, não requerendo informações sobre suas derivadas ou possíveis descontinuidades. Estas técnicas requerem elevado número de avaliações do problema para que seja necessário a exploração do método em toda a região do espaço de busca em que está contida a solução ótima, resultando em elevado número de avaliações (GILL PHILIP E.; WRIGHT, 1981).

Os métodos heurísticos são estruturas iterativas que propõem simular os processos usados na natureza e assim, resolver problemas. Entre as técnicas conhecidas pode-se citar arrefecimento simulado (*Simulated Annealing*), Busca Tabu e o grupo de métodos baseados em populações. Nos métodos populacionais, destacam-se os Algoritmos Evolutivos ou Evolucionários como os Algoritmos Genéticos, Estratégias de Evolução, Evolução Diferencial entre outros, e os algoritmos baseados em inteligência coletiva como otimização por enxame de partículas, colônias de formigas entre outro. Estes algoritmos se baseiam em população de indivíduos, onde cada indivíduo representa a solução do problema e baseiam-se nos princípios da natureza para criar procedimentos de otimização. Os Algoritmos Evolutivos possuem alguns procedimentos de seleção natural baseados na aptidão dos indivíduos, e em operadores de cruzamento e mutação (SARAMAGO; STEFFEN, 2008).

3.2 Processo de modelagem matemática

Bassanezi (2002) afirma que o processo de modelagem matemática consiste na arte de transformar problemas reais em problemas matemáticos, de forma a resolvê-los interpretando suas soluções na linguagem do mundo real. A Figura 3.2 apresenta o fluxograma do processo de modelagem do problema real em modelo matemático.

Biembengut (1997) acrescenta, no entanto, que tal processo pode, sob alguns aspectos, ser considerado processo artístico. Na perspectiva da autora, para elaborar o

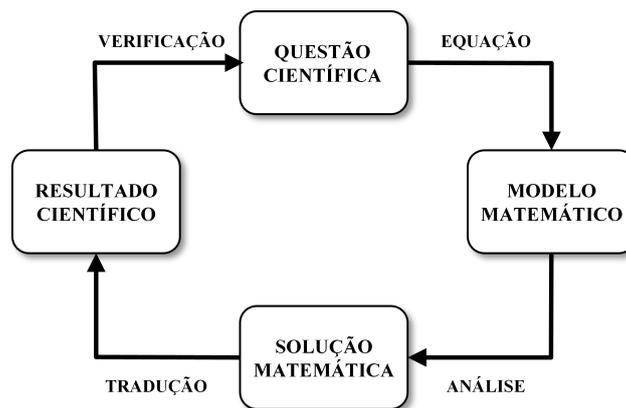


Figura 3.2 - Fluxograma do processo de modelagem matemática.

modelo, além de conhecimento apurado de matemática, o modelador deve ter dose significativa de intuição e criatividade para interpretar o contexto, discernir que conteúdo matemático melhor se adapta para descrevê-lo, além de senso lúdico para trabalhar com as variáveis envolvidas.

Com o interesse de descrever quantitativamente o fenômeno físico, ou seja, de se obter uma expressão matemática que corresponda ao fenômeno em análise, inicialmente o problema físico real é substituído por um problema equivalente, mais simples conforme ilustra a Figura 3.3. Neste novo problema são selecionados os parâmetros considerados fundamentais e que podem ser descritos matematicamente através de um sistema de equações diferenciais válido em todo o domínio do problema.

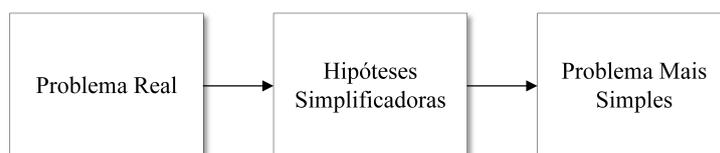


Figura 3.3 - Flexibilização do sistema em problema mais simples.

O modelo matemático do problema permite a previsibilidade do sistema com sensibilidade de resposta proporcional da complexidade da modelagem. A partir do modelo, eventos futuros podem ser previstos e os resultados comparados à realidade, construindo-se modelos fechados de modelagem e simulação.

3.3 Simulador

O simulador é a ferramenta computacional capaz de produzir, a partir do modelo matemático, resultados do processo de experimentação. O simulador é o conjunto dos modelos detalhados do sistema real, necessário ao estudo do comportamento dos sistemas. A simulação normalmente é utilizada para determinar como o sistema se comportará às mudanças sistemáticas de seus parâmetros.

[Pegden \(1995\)](#) afirma que a simulação é o processo de projetar o modelo computacional do sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação. Assim, a simulação engloba não apenas a construção do modelo, mas todo o método experimental, buscando a descrição do comportamento do sistema, a construção de teorias e hipóteses considerando as observações efetuadas.

Outras definições de simulador podem ser encontradas em [Schriber \(1974\)](#) que propõe a simulação como sendo a modelagem do processo ou sistema, de tal forma que o modelo imite as respostas do sistema real na sucessão de eventos que ocorrem ao longo do tempo. Já [Banks \(1998\)](#) define que a simulação é a imitação da operação do processo ou sistema real ao longo do tempo e [Law e Kelton \(2003\)](#) consideram a simulação como a técnica que utiliza computadores para imitar as operações de vários tipos de processos do mundo real.

[Kelton et al. \(2015\)](#) definem que simulação é o processo de projetar e criar o modelo do sistema real, no computador para o propósito de conduzir experimentos numéricos de forma a compreender o comportamento de dado sistema a partir de série de condições.

A aplicação do simulador no processo de otimização permite responder questões antes não observadas, levando em consideração a complexidade dos sistemas, tais como a variabilidade da ocorrência de eventos, complexidades associadas a decisões e restrições próprias de sistemas dinâmicos ([PIDD, 1998](#)).

[Azadivar \(1999\)](#) afirma que as aplicações de otimização são tradicionalmente focadas em responder questões para melhorar a eficiência do sistema, os avanços que a união otimizador/simulador trás, dá origem a subárea de pesquisa, modelagem e previsão, a qual passou a receber maior atenção nas últimas décadas ([HALL, 1998](#)).

Silva (2012) estabelece as necessidades para o desenvolvimento da aplicação do simulador no processo de otimização (Figura 3.1), desenvolvimento do modelo, escolha do método de otimização e do simulador. Inicialmente, a solução deste modelo serve como entrada para a condição operacional da simulação (condições de contorno iniciais para o problema), que tem por objetivo avaliar a sensibilidade da solução ótima ou otimizada das variabilidades associadas ao sistema modelado (estudo das variabilidades).

Baseando-se na análise dos cenários construídos pelo modelo de simulação, dois resultados podem surgir: i) considerado viável e gera a solução a ser implementada ou ii) não é considerado viável e necessita de reestruturação. Adaptações podem ser realizadas através da análise das restrições sobre o modelo, de forma a re fletir de maneira adequada às características do sistema estudado..

3.3.1 Introdução aos métodos aproximados

Os métodos aproximados surgem da necessidade do estudo de diferentes métodos para simplificação de problemas e aproximação das soluções das equações diferenciais existentes. A utilização dos métodos aproximados está condicionada aos seguintes fatores: i) validação da prática ou do experimento através do equacionamento matemático que modela o problema físico, ii) utilização dos métodos numéricos para a obtenção de medições inviáveis economicamente, tais como corrente e temperatura máxima, iii) simulação de condições inviáveis e até impossíveis e iv) viabilização do processo de otimização.

Em suma, os métodos aproximados contribuem na resolução de problemas de equações diferenciais, quando a solução analítica é inacessível.

Alves (2007) aborda sobre a teoria dos métodos aproximados mais utilizados no meio acadêmico, em resumo: Método das Diferenças Finitas, Método dos Resíduos Ponderados, Método Variacional, Métodos dos Elementos de Contorno, Método dos Elementos Finitos e o Método dos Volumes Finitos.

Os métodos de aproximação se dividem em locais e globais. Os locais são representados pelo Métodos de Diferenças Finitas, Métodos dos Elementos Finitos, Métodos dos Volumes Finitos e outros. Os globais são representados pelos Métodos Espectrais de Domínios Alternativos que utilizam Transformadas Integrais de Laplace e Fourier e outros.

Hughes (1987) afirma que todo método numérico deve preceder-se da discretização do domínio ou do contorno. Discretizar é dividir o sistema em partes menores, tão menores quanto se queira. Matematicamente, baseia-se na conversão das equações diferenciais de domínio contínuo para equações algébricas de domínio discreto.

Convém subdividir o problema em partes finitas de geometria conhecida (BATHE, 1982). Assim, é possível transformar o conjunto de pontos infinitos em número finito de pontos associado ao erro de aproximação.

3.3.2 Método das diferenças finitas

O Método das Diferenças Finitas (MDF) substitui por série de pontos discretos, o domínio do problema contínuo. Nestes pontos, também chamados de nós, são calculadas as incógnitas do problema. A Figura 3.4 ilustra a discretização de dado problema com mudança de domínio.

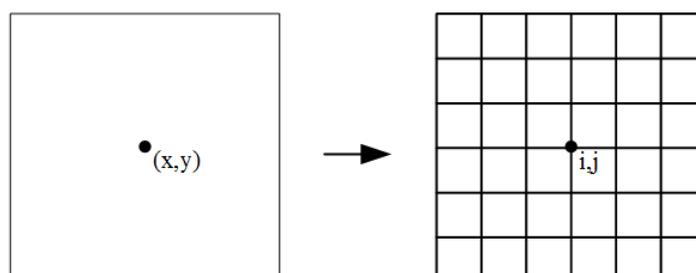


Figura 3.4 - Discretização do problema com mudança do domínio contínuo (x, y) para o discreto (i, j) .

As derivadas que constituem o problema são substituídas (ou aproximadas) por expressões discretas de diferenças. A aplicação destas expressões aos nós do domínio discretizado permite constituir o sistema de expressões algébricas, cuja solução fornece os valores das incógnitas do problema nestes pontos discretos.

A derivada da função $v(x)$ no ponto x_i é dada por:

$$\frac{dv}{dx}_{x=x_i} = \frac{v(x_i + h) - v(x_i)}{h} \quad (3.1)$$

onde $h = \Delta x$ e aproximando com incremento de h , porém finito, tem-se:

$$\frac{dv}{dx}_{x=x_i} \cong \frac{v(x_i + h) - v(x_i)}{h} \quad (3.2)$$

A aproximação dada por (3.2) é chamada de diferença progressiva, uma vez que utiliza o ponto a frente de x_i , isto é, o ponto $(x_i + h)$. De maneira semelhante, pode-se construir a diferença regressiva utilizando o ponto $(x_i - h)$.

A partir das séries de Taylor truncadas, o erro cometido em (3.2) pode ser obtido pela aproximação dada por:

$$\frac{dv}{dx}_{x=x_i} \cong \frac{v(x_i + h) - v(x_i)}{h} - \frac{h^2}{2!} \frac{d^2v}{dx^2}_{x=x_i} - \frac{h^3}{3!} \frac{d^3v}{dx^3}_{x=x_i} \quad (3.3)$$

Sendo h o incremento finito pequeno, é possível truncar a série no ponto indicado. Assim, desprezando-se os termos relativos às derivadas de ordem igual ou superior a dois, obtém-se a expressão da diferença progressiva. Sendo h o valor pequeno, o maior termo desprezado é igual ao produto de h por uma constante, ou seja, é da ordem de h onde (3.3) pode ser descrita como $O(h)$. O erro que se comete ao substituir a expressão (3.2) pela expressão (3.1) é $O(h)$.

3.3.3 Método dos elementos finitos

O método de elementos finitos (MEF) surge do desenvolvido da solução aproximada de problemas de mecânica do sólidos em 1909 por Walter Ritz, obtendo-se o gradiente de energia de deformação aproximado por funções com coeficientes a serem determinados. Este método ficou conhecido como Método de Ritz. Em 1943, Richard Courant estendeu consideravelmente as possibilidades do Método de Ritz adicionando funções lineares especiais definidas a partir de estruturas triangulares e o aplicou na solução de problemas de torção, sendo variáveis, os valores das funções nos pontos nodais das regiões triangulares. Desta forma, a principal restrição das funções de Ritz (satisfação das condições de contorno) foi eliminada (BAKER; PEPPER, 1991). O método de Ritz, adicionando às contribuições de Courant, é similar ao MEF proposto por Ray William Clough Jr. anos depois. Clough (1960) introduz, pela primeira vez, o termo **elemento finito** no artigo *The finite element method in plane stress analysis*. A modelagem por MEF desenvolve inicialmente na indústria aeroespacial como poderoso mecanismo para a simulação de problemas matemáticos e se consolidou como ferramenta de desenvolvimento, com o avanço contínuo das

tecnologias computacionais.

O método possibilita a solução de equações diferenciais obtidas a partir da discretização do problema em elementos finitos. Os elementos em conjunto constituem a malha do sistema e conseqüentemente, tem-se o sistema de equações diferenciais que interpretam o modelo. Embora sua aplicabilidade inicial esteja focada na mecânica dos sólidos, atualmente a abrangência é ampla cobrindo desde a análise de vibrações simples de estrutura até simulações complexas de fluidos, transferência de calor e massa e eletromagnetismo (HUGHES, 2012).

O MEF parte do fundamento que toda função contínua, seja ela de temperatura, viscosidade ou deformação, pode ser aproximada por modelo composto do conjunto de funções contínuas definidas dentro de número finito de intervalos e subdomínios (SEGERLIND; SAUNDERS, 1987). Usualmente, os elementos têm forma triangular ou quadrilateral, podendo ser retilíneos ou não. A malha não necessita ser estruturada, permitindo que geometrias de alta ordem de complexidade possam ser tratadas com menor complexidade. A solução do problema discreto tem que pertencer ao espaço das funções variando-se, por exemplo, linearmente ou quadraticamente, entre os valores dos pontos nodais. Os pontos nodais podem ser: os vértices dos elementos, os pontos médios dos lados ou ainda, os pontos médios do elemento. Observa-se assim forte relação entre a representação geométrica do domínio e a representação da solução.

O MEF procura pela solução integral da equação diferencial parcial. Geralmente, segundo afirmam Huebner e Thornton (1982), a formulação residual ponderada dá origem à formulação integral. Devido a esta caracterização, o método é capaz de agregar naturalmente as condições de contorno do tipo diferencial. A combinação intrínseca entre a representação e a solução no MEF permite a fundamentação matemática extremamente robusta, garantindo assim definição da precisão do cálculo. O MEF possibilita a simulação de situações reais em espaço discreto, cujo limite infinitesimal tende ao contínuo.

Huebner e Thornton (1982) afirmam que o método dos elementos finitos pode ser resumido em três etapas: 1) pré-processamento, 2) solução e 3) pós-processamento. O pré-processamento é a fase de preparação do problema, isto é, modelagem, identificação das condições de contorno, carregamentos, escolha dos elementos básicos da malha, propriedades dos materiais e simplificações. A aplicação do método consiste

em subdividir, o domínio do problema, em subdomínios de dimensões finitas tais que, o conjunto de todos os subdomínios seja igual ao domínio original. Em seguida, sobre cada subdomínio, isoladamente, adota-se o comportamento aproximado, local, para as incógnitas do problema (ALVES, 2007).

Quanto mais simples for o elemento, mais simples será sua formulação. Os elementos mais usuais na discretização de domínios bidimensionais são os triângulos ou quadriláteros. Nos problemas bidimensionais, os triângulos são os mais simples e se adaptam bem aos contornos irregulares. Porém, modelar sistemas de contorno complexo, por exemplo, superfícies com contornos orgânicos (desenho a mão livre), pode exigir a combinação de diferentes formas de elementos. O uso de elementos mais simples exige melhor discretização, maior refinamento da malha e por consequência, maior capacidade e menor tempo computacional (GESUALDO, 2010).

As equações discretas são desenvolvidas a partir das contribuições de cada nível do elemento, onde depois são reunidos e constituídos na formação da malha. Nos modelos bidimensionais, para a construção da malha empregam-se elementos com no mínimo 3 e 4 nós, respectivamente, ilustrado na Figura 3.5. É possível o uso de elementos com nós adicionais ao longo de suas arestas, os chamados elementos de alta ordem (ilustrado na Figura 3.6), mais complexos e que permitem representações polinomiais quadráticas.

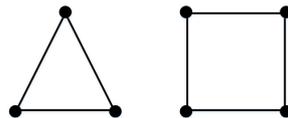


Figura 3.5 - Comportamento linear nos nós.

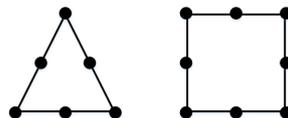


Figura 3.6 - Comportamento não-linear nos nós.

Elementos com forma mais regular são sempre preferíveis. Para o caso bidimensional, a forma quadrangular é a recomendada. Para modelos tridimensionais o hexágono

deve ser o tipo desejado. No entanto, isto nem sempre é possível, especialmente nas regiões de transições de malhas, onde pode ser exigido o uso de elementos com formas diferenciadas ajustáveis aos contornos, como ilustrado na Figura 3.7.

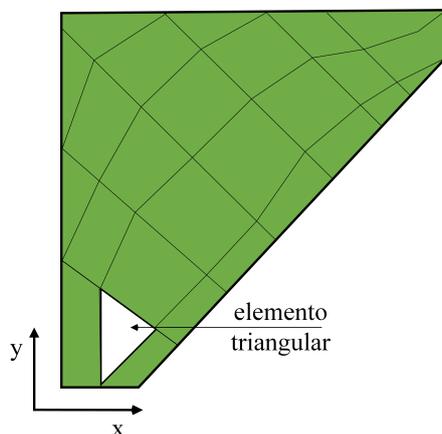


Figura 3.7 - Malha com elementos de diferentes geometrias.

Na Figura 3.8 é possível observar a complexidade da união dos diversos nós para a constituição do número finito de elementos. Nas junções das peças, há maior detalhamento e complexidade. Reddy e Gartling (1994) afirmam que em dinâmica de fluidos, o elemento tetraédrico é o mais apropriado.

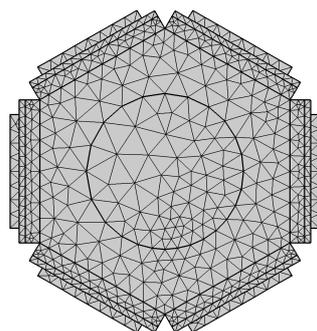


Figura 3.8 - Variações da geometria dos elementos no objeto.

Como o método é numérico, o domínio é subdividido em partes não contínuas (discretizadas), então, quanto maior for o número de nós e, conseqüentemente, o número de elementos, haverá tendência de se obter maior precisão dos resultados, observando

somente as limitações computacionais para solução das expressões discretas. Devem ser procurados elementos com proporcionalidades de dimensões (regulares) evitando elementos distorcidos, ou seja, elementos geométrico não curvos. O modelo completo, Figura 3.9, corresponde à associação de diversos elementos conectados pelos nós.

No processo de cálculo, como as expressões são calculadas nos nós, são garantidos que os deslocamentos associados aos graus de liberdade dos nós de conectividade são iguais. Assim, ao longo dos lados dos elementos (entre um nó e outro), as deformações são específicas para cada elemento e dependem do seu comportamento interno, isto é, a visualização da deformação do elemento triangular é diferente da deformação do elemento hexagonal (GESUALDO, 2010).

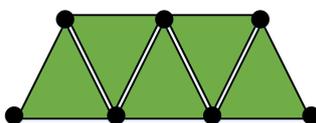


Figura 3.9 - Conexão entre elementos e compatibilidade.

A partir do tipo de elemento escolhido, existem funções de interpolação e deslocamento associadas na literatura. Usualmente, a forma adotada para as funções de interpolação é do tipo polinomial, dada a simplicidade nas operações matemáticas.

Segunda parte: a solução a partir do MEF baseia-se no algoritmo numérico que resolve o sistema de equações diferenciais dada as restrições impostas. Inicialmente, determina-se a matriz de rigidez elementar que é constituída pelos coeficientes das equações de equilíbrio, derivadas das propriedades geométricas do material e do elemento adotado, a partir do princípio da mínima energia potencial. Esta rigidez relaciona os deslocamentos nodais às forças aplicadas nos nós.

O equilíbrio entre a matriz de rigidez K , o vetor de deslocamento nodal u e a força nodal é dada por:

$$F = K \cdot u \quad (3.4)$$

A matriz de rigidez K depende exclusivamente da geometria do modelo, das propriedades locais do material e da função de interpolação. O deslocamento entre os

nós deve-se manter constante para todos os elementos adjacentes. Desta forma, é possível construir a matriz de rigidez elementar e os vetores de força elementar (interconexões nodais). Em (3.4) é expresso o conjunto de equações algébricas lineares simultâneas.

Terceira parte: trata-se da fase final do MEF onde é possível interpretar os resultados em função das restrições impostas nos cálculos. Pode-se utilizar de gráficos que apresentam os gradientes de tensão, temperatura, deslocamentos nodais ao longo do tempo ou de frequências naturais da estrutura.

3.3.4 Análise não-linear

Vários problemas, como análise do escoamento de fluidos e a transferência de calor e massa apresentam comportamento não linear. Esta não linearidade ocorre devido a fatores como: deslocamentos, atritos, rotações ou deformações.

Reddy e Gartling (1994) e Cook et al. (1989) afirmam que escoamentos de fluidos e transferência de calor apresentam comportamento não linear do tipo construtivo (movimento visco plástico) e comportamento não linear das condições de contorno devido ao atrito. Para solução de problema dinâmico utiliza-se a expressão do movimento, dada por (BATHE, 1982):

$$M \cdot \ddot{u} + C \cdot \dot{u} + K \cdot u = F^a \quad (3.5)$$

onde M é a matriz de massa, C é a matriz de amortecimento, \ddot{u} é o vetor de aceleração, \dot{u} é o vetor velocidade, u é o vetor deslocamento e F^a o vetor de forças aplicadas.

3.3.5 Simulações fluidodinâmicas

A fluidodinâmica computacional é a área responsável pela simulação numérica de escoamentos de fluidos, transferência de calor e fenômenos relacionados, como reações químicas, combustão e acústica. Seu estudo tem origem a partir da combinação de: mecânica dos fluidos e cálculo numérico. As equações que regem o escoamento de fluidos têm origem na mecânica dos fluidos e podem ser resolvidas por meio de diferentes métodos numéricos.

As expressões necessárias para o desenvolvimento do simulador, baseiam-se na interação fluido-estrutura e estabelecem as relações físicas de dinâmica dos fluidos e transferência de calor associadas ao problema e são dada por (REDDY; GARTILING, 1994):

$$\rho(u \cdot \nabla) = \nabla \cdot \left[-\rho I + \mu (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla u) I \right] + F \quad (3.6)$$

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (3.7)$$

$$\rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (3.8)$$

Simular computacionalmente determinado fenômeno físico requer atenção às condições de contorno e simplificações adotadas, visando obter resultados coerentes. A simulação para duto de escape deve atender uma das duas situações distintas de condições de contorno: 1) baixa velocidade da saída dos gases e baixo coeficiente de troca de calor por convecção ou 2) alta velocidade de saída dos gases e alto coeficiente de troca de calor por convecção. A troca de calor por convecção no exterior do duto é do tipo natural.

3.3.6 Simulação com método de elementos finitos

A metodologia de solução por método dos elementos finitos independe do problema a ser resolvido, pois é ferramenta a ser aplicada na simulação de diversos sistemas mecânicos, elétricos e magnéticos. A Figura 3.10, adaptada de Bathe (1982), apresenta o fluxograma para o desenvolvimento da solução através do método dos elementos finitos.

Para a simulação pelo método dos elementos finitos, inicialmente define-se quais estudos/físicas serão utilizados. Definido quais estudos serão utilizados, a segunda etapa é a definição do regime em que será simulado, se regime estacionário ou regime transiente. Diz-se que o sistema está em estado transiente quando pelo menos uma variável do processo encontra-se em mudança, não tendo atingido ainda o regime estacionário. Após a escolha do regime, os passos seguintes fazem-se necessários: i) definir as variáveis e parâmetros que serão utilizadas, ii) utilizar software de desenho

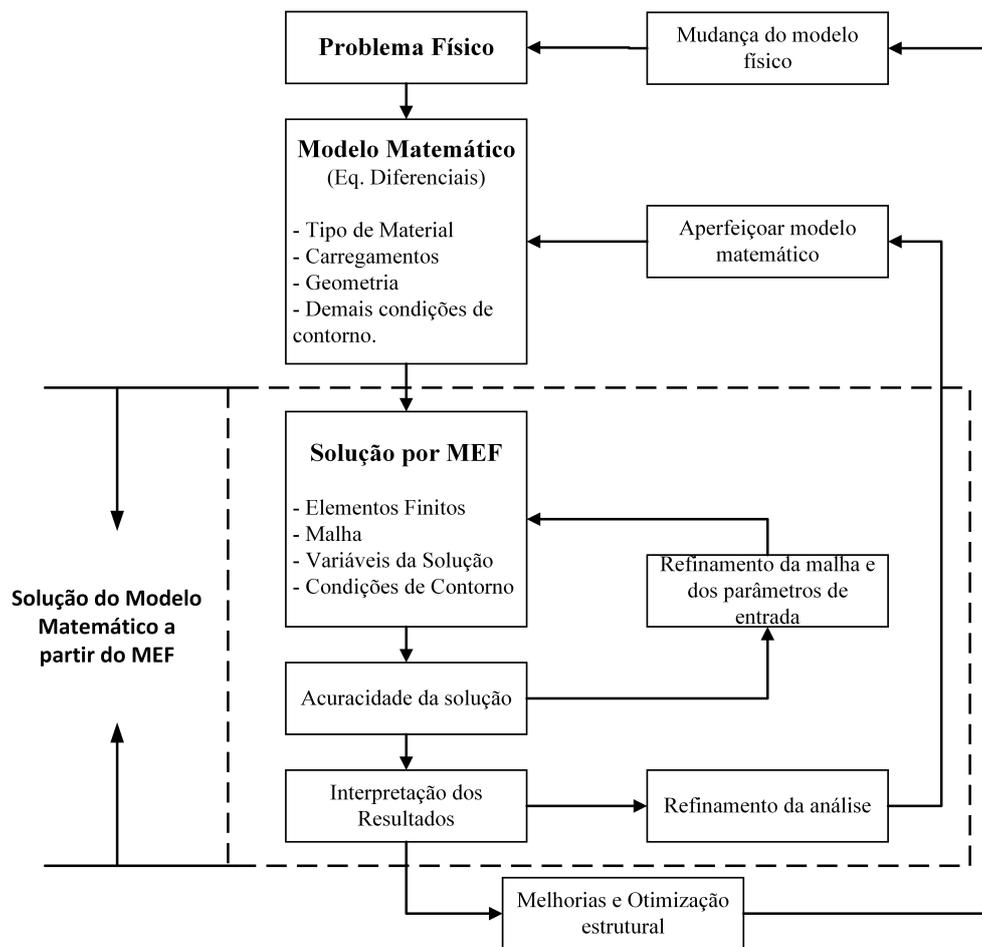


Figura 3.10 - Fluxograma da solução pelo método dos elementos finitos.

assistido por computador (*computer aided design* CAD) para gerar a geometria 3D e iii) selecionar os materiais. Na Figura 3.11, o fluxograma ilustra o desenvolvimento da aplicação do método de elementos finitos.

3.4 Considerações

Este capítulo apresentou os conceitos sobre a modelagem do sistema, o simulador e métodos de otimização, itens fundamentais para o desenvolvimento e compreensão da metodologia apresentada no Capítulo 4. Ademais, esclareceu a aplicabilidade dos métodos heurísticos e sua conectividade com a resolução de problemas através de métodos aproximados. Dentre estes métodos, destacou-se o MEF, como método para simulação e viabilização do processo de otimização.

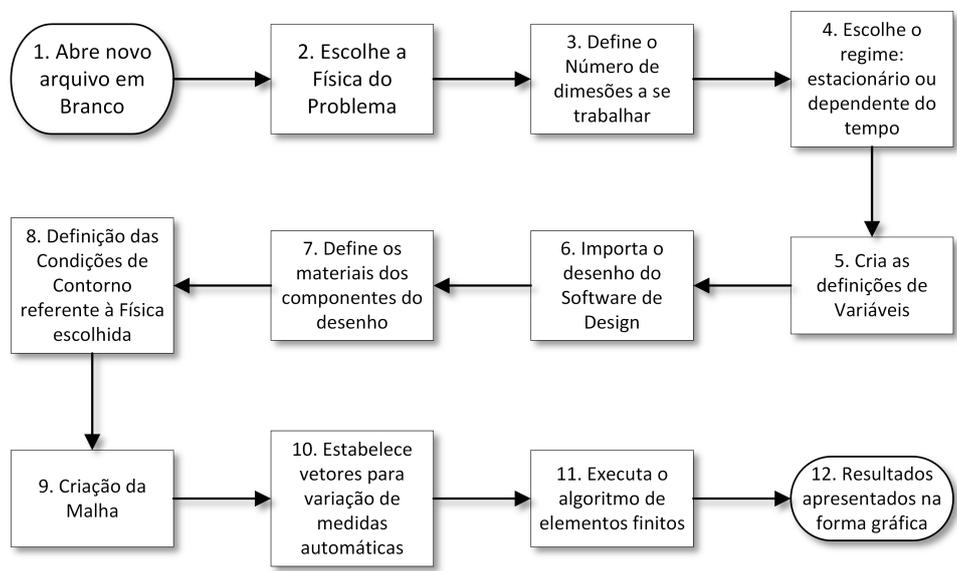


Figura 3.11 - Fluxograma do processo de simulação.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia proposta para o desenvolvimento do protótipo que maximize a transformação da energia térmica em energia elétrica, no duto de exaustão. Simulações com geometrias conhecidas não parametrizadas são realizadas e o primeiro protótipo é projetado para validação do modelo matemático. Após a validação do modelo é possível realizar a parametrização da geometria no modelo matemático, com o intuito de otimizar o projeto e validar a metodologia.

4.1 Avaliação do potencial de energia

O primeiro estudo a ser produzido é sobre a quantidade e qualidade de energia térmica gerada pelo tubo de exaustão onde será conectado o protótipo proposto. Para avaliação do potencial de energia térmica, deve-se analisar o equipamento gerador de calor térmico e mensurar a quantidade de calor que é rejeitado/perdido. Esta mensuração é realizada através de termopares e medidores de fluxo de calor e seu detalhamento inclui: i) medidas para máquina em *stand-by*, ii) medidas para a máquina em operação, iii) avaliação da qualidade térmica do fluido, iv) facilidade na extração do calor da fonte térmica e v) o custo, quando não nulo, deste calor.

4.2 Projeto do protótipo

O desenvolvimento do protótipo depende de dois fatores a serem analisados: i) a quantidade de potência térmica disponível e ii) a área disponível para posicionamento dos geradores termoelétricos (TEG). Inicialmente é necessário estipular a faixa de potência de geração de energia elétrica desejada. A partir da potência térmica disponível, deve-se calcular a quantidade de potência gerada pelos TEG em condições de trabalho ótimas. A partir da relação de potência por cm^2 obtém-se a superfície aproximada de captação para o protótipo. Com relação à fabricação do protótipo, a escolha do material para a construção, o detalhamento dos processos de fabricação e o desenvolvimento do módulo de resfriamento são características básicas a serem estudadas. O projeto do protótipo depende de duas condições restritivas: i) o gradiente de temperatura na superfície de captação de calor deve ser aproximadamente *zero*, ou seja, a diferença entre a temperatura da superfície na entrada do duto de captação deve ser próxima da temperatura da superfície de saída do duto de captação. [Bélanger e Gosselin \(2011\)](#) propõe o uso de superfícies que

tenham temperaturas constantes, pois isto aumenta a eficiência dos TEG e ii) a temperatura de operação limite dos TEG deve ser atendida, ou seja, a temperatura máxima na superfície de captação, quando em operação, não pode exceder o limite de funcionamento dos TEG.

Como solução às condições restritivas, pode-se utilizar de artifícios para aceitá-las, incorporando-as ao projeto. Assim, pode-se propor: 1) variar a espessura interna do duto de captação de forma proporcional à resistividade do material utilizado, isto é, quanto maior a espessura no início do duto de captação, menor a temperatura na superfície e quanto menor a espessura na saída do duto de captação, maior a temperatura na superfície, garantindo gradiente aproximadamente nula ao longo da superfície externa do duto e 2) variar a espessura externa do duto de captação, ao invés de variar o diâmetro de entrada e saída, facilitando a construção do protótipo. A Figura 4.1 ilustra as propostas.

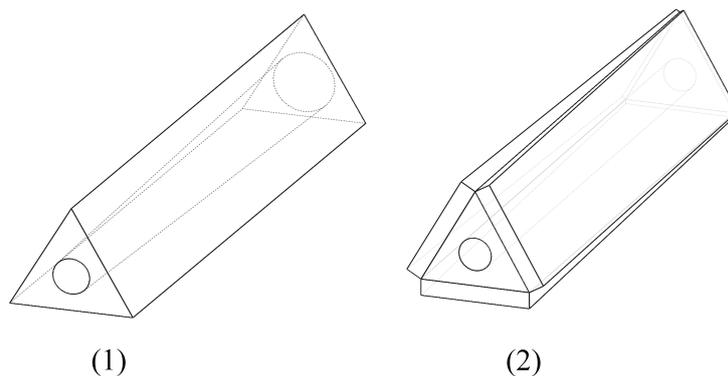


Figura 4.1 - Propostas: (1) variação do diâmetro interno e (2) variação da espessura da casca do duto.

4.3 Simulação

Inicialmente é necessário entender o comportamento do fluxo de calor ao longo do duto de escape, visando compreender a distribuição do calor na superfície externa do duto. A distribuição de calor na superfície está associada à entropia do fluxo no interior do duto. É realizado o estudo de quatro geometrias, com números de lados diferentes, com o intuito de avaliar a distribuição de energia térmica sobre a superfície externa. As seções dos dutos simulados são ilustradas na Figura 4.2.

Para a simulação das geometrias propostas, o comprimento, a espessura, o períme-

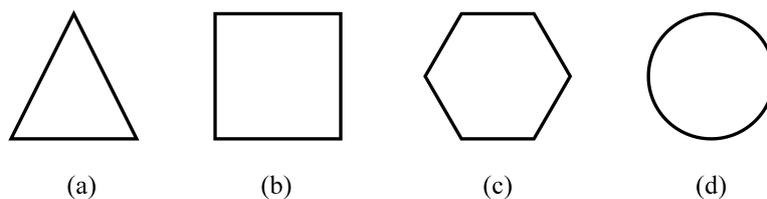


Figura 4.2 - Seções geométricas básicas simuladas: (a) triângulo, (b) quadrado, (c) hexágono e (d) círculo.

tro, a velocidade e a temperatura de entrada serão mantidos constantes. Utilizando a expressão (2.5), varia-se o diâmetro geométrico (diferente para cada seção transversal) e a distribuição de velocidade no interior do duto. Para a mesma velocidade de entrada no duto, o fator de forma e atrito influencia na velocidade média, no cálculo do número de Reynolds. Portanto, não se deve realizar o cálculo a partir do valor constante de velocidade média, dado que esta sofre variações no interior do duto em função da geometria.

Para a escolha da melhor proposta de geometria e variação de espessura, é necessário realizar a simulação. Desta forma, utiliza-se a modelagem do sistema e constrói o simulador com o método dos elementos finitos. O comprimento do duto também será escolhido a partir da simulação, levando em conta o aumento da relação área da superfície interna por volume. Neste sentido, o aumento da superfície no interior do duto de exaustão pode aumentar a captação de energia térmica do fluido, como ilustrado na Figura 4.3.

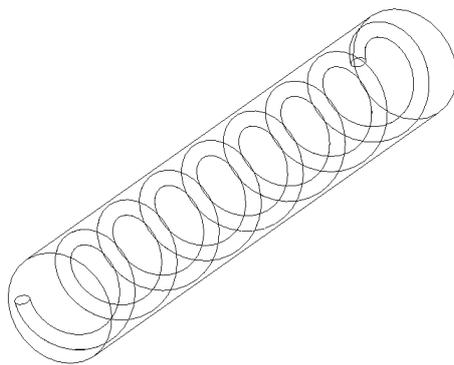


Figura 4.3 - Proposta de superfície interna do duto de exaustão.

As superfícies estendidas visam aumentar a relação área de superfície por volume e auxiliam na troca de calor do sistema. Seu uso é condicionado à situação onde há necessidade de dissipação ou absorção elevada de calor em áreas com dimensões restritas. Os TEG não são considerados na simulação visto que o objetivo desta etapa é avaliar o potencial de energia térmica no duto de escape.

4.4 Construção do protótipo

Depois de simulado todas as possíveis geometrias e variações de espessuras, é escolhido o modelo a ser construído. O fluxograma da Figura 4.4 descreve as etapas para a construção do protótipo desenvolvido.

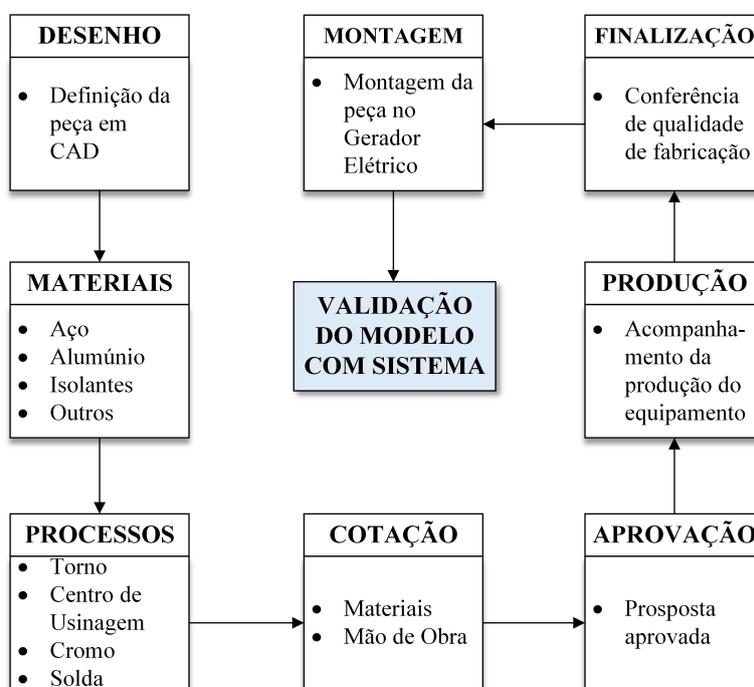


Figura 4.4 - Fluxograma da fabricação do protótipo até a validação.

4.5 Validação do modelo

Para validação do modelo, o protótipo deve ser conectado no duto de exaustão de gases quentes. Utiliza-se como sistema de geração de fluxo térmico o conjunto motor gerador elétrico. O posicionamento do duto de captação é conectado como ilustrado na Figura 4.5.

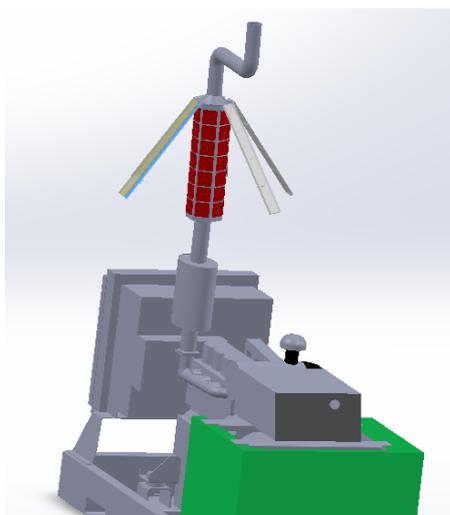


Figura 4.5 - Modelo de acoplagem do duto de captação no moto gerador.

Após a conexão do protótipo no duto de exaustão principal do conjunto motor gerador elétrico, é possível comparar os resultados encontrados na simulação com os valores medidos no protótipo, validando assim o modelo.

Os TEG são implementados na simulação como superfícies cerâmicas, que é o principal material utilizado na casca externa dos módulo termoeletrico. Depois de testado o modelo, é necessária a realização de teste do protótipo com a inserção dos TEG, a fim de validar o funcionamento do módulo de Seebeck no protótipo. O teste consiste em colocar o módulo de Seebeck (TEG) no protótipo e pressioná-lo entre a superfície quente T_h e a superfície fria T_c , como ilustrado na Figura 4.6.

O primeiro teste tem o intuito de comparar os parâmetros do TEG medido em bancada, com os parâmetros do fabricante (*datasheet*). Neste teste, utiliza-se apenas um TEG. A superfície quente recebe calor do bico de Bunsen com gás liquefeito de petróleo (GLP). A superfície fria consiste em caixa de resfriamento por onde circula água com $T_c < T_h$. O controle do fluxo d'água é realizado por meio de válvulas. O termopar é colocado na superfície quente $TT02$ e outro no fluxo d'água $TT01$, como ilustrado na Figura 4.6. Os valores de tensão e corrente com carga no TEG, V_{TEG} e I_{TEG} , respectivamente, são medidos por multímetro.

Após os testes em bancada (no protótipo), os resultados são comparados com os resultados da simulação, validando o modelo para realizações de previsões e utilização no processo de otimização.

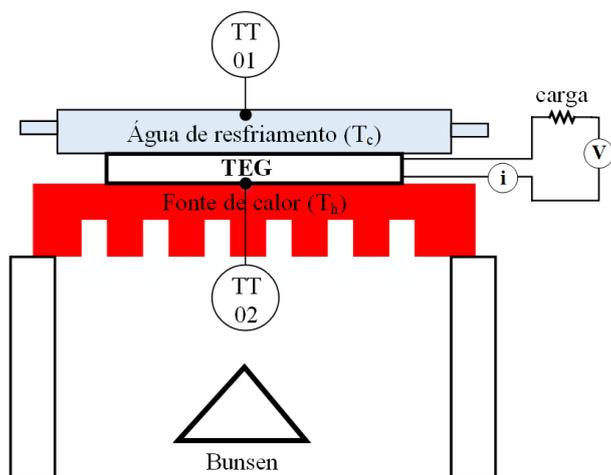


Figura 4.6 - Teste com módulo de Seebeck no protótipo.

4.6 Avaliação do efeito da pressão e da superfície de contato

Com o objetivo de estabelecer a relação entre a pressão de contato e produção de energia elétrica pelo TEG, constrói-se a prensa mecânica para estudo tribológico. Os componentes da prensa apresentados na Figura 4.7 são: (1) TEG, (2) bico de Bunsen, (3) macaco hidráulico 5000 [kg], (4) manômetro, (5) chapa base inferior, (6) guias laterais de aço, (7) caixa suporte para bico de Bunsen, (8) mancais, (9) chapa base superior e (10) resfriador TEG.

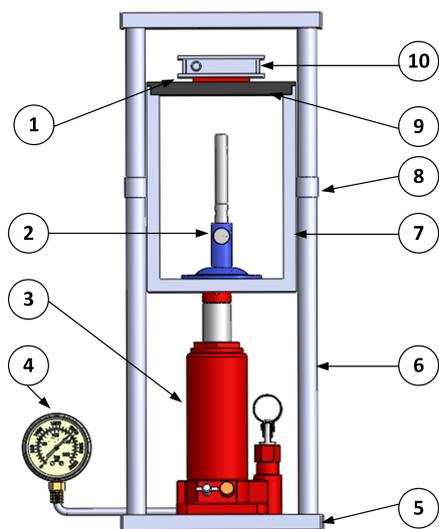


Figura 4.7 - Protótipo de prensa para estudo tribológico.

Para a fonte de calor é utilizado o bico de Bunsen, que fornece a chama para aquecer a área da superfície quente do TEG. Este aparelho é posicionado sobre a caixa base, com extremidade superior intercambiável, afim de alterar a superfície de contato, e guiada por dois cilindros.

Na parte superior da caixa base do bico de Bunsen, é posicionado o TEG e o resfriador. Quando o macaco hidráulico for acionado, este deslocará o conjunto contra a chapa base superior (9), produzindo pressão de compressão, cuja medida é lida através do manômetro. O objetivo é estabelecer a relação entre pressão de contato e geração de tensão elétrica pelo TEG em circuito aberto, comparando com os dados do fabricante.

4.6.1 Acabamento superficial

A superfície superior da caixa, representada por (9) na Figura 4.7, é intercambiável. Desta forma, define-se quatro tipos de superfície para teste: i) superfície crua, ii) superfície retificada, iii) superfície polida e iv) superfície polida com pasta térmica. Objetiva-se analisar a geração de tensão em circuito aberto em função do aumento da superfície de contato (redução da rugosidade da superfície da chapa de aço).

4.7 Sistema de controle e supervisão dos dados

A geração de potência dos TEG é diretamente dependente das superfícies fria e quente. Como o aquecimento da superfície quente é proveniente dos gases de exaustão e depende diretamente da potência requerida do gerador elétrico, não é possível o controle da temperatura. Contudo, pode-se supervisionar a temperatura máxima e instalar placas com espessuras adequadas, de forma que a temperatura nos TEG não ultrapasse o limite máximo suportado. Portanto, para o funcionamento da planta de cogeração elétrica na máxima eficiência, é necessário o controle de temperatura da superfície fria.

4.8 Processo de otimização do protótipo

A partir dos dados coletados em bancada e no simulador, é possível realizar o processo de otimização do protótipo utilizando o modelo validado. Esta otimização busca encontrar solução otimizada para o problema, dadas as condições de contorno e suas restrições de funcionamento. As etapas principais no processo de otimização do protótipo são: i) parametrização das variáveis geométricas do modelo, ii) defini-

ção do volume de controle do sistema, iii) temperatura limite de trabalho dos TEG, iv) formulação da função objetivo, v) escolha do método de otimização e vi) conexão do simulador com o método de otimização.

A função objetivo deve levar em conta as temperaturas de entrada e saída do gás na superfície quente, visando manter o gradiente constante e aproximadamente nulo. É realizada a comparação entre o método determinístico e o método heurístico de força bruta com memória para análise de desempenho entre os métodos. O modelo otimizado é comparado ao modelo construído segundo os critérios: i) melhorias na eficiência do modelo otimizado, ii) viabilidade construtiva e iii) comparação quantitativa da eficiência do modelo otimizado em relação ao construído.

Para a otimização do modelo utiliza-se, inicialmente o método de otimização determinístico Quase-Newton. Caso o problema convirja para o mínimo local, torna-se necessário a utilização do método de otimização heurístico Algoritmo Genético.

4.9 Considerações

Este capítulo apresentou a metodologia utilizada para a construção, modelagem e avaliação do sistema de cogeração. Inicialmente, é avaliado o potencial de energia das máquinas térmicas e em seguida é desenvolvido o projeto do protótipo captador de energia, no qual, através da simulação de superfícies conhecidas, é possível desenvolver o protótipo cuja temperatura na superfície de captação seja uniforme e abaixo do valor limite de operação do TEG. O protótipo é construído em escala real e acoplado ao grupo moto gerador elétrico para validação do dados. Finalmente, com o modelo desenvolvido e validado, propõe-se o *design* de novo protótipo a partir de resultados do método de otimização.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia indicada no Capítulo 4. Inicialmente foram realizadas simulações numéricas em elementos finitos usando modelos com geometrias conhecidas e os resultados são discutidos de acordo com a literatura. Em seguida, foi idealizado o protótipo de captação térmica a partir da simulação de hipóteses construtivas para o modelo. A partir de vetores de valores possíveis, obteve-se a geometria com gradiente próximo a *zero*. Esta geometria foi construída para validação em laboratório, onde se obteve resultados elétricos do experimentos que validam o ensaio. Finalmente, utiliza-se a aplicação do método de otimização visando a busca pela geometria ótima ou otimizada.

5.1 Análise do sistema de cogeração

A planta de geração termoelétrica proposta utiliza como fonte de calor os gases de exaustão do conjunto moto-gerador a diesel, através da instalação de aparato na tubulação de escape. A Figura 5.1 apresenta o conjunto moto-gerador a diesel utilizado, instalado no laboratório de geração elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), campus Goiânia. Foi realizada análise do perfil térmico de exaustão do conjunto moto-gerador e as temperaturas médias \overline{T}_m do conjunto moto-gerador a diesel, após 10 medições são dispostas na Tabela 5.1.



Figura 5.1 - Conjunto moto-gerador a diesel.

Tabela 5.1 - Temperaturas médias no escape do conjunto moto-gerador a diesel.

Condição	$\overline{T_m}$ [°C]
<i>Stand by</i>	210
Carga aplicada	503

Na Tabela 5.2 são dispostos os principais dados do conjunto moto-gerador apresentado na Figura 5.1. O funcionamento do conjunto moto-gerador diesel compreende quatro fases: i) admissão, ii) compressão, iii) combustão e iv) escape. Apenas a fase de combustão produz energia na forma de calor. Dos 100% de óleo diesel utilizado, apenas 40% é convertido em energia elétrica e 23% são perdidos na tubulação dos gases de exaustão (BERGMAN et al., 2011). Com base nas informações de Bergman et al. (2011) e utilizando as informações da Tabela 5.2, pode-se calcular a energia dispersada através dos gases de exaustão, dado por (5.1), onde P_{ge} [kW] é a potência das perdas de exaustão através da tubulação do escapamento do gerador e P_{ee} [kW] é a potência elétrica disponível para utilização.

$$P_{ge} = 0,575 \cdot P_{ee} \quad (5.1)$$

Tabela 5.2 - Dados do conjunto moto-gerador.

Modelo	Síncrono / trifásico
Potência	150/141kVA
Tensão	380V
Corrente	214A
Frequência	60Hz
Rotação	1800rpm
Combustível	Diesel
Consumo a 100% de carga	31,3L/h

Os conjuntos moto-geradores são máquinas térmicas que apresentam elevado potencial na geração de energia térmica. Esta energia térmica, normalmente é desperdiçada na natureza, tornando resíduo térmico.

5.2 Construção do protótipo

Para a construção do protótipo do dutos de exaustão foi necessário simular várias geometrias com o intuito de encontrar a mais eficiente. A ideia foi conseguir a geome-

tria que comporte em sua superfície, quantidade determinada de TEG e que tenha o gradiente nulo. Após a escolha da geometria que melhor se adequa, foi necessário realizar a fabricação e os testes.

5.2.1 Gerador termoelétrico

Para realizar as simulações é necessário primeiramente conhecer os TEG que serão utilizados. Isto se justifica na necessidade de saber suas dimensões, uma vez que a geometria externa do duto depende das dimensões do TEG. O TEG a ser utilizado no desenvolvimento do aparato é apresentado na Figura 5.2, que têm suas características dispostas na Tabela 5.3. Este TEG foi escolhido em função do custo benefício, ou seja, o custo do equipamento pela potência gerada. Outra característica observada foi a faixa de operação, pois analisando a Tabela 5.3, observa-se o valor de $503^{\circ}C$ na saída do escape do conjunto moto-gerador a diesel. A empresa [Thermonamic \(2017\)](#), produtora do TEG utilizado, afirma que seu produto atinge o máximo desempenho quando há temperatura de $360^{\circ}C$ no lado quente e $30^{\circ}C$ no lado frio.

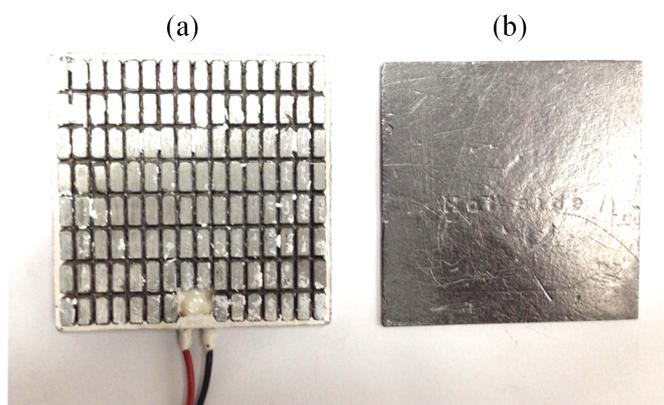


Figura 5.2 - TEG da *Thermonamics* utilizado: (a) visualização interna e (b) superfície de contato.

Com o intuito de gerar pelo menos $800W$ de energia elétrica, dado que a geração individual de cada TEG é de $21,7W$, torna-se necessário distribuir sobre a superfície externa do duto, aproximadamente 36 TEG, considerando o funcionamento ótimo destes equipamentos. Dado a área de $31,36cm^2$ de cada TEG, necessita-se da área mínima de $1290cm^2$, sobre a superfície de captação do duto.

Tabela 5.3 - Dados técnicos do TEG da *Thermonamics* utilizado.

Parâmetro	Valor
Marca	<i>Thermonamics</i>
Potência Gerada	21,7W
Modelo de TEG	TELBP1-12656-45
Dimensões	56mm × 56mm × 5mm
Temperatura lado quente	360°C
Temperatura lado frio	30°C
Fluxo de calor através do módulo	247W
Máxima Temperatura de Operação	360°C

5.2.2 Simulação de geometrias

Para fazer a comparação entre as diferentes geometrias de dutos foi necessário fixar o valor do perímetro e do comprimento, a fim de garantir a homogeneidade dos parâmetros de entrada. O perímetro foi fixado em 30cm e o comprimento do duto em 100cm, mantendo a área superficial constante. A Tabela 5.4 dispõe os valores de L_L que é a divisão do perímetro pelo número de lados da geometria, diâmetros hidráulicos D_h e os número de Reynolds máximo Re_{max} .

Tabela 5.4 - Características básicas das geometrias simuladas.

Geometria	L_L [cm]	D_h [cm]	Re_{max}
Triângulo	10,00	5,77	677,51
Quadrado	7,50	7,50	576,90
Hexágono	5,00	8,66	641,41
Circular	4,77	9,55	631,24

Para a simulação foi utilizado o aço ABNT 1045 como material da casca do duto e o ar atmosférico como fluido, com velocidade inicial igual de 5m/s e coeficiente de transferência de calor por convecção igual de 1W/m²K. O valor adotado para o índice de troca de calor por convecção basearam-se nos valores encontrados na literatura para transferência de calor natural (BERGMAN et al., 2011). Nas Figura 5.3 à Figura 5.6 são ilustradas as distribuições de calor e de Reynolds para as geometrias: i) triangular, ii) quadrangular, iii) hexagonal e iv) circular.

A Tabela 5.5 dispõe os valores médios da transferência de calor nas superfícies dos modelos. A Figura 5.7 apresenta o comparativo da influência do fator de quina na geração de *vortex* das geometrias triangular e circular. Na Figura 5.7 (a), geometria circular, linhas de fluxos percorrem caminhos lineares ao longo do escoamento,

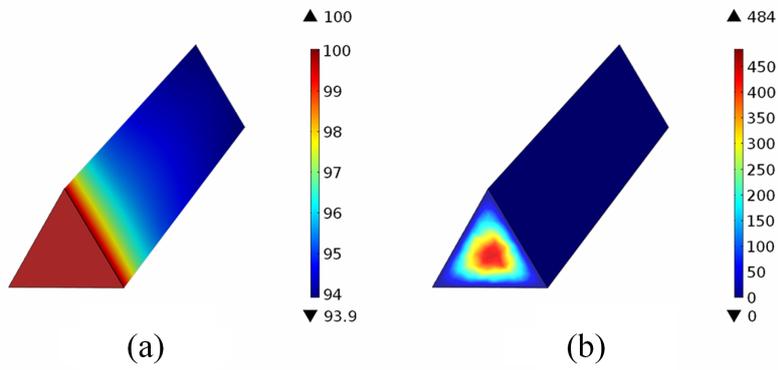


Figura 5.3 - Distribuição de: (a) calor [$^{\circ}C$] e (b) Reynolds, no duto triangular.

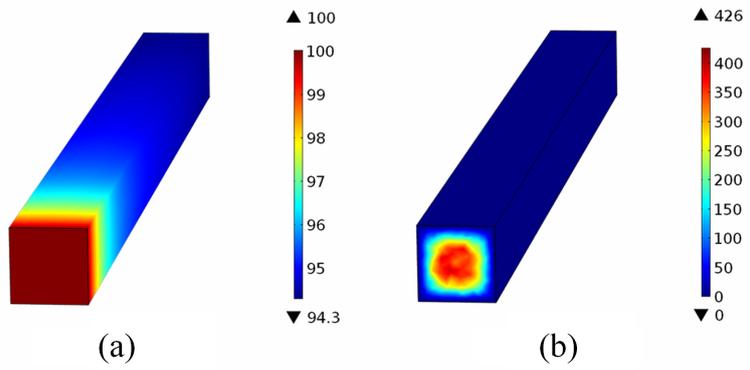


Figura 5.4 - Distribuição de: (a) calor [$^{\circ}C$] e (b) Reynolds, no duto quadrangular.

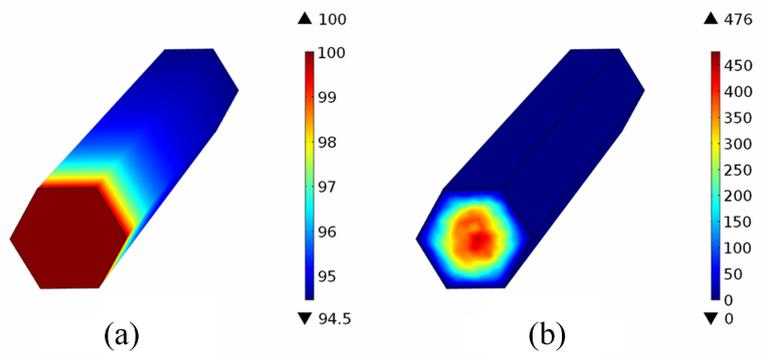


Figura 5.5 - Distribuição de: (a) calor [$^{\circ}C$] e (b) Reynolds, no duto hexagonal.

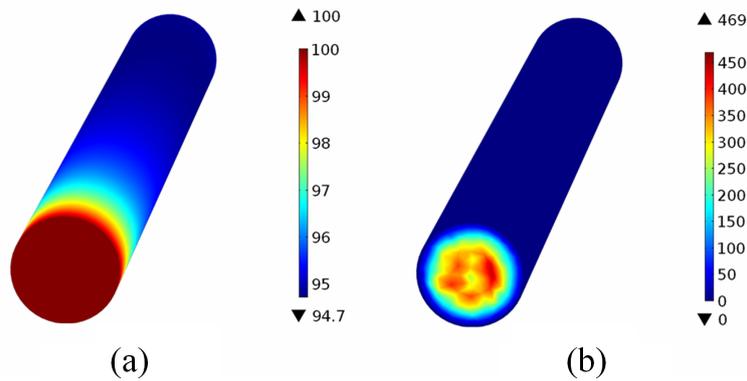


Figura 5.6 - Distribuição de: (a) calor [$^{\circ}C$] e (b) Reynolds, no duto circular.

enquanto que na Figura 5.7 (b) linhas de fluxos percorrem caminhos com geração de *vortex* ao longo do escoamento, a partir de $500mm$ do comprimento do duto. As geometrias apresentaram significativa perda de temperatura e é observado que o ângulo entre os lados da geometria interferem no aparecimento de *vortex*. Portanto, quando maior o ângulo entre os lados da geometria, mais lineares serão as linhas de fluxo ao longo do escoamento.

Tabela 5.5 - Fluxo de calor \times geometria.

Geometria	Fluxo de Calor (W/m^2)
Triângulo	341,92
Quadrado	293,65
Hexágono	272,73
Círculo	265,49

A maior diferença de temperatura na geometria triangular está associada ao maior número de zonas de alta pressão (nos vértices com ângulos agudos). As regiões de alta pressão, que são regiões onde a agitação das moléculas são mínimas e com velocidade $\rightarrow 0$ na direção da superfície, conduz à distribuição heterogênea do calor na superfície do modelo. Na Figura 5.8 observa-se maior homogeneidade na distribuição de calor na geometria circular, Figura 5.8 (a), quando comparado com a distribuição de calor na geometria triangular, Figura 5.8 (b), onde é observado o resfriamento nos vértices do triângulo.

Nas simulações com duto de escape cujo comprimento era superior a $1000mm$, há

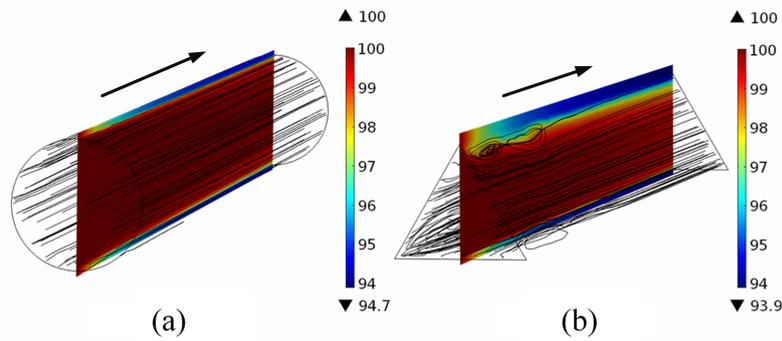


Figura 5.7 - Linhas de fluxo e temperatura [$^{\circ}C$]: (a) modelo circular e (b) modelo triangular.

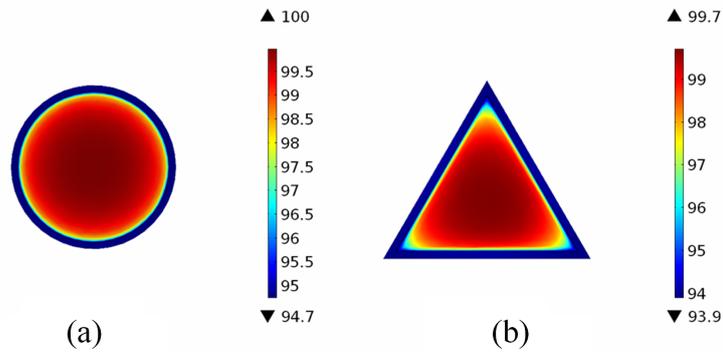


Figura 5.8 - Distribuição de temperatura [$^{\circ}C$]: (a) modelo circular e (b) modelo triangular.

elevada perda de energia no sistema após os $500mm$, o que indica que o módulo captador deve possuir comprimento longitudinal máximo de $500mm$. Das simulações com geometrias: i) triangular, ii) quadrangular, iii) hexagonal e iv) circular, observa-se que: i) o duto não pode passar de $500mm$, ii) a parede do duto não poderia ser mais espessa que o diâmetro de saída do duto, ou seja, superior a $5,85cm$ e iii) o duto deve conter geometria de secção transversal próxima à geometria circular. Diante destas restrições de projeto, foi escolhido o modelo circular para geometria interna do duto e o modelo hexagonal para geometria externa do duto. A geometria hexagonal foi escolhida para geometria externa por ter maior número de lados e com isto receber maior quantidade de TEG.

5.2.3 Análise da proposta hexagonal

Escolhida a geometria, é necessário realizar a distribuição dos TEG sobre a superfície do duto de escape. Da Tabela 5.3, observa-se que para cada módulo gerar $21,7W$ de energia elétrica é necessário o fluxo de calor de $247W$. Desta forma, considerando o melhor caso, onde toda a potência térmica gerada é aproveitada, pode-se, utilizando o valor da potência dissipada nos gases de exaustão, quando o gerador está funcionando com carga e o valor do fluxo de calor necessário para que cada TEG gere sua potência máxima, calcular a quantidade de TEG necessária para extrair toda a potência dissipada nos gases de exaustão do conjunto moto-gerador utilizado, Figura 5.1.

Seriam possíveis a utilização de até 280 TEG para recuperar a potência energética total no escape do gerador. No entanto, seria necessário comprimento superior a $500mm$, o que acarretaria a má distribuição da temperatura, onde os TEG dispostos na saída do duto de escape não receberiam a temperatura necessária para extração da sua máxima potência.

A geometria hexagonal proposta têm: i) lado de $70mm$, ii) diâmetro médio de $140mm$ e comprimento de $500mm$, dispostos em seis fileiras de sete TEG (42 TEG no conjunto), como ilustrado na Figura 5.9 (a). A estimativa de geração com esta configuração é de $882W$.

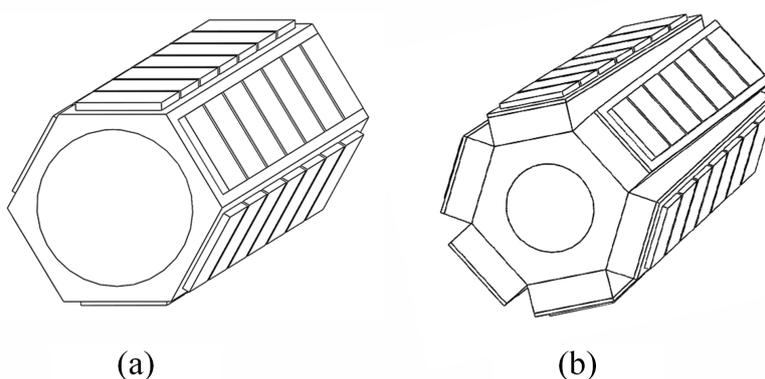


Figura 5.9 - Modelo hexagonal: (a) com variação interna e (b) com variação externa.

Após simuladas as duas geometrias propostas, os modelos não apresentaram equi-

zação e nem a limitação térmica necessária na superfície do duto. Observou-se a necessidade da utilização de material mais resistivo termicamente que o aço. Realizou-se novas simulações utilizando o ar como material térmico isolante. A nova proposta é ilustrada na Figura 5.10, onde é implementada a **camada de ar resistiva**. A proposta simulada considerando a camada de ar resistiva apresenta a equalização e o controle da limitação térmica necessária. As características desta proposta estão dispostas na Tabela 5.6.

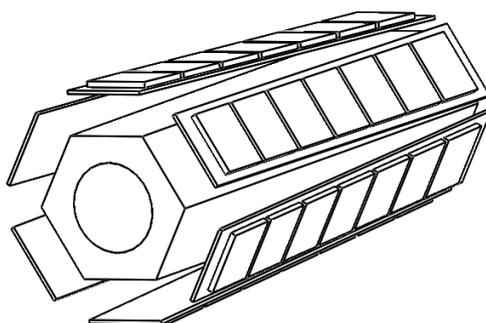


Figura 5.10 - Projeto da camada de ar resistiva no duto.

Tabela 5.6 - Características do protótipo hexagonal com camada de ar resistiva.

Parâmetro	Valor
Geometria	Hexagonal
Número Total de TEG	42
Quantidade de TEG por fileira	7
Diâmetro duto Interno	57,15mm
Diâmetro Externo	140mm
Comprimento do protótipo	500mm
Material do duto	Aço ABNT 1045

5.2.4 Simulação do modelo hexagonal com camada de ar resistiva

Na nova proposta, o modelo hexagonal com a camada de ar resistiva, existe a necessidade da definição da espessura da camada de ar. De posse da geometria e do modelo, é possível simular, via método dos elementos finitos, alguns valores de temperatura de entrada do duto ($500^{\circ}C$ até $1000^{\circ}C$) e observar a equalização, o limite máximo de temperatura na superfície e a variação na camada de ar resistiva. A

Tabela 5.7 dispõe os valores obtidos nas variações dos parâmetros, onde ΔT [$^{\circ}C$] é a diferença entre a temperatura de entrada t_i [$^{\circ}C$] e a temperatura de saída t_o [$^{\circ}C$]. A partir dos dados dispostos na Tabela 5.7 é possível encontrar as expressões (5.2) e (5.3) que definem as espessuras da camada de ar resistiva.

Tabela 5.7 - Valores dos parâmetros para construção da expressão (5.2).

T_{fluid} [$^{\circ}C$]	E [mm]	e [mm]	t_i [$^{\circ}C$]	t_o [$^{\circ}C$]	ΔT [$^{\circ}C$]
500	7	3	342,90	342,44	0,46
550	10	5,5	338,94	338,89	0,05
600	12,5	7,5	341,19	341,59	0,60
650	15	10	339,15	339,27	0,12
700	18	12	337,19	337,96	0,77
750	20	15	335,06	334,53	0,53
800	24	18	321,50	321,81	0,31
850	25	19	334,55	334,73	0,18
900	27	21	335,48	335,52	0,04
950	29	23	336,25	336,07	0,18
1000	31,5	25,5	330,92	330,63	0,29

$$E(T) = -1,119e^{-5}T^2 + 6,169e^{-2}T - 19,79 \quad (5.2)$$

$$e(E) = E - 5,41 \quad (5.3)$$

onde T é a temperatura do fluido, E é a espessura de entrada e e é a espessura de saída em [mm]. A Figura 5.11 ilustra os dados obtidos e dispostos na Tabela 5.7, apresentando a diferença entre os valores medidos em simulação e os valores obtidos pela expressão (5.2).

Os valores obtidos de ΔT em simulação indicam a equalização da temperatura sobre a superfície do duto. Com relação ao limite máximo de temperatura, esta pode ser controlada variando os valores de E e e na expressão (5.2).

5.2.5 Análise de superfície estendida

Há relação direta entre o número de Reynolds e o aumento da energia do sistema (entropia) justificada pela primeira lei da termodinâmica (MURTHY et al., 2006). O aumento da energia do sistema permite maior troca de calor do fluido com o aparato

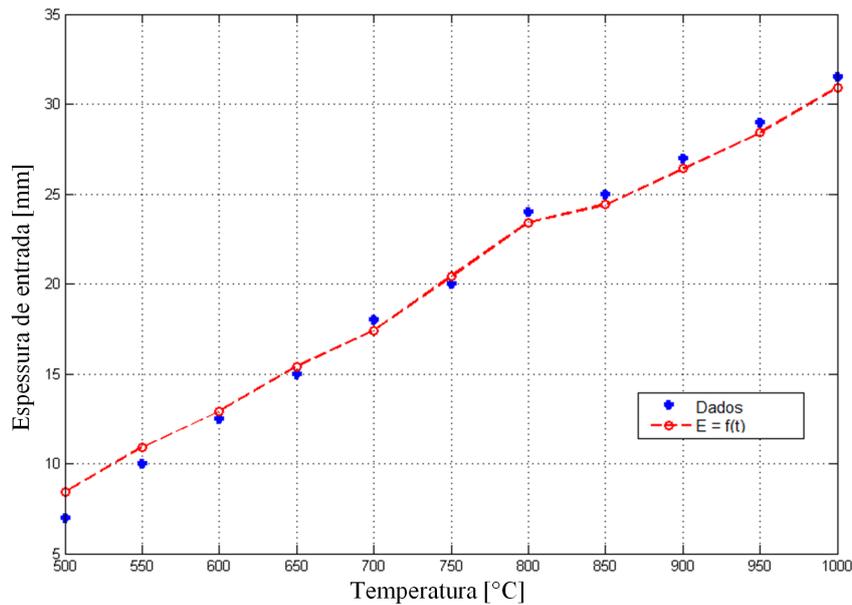


Figura 5.11 - Relação da espessura da entrada da camada de ar \times temperatura equalizada.

de captação. Porém, o aumento da entropia pode ser prejudicial ao escoamento, isto é, pode gerar perda de carga e possivelmente comprometer o rendimento do conjunto moto-gerador.

Com o intuito de aumentar a transferência de calor dos gases de exaustão para a superfície do duto, propõe-se a implementação de superfície estendidas no interior do duto. O uso de superfície estendida é comum em situações onde se deseja o aumento da área de troca de calor do sistema para a mesma área base (BERGMAN et al., 2011). Uma das soluções encontrada nestes casos é a instalação de superfície estendida helicoidal ao longo do comprimento do duto. Nesta proposta, o desejo é observar aumento da temperatura na superfície de captação do aparato sem perda de carga do conjunto moto-gerador. A proposta é simular para possível implantação, uma mola com fio de 6mm de diâmetro e oito revoluções, a ser inserida no interior do duto.

Após a construção do novo modelo, com a inserção da superfície estendida, foi realizada a comparação da variação de temperatura na superfície do duto para dois dutos idênticos de aço com temperatura na fonte quente de 500°C , onde: i) duto sem superfície estendida, Figura 5.12 (a) e ii) duto com superfície estendida helicoidal, Figura 5.12 (b).

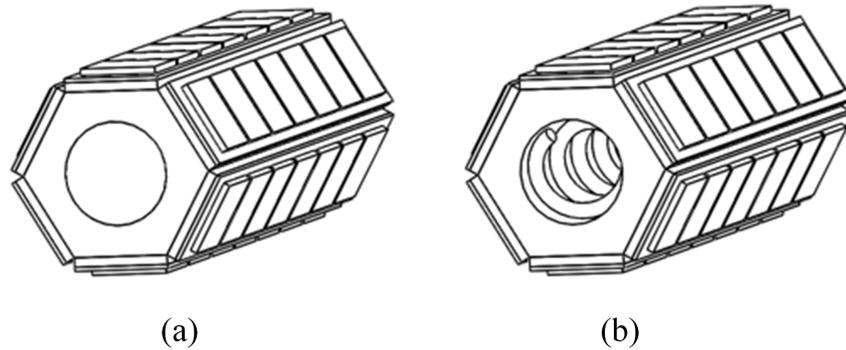


Figura 5.12 - Interior do duto: (a) sem superfície estendida helicoidal e (b) com superfície estendida helicoidal.

Na simulação foi obtido os valores: i) sem superfície estendida $t_i = 324,5^{\circ}C$ e $t_o = 318,1^{\circ}C$, com média de $321,3^{\circ}C$ e ii) com superfície estendida helicoidal $t_i = 327,1^{\circ}C$ e $t_o = 321,1^{\circ}C$, com média de $324,1^{\circ}C$. Houve aumento de 0,86% na temperatura da superfície do duto, utilizando a superfície estendida helicoidal. Analisando o aumento da temperatura obtido com a utilização da superfície estendida, não é interessante sua utilização, pois há aumento no custo de fabricação e outros. No entanto, analisando a teoria de transferência de calor, se houver mudança na carga do conjunto moto-gerador, há mudança no fluxo de saída. Desta forma, a utilização da superfície estendida atrasa a dinâmica do fluxo, mantendo a uniformidade do mesmo, maximizando a troca de calor sem corromper a homogeneidade da transferência à superfície. A Figura 5.13 ilustra a distribuição das linhas de fluxo no interior do duto e a Figura 5.14 ilustra a distribuição da temperatura no interior do duto.

É provável que diâmetros maiores do fio da mola apresentem maiores ganhos, no entanto, não é recomendável, pois haveria a queda de pressão o que seria prejudicial ao conjunto moto-gerador.

5.2.6 Construção do protótipo

O protótipo foi construído no centro de usinagem e fresadoras a partir de bloco maciço de aço. Foi inserido, como teste, fina chapa de cobre de $2mm$ entre a superfície de captação e as faces dos TEG, com o intuito de auxiliar na equalização da temperatura e melhorar a transferência de calor para os TEG. Com o intuito de extrair a máxima potência dos TEG, foi acoplado resfriador por fluxo contínuo de água, com

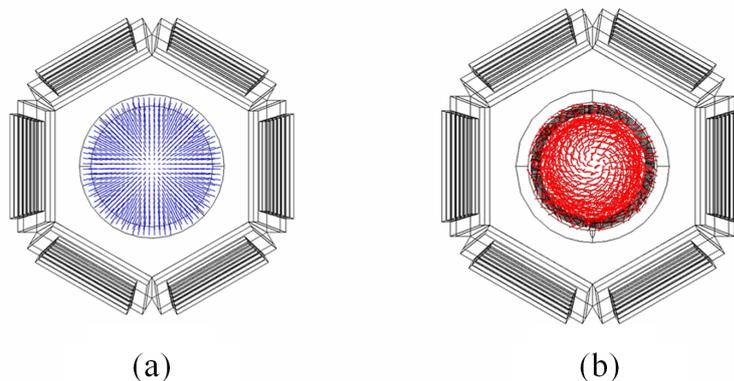


Figura 5.13 - Linhas de fluxo: (a) sem superfície estendida helicoidal e (b) com superfície estendida helicoidal.

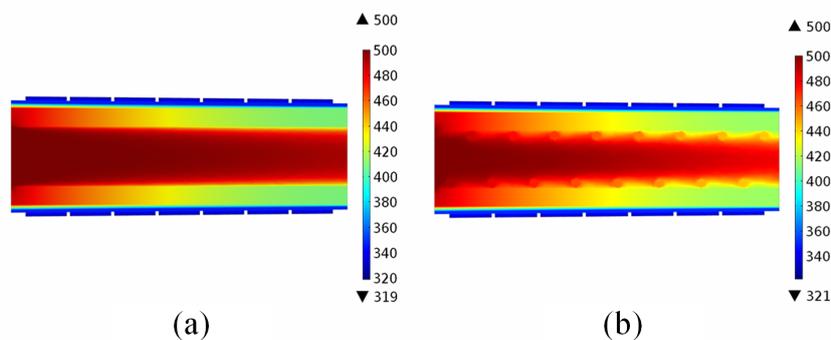


Figura 5.14 - Distribuição de temperatura: (a) sem superfície estendida helicoidal e (b) com superfície estendida helicoidal.

o desejo de manter a temperatura do lado frio dentro do exigido pelo fabricante, Tabela 5.2. Na Figura 5.15 as indicações numéricas: (1) o sistema de refrigeração por fluxo de água corrente, (2) ilustra a face de captação, (3) e (4) as chapas superiores e inferiores de cobre, (5) o isolante térmico para amenizar a transferência de calor entre os TEG, (6) os TEG, (7) isolante térmico e, (8) e (9) flanges de conexão com a tubulação do sistema. Em complemento, a Figura 5.16 ilustra em (10) o isolante térmico, (11) roscas para o parafuso de posicionamento do suporte de TEG, (12) o suporte para o posicionamento dos TEG, em (13) os furos para fixação da flange e em (14) os rasgos nas faces do duto visando a instalação de termopares para o processo de validação do equipamento.

A Figura 5.17 ilustra a vista explodida do protótipo com indicação dos materiais.

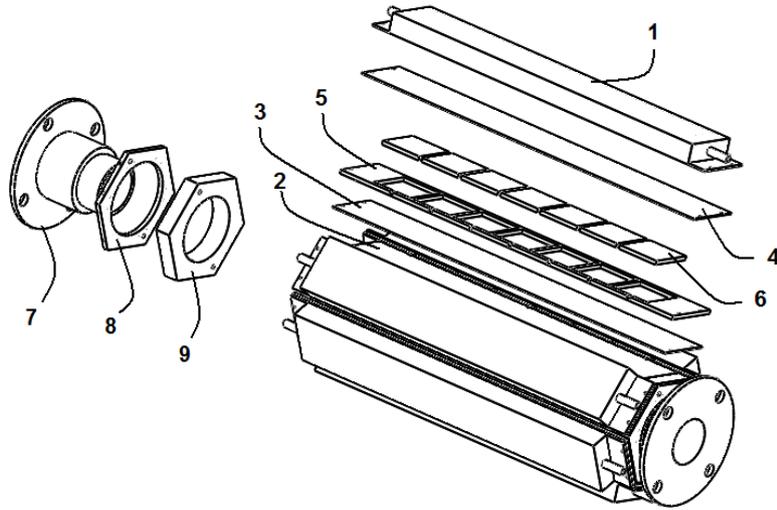


Figura 5.15 - Vista em perspectiva do protótipo para captação de energia térmica.

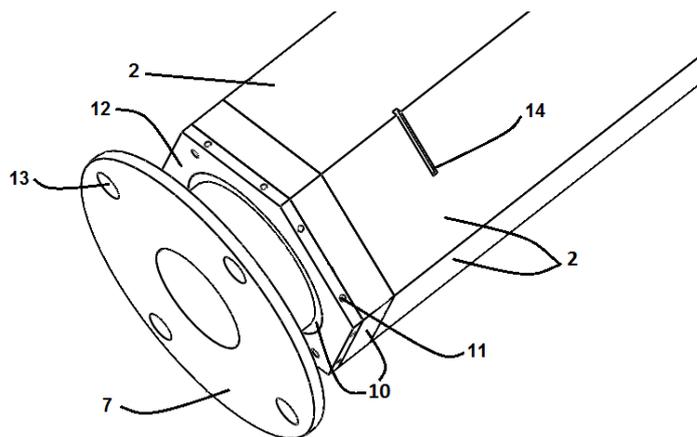


Figura 5.16 - Vista em perspectiva do protótipo.

Foi adicionado ao protótipo a superfície estendida, fabricada em aço ABNT 1045 e diâmetro externo igual ao diâmetro interno do furo do protótipo.

Devido ao alto coeficiente de condução térmica, o cobre (*Cu*) pode ser utilizado entre as superfícies de troca de calor, visando a homogeneidade da distribuição térmica. No ensaio laboratorial, apresentado na Figura 5.18, observa-se a superfície de cobre no centro da placa de aço, com temperaturas equalizadas e superiores à da chapa de aço. Observa-se ainda a homogeneidade térmica na placa de cobre.

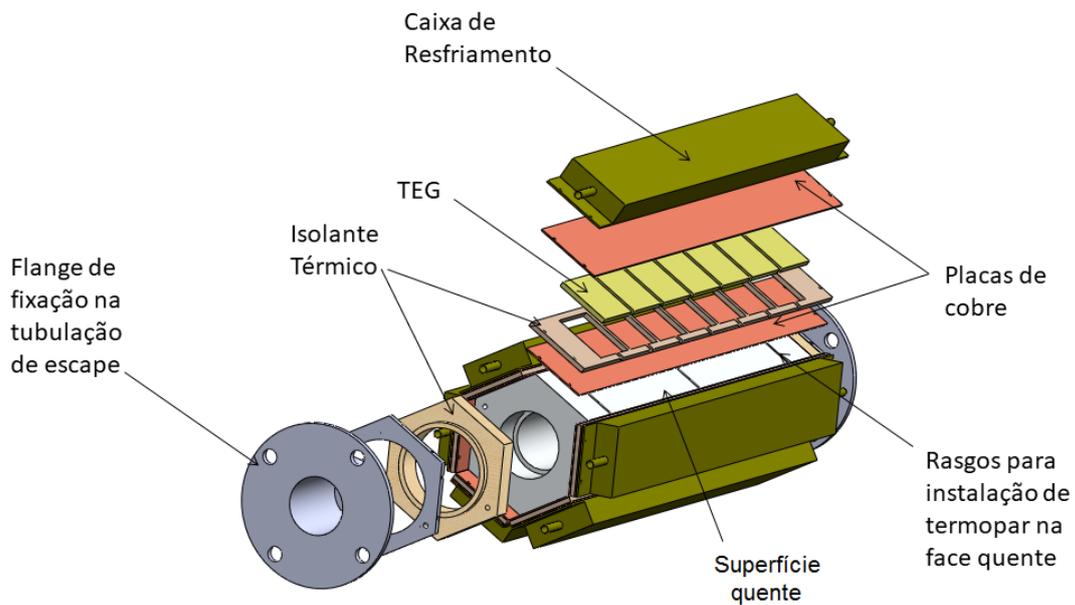


Figura 5.17 - Vista explodida do protótipo.

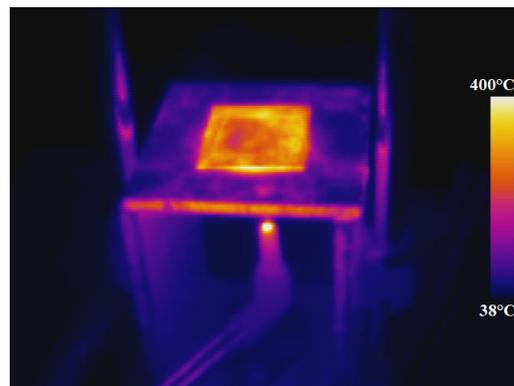


Figura 5.18 - Equalização térmica em chapa de cobre.

5.3 Validação experimental

Para a validação do protótipo foi necessário avaliar os TEG em laboratório e comparar os resultados obtidos com os dados do fabricante. Após esta análise, os TEG foram colocados no aparato e o aparato conectado ao conjunto moto-gerador a diesel. Houve a necessidade de controlar a temperatura do lado quente através da espessura da câmara de ar, pois o conjunto moto-gerador disponibiliza temperatura acima do suportado pelos TEG. O controle da temperatura do lado frio é realizado

com o intuito de aumentar a eficiência dos TEG.

5.3.1 Análise do TEG

Para análise dos dados do fabricante dos TEG foi construído dispositivo composto por: i) morsa de bancada, ii) caixa metálica com fluxo de água para resfriamento, iii) dissipador de alumínio para transferência de calor e iv) bico de Bunsen para aquecer o dissipador. Na Figura 5.19 é apresentado o dispositivo para avaliação dos TEG e na Figura 5.20 é apresentada a imagem térmica obtida por câmera termovisora a laser, modelo ITTMV-100 da Instrutemp. Na imagem é possível observar, pelo espectro de cores, que a temperatura do lado frio T_c é aproximadamente 30°C e que a temperatura do lado quente T_h , após período transitório, fica em torno de 300°C .

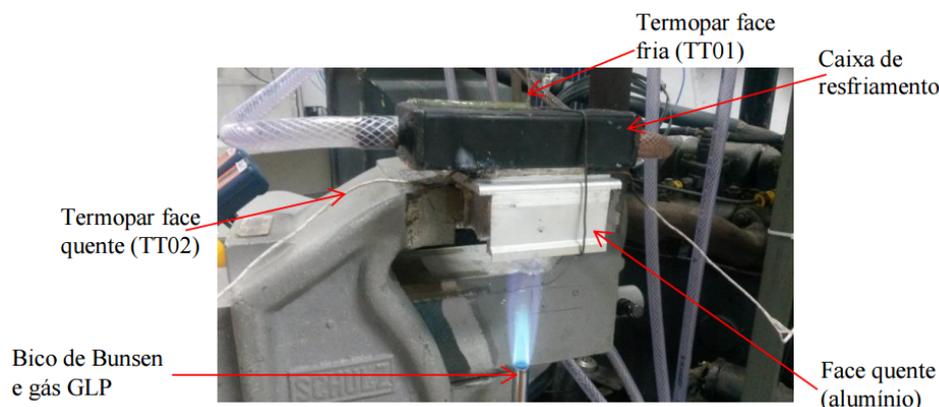


Figura 5.19 - Montagem laboratorial para teste do TEG.

Na Figura 5.21 são apresentadas as curvas $V \times I$ e $P \times I$ de desempenho do TEG para o teste em bancada e as curvas $V \times I$ e $P \times I$ do fabricante. A curva experimental foi obtida através da variação do resistor (carga variável) conectado ao circuito. A partir da variação da resistência do valor mínimo até o valor máximo, foram definidas os valores de tensão de circuito aberto e curto circuito. As curvas foram obtidas com $T_h = 297^\circ\text{C}$ e $T_c = 30^\circ\text{C}$.

Sugere-se que as variações observadas entre o resultado experimental e do fabricante são oriundas das falhas no contato entre a superfície do TEG e as fontes quente e fria. Embora o fabricante indique a geração de $21,7\text{W}$ por TEG, foi obtido apenas $6,3\text{W}$ por TEG no experimento, redução de $70,96\%$ no valor informado pelo fabricante.

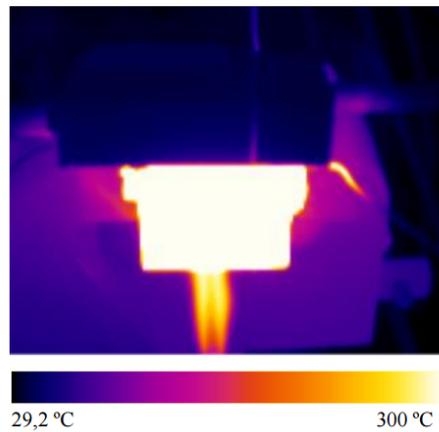


Figura 5.20 - Imagem térmica do teste laboratorial dos TEG.

A diferença encontrada entre a potência experimental e a informada pelo fabricante pode estar associada a rugosidade da superfície e a pressão de contato.

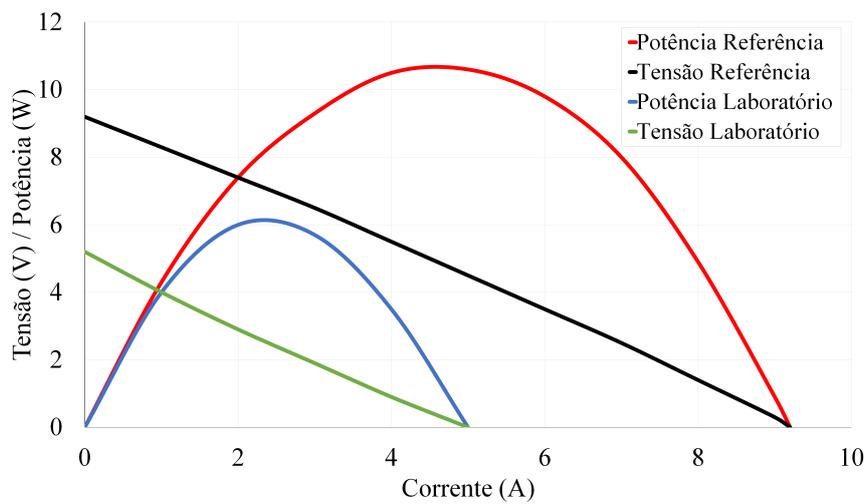


Figura 5.21 - Curvas experimental × fabricante do TEG.

5.3.2 Conexão do aparato ao conjunto moto-gerador diesel

É realizada a conexão do aparato no conjunto moto-gerador da Figura 5.1. Na Figura 5.22 é apresentado o aparato montado na tubulação de saída dos gases de exaustão, ainda sem os TEG e sem as caixas de resfriamento. Observa-se na Figura 5.22 que o aparato foi montado após o amortecedor de vibração e que os rasgos

para instalação dos termopares na face quente foram colocados apenas em uma das seis faces. Nos testes foram medidas as temperaturas dos gases de exaustão e da face quente sem os TEG, para diferentes condições, que são: i) moto-gerador produzindo potência elétrica de $60kW$ e ii) moto-gerador produzindo potência elétrica de $80kW$. Estes testes servem para verificação e validação com a simulação da máxima temperatura da face quente para duas potências do gerador elétrico.

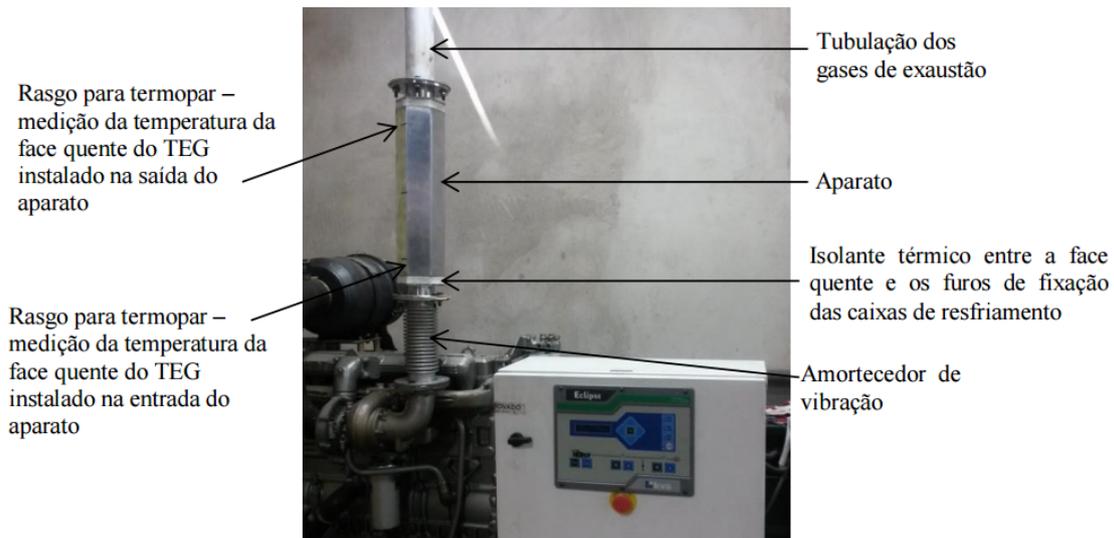


Figura 5.22 - Protótipo acoplado no conjunto moto-gerador diesel.

A Figura 5.23 (a) apresenta a imagem térmica do protótipo acoplado ao conjunto moto-gerador, onde a superfície quente atinge a temperatura de $347^{\circ}C$. Na Figura 5.23 (b) é apresentada a localização dos sensores: i) T_1 termopar modelo com bainha para medir a temperatura dos gases de exaustão na saída do aparato, ii) T_2 termopar modelo sem proteção na junta de medição que realiza a medida da temperatura na superfície de entrada do aparato, iii) T_3 termopar modelo sem proteção na junta de medição que realiza a medida da temperatura no centro da superfície do aparato e iv) T_4 termopar modelo sem proteção na junta de medição que realiza a medida da temperatura na superfície de saída do aparato. Nos testes foram coletados os seguintes dados: i) gases de exaustão na tubulação de diâmetro de $7,8cm$ com pressão de $25,41kPa$ e ii) velocidade dos gases de $55,80m/s$. Estas medições foram realizadas no último ponto de saída da tubulação, após o silenciador.

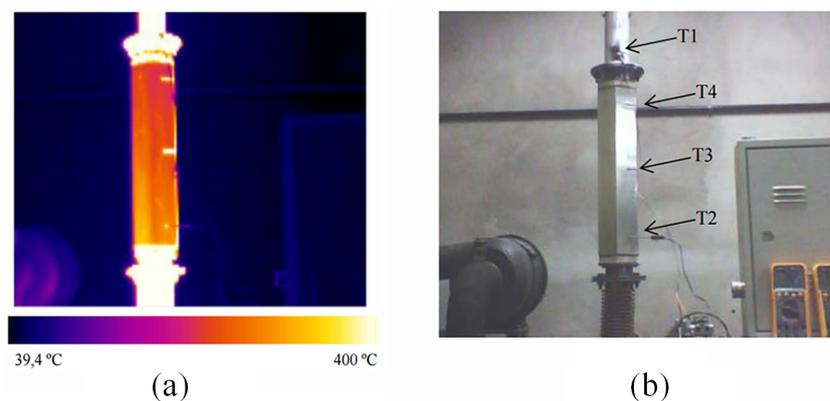


Figura 5.23 - Comparativo: (a) imagem térmica do aparato quente sem TEG; (b) localização dos sensores no aparato.

5.3.3 Controle da temperatura no resfriador

Com intuito de obter o máximo da eficiência dos TEG, foi desenvolvido sistema de refrigeração para ser colocado no lado frio do aparato. A Figura 5.24 apresenta o sistema de resfriamento acoplado ao conjunto moto-gerador. Neste sistema, foram utilizados termopares para monitorar a temperatura da água no resfriador. A Figura 5.25 apresenta o resfriador produzido para manutenção da temperatura no lado frio do aparato.

Para o controle da temperatura do lado frio, foram projetados comandos no Controlador Lógico Programável (CLP) que a partir da leitura de temperatura no termopar abre ou fecha a válvula do tipo normalmente fechada. Desta forma, quando a temperatura da água for superior a 50°C , a válvula abre e a água fria é trocada pela água quente, realizando a refrigeração do lado frio dos TEG. Quando a temperatura atinge 30°C , a válvula é novamente fechada. Este valor de *setpoint* foi definido utilizando as curvas do TEG, informado pelo fabricante (THERMONAMIC, 2017). Leva-se em consideração a relação eficiência \times economia de água para resfriamento. Neste caso, quanto menor a temperatura dos TEG no lado frio, maior é a sua eficiência, mas conseqüentemente, mais água será consumida para manter a face em $\approx 30^{\circ}\text{C}$.

5.4 Resultados obtidos nos experimentos

Este trabalho é parte do projeto de pesquisa do CNPq n°. 8485, composto pelas etapas: 1) obtenção da geometria do duto, desenvolvido no trabalho em tela, 2) planta

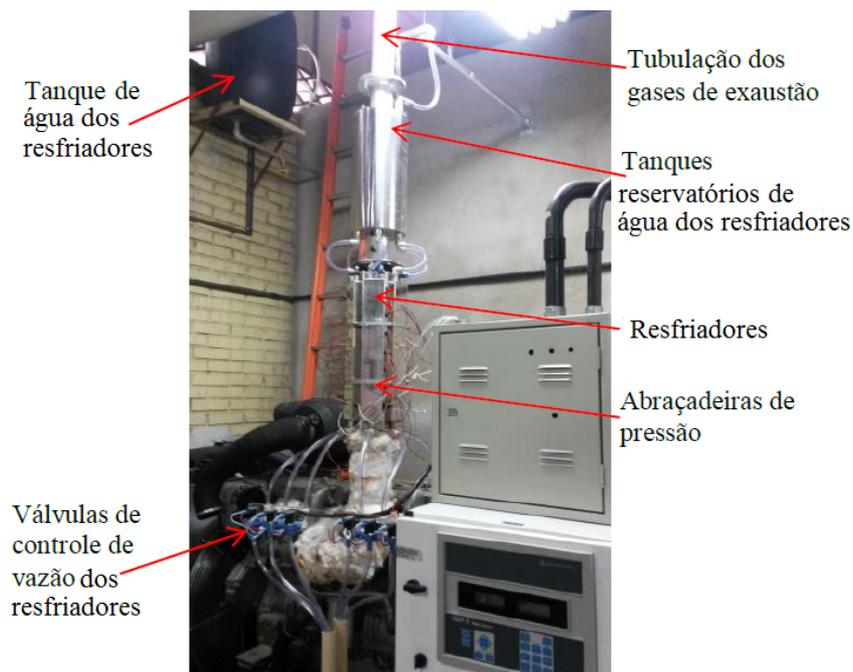


Figura 5.24 - Sistema de resfriamento acoplado ao conjunto moto-gerador.



Figura 5.25 - Aparato conectado ao dispositivo de resfriamento.

de geração termoelétrica, desenvolvido em [Stecanella \(2016\)](#) e 3) conexão da energia gerada à carga, desenvolvido em [Faria \(2016\)](#). Desta forma, os resultados da geração elétrica foram obtidos nos trabalhos de [Stecanella \(2016\)](#) e [Faria \(2016\)](#).

Com o intuito de validar os resultados de simulação, alguns testes foram realizados no aparato. O primeiro teste foi o monitoramento com e sem a superfície estendida. A Tabela 5.8 dispõe os resultados de temperatura média, coletadas nos sensores ilustrados na Figura 5.23 (b), com o moto-gerador produzindo potência elétrica de $60kW$ e $80kW$. Observou aumento na temperatura média da superfície quente de $\approx 6\%$ quando a superfície estendida foi acoplada. Na Tabela 5.8, a variação média da temperatura é dada por ΔT_{sen} .

Tabela 5.8 - Resultados experimentais do uso da superfície estendida.

Potência do moto-gerador [kW]	Condição	ΔT_{sen}	Aumento
60	Sem superfície	303,75 [°C]	5,35%
	Com superfície	320,00 [°C]	
80	Sem superfície	360,00 [°C]	6,8%
	Com superfície	384,75 [°C]	

Durante a simulação foram analisadas as temperaturas das superfícies dos lados frio T_c e do lado quente T_h , onde seriam acoplados os TEG. Estas temperaturas são importantes para o sistema de recuperação de energia. Desta forma, foram comparados os resultados simulados com os resultados medidos de T_c e T_h e dispostos na Tabela 5.9. Observa-se na Tabela 5.9 que a variação ΔT_c e ΔT_h foi maior que o simulado, no entanto, seus valores ficaram dentro do esperado.

Tabela 5.9 - Resultados simulados × experimentais.

	Simulado	Experimental
ΔT_c	0, 0°C	3, 0°C
ΔT_h	3, 2°C	6, 9°C
Velocidade dos gases	40, 0m/s	55, 80m/s

A planta de geração elétrica foi construída com seis ramos em paralelo, sendo que cada ramo contém sete TEG em série formando uma lateral do dispositivo. Esta configuração é viável pelo fato de elevar a tensão na planta, além de manter a segurança no funcionamento do sistema. Assim, se um TEG de qualquer ramo sair de operação, os demais mantêm a alimentação da carga. A Tabela 5.10 dispõe os valores de geração por ramo e os resultados da experimentação para o modelo completo incluindo os 42 TEG, são dispostos na Tabela 5.11.

Tabela 5.10 - Geração da planta termoelétrica × ramo.

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

Tabela 5.11 - Geração da planta termoelétrica.

Parâmetro	Valor
V_{out}	17,84 [V]
I_{cc}	13,56 [A]
V_{mpp}	8,92 [V]
I_{mpp}	6,78 [A]
P_{max}	60,48 [W]

Na Tabela 5.10 e Tabela 5.11, V_{out} é a tensão de circuito aberto, I_{cc} é a corrente de curto circuito, V_{mpp} é a tensão na máxima potência, I_{mpp} é a corrente na máxima potência e P_{max} é a potência máxima. Os valores de V_{mpp} e I_{mpp} foram obtidos utilizando rastreador de máxima potência desenvolvido em Faria (2016). Segundo o fabricante dos TEG, o conjunto de 42 TEG deveriam obter $\approx 900W$, no entanto, foi obtido $\approx 60W$ que equivale a $\approx 7\%$ do esperado.

5.5 Eficiência \times contato físico e pressão

O baixo rendimento do protótipo foi ocasionado por diversos motivos, no entanto, dois deles podem ser investigados: i) o contato da superfície do TEG com o aparato e ii) a pressão exercida sobre o TEG contra o aparato nas partes fria e quente. Com relação as superfícies, mesmo as superfícies que aparentemente estão lisas e planas, na verdade, quando são ampliadas, apresentam picos e vales, indicando a presença de rugosidade. Quando as superfícies entram em contato, a transferência de energia térmica é realizada apenas nos picos, gerando baixa condução térmica e conseqüente baixa geração elétrica dos TEG. Bhushan (1998) estima que a quantidade média de contatos entre duas superfícies lisas é, na realidade, apenas 5% da área total da superfície. Com relação a pressão, a conexão dos TEG no protótipo foi realizada por abraçadeiras e pelos parafusos de fixação da caixa de resfriamento. A pressão exercida por estes conectores não foi suficiente para extrair o máximo da potência dos TEG.

5.5.1 Influência da pressão de contato

Para realizar a análise de contato e pressão foi desenvolvido dispositivo composto por: i) prensa hidráulica, ii) manômetro, iii) resfriador e iv) bico de Bunsen. O aparato apresenta na parte superior da prensa hidráulica, o resfriador com aletas internas alimentado por ar comprimido. O ar comprimido em alta vazão, auxiliado pela presença de aletas, promove o resfriamento da superfície do resfriador e con-

sequentemente da parte fria do TEG. A Figura 5.26 apresenta o dispositivo para análise de contato e pressão.

Para produzir os experimentos, necessita-se de relacionar os valores medidos no manômetro em quilopascals [kPa] com quilograma-força [kgf]. Desta forma, é realizada a calibração através de célula de carga colocada entre a ponta da prensa hidráulica e a base superior do dispositivo. Assim, a pressão aplicada no dispositivo e medida no manômetro, também é medida na célula de carga, os valores correspondentes são disposto na Tabela 5.12.



Figura 5.26 - Dispositivo para análise de contato e pressão.

Tabela 5.12 - Relação quilopascal \times quilograma-força.

Pressão [kPa]	Força [kgf]
0	0
68,9	109,3
137,9	218,5
206,8	327,8
275,8	437,1
344,7	546,4
413,7	655,6
517,1	819,5
689,5	1092,7
861,8	1365,9
1034,2	1639,1

Foi inserida chapa de cobre entre a parte quente do TEG e o bico de Bunsen para melhorar a transferência de calor. Inicialmente foi realizada calibração do manômetro na prensa hidráulica, de forma a considerar a massa dos objetos. O multímetro foi conectado nos terminais do TEG, medindo a tensão em circuito aberto. Após o posicionamento de todos os objetos na prensa hidráulica, colocou-se o bico de Bunsen e monitorou-se a temperatura da placa de cobre através da câmera termovisora, com o intuito de não ocorrer a extrapolação da temperatura limite. O experimento foi realizado com temperatura do lado frio de $34^{\circ}C$ e temperatura do lado quente de $360^{\circ}C$. Os resultados de tensão [V] gerada em circuito aberto pelo TEG, para cada incremento de pressão, até $\approx 17\%$ a mais do limite estabelecido pelo fabricante $450kgf$, quando houve a ruptura do TEG, são apresentados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Relação força \times tensão.

Força [kgf]	Tensão [V]
0	3,14
109,3	3,16
218,5	3,23
327,8	3,35
437,1	3,40
546,4	3,47

Observando os resultados apresentados na Tabela 5.13, quando não há nenhuma força aplicada sobre os TEG, somente o peso do resfriador, obtém-se a tensão de $3,14V$. No entanto, quando se aplica força de $546,4kgf$, obtém-se a tensão de $3,47V$. Isto corresponde a incremento de $\approx 9,50\%$ na tensão de circuito aberto, indicando a relação entre a força aplicada e a tensão gerada. A Figura 5.27 apresenta a distribuição de temperatura sobre o dispositivo, onde é observada a transferência de calor da placa de cobre para o lado quente do TEG e o resfriador.

5.5.2 Influência da superfície

Na realização dos testes de contato, utilizou-se três superfícies com diferentes acabamentos. As três chapas são laminadas a quente com dimensão $150mm \times 150mm \times 12,8mm$ de Aço ABNT 1020. A primeira peça P_1 possui superfície com carepa (película de óxido de ferro que se forma na superfície do aço laminado a quente), a segunda peça P_2 foi lixada e a terceira peça P_3 possui superfície usinada por torneamento. O nível de acabamento das superfícies foi avaliado através do rugosímetro

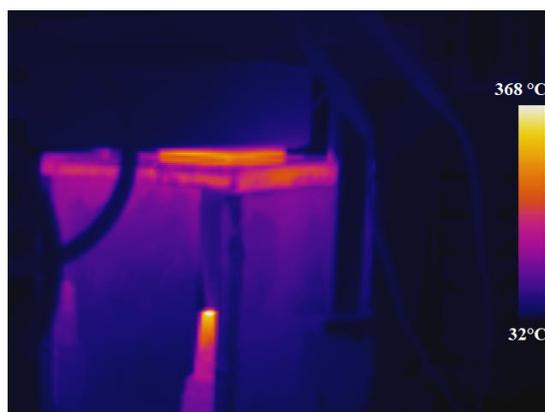


Figura 5.27 - Distribuição de temperatura no dispositivo para análise de contato e pressão.

Mitutoyo SJ-210, como apresentado na Figura 5.28.



Figura 5.28 - Rugosímetro para avaliação de superfícies.

Foram realizadas quatro medições para cada tipo de superfície e a média dos resultados estão dispostos na Tabela 5.14, onde R_a é a rugosidade média, R_q é a rugosidade média quadrática e R_z é a distância vertical entre o maior pico e o menor vale no comprimento em estudo. Para as três superfícies de contato, foram coletas a tensão de circuito aberto com pressão fixa em 450kgf e temperatura do lado frio de 34°C e temperatura do lado quente de 360°C . Cada superfície P_1 , P_2 e P_3 , ainda foram testadas com e sem pasta térmica, com o intuito de observa a influência desta na transferência de calor. Os resultados são dispostos na Tabela 5.15.

Analisando a Tabela 5.15, observa-se que quanto mais lisa (menor rugosidade) a superfície, maior será a tensão gerada. Há o incremento de $\approx 29\%$ na tensão gerada utilizando a superfície da peça P_1 , com menor rugosidade, em relação a superfície da peça P_3 , de maior rugosidade. A pasta térmica melhorou a transferência de calor

Tabela 5.14 - Rugosidades das superfícies analisadas.

Parâmetro	P_1	P_2	P_3
R_a (μm)	0,25	0,55	0,87
R_q (μm)	0,32	0,70	1,10
R_z (μm)	1,32	3,18	4,04

em 3,07% para a peça P_1 , 6,72% para a peça P_2 e 11,51% para a peça P_3 . Os cabos elétricos que acompanham o TEG possuem baixa resistência térmica, podendo comprometer a utilização dos mesmos. Recomenda-se o uso de cabos com revestimento de fibra para o trabalho contínuo em temperaturas acima de $200^\circ C$.

Tabela 5.15 - Acabamento superficial \times tensão.

Situações	Tensão [V]
P_1	3,47
P_1 com pasta	3,58
P_2	3,03
P_2 com pasta	3,25
P_3	2,46
P_3 com pasta	2,78

5.6 Processo de otimização aplicada

Com o desejo de melhorar a eficiência do sistema de cogeração, é aplicado processo de otimização para encontrar os melhores valores de espessura E e e da camada de ar. Na tentativa de otimizar o sistema, desenvolve-se a função de avaliação que expresse o melhor desempenho do sistema. Utiliza-se como simulador o método dos elementos finitos e como metodologia de otimização, os métodos: i) quase-Newton e ii) algoritmo genético.

Para realizar a simulação no processo de otimização, é necessário a definição do volume de controle. Para efeitos de cálculos computacionais deve-se reduzir ao máximo este volume, diminuindo assim o esforço computacional. A região para análise foi de $400mm \times 200mm \times 462mm$. Foi observado que a partir destas dimensões, a influência do ambiente não é considerável. A Figura 5.29 ilustra o modelo simulado e seu volume de controle. O modelo foi dividido em seu eixo de simetria visando ainda mais a redução no esforço computacional. A função de avaliação foi definida a partir da análise da Figura 5.30, onde: i) temperatura da superfície na face de entrada t_o ,

ii) temperatura da superfície na face da saída t_i , iii) espessuras na entrada E e iv) espessura na saída e .

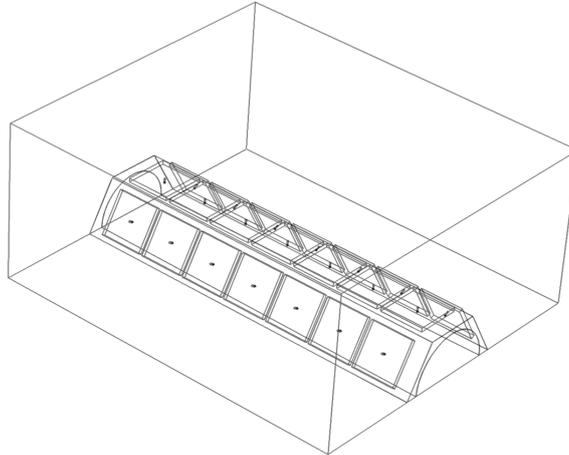


Figura 5.29 - Zona de efeito convectivo do meio externo.

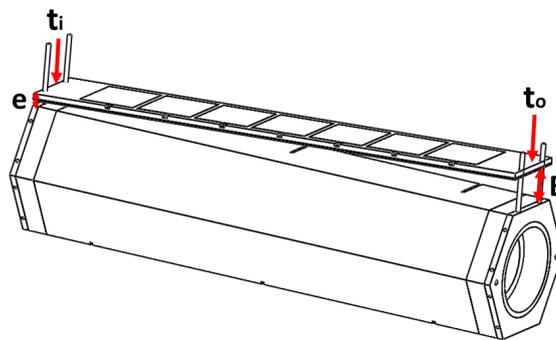


Figura 5.30 - Duto com indicação das temperaturas t_i , t_o e das espessuras E e e .

De acordo com os dados do fabricante, a máxima temperatura de operação dos TEG é de $360^{\circ}C$, esta restrição deve ser considerada na função de avaliação. Outra consideração que deve ser observada, é a temperatura máxima obtida pelo aparato na superfície quente T_h , de forma a produzir na simulação os efeitos do sistema real. A expressão (5.4) define a função de avaliação.

$$f(x) = |\Delta T_h - T_e| + (t_i - t_o) \quad (5.4)$$

Em (5.4) T_e é a temperatura limite dos TEG, ΔT_h é a temperatura média encontrada na superfície quente do aparato simulado. De forma prática, pode-se estimar $\Delta T_h = \frac{t_i + t_o}{2}$ e $T_e = 360^\circ C$. Utilizando o simulador e inserindo nele os valores de $t_o = 342,44^\circ C$, $t_i = 342,90^\circ C$, $E = 7mm$ e $e = 3mm$ utilizados no aparato construído, obtém-se $\Delta T_h = 342,67^\circ C$. Substituindo estes valores em (5.4), obtém-se $f(x) = 17,79^\circ C$. De posse deste dado, pode-se realizar o processo de otimização na busca de E e e que leve o sistema ao melhor desempenho.

5.6.1 Otimização com quase-Newton e algoritmo genético

Para otimização com o método de quase-Newton, é necessário definir os valores iniciais dos parâmetros a serem otimizados. Desta forma, utiliza-se os parâmetros da geometria do duto construído. Estes parâmetros inseridos como chute inicial no método de quase-Newton não resultaram em valores melhores, pois, o método de quase-Newton ficou preso em ótimo local e o valor de $f(x)$ ficou estagnado no valor $f(x) = 17,79^\circ C$.

O método heurístico algoritmo genético foi implementado com população de 50 indivíduos, operador de cruzamento heurístico e operador de mutação adaptativo. Como critério de parada foi estabelecido o valor da função de avaliação $f(x) = 0^\circ C$ ou 50 gerações. O algoritmo genético obteve valores otimizados das espessuras E e e , que são dispostos na Tabela 5.16. Observe que na Tabela 5.16, há dois valores para $f(x)$, no valor onde $f(x) = 6,49^\circ C$ o valor de $t_i = 363,24^\circ C$ é $\approx 0,89\%$ superior ao valor T_e , temperatura limite dos TEG. Como os algoritmos genéticos são métodos heurísticos e estes métodos encontram valores entorno/vizinho do ponto ótimo ou otimizado, realizando nova execução, limitando $f(x) = 10^\circ C$, obtém-se novos parâmetros otimizados. Neste novo ponto, Tabela 5.16 segunda linha, $f(x) = 11,89^\circ C$ e a restrição $T_e = 360^\circ C$ foi atendida.

Tabela 5.16 - Resultados da otimização.

E [mm]	e [mm]	t_i [$^\circ C$]	t_o [$^\circ C$]	$f(x)$ [$^\circ C$]
5,59	4,55	363,24	356,76	6,49
5,72	5,22	358,75	351,66	11,89

Analisando o valor de $f(x) = 17,79^{\circ}C$ do protótipo construído, houve melhoria de $\approx 60\%$ para os parâmetros que tiveram $f(x) = 6,49^{\circ}C$ e $\approx 30\%$ para os parâmetros que obtiveram $f(x) = 11,89^{\circ}C$. Foi observado que 90% do tempo gasto no processo de otimização foi utilizado na simulação e, deste tempo de simulação, cerca de 80% foi gasto na geração da malha. O desempenho do algoritmo genético é apresentado na Figura 5.31. A Figura 5.32 ilustra a geometria utilizada no simulador com a composição da malha de elementos.

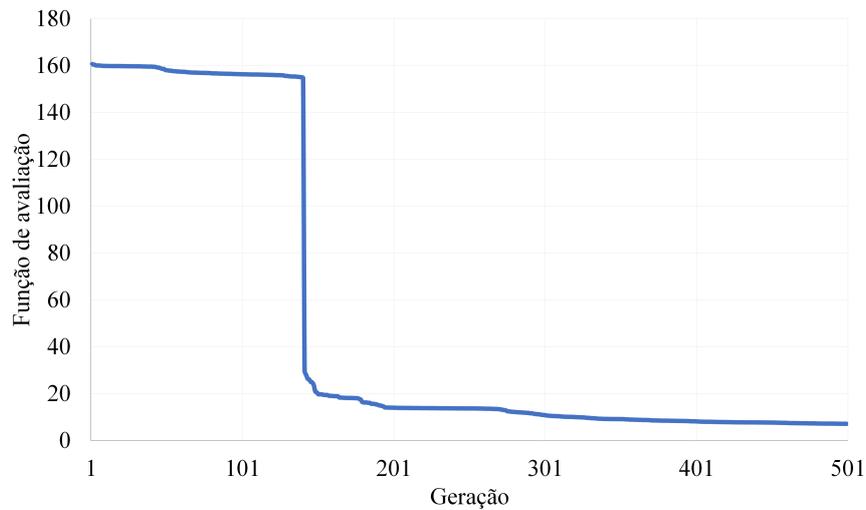


Figura 5.31 - Desempenho do algoritmo genético.

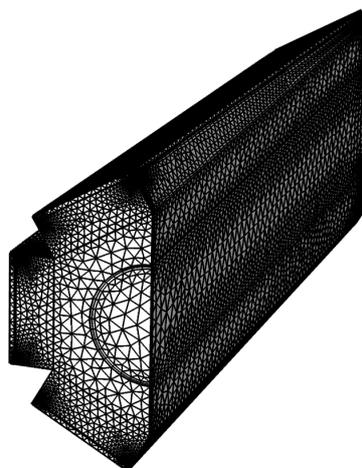


Figura 5.32 - Vista isométrica após construção da malha de elementos.

5.7 Comentários

As máquinas térmicas, em especial, o moto-gerador diesel, dispensam energia térmica que pode ser aplicada na cogeração de eletricidade, aumentando assim, a eficiência total do sistema. Após análise do moto-gerador em funcionamento, foi possível avaliar a carga térmica disponível quando este funcionava em *stand by* ou com carga.

Os geradores termo-elétricos, embora de eficiência de conversão próxima aos 5%, podem ser utilizados em sistemas de cogeração, destacando sua compactabilidade e inexistência de peças móveis. Contudo, a disponibilidade dos TEG é restrita a fabricantes internacionais, detentores de avanços tecnológicos do Telureto de Bismuto e de outros semicondutores. A obtenção deste equipamento é burocratizada e atrelada a alto custo.

O uso do método de elementos finitos permitiu a simulação de modelos físicos com resultados próximos aos experimentais. Esta proximidade dos resultados foi possível em função do detalhamento e implementação das condições de contorno do problema. Foi observado o efeito das quinas na comparação dos tipos de seção transversal de dutos de exaustão. As quinas geram *vortex* e prejudicam a linearidade da camada limite interna do escoamento. A seção circular apresentou para o escoamento interno a condição mais favorável.

Existe relação direta entre a variação da espessura do duto \times comprimento em escoamentos térmicos e a manutenibilidade da temperatura da superfície do duto constante. A manutenção deste gradiente térmico da superfície próximo a *zero* aumenta a vida útil dos componentes termoeletrônicos. O ar atmosférico, ótimo isolante térmico, foi utilizado como meio de controle da temperatura devido sua enorme sensibilidade na relação espessura da camada de ar \times isolamento do calor.

O protótipo foi construído incluindo a camada de ar resistiva, equacionada em função da temperatura no interior do duto, de forma a manter a temperatura da superfície externa constante. Nos experimentos realizados, o TEG não respondeu como descrito pelo fabricante. As diferenças nos resultados são atribuídas a construção e material do próprio TEG e a pressão e superfície de contato com o TEG.

As simulações foram importantes para o esclarecimento de dois fatores: i) o uso da chapa de cobre como material transferidor de energia térmica é eficiente devido ao seu elevado coeficiente de troca de calor por condução e os resultados experimentais

identificaram a homogeneidade na troca e ii) o uso de superfícies estendidas no interior do duto aumentaram a quantidade de energia trocada com a superfície em cerca de 6% sem interferências significativas de de pressão interna ao sistema.

A superfície de contato influencia na troca de calor por condução. Portanto, superfícies em contato de baixa rugosidade relativa, têm mais área em contato real, o que aumenta a troca de energia entre os corpos. Ainda, a menor presença de ar (alto índice de isolamento térmico) entre as superfícies, beneficia-se a troca. A pressão de contato diminui as vacâncias entre os corpos em contato e se relaciona diretamente com o aumento da troca de calor do TEG, respeitando o limite de resistência mecânica do material.

A construção do protótipo teve importância não apenas para o entendimento do funcionamento do sistema, mas principalmente para o desenvolvimento do processo de otimização do sistema.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

Enquanto os trabalhos recentes dispostos na comunidade científica focam na obtenção de novos materiais com valores elevados ZT , este trabalho busca a eficiência na conversão de energia, otimizando a geometria de captação. Diversas geometrias foram testadas, chegando a conclusão que a superfície de face interior circular e face exterior hexagonal são as mais eficientes, quando analisada pela relação quantidade de TEG na superfície por comprimento de área disponível.

Diante das propostas para equalização da temperatura na superfície do protótipo, a camada de ar resistiva apresentou gradiente de temperatura próximo a *zero*, além da manutenção da temperatura abaixo da temperatura limite de operação do TEG. O protótipo simulado foi fabricado e acoplado ao moto-gerador elétrico para validação dos dados obtidos. Utilizou-se o TEG da *Thermonamics*, constituído de semicondutor Telureto de Bismuto, que possui condição favorável para conversão de energia térmica em elétrica mesmo em temperaturas próximas de 200°C.

Foram encontradas diferenças nos valores da potência elétrica obtida no experimento e a apresentada pelo fabricante dos TEG. Estas diferenças foram associadas ao contato entre as superfícies do TEG e das fontes quente e fria. Após análise da pressão de contato, verificou-se dependência do acabamento da superfície do TEG e da força de contato na geração de energia elétrica. A superfície de menor rugosidade associada à pressão de contato de 450kgf favoreceu a troca de calor para o modelo de TEG avaliado. Ainda, destacam-se que o uso de pasta térmica aumentou a eficiência na geração elétrica do sistema ao diminuir os espaços com ar entre o TEG e a superfície de contato.

Finalmente, a partir dos resultados experimentais obtidos e validação do modelo computacional em elementos finitos, foi possível chegar ao modelo otimizado com o uso de algoritmo genético, com melhoria de $\approx 60\%$ de $f(x)$ quando comparado ao protótipo construído. O aparato com camada de ar resistiva facilita o ajuste e a equalização da temperatura, uma vez que basta aproximar ou afastar a superfície dos TEG da superfície do aparato. Desta forma, o protótipo serve para qualquer equipamento que gere calor acima do limite dos TEG.

6.1 Contribuições do trabalho

Este trabalho é parte do projeto de pesquisa Processo CNPq n°. 8485, intitulado *Produção de aparato tecnológico e de software para estudos de recuperação de perdas de energia em motorizador elétrico* composto pelas etapas: 1) Obtenção da geometria ótima da tubulação dos gases, 2) Planta de geração termoeétrica e 3) Conexão da energia gerada à carga. Este trabalho fornece a base para as etapa 2 e etapa 3 deste projeto.

6.1.1 Artigos em anais de congresso

GOMES, PEDRO H. G.; CALIXTO, WESLEY P.; FARIA, MESSIAS A. A.; STECANELLA, PRISCILLA A. J.; ALVES, AYLTON J.; DOMINGUES, ELDER G. Geometry optimization of exhaust ducts applied in thermoelectric cogeneration efficiency. In: 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015, Rome. 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015. p. 1132.

STECANELLA, PRISCILLA A. J.; FARIA, MESSIAS A. A.; DOMINGUES, ELDER G.; GOMES, PEDRO H. G.; CALIXTO, WESLEY P.; ALVES, AYLTON J. Electricity generation using thermoelectric generator - TEG. In: 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015, Rome. 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015. p. 2104

FARIA, MESSIAS A. A.; STECANELLA, PRISCILLA A. J.; DOMINGUES, ELDER G.; GOMES, PEDRO H. G.; CALIXTO, WESLEY P.; ALVES, AYLTON J. Modeling, simulation and control of a thermoelectric generator. In: 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015, Rome. 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015. p. 1373.

GOMES, PEDRO H. G.; CALIXTO, WESLEY P.; FARIA, MESSIAS A. A.; STECANELLA, PRISCILLA A. J.; ALVES, AYLTON J.; DOMINGUES, ELDER G. Optimized exhaust duct applied in thermoelectric waste heat recovery system. In: 2015 23rd International Congress of Mechanical Engineering, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

6.1.2 Artigos completos publicados em periódicos:

GOMES, PEDRO H. G.; CALIXTO, WESLEY P.; FARIA, MESSIAS A. A. ; STECANELLA, PRISCILLA A. J.; ALVES, AYLTON J.; DOMINGUES, ELDER G. Waste heat recovery plant for exhaust ducts using thermoelectric generators. Revista IEEE América Latina, v. 14, p. 2752-2757, 2016.

6.1.3 Patente

GOMES, P. H. G.; CALIXTO, W. P.; ALVES, A. J. Aparelho e processo para recuperação de energia térmica em dutos com camada de ar resistiva e superfície de captação com gradiente nulo. 2016, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR102016010305, Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 06/05/2016. Data de publicação na RPI: 21/11/2017.

6.2 Continuação do trabalho

- Aplicação do duto à outra fonte quente para comparação dos resultados como escapamentos de veículos ou saídas de chaminés industriais;
- Simulação do sistema utilizando situações de turbulência, semelhantes à prática, além do uso do fluido, o gás de combustão e observar as diferenças.
- Otimizar a geometria do arranjo das placas (configuração mista).
- Desenvolvimento de trabalho completo incluindo o desenvolvimento da geometria, o teste laboratorial com carga (usina) e busca pelo máxima potência de maneira conjunta, resultando um único trabalho final.
- Estudo da sensibilidade dos parâmetros de entrada do modelo visando entender a influência das variáveis no comportamento do sistema.
- Realizar análise de diferentes fabricantes de TEG e diferentes tipos de pasta térmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, L. M. **Introdução aos métodos aproximados em engenharia**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 2007. 55, 59
- ALVES, M. L. **Reconhecimento da Rugosidade em Imagens Monocromáticas por meio de Análise de Textura**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal Fluminense, 2011. 48
- ANATYCHUK, L. On the discovery of thermoelectricity by volta. **Journal of Thermoelectricity**, ., n. 2, p. 5–11, 2004. 36
- ANDERSON, D. A.; TANNEHILL, J. C.; PLETCHER, R. H. **Computational fluid mechanics and heat transfer**. [S.l.]: Hemisphere Publishing, New York, NY, 1984. 39, 40, 41
- ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. [S.l.]: Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), 2002. 27
- ARROYO, J. E. C. **Heurísticas e metaheurísticas para otimização combinatoria multiobjetivo**. Tese (Doutorado) — Universidade de Campinas, 2002. 51
- AZADIVAR, F. Simulation optimization methodologies. **Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference**, ., 1999. 54
- BAKER, A. J.; PEPPER, D. W. **Finite element 1-2-3**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1991. 57
- BANKS, J. **Handbook of Simulation - Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice**. [S.l.: s.n.], 1998. 54
- BASS, J. C.; ELSNER, N. B.; LEAVITT, F. A. Performance of the 1 kw thermoelectric generator for diesel engines. In: **AIP Conference Proceedings**. [S.l.: s.n.], 1995. p. 295–295. 30, 36
- BASSANEZI, R. C. **Ensino Aprendizagem com Modelagem Matemática: uma nova estratégia**. [S.l.]: Editora Contexto, 2002. 52
- BATHE, K. J. **Finite Element Procedures in Engineering Analysis**. [S.l.]: Prentice-Hall, 1982. 56, 62, 63

- BEJAN, A. K. A. **Heat Transfer Handbook**. [S.l.]: John Wiley and Sons Inc., 2003. [43](#), [44](#)
- BERGLES A. E., R. W. M. H. J. P.; CHO. **Techniques to Enhance Heat Transfer, in Handbook of Heat Transfer**. [S.l.]: McGraw-Hill, New York, 1998. [29](#)
- BERGMAN, T. L.; INCROPERA, F. P.; LAVINE, A. S. **Fundamentals of heat and mass transfer**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. [28](#), [36](#), [39](#), [41](#), [43](#), [44](#), [76](#), [78](#), [85](#)
- BHUSHAN, B. Contact mechanics of rough surfaces in tribology: multiple asperity contact. **Tribology letters**, 1998. [96](#)
- BIEMBENGUT, M. S. **Qualidade no ensino de matematica na engenharia : uma proposta metodologica e curricular**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 1997. [52](#)
- BÉLANGER, S.; GOSSELIN, L. Thermoelectric generator sandwiched in a crossflow heat exchanger with optimal connectivity between modules. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n. 8, p. 2911–2918, 2011. [32](#), [67](#)
- BOYCE, M. P. **Handbook for Cogeneration and Combined Cycle Power Plants**. [S.l.: s.n.], 2002. [35](#)
- BP. Bp energy outlook 2030. **BP Statistical-review**, ., n. ., p. ., January 2013. [27](#)
- CALIXTO, W. P.; COIMBRA, A. P.; MOTA, J. C.; WU, M.; SILVA, W. G.; ALVARENGA, B. P.; BRITO, L. C.; ALVES, A. J.; DOMINGUES, E. G.; NETO, D. . P. Troubleshooting in geoelectrical prospecting using real-coded genetic algorithm with chromosomal extrapolation. **International Journal of Numerical Modelling (Print)**, v. 1, p. 1-18, 2015. [49](#)
- CARVALHO, D. F.; GANZAROLI, C. A.; DIAS, R. N. H. M.; COUTO, L. A.; ALVES, A. J.; DOMINGOS, J. L.; CALIXTO, W. P. Heuristic optimization applied on dmc and cascade pi controllers tuning for speed control of dc motor. **Renewable Energy and Power Quality Journal**, v. 1, p. 1, 2016. [49](#)
- CHAMPIER, D.; BÉDÉCARRATS, J.-P.; KOUSKSOU, T.; RIVALETTO, M.; STRUB, F.; PIGNOLET, P. Study of a te (thermoelectric) generator incorporated in a multifunction wood stove. **Energy**, v. 36, n. 3, p. 1518–1526, 2011. [31](#)

- CHUNG, D. D. L. Thermal interface materials. **Journal of Materials Engineering and Performance**, Volume 10, n. Issue 1, p. pp 5659, 2000. [48](#)
- CIA. **The World Factbook 2013**. Washington, D.C., 2013. [27](#)
- CLOUGH, R. The finite element method in plane stress analysis. **Proceedings, 2nd Conference on Electronic Computation, ASCE**, 1960. [57](#)
- COOK, R. D.; S., M. D.; E., P. M. **Conceptions and Applications of Finite Element Analysis**. [S.l.]: Wiley, 1989. [62](#)
- COOPER, L. Heuristic methods for location-allocation problems. **Siam Review**, v. 6, n. 1, p. 37-53, 1964. [52](#)
- ENERGIA, B. M. de Minas e. **Plano Nacional de Energia 2030**. [S.l.]: Brasília, 2007. [27](#)
- _____. **Tecnologias de Energias Renováveis - Soluções Energéticas para Amazônia**. [S.l.]: 1.ed. Brasília, 2008. [28](#)
- FARIA, M. A. A. **Conexão elétrica de planta de geração termoelétrica baseada no efeito Seebeck**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Federal de Goiás, 2016. [94](#), [96](#)
- FARIAS, S. R. A. **Protótipo de um microgerador termoelétrico de estado sólido: cogeração a gás**. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009. [30](#)
- FERENCE JUNIOR, M.; LEMO, H.; STEPHENSON, R. Curso de física, eletromagnetismo. **Curso de Física, Eletromagnetismo**, 1973. [38](#)
- GESUALDO, F. A. R. **Método dos Elementos Finitos**. [S.l.]: Universidade Federal de Uberlândia, 2010. [59](#), [61](#)
- GILL PHILIP E., W. M.; WRIGHT, M. H. **Practical optimization**. [S.l.: s.n.], 1981. [52](#)
- GONCALVES, L. Microsistema termoelétrico baseado em teluretos de bismuto e antimônio. **Escola de Engenharia, Universidade do Minho. Lisboa**, 2008. [39](#)
- GOU, X.; XIAO, H.; YANG, S. Modeling, experimental study and optimization on low-temperature waste heat thermoelectric generator system. **Applied energy**, v. 87, n. 10, p. 3131–3136, 2010. [31](#)

HALL, R. B. J. Simulation optimization research and development. **Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference**, 1998. [54](#)

HSIAO, Y.; CHANG, W.; CHEN, S. A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine. **Energy**, v. 35, n. 3, p. 1447–1454, 2010. [28](#), [30](#)

HSU, C.-T.; HUANG, G.-Y.; CHU, H.-S.; YU, B.; YAO, D.-J. An effective seebeck coefficient obtained by experimental results of a thermoelectric generator module. **Applied Energy**, v. 88, n. 12, p. 5173–5179, 2011. [31](#)

HUEBNER, K.; THORNTON, E. **The finite element method for engineers**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1982. [58](#)

HUGHES, T. J. **The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis**. [S.l.]: Courier Corporation, 2012. [58](#)

HUGHES, T. J. R. **The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis**. [S.l.]: Prentice-Hall, 1987. [56](#)

IKOMA K., M. K. F. M. K. T. I.; SHINOHARA, K. Thermoelectric module and generator for gasoline engine vehicle. **Proc. 17th International Conference on Thermoelectrics.Nagoya, Japan.**, IEEE, p. pp. 464–467., 1998. [29](#)

ISMAEL BASEL I.;AHMED, W. H. Thermoelectric power generation using waste-heat energy as an alternative green technology. **Recent Patents on Electrical Engineering**, Vol 2, p. 27–39, 2009. [28](#), [29](#)

KAYS, W. M. **Convective heat and mass transfer**. [S.l.]: Tata McGraw-Hill Education, 2012. [36](#), [41](#)

KELTON, D.; SADOWSKI, R.; SWETS, N. **Simulation with Arena**. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2015. [54](#)

KERN, D. Q.; KRAUS, A. D. **Extended Surface Heat Transfer**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1972. [29](#)

KUMAR, S.; HEISTER, S. D.; XU, X.; SALVADOR, J. R.; MEISNER, G. P. Thermoelectric generators for automotive waste heat recovery systems part i: numerical modeling and baseline model analysis. **Journal of electronic materials**, v. 42, n. 4, p. 665–674, 2013. [32](#)

- LAVRIC, E. Sensitivity analysis of thermoelectric module performance with respect to geometry. **Energy**, v. 21, p. 133–138, 2010. 31
- LAW, C.; KELTON, D. **Simulation Modeling And Analysis**. [S.l.: s.n.], 2003. 54
- LEE, H. **Thermoelectrics: Design and Materials**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2016. 39
- MACDONALD, D. K. C. **Thermoelectricity: an introduction to the principles**. [S.l.]: Courier Corporation, 2006. (., .). 37
- MARTINEZ, J.; SANTOS, S. **Métodos Computacionais de Otimização**. [S.l.]: UNICAMP, 1995. 50
- MCLEAN, J. G.; KRISHNAMACHARI, B.; PEALE, D.; CHASON, E.; SETHNA, J. P.; COOPER, B. Decay of isolated surface features driven by the gibbs-thomson effect in an analytic model and a simulation. **Physical Review B**, v. 55, n. 3, p. 1811, 1997. 38
- MURTHY, J.; MINKOWYCZ, W.; SPARROW, E.; MATHUR, S.; PLETCHER, R. H.; HEINRICH, J. C.; KASSAB, A.; WROBEL, L.; BIALECKI, R.; DIVO, E. et al. **Handbook of numerical heat transfer**. [S.l.]: Wiley Online Library, 2006. 40, 43, 84
- NIU, X.; YU, J.; WANG, S. Experimental study on low-temperature waste heat thermoelectric generator. **Journal of Power Sources**, v. 188, n. 2, p. 621–626, 2009. 29
- PALACIOS, R.; ARENAS, A.; PECHARROMÁN, R.; PAGOLA, F. Analytical procedure to obtain internal parameters from performance curves of commercial thermoelectric modules. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, n. 17, p. 3501–3505, 2009. 30
- PEGDEN, C. D. **Introduction to simulation using SIMAN**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1995. 54
- PIDD, M. **Modelagem Empresarial: Ferramentas para tomada de decisão**. [S.l.]: ., 1998. 54
- PIERRE, D. A. **Optimization Theory with Applications**. [S.l.: s.n.], 1969. 51

- POUDEL, B.; HAO, Q.; MA, Y.; LAN, Y.; MINNICH, A.; YU, B.; YAN, X.; WANG, D.; MUTO, A.; VASHAEE, D. et al. High-thermoelectric performance of nanostructured bismuth antimony telluride bulk alloys. **Science**, v. 320, n. 5876, p. 634–638, 2008. [37](#)
- REDDY, J. N.; GARTILING, D. K. **The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics**. [S.l.]: CRC Press, 1994. [60](#), [62](#), [63](#)
- RODRÍGUEZ, A.; VIÁN, J.; ASTRAIN, D.; MARTÍNEZ, A. Study of thermoelectric systems applied to electric power generation. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 5, p. 1236–1243, 2009. [30](#)
- ROHSENOW, W. M.; HARTNETT, J. P.; GANIC, E. N. **Handbook of heat transfer fundamentals**. [S.l.]: New York, McGraw-Hill Book Co., 1440 p., 1985. [40](#), [42](#)
- ROWE, D. M. **CRC handbook of thermoelectrics**. [S.l.]: CRC press, 1995. [38](#)
- SANO, S.; MIZUKAMI, H.; KAIBE, H. Development of high-efficiency thermoelectric power generation system. **Komatsu technical report**, v. 49, n. 152, p. ., 2003. [32](#)
- SANTOS, L. P. **Análise de desempenho de um gerador termoelétrico baseado no efeito Seebeck**. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade de Taubaté, 2010. [31](#)
- SAPKAL, P.; BAVISKAR, P.; M, S.; P, M. Optimization of air preheater design for the enhancement of heat transfer coefficient. **International Journal of Applied Research In Mechanical Engineering (IJARME)**, Volume-1, Issue-2, p. 44–51, 2011. [28](#)
- SAQR, K. M.; MUSA, M. N. Simulation of a novel hot-side heat exchanger for automobile exhaust based thermoelectric generators using efd. **Lab[R] Journal Teknos-2K**, Vol. 8(1), p. pp 17–26, 2008. [29](#)
- _____. Optimization of fin geometry of an exhaust heat exchanger for automotive thermoelectric generators. **International Journal of Applied Engineering Researc**, ., n. ., p. ., 2009. [29](#)
- SARAMAGO, S. P.; STEFFEN, V. Introdução às técnicas de otimização em engenharia. **Horizonte Científico**, 2008. [51](#), [52](#)

- SCHRIBER, T. J. **Simulation using GPSS**. [S.l.: s.n.], 1974. 54
- SCHWAAB, M. **Avaliação de Algoritmos Heurísticos de Otimização em Problemas de Estimação de Parâmetros**. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio De Janeiro, 2005. 50
- SEGERLIND, L. J.; SAUNDERS, H. **Applied finite element analysis**. 1987. American Society of Mechanical Engineers. 58
- SILVA, H. **Algoritmo de otimização multinível aplicado a problemas de planejamento de Redes**. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2012. 55
- SINATORA, A.; TSCHIPTSCHIN, A. Propriedades de superfície de filmes e camadas. **Revista de Metalurgia e Materiais**, 2004. 48
- SONG, S.; YOVANOVICH, M. Relative contact pressure - dependence on surface roughness and vickers microhardness. **Journal of Thermophysics and Heat Transfer**, Vol. 2, n. No. 1, p. pp. 43–47., 1988. 48
- STECANELLA, P. A. J. **Arranjo técnico para desenvolvimento de uma planta de geração termoeétrica baseada no efeito Seebeck**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Federal de Goiás, 2016. 94
- TERVO J.; MANNINEN A.; ILOLA, R. e. H. H. State-of-the-art of thermoelectric materials processing. **VTT Working Papers**, v. 124, p. 29 p., 2009. 28
- THERMONAMIC. **Specification of Thermoelectric Module TELBP1-12656-0.45**. 2017. 77, 93
- VÁZQUEZ J., S.-B. M. A. P. R.; ARENAS, A. State of the art of thermoelectric generators based on heat recovered from the exhaust gases of automobiles. **Proc. 7th European Workshop on Thermoelectrics, Pampelona, Spain.**, ., n. ., p. ., 2002. 29
- WEBB, R.; MENZE, K.; RUDY, T.; AYUB, Z.; FUJII, M. Enhanced heat transfer. **Technology Review**, Vol. 1(2), p. pp:127–130., 1994. 29
- YANG, J. Thermoelectric technology for automotive waste heat recovery. In: **General Motors R&D, presented at the 2007 DEER Conference, sponsored by US DOE**. [S.l.: s.n.], 2005. 29

YU, C.; CHAU, K. Thermoelectric automotive waste heat energy recovery using maximum power point tracking. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 6, p. 1506–1512, 2009. [30](#)