



HEURÍSTICAS DE CONCEPÇÃO: UM ESTUDO DE CASO SOBRE A ANÁLISE
DA PERDA DA POTÊNCIA TÉRMICA EM FLUIDOS INCOMPRESSÍVEIS

Tainah Pinho de Lima

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
submetido ao Corpo Docente da Engenharia
Mecânica do Campus Macaé da Universidade
Federal do Rio de Janeiro, como parte dos
requisitos necessários à obtenção do grau de
Engenheiro Mecânico.

Orientadora: Elisa Pinto da Rocha

Macaé – RJ
Dezembro de 2017

HEURÍSTICAS DE CONCEPÇÃO: UM ESTUDO DE CASO SOBRE A ANÁLISE
DA PERDA DA POTÊNCIA TÉRMICA EM FLUIDOS INCOMPRESSÍVEIS

Tainah Pinho de Lima

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO
CORPO DOCENTE DA ENGENHARIA MECÂNICA DO CAMPUS MACAÉ DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRO MECÂNICO.

Examinada por:

Prof^a. Elisa Pinto da Rocha, D.Sc.
Orientadora – UFRJ Macaé

Prof. Matheus Ferreira de Barros, M.Sc.
Coorientador – UFRJ Macaé

Prof^a. Milena Estanislau Diniz, D.Sc.
Membro interno – UFRJ Macaé

Prof. Diego Cunha Malagueta, D.Sc.
Membro interno – UFRJ Macaé

MACAÉ, RJ – BRASIL
DEZEMBRO DE 2017

De Lima, Tainah Pinho
Heurísticas de
concepção: Um estudo
de caso sobre a análise
da perda da potência
térmica em fluidos
incompressíveis/ Tainah
Pinho de Lima - Macaé:
UFRJ, 2017.

Orientadora: Elisa
Pinto da Rocha.

Coorientador:
Matheus Ferreira de
Barros.

Trabalho de Conclusão
de Curso (graduação) –
UFRJ-Macaé/
Engenharia

Dedico este trabalho aos meus pais, que
sempre me amaram de maneira incondicional e
me apoiaram em minha escolha de cursar
Engenharia Mecânica.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus por sempre estar ao meu lado em todos os momentos de minha vida, em especial os mais difíceis e pelas pessoas maravilhosas que pôs no meu caminho durante esses anos.

Agradeço aos meus pais, Tania Márcia de Pinho e Ernandes de Lima Batista, que em todo o momento estiveram presentes, me apoiando e dedicando tanto amor e cuidado a mim.

Ao meu namorado, João Victor Barcelos Coutinho, que me ajudou e encorajou a todo momento, e meus familiares: irmãos, avós e avô, padrinho e madrinha, tios, tias, primos e todos que de alguma forma vem contribuindo com meu crescimento pessoal e profissional. Eu não teria chegado até aqui sem vocês.

Aos amigos que fiz durante esses últimos anos que foram extremamente importantes para me manter alegre e confiante que um dia eu seria capaz de concluir a minha graduação.

Gostaria de agradecer ao professor Jean Pierre Nadeau por ter me dado a oportunidade de trabalhar com ele na França, introduzindo a metodologia tema deste trabalho de conclusão e, principalmente, por ter compartilhado comigo seu vasto conhecimento em vários domínios da engenharia.

Aos professores que sempre me incentivaram e estiveram comigo durante essa graduação. Em especial, ao professor Matheus Ferreira de Barros, por ter sido muito solícito e presente durante a execução deste trabalho.

Finalmente gostaria de agradecer à professora Elisa Pinto da Rocha, que tornou todo esse trabalho possível. Obrigado por todo empenho, ajuda e momentos de troca de conhecimento e ensinamentos.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado a Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

HEURÍSTICAS DE CONCEPÇÃO: UM ESTUDO DE CASO SOBRE A ANÁLISE DA PERDA DA POTÊNCIA TÉRMICA EM FLUIDOS INCOMPRESSÍVEIS

Tainah Pinho de Lima

Dezembro / 2017

O objetivo do presente trabalho é criar e aplicar um método, utilizando as heurísticas de concepção, para reduzir o problema da perda da potência térmica em processos pertinentes à Engenharia Mecânica que envolvam fluidos incompressíveis.

O método proposto consiste em uma análise física do problema em questão a fim de obter os parâmetros termofísicos relevantes que o provocam. A partir desses parâmetros o engenheiro encontrará um conjunto de heurísticas que lhe dará possíveis caminhos para resolução do problema.

Neste trabalho, foram consideradas as perdas da potência térmica de um processo por meio da convecção e da condução. Para mostrar a utilização e a coerência da metodologia, tomou-se como escolha três heurísticas ligadas à condução térmica, modificar a parede da tubulação para multicamadas, utilizar um revestimento com a propriedade desejada e utilizar materiais porosos.

Viu-se que com a utilização de multicamadas é possível unir materiais com propriedades e espessuras diferentes para se obter uma parede com uma maior resistência térmica. Além disso, as limitações encontradas por um material podem ser sanadas. Outra maneira de se reduzir a perda térmica é utilizando isolantes feitos de materiais porosos, já que a condutividade térmica deste tipo de material é baixa comparada aos isolantes convencionais. As soluções obtidas a partir das heurísticas escolhidas neste trabalho foram corroboradas com resultados encontrados na literatura.

Palavras-Chave: Resolução de problemas, parâmetros termofísicos, heurísticas de concepção, perda de potência térmica

Abstract of the Undergraduation Project submitted to the UFRJ as part of the requirements for the degree of Mechanical Engineer.

DESIGN HEURISTICS: A CASE STUDY ON THE ANALYSIS OF THE LOSS OF
THERMAL POWER IN INCOMPRESSIBLE FLUIDS

Tainah Pinho de Lima

December / 2017

The objective of this work is to create and apply a method, using design heuristics, to reduce the problem of loss of thermal power in processes related to Mechanical Engineering involving incompressible fluids.

The proposed method consists of a physical analysis of the problem in order to obtain the relevant thermophysical parameters that provoke it. From these parameters the engineer will find a set of heuristics that will give him possible ways to solve the problem.

In this work, the thermal power losses of a process were considered by convection and conduction. In order to show the use and the coherence of the methodology, three heuristics related to the thermal conduction were chosen, to modify the wall of the pipe for multilayers, to use a coating with the desired property and to use porous materials.

It has been seen that with the use of multilayers it is possible to join materials with different properties and thicknesses to obtain a wall with a higher thermal resistance. In addition, the limitations encountered by a material can be remedied. Another way to reduce thermal loss is to use insulators made of porous materials, since the thermal conductivity of this type of material is low compared to conventional insulation. The solutions obtained from the heuristics chosen in this work were corroborated with results found in the literature.

Keywords: Troubleshooting, thermophysical parameters, design heuristics, loss of thermal power

ÍNDICE

1 - INTRODUÇÃO.....	2
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	2
1.2 JUSTIFICATIVA.....	3
1.3 OBJETIVO.....	4
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 MÉTODOS HEURÍSTICOS.....	6
2.2 HEURÍSTICAS DE CONCEPÇÃO.....	6
2.3 FICHAS DE INTERPRETAÇÃO DAS HEURÍSTICAS DE CONCEPÇÃO	10
2.4 COLABORAÇÃO DE TRABALHOS CIENTÍFICOS UTILIZANDO MÉTODOS HEURÍSTICOS APLICADOS NA ÁREA TÉRMICA	13
3 - PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	21
3.1 ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM PROCESSOS COM PERDA TÉRMICA.....	21
3.1.1 CONVECÇÃO TÉRMICA.....	22
3.1.1.1 CONVECÇÃO NATURAL	23
3.1.1.2 CONVECÇÃO FORÇADA	25
3.1.2 CONDUÇÃO TÉRMICA	26
3.2 PARÂMETROS PERTINENTES DOS PROCESSOS QUE ENVOLVAM PERDA TÉRMICA E ASSOCIAÇÃO ÀS HEURÍSTICAS DE CONCEPÇÃO	28
4 – APLICAÇÃO.....	30
4.1 HEURÍSTICA 1: « REDUZIR O PROBLEMA/ AGINDO SOBRE A TRANSMISSÃO/ ATRAVÉS DA MODIFICAÇÃO DE COMPONENTES/ GLOBALMENTE»	30
4.2 HEURÍSTICA 2: « REDUZIR O PROBLEMA/ AGINDO SOBRE A TRANSMISSÃO/ ATRAVÉS DA MODIFICAÇÃO DE COMPONENTES/ ADAPTANDO OS COMPONENTES/ POR EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS ».....	33

4.3 HEURÍSTICA 3: « REDUZIR O PROBLEMA/ AGINDO SOBRE A TRANSMISSÃO/ ATRAVÉS DA MODIFICAÇÃO DE COMPONENTES/ ADAPTANDO OS COMPONENTES/ POR EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS ».....	36
5 - CONCLUSÃO.....	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42
ANEXO A: CORRELAÇÕES.....	45
ANEXO B: ÁRVORE DE HEURÍSTICAS.....	47
ANEXO C: HEURÍSTICAS LIGADAS À CONVECÇÃO NATURAL.....	48
ANEXO D: HEURÍSTICAS LIGADAS À CONVECÇÃO FORÇADA.....	49
ANEXO E: HEURÍSTICAS LIGADAS À CONDUÇÃO TÉRMICA.....	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura da Árvore de Heurísticas.....	7
Figura 2 - Esquema da visão Causa/Efeitos	8
Figura 3 - Ações sobre a geração, a transmissão, a interação e o sistema	9
Figura 4 - Ações sobre o fluxo.....	9
Figura 5 - Heurísticas ligadas à modificação das variáveis de estado.....	10
Figura 6 - Exemplo de uma ficha de interpretação	10
Figura 7 - Primeira parte de uma ficha de interpretação	11
Figura 8 - Segunda parte de uma ficha de interpretação.....	11
Figura 9 - Diagrama Temperatura versus Concentração para operação	14
Figura 10 - Simples rede de permutadores de calor	15
Figura 11 - Fluxograma básico do algoritmo	17
Figura 12 - Etapa de Síntese de uma rede	19
Figura 13 - Etapa de Síntese de uma sub rede.....	20
Figura 14 - Esquema do volume de controle.....	22
Figura 15 - Ramos das heurísticas	29
Figura 16 - Caminhos ligados à heurística « <i>Reduzir o problema</i> > <i>Agindo sobre a transmissão</i> > <i>Por modificação dos componentes</i> »	30
Figura 17 - Ficha de interpretação ligada a heurística « <i>Reduzir o problema Agindo sobre a transmissão Por modificação de componentes Globalmente Segmentando a estrutura dos componentes de camadas para multicamadas</i> »	31
Figura 18 - Dimensões do tubo de cobre e do tubo multicamadas.....	32
Figura 19 - Caminhos ligados à heurística « <i>Reduzir o problema/Agindo sobre a transmissão/Através da modificação de componentes/Adaptando os componentes/Por evolução dos materiais</i> »	34
Figura 20 - Ficha de interpretação ligada a heurística « <i>Reduzir o problema Agindo sobre a transmissão Através da modificação de componentes Adaptando os componentes Por evolução dos materiais Para materiais porosos ou multimateriais</i> »	34
Figura 21 - Pontos térmicos em um isolante poroso	35

Figura 22 - Condutividade térmica de diversos materiais isolantes.....	36
Figura 23 - Caminhos ligados à heurística « Reduzir o problema/Agindo sobre a transmissão/Através da modificação de componentes/Adaptando os componentes/Por evolução dos materiais».....	37
Figura 24 - Ficha de interpretação ligada a heurística « <i>Reduzir o problema Agindo sobre a transmissão Através da modificação de componentes Adaptando os componentes Por evolução dos materiais Utilizando revestimento de propriedades diferentes</i> »	37
Figura 25 - Revestimento Foamglas	38
Figura 26 - Resistência térmica por unidade de comprimento x Espessura.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros pertinentes no processo de convecção natural.....	28
Tabela 2: Parâmetros pertinentes no processo de convecção forçada.....	28
Tabela 3: Parâmetros pertinentes no processo de condução térmica	28

LISTAS DE SÍMBOLOS

P	Pressão
V	Velocidade
h	Altura
g	Aceleração da gravidade
ρ	Densidade do fluido
$\Delta\rho$	Varição de massa volumétrica
P_{in}	Potência de entrada
P_{out}	Potência de saída
\dot{E}_{acu}	Taxa de energia acumulada do sistema
\dot{E}_{ent}	Taxa de energia na entrada
\dot{E}_{sai}	Taxa de energia na saída
\dot{E}_{ger}	Taxa de energia gerada no sistema
\dot{m}	Vazão mássica
C_p	Capacidade calorífica
T	Temperatura do fluido
Φ	Potência ou fluxo térmico
Φ_{conv}	Fluxo de calor por convecção
Φ_{cond}	Fluxo de calor por condução
\bar{h}	Coefficiente de transferência de calor por convecção médio
T_s	Temperatura da superfície
ΔT	Varição da temperatura
A	Área de troca térmica
β	Coefficiente de dilatação térmica
G_r	Número de Grashof
L	Comprimento característico da superfície
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
Nu	Número de Nusselt
k	Condutividade térmica do fluido
G_r	Número de Grashof
P_r	Número de Prandtl

R_a	Número de Rayleigh
D	Constante
b	Constante
C	Constante
n	Constante
R_e	Número de Reynolds
d_h	Diâmetro hidráulico
$\frac{dT}{dx}$	Gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor
Δx	Espessura da superfície

1 - INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

No setor industrial, tal qual em situações cotidianas, o modo de lidar com os problemas e solucioná-los de forma eficiente é essencial. Focando de maneira mais precisa nos problemas de concepção que podem ser encontrados em alguns sistemas, torna-se relevante identificar os problemas em questão com objetividade e refletir sobre as metodologias aplicáveis a cada situação para obtenção de uma solução mais confiável e que possa ser reutilizada em um futuro.

Assim sendo, uma metodologia apropriada é a heurística, pois ela permite alcançar uma solução para um problema particular através da implementação de uma regra geral derivada da experiência. Geralmente não envolve a implementação computacional de um conhecimento especializado. Por exemplo, um método heurístico, para resolver uma equação de segundo grau, não usaria, necessariamente, a fórmula de Báscara, mas buscaria, por outros meios, uma solução que atendesse à equação (Bueno, 2009).

No contexto da engenharia, as heurísticas se referem a soluções técnicas ou conceituais que foram aplicadas e validadas em um domínio, e que podem ser extrapoladas para um problema de outra área, com características similares (Calle-Escobar et al., 2014).

No fim dos anos 40, o engenheiro Genrich Altshuller (1964) desenvolveu a “Teoria da Solução Inventiva de Problemas”, conhecida como TRIZ, a partir da análise de milhares de patentes de diferentes classes. Genrich percebeu que as soluções nelas encontradas apresentavam 40 princípios comuns de inovação, e concluiu que apenas 1% das patentes apresentava uma solução inovadora. Isso significa que, na maioria dos casos, a solução associada a um novo problema é, geralmente, conhecida.

Outra ferramenta desenvolvida para o auxílio da resolução de problemas de concepção é uma série de regras propostas por Polovinkin. Ao total, são 121 regras genéricas baseadas nos princípios de inovação, e agrupadas em 9 grupos de atuação. Transformação da forma e transformação dos movimentos e das ações mecânicas são exemplos dos grupos de atuação. A estratégia dessa metodologia é mostrar ao engenheiro

as possíveis ações que podem ser tomadas a partir da escolha do grupo de atuação no qual ele deseja agir (Polovinkin, 1991; Polovinkin, 1988).

Com base nos 40 princípios de inovação e nas regras de Polovinkin, Morillon (2009) desenvolveu as heurísticas de concepção. Tais heurísticas foram estruturadas em porções de frases em diferentes níveis, de maneira horizontal, na forma de uma “Árvore de heurísticas”. Essas porções são associadas para formar uma frase explícita que propõe uma possibilidade de solução. No total foram construídas 78 heurísticas, sendo cada heurística representada por um ramo da árvore.

A “árvore de heurísticas” proposta por Morillon foi construída a partir da visão causa/efeitos. Nesta visão, cada efeito tem sua causa, mas certos efeitos são desejáveis e úteis enquanto outros são indesejáveis e muitas vezes prejudiciais. Após definir a situação do problema em questão, o engenheiro, com a ajuda de um questionário, fará suas escolhas sob a árvore. É importante frisar, que o engenheiro é livre para escolher o caminho que o leve à uma heurística final. O questionário apenas auxilia o engenheiro na sua abordagem. Sendo assim, a escolha das heurísticas a cada nível da árvore pode não ser tão evidente para uma pessoa com pouca experiência, visto que problemas que envolvem a área de conhecimento da engenharia possuem um número elevado de avaliações.

1.2 JUSTIFICATIVA

Diante do exposto no capítulo acima, a criação e a aplicação de um novo método que permite a escolha das heurísticas de concepção de maneira mais estruturada tornam-se necessárias. O método proposto consiste em uma análise física do problema em questão a fim de obter os parâmetros relevantes que o provocam. A partir desses parâmetros, o engenheiro encontrará um conjunto de heurísticas que lhe dará possíveis caminhos para resolução do problema, reduzindo as chances de heurísticas irrelevantes aparecerem para o utilizador.

Diferentemente dos métodos usuais para a resolução de um problema, que geralmente utilizam fórmulas matemáticas, o método aqui abordado não possui o objetivo de encontrar uma solução ótima, mas sim mostrar possíveis ideias que possam auxiliar o engenheiro a solucionar o problema em análise, estimulando seu lado criativo.

Neste trabalho, o novo método é utilizado para mostrar ideias de solução para reduzir a perda de potência térmica em processos que envolvem fluidos em movimento.

A dificuldade em encontrar literatura referente ao assunto abordado neste trabalho justifica a relevância e o desafio deste estudo em colaborar com as referências literárias sobre o tema abordadas no Brasil.

1.3 OBJETIVO.

Este trabalho tem como objetivo principal, criar e aplicar um método para solucionar problemas de perda de potência térmica em processos térmicos pertinentes à Engenharia Mecânica, que envolvam fluidos incompressíveis por meio de adaptações propostas na metodologia heurística.

Sabendo que a perda de potência térmica ocorre devido ao gradiente de temperatura em determinado meio, os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- Analisar a transferência de calor por convecção e condução, obedecendo as leis de conservação de energia nos processos analisados;
- Obter um modelo agrupando os parâmetros termofísicos relevantes dos processos discutidos de forma independentes, que estejam relacionados à perda de potência térmica;
- Associar os parâmetros a grupos e em seguida às heurísticas já existentes;
- Apresentar possíveis caminhos para solução do problema em questão.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é dividido em três partes: revisão bibliográfica, procedimento metodológico e aplicação.

Na revisão bibliográfica, são abordados a definição da metodologia heurística, bem como seus tipos, conceitos e alguns trabalhos científicos que aplicam as heurísticas na área térmica. É apresentado também como a árvore de heurísticas e as fichas de interpretação foram construídas.

Na segunda parte são apresentadas as etapas do procedimento metodológico.

E na aplicação, são apresentadas três heurísticas diferentes que demonstram a utilização e a coerência da metodologia. Os resultados encontrados neste trabalho foram confrontados com aqueles encontrados na literatura.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica tem o intuito de colaborar na compreensão da metodologia e embasamento para discutir os resultados.

2.1 MÉTODOS HEURÍSTICOS

A palavra heurística deriva do verbo grego *heuristiké* que significa arte de encontrar, descobrir. As heurísticas se referem ao procedimento ou abordagem que permite alcançar uma solução para um problema particular através da implementação de uma regra geral derivada da experiência.

Calle-Escobar (2014) ressalta que, em geral, uma heurística é simples, explícita, prática e rápida de utilização. Ela é universal e pode ser interpretada em diferentes contextos.

Uma solução ótima de um determinado problema não é o alvo da metodologia heurística, mas sim, uma solução viável baseada em aproximações que direcionam a uma solução ótima. O método heurístico trata-se de uma busca contínua e empírica com vários resultados que podem ser encontrados em determinadas condições, mas que não necessariamente tenha uma comprovação científica.

Atualmente, existem vários tipos de heurísticas, dentre elas; heurísticas *tallying*, onde cada alternativa tem o mesmo peso e a escolha é realizada baseando-se no número de pistas a favor de uma alternativa; heurísticas de julgamento que se baseiam em similaridades e enquadramento; e heurísticas de concepção que se baseiam em reconhecimento de alternativas pré-estabelecidas para a tomada de uma decisão. Neste trabalho, foi adotada a heurística de concepção (Gerd et al., 2000).

2.2 HEURÍSTICAS DE CONCEPÇÃO

Conforme exposto no capítulo 1, os 40 princípios de inovação e as regras de Polovinkin são as bases para a construção das heurísticas de concepção. As numerosas interseções existentes entre eles permitiram destacar uma certa organização das heurísticas.

A análise dos sistemas técnicos mostra que os engenheiros utilizam métodos recorrentes para resolver os problemas. Desta forma, Morillon (2009) propôs exprimir estas técnicas por meio de heurísticas organizadas.

As heurísticas foram representadas de maneira horizontal, no que se pode chamar de “Árvore de heurísticas” e representada na Figura 1. Elas são expressas por porções de frases em diferentes níveis. Cada nível é representado por uma cor diferente. Essas porções quando associadas formam uma frase explícita que propõe uma possibilidade de solução.

O intuito de mostrar a Figura 1, é apenas para que o leitor possa ter uma noção de como é a configuração da árvore e pode ser melhor visualizada em ANEXO B.

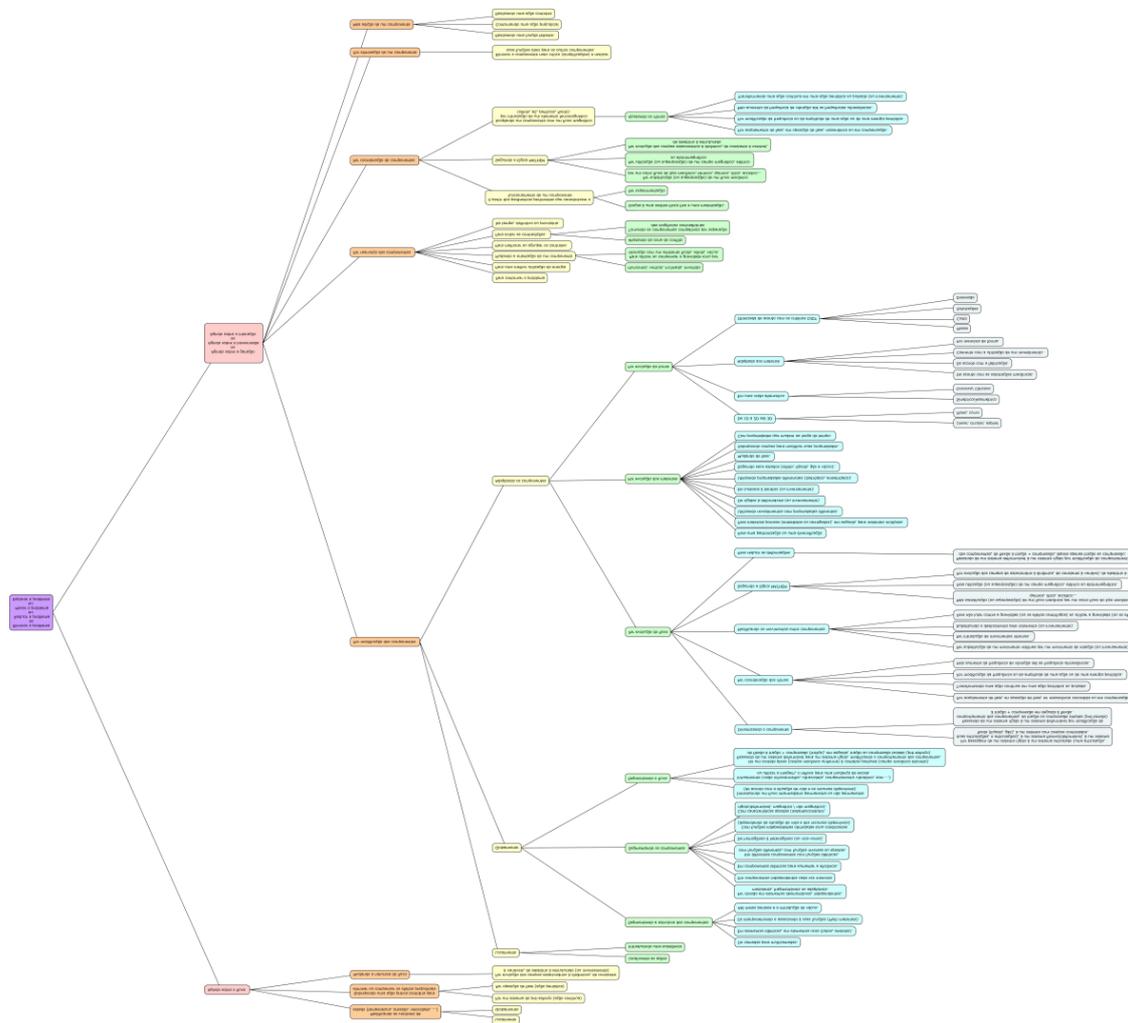


Figura 1 - Estrutura da Árvore de Heurísticas

Fonte: Adaptada de Morillon (2009)

A árvore de heurística foi construída a partir da visão Causa/Efeitos. Nesta visão, duas entidades são definidas, como mostra a Figura 2. A entidade S1, que é considerada como a causa do problema e a entidade S2, considerada como o sistema a ser estudado e o que sofre os efeitos.

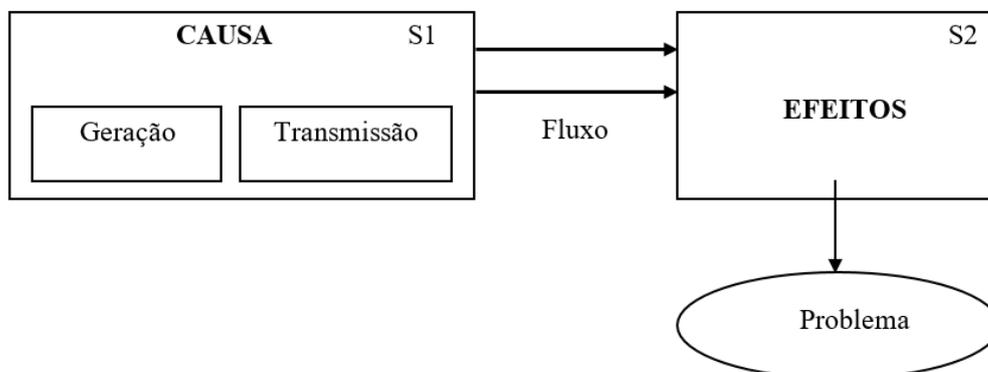


Figura 2 - Esquema da visão Causa/Efeitos

Fonte: O autor (2017)

A entidade S1, que é a causa, gera e transmite os fluxos ao sistema. Estes fluxos podem ser de diferentes naturezas, dentre as quais: fluxo de energia, fluxo de informações, fluxo de matéria etc. Os efeitos gerados por esses fluxos sob o sistema S2 são a fonte de problemas.

Em outras palavras, duas entidades materiais (sólidas ou fluidas) são definidas e ligadas por pelo menos um fluxo. Ao longo da realização de uma função, certos efeitos podem aparecer no sistema. E a partir da análise desses efeitos, é possível dizer se existe um problema ou não, visto que certos efeitos são apropriados e úteis enquanto outros são indesejáveis e muitas vezes prejudiciais. Diante disso, foram definidas três situações que podem descrever um problema: um efeito prejudicial se produz, um efeito desejável não se produz e o efeito desejável é insuficiente.

Baseada nas três situações citadas acima, o primeiro nível da árvore foi construído. Ele consiste em definir a ação a ser tomada. Podendo assim eliminar o problema, reduzi-lo, movê-lo ou explorá-lo.

O segundo nível consiste em escolher a zona na qual se deseja agir. Se deseja agir na geração, na transmissão, na interação ou no fluxo. Agir na geração significa atuar na fonte do fluxo. Agir na transmissão significa agir nos componentes funcionais, responsáveis por alterar os parâmetros relevantes para atender as restrições do operador. Por exemplo, para um sistema eólico o multiplicador permite adaptar a energia mecânica

do rotor ao gerador, aumentando a velocidade de rotação. Agir na interação, significa agir nos componentes que permitem realizar as ligações entre os diferentes componentes e transmitir o fluxo. Por fim, atuar no fluxo implicaria modificar o fluxo em si (Sallou et al., 2009).

Selecionado o local de atuação, o próximo nível define como ocorre essa ação. As possibilidades de ação sobre a geração, a transmissão, a interação são as mesmas, pois todas envolvem atuar nos componentes. Desta forma, várias maneiras de agir sobre esses componentes são propostas na Figura 3, seja modificando-os, rearranjando-os, coordenando-os de maneira diferente, eliminando-os ou adicionando novos componentes.

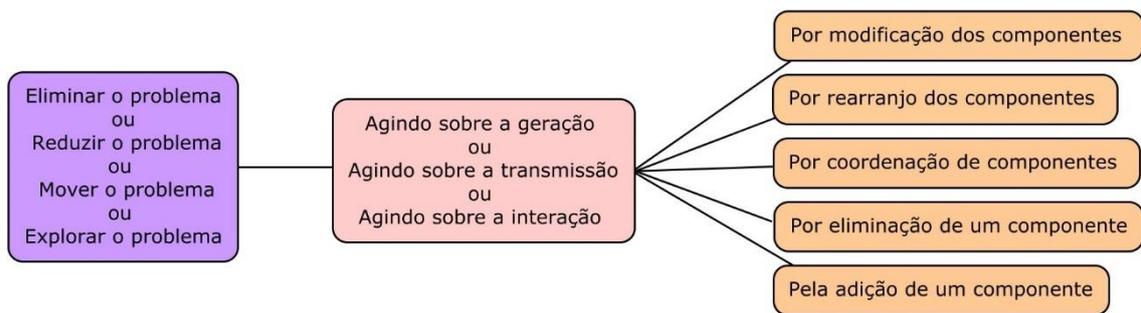


Figura 3 - Ações sobre a geração, a transmissão, a interação e o sistema

Fonte: Adaptado de Morillon (2009)

Para agir sobre o (s) fluxo (s) que transita (m) entre os sistemas S1 e S2 é necessário agir sobre os efeitos gerados no sistema S2. Sendo assim, é possível agir sobre o fluxo alterando as variáveis de estado (pressão, temperatura, velocidade etc.), sobrepondo uma ação contrária antes de eliminar ou atenuar os efeitos adversos ou alterando a natureza do fluxo, como a Figura 4.

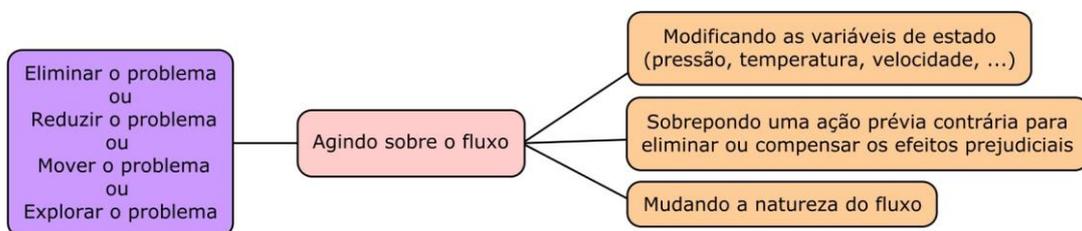


Figura 4 - Ações sobre o fluxo

Fonte: Adaptado de Morillon (2009)

Os próximos níveis mostram, de forma mais específica, de que modo pode ser feita a ação escolhida no terceiro nível. Por exemplo, o grupo de heurísticas ligada a opção

Eliminar/Reduzir/Mover/Explorar o problema > Agindo sobre o fluxo > Modificando as variáveis de estado são mostradas na Figura 5.

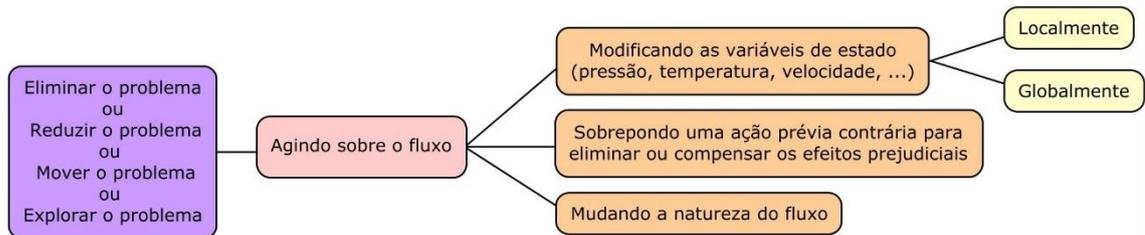


Figura 5 - Heurísticas ligadas à modificação das variáveis de estado

Fonte: Adaptado de Morillon (2009)

Tendo em vista que a frase heurística possa ser de difícil compreensão para uma pessoa com pouca experiência foram criadas as fichas de interpretação.

2.3 FICHAS DE INTERPRETAÇÃO DAS HEURÍSTICAS DE CONCEPÇÃO

As fichas de interpretação são compostas por três exemplos: uma aplicação industrial, um produto e uma aplicação baseada em uma visão biomimética. Esses exemplos têm como objetivo estabelecer ideias, implicando em uma interpretação das heurísticas mais clara.



Figura 6 - Exemplo de uma ficha de interpretação

Fonte: Calle-Escobar (2014)

A Figura 6 mostra três diferentes aplicações utilizando o mesmo princípio heurístico. Que neste caso é *Eliminar/Reduzir/Mover/Explorar o problema > Agindo sobre o fluxo > Modificando as variáveis de estado (temperatura, pressão, velocidade) > Globalmente*. Os três exemplos abordados nesta ficha são: o sistema do tubo de Venturi, os coletores solares térmicos e um sistema utilizando a mesma ideia de uma planta australiana.

Cada exemplo consiste em duas partes. A primeira parte, Figura 7, consiste em uma breve explicação do princípio em questão, permitindo ao utilizador associar o seu problema aos exemplos dados de maneira mais clara e estruturada. E a segunda parte, Figura 8, consiste em mostrar o modelo do comportamento físico do conceito tratado. E no caso da visão biomimética é apresentado uma aplicação utilizando o conceito biomimético em questão.

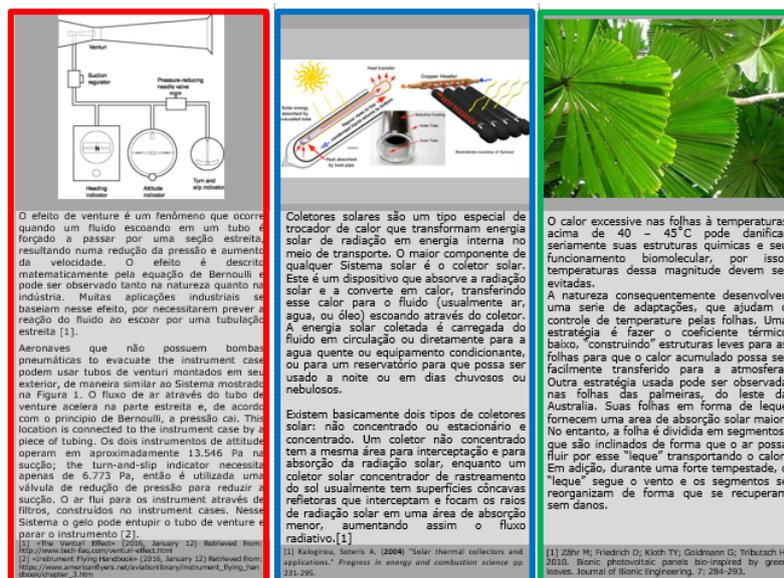


Figura 7 – Primeira parte de uma ficha de interpretação

Fonte: Calle-Escobar (2014)

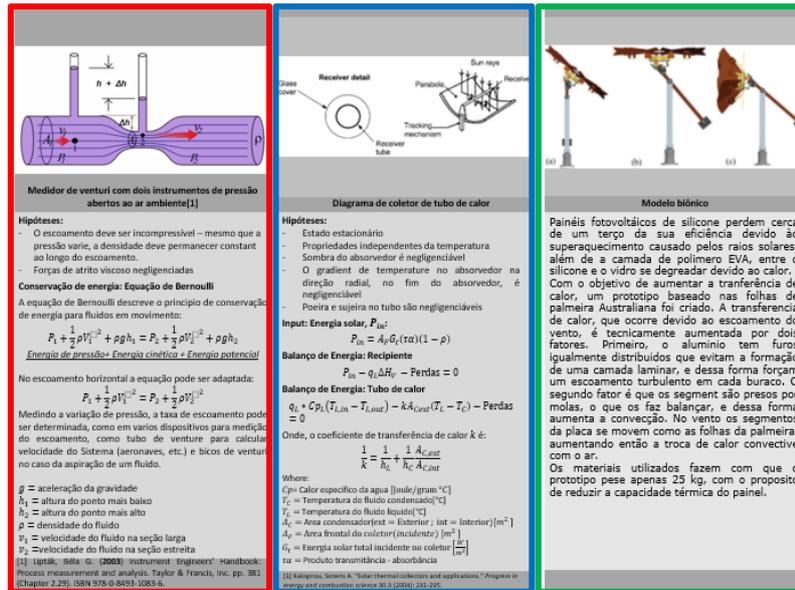


Figura 8 - Segunda Parte de uma ficha de interpretação

Fonte: Calle-Escobar (2014)

O primeiro exemplo apresentado (Tubo de Venturi) mostra o efeito Venturi, onde o fluido ao passar por uma seção estreita diminui sua pressão e aumenta sua velocidade. O carburador nos veículos utiliza esse efeito para controlar a quantidade de ar e dosar a gasolina que irá compor a mistura ar-combustível. O princípio de funcionamento é baseado na diferença de pressão existente na cuba de nível constante de gasolina, que está submetida à pressão atmosférica, e a pressão no tubo de venturi, que é menor que a da cuba devido a depressão, formada pelo deslocamento do ar no estrangulamento do tubo. Esse efeito é descrito matematicamente pela equação de Bernoulli, conforme Equação 1 (Tech-Faq, 2015).

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 + \rho g h_2 \quad (1)$$

Onde P é a pressão, V é a velocidade, h é altura, g é a aceleração da gravidade e a ρ é a densidade do fluido.

No segundo exemplo, Coletores solares térmicos, a temperatura do sistema varia de acordo com a conversão da energia da radiação solar em energia térmica transferida para um fluido que passa através dos coletores. A partir do balanço de energia é possível fazer o modelo do comportamento físico desse sistema, mostrado na relação abaixo (Kalogirou, 2004).

$$P_{in} = P_{out} - Perdas \quad (2)$$

Onde, P_{in} é a Potência de entrada oriunda da energia solar e P_{out} é a potência utilizada para aquecer um determinado sistema.

Por fim, o terceiro exemplo mostra como a Palmeira, uma planta australiana, controla sua temperatura. Apesar de suas folhas apresentarem uma grande área de absorvedor solar, seu formato, cortado em segmentos, faz com que o ar passe livremente fazendo a troca térmica, evitando que o aquecimento excessivo danifique sua estrutura química. A partir dessa ideia, o painel fotovoltaico de silício foi criado, apresentando um formato semelhante à das folhas das palmeiras australianas e obtendo o mesmo benefício (Zähr et al., 2010).

O objetivo final a partir desses exemplos é desencadear o pensamento criativo do engenheiro fornecendo-lhes ferramentas para explorar um conjunto de estratégias de soluções aplicáveis a uma vasta gama de problemas.

2.4 COLABORAÇÃO DE TRABALHOS CIENTÍFICOS UTILIZANDO MÉTODOS HEURÍSTICOS APLICADOS NA ÁREA TÉRMICA

Muitas pesquisas relevantes na área térmica envolvendo procedimento heurístico têm sido desenvolvidas até momento. Alguns trabalhos sobre otimização de sistemas integrado de água e energia merecem destaques, tendo em vista que esses recursos são tão necessários para os processos industriais, e serão citados a seguir. O intuito deste capítulo é mostrar diferentes metodologias heurísticas que visam atingir o mesmo objetivo, deixando o conceito de heurística ainda mais claro.

O procedimento proposto por (Martínez-Patiño et al., 2012) baseia-se em técnicas de integração de processos e análise de um design de redes que apresentam um consumo mínimo de água e energia. As interações entre a água e a energia são analisadas e novos *insights* são desenhados permitindo a implementação de uma metodologia sistemática.

A abordagem proposta incorpora os conceitos do método *Water Pinch* para determinar o consumo mínimo de água, considerando sua reutilização. É obtido um diagrama de temperatura versus concentração, que é usado para orientar o projeto de uma configuração inicial de rede de trocas de calor e massa. Este diagrama, representado na

Figura 9, contém as seguintes informações: número de operações, concentração máxima de água permitida, temperatura de operação e fluxo de água. A linha sólida representa o intervalo sobre o qual a concentração de água varia à medida que o contaminante é removido da concentração de entrada ($C_{lim,in,i}$) para a concentração de saída ($C_{lim,out,i}$). A partir dessa configuração, algumas melhorias são implementadas para minimizar os requisitos de energia (Martínez-Patiño et al., 2012).

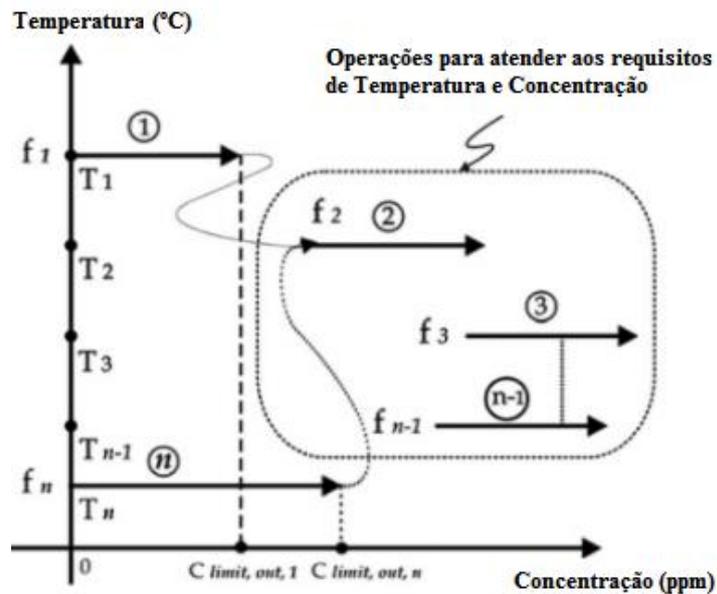


Figura 9 - Diagrama Temperatura versus Concentração para operação

Fonte: Adaptado de Martínez-Patiño et al. (2012)

Essa metodologia apresenta algumas vantagens em termos de consumo de energia e/ou números de permutadores de calor, o que produz um impacto positivo no custo de operação e/ou investimento.

Uma metodologia diferente da apresentada anteriormente foi proposta por (Brandt et al., 2011), que associa um algoritmo genético (AG) à um procedimento heurístico, imitando o processo de evolução natural.

As estruturas iniciais da rede de permutadores de calor são geradas a partir do AG. Ao longo do processo evolutivo, estas estruturas são constantemente modificadas pelas operações genéticas. Devido ao caráter estocástico dessas operações, as estruturas provavelmente estarão longe de ser ótimas soluções. Para otimizar as estruturas da rede foram desenvolvidas algumas estratégias. Uma delas é o método *Loop-Breaking*, que

reduz o número de trocadores de calor dentro da rede, quando lucrativo (Brandt et al., 2011).

Em uma rede de permutadores de calor, o número mínimo global de permutadores (N_{HX}) pode ser calculado de acordo com a teoria dos Grafos. Se uma rede de permutadores contém um número maior que o número mínimo de permutadores, ela contém loops. A Figura 10 mostra uma simples rede de permutadores de calor com duas linhas quentes, duas linhas frias e cinco permutadores de calor. Nesta estrutura dois loops de cargas de calor podem ser encontrados. O primeiro loop é construído pelos permutadores de calor 1 e 3. E o segundo é construído pelos permutadores 2,3,4 e 5 (Brandt et al., 2011).

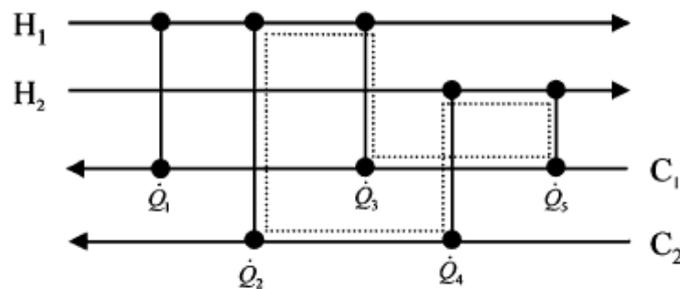


Figura 10 - Simples rede de permutadores de calor

Fonte: Adaptado de Brandt et al. (2011)

O nível do loop (LL) é dado pelo número de linhas quentes e frias envolvidas na rede. O loop de calor construído pelo permutador 1 e 3 é o loop de primeiro nível. E o loop com a sequência 2,3,4 e 5 é o segundo nível. Um loop sempre contém o mesmo número de linhas quentes e frias. Assim, o nível de loop máximo possível é definido pelo número de fluxos quentes (N_h) ou pelo número de fluxos frios (N_c) envolvidos no problema da síntese de redes de permutadores (Brandt et al., 2011).

$$LL_{m\acute{a}x} = \min\{N_h, N_c\} \quad (3)$$

Dentro de um loop, as cargas de calor podem ser deslocadas sem mudanças no balanço geral de calor. Sendo assim, considerando o loop de segundo nível da Figura 8, qualquer carga de calor X pode ser deslocada em torno deste loop no seguinte caminho (Brandt et al., 2011):

$$\dot{Q}_2' = \dot{Q}_2 - X \quad (4)$$

$$\dot{Q}_4' = \dot{Q}_4 + X \quad (5)$$

$$\dot{Q}_5' = \dot{Q}_5 - X \quad (6)$$

$$\dot{Q}_3' = \dot{Q}_3 + X \quad (7)$$

Assim, se X for igual a \dot{Q}_2 ou \dot{Q}_5 , o trocador 2 ou 5 pode ser removido da estrutura. Se o sinal algébrico nas equações 4,5,6 e 7 são alterados, o trocador 3 ou 4 podem ser removidos (Brandt et al., 2011).

A quantidade de loops independentes dentro de uma rede de permutadores é dada pela equação 8. Eles podem ser combinados para que um novo loop de carga seja criado (Brandt et al., 2011).

$$N_L = N_{HX} + N_{HX,min} \quad (8)$$

Nesse algoritmo é possível procurar somente loops de um determinado nível. Além disso, ele permite um processo mais estruturado ao longo de todo método *Loop-Breaking* (Brandt et al., 2011).

Quaisquer loops que são encontrados em uma determinada estrutura, os algoritmos tentam quebrá-los removendo o trocador de calor com a menor carga de calor dentro do respectivo loop. A estratégia para remover o trocador com a menor carga tem razões práticas. Desta forma garante que os valores de cargas de calor dos permutadores restantes fiquem positivos (Brandt et al., 2011).

Nem todos os casos de redução de um trocador por meio do método *Loop-Breaking* melhora a estrutura de rede de permutadores com referência aos seus custos totais. Somente se o custo do permutador for otimizado, a estrutura será modificada. Caso contrário, a estrutura do permutador é mantida inalterada. Se a quebra de um loop de carga for bem sucedida, o algoritmo é executado novamente a partir do nível de loop mais baixo. Isso ocorre porque as temperaturas dentro da rede de permutadores são alteradas pela remoção de um trocador, que pode ser lucrativa. Um fluxograma básico do algoritmo é mostrado na Figura 11 (Brandt et al., 2011).

A fim de provar a influência positiva do método *Loop Breaking* na síntese da rede de permutadores com um algoritmo genético, dois exemplos, utilizando o novo

procedimento, foram examinados e obtiveram melhores resultados em relação aos custos anuais. Esses resultados mostram que a implementação do procedimento *Loop Breaking* melhorou ainda mais eficiência do algoritmo genético (Brandt et al., 2011).

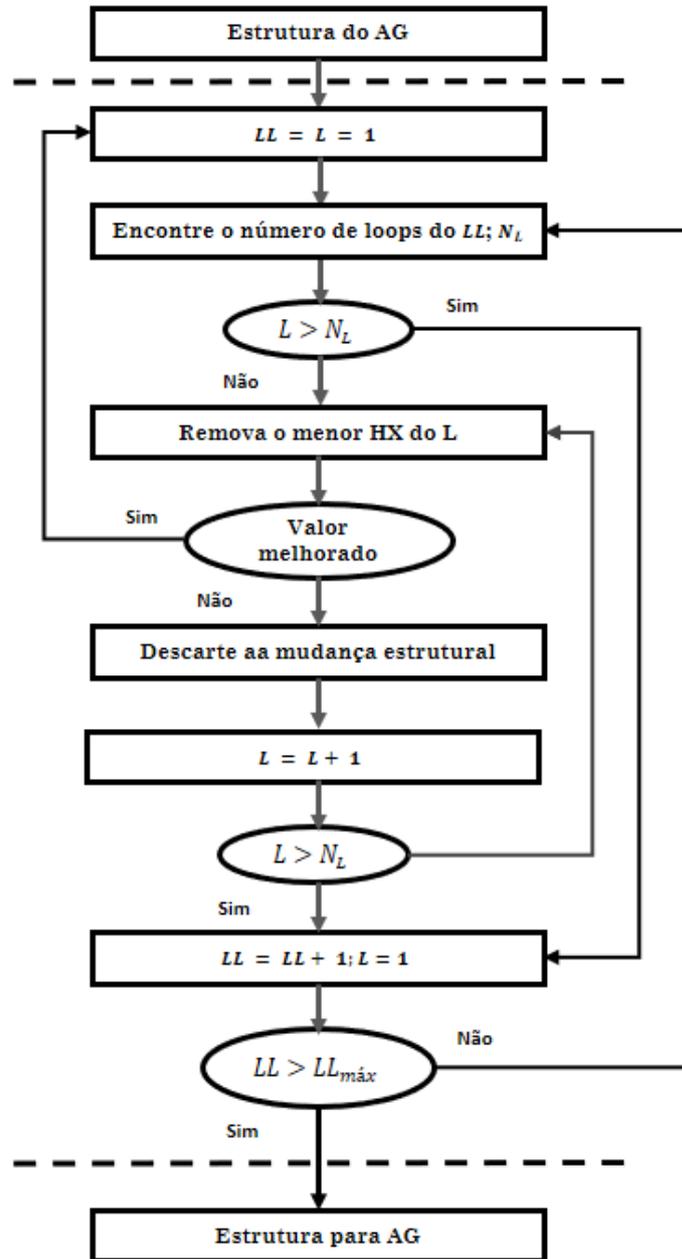


Figura 11 - Fluxograma básico do algoritmo

Fonte: Adaptado de Brandt et al. (2011)

Determinar a estrutura da rede de trocadores de calor, juntamente com aquecedores e resfriadores adicionais, se necessário, é o que fará com que todos os fluxos atinjam suas temperaturas alvo, de maneira que a configuração do sistema seja ótima,

minimizando assim os gastos. A dificuldade inerente à determinação desta rede encontra-se no grande número de combinações possíveis de redes (Brandt et al., 2011).

Diante disso, (Ponton et al, 1974) propõe uma metodologia diferente das apresentadas anteriormente, pois ao invés de combinar os fluxos quentes e frios na entrada do processo, considera os fluxos quentes que entram (T_{hi}) e os fluxos frios alvos que deixam o sistema (T_{cti}).

O objetivo principal do processamento neste estudo é a recuperação de calor. Sendo assim, tanto a intuição quanto a prática da engenharia sugerem que a temperatura mais elevada de fluxo frio final (T_{ct}^*) seja (Ponton et al, 1974):

$$T_{ct}^* = \text{máx}(T_{cti}) \quad (9)$$

Resultado da troca com fluxo mais quente disponível, cuja temperatura é (Ponton et al, 1974):

$$T_h^* = \text{máx}(T_{hi}) \quad (10)$$

Assim, a combinação do fluxo mais quente de entrada com o fluxo de temperatura mais alta do frio de saída é a regra heurística em que esse método se baseia, denominada como heurística H/H (Ponton et al, 1974).

Se a rede completa contém n permutadores, então a escolha dos fluxos associados aos n^{th} permutadores é determinada pela seleção de T_h^* e T_{ct}^* , como mostra a Figura 10. A temperatura em que a linha fria deve entrar no trocador n , T_{cr} , e a temperatura que a linha quente deve sair, T_{ho} , podem ser determinados imediatamente a partir de uma outra heurística que determine a quantidade de calor transferida neste trocador. O requisito de transferir tanto calor quanto possível será usado neste método (Ponton et al, 1974).

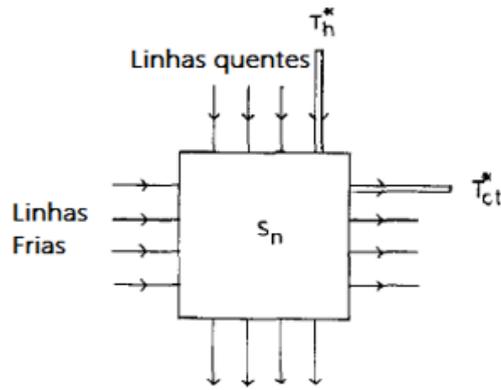


Figura 12 - Etapa de Síntese de uma rede

Fonte: Adaptado de Ponton et al. (1974)

O método completo usando a heurística H/H consiste em várias etapas, descritas a seguir (Ponton et al, 1974):

1. Selecione T_{ct}^* e T_h^* correspondente ao fluxo frio e quente respectivamente;
2. Se T_h^* for muito baixo para permitir alcançar T_{ct}^* em um trocador de calor, insira um aquecedor para aquecer o fluxo frio de T_{cm} , onde T_{cm} é a temperatura máxima possível de ser alcançada utilizando T_h^* e faça $T_{ct}^* = T_{cm}$;
3. Considere o trocador no qual T_{ct}^* e T_h^* são a saída fria e entrada quente respectivamente;
4. Utilize a heurística descrita anteriormente para determinar a quantidade de calor a ser transferido no trocador;
5. Calcule a temperatura de entrada fria, T_{cr} , $T_{cr} \geq T_{ci}$ e a temperatura de saída do fluxo quente $T_{ho} \geq T_{hi}$;
6. Se $T_{cr} = T_{ci}$, o processamento do fluxo frio está completo e o fluxo i é deletado do problema, caso contrário faça $T_{cti} = T_{cr}$, como mostra a Fig.11.;
7. Similarmente, delete o fluxo quente se $T_{ho} = T_{hi}$, caso contrário faça $T_{hti} = T_{ho}$, como mostra a Fig.11;
8. Repita o passo 1 até que não restem mais combinações a serem feitas;
9. Aqueça qualquer T_{ci} até T_{cti} utilizando aquecedores, e resfrie qualquer T_{hi} até T_{hti} usando resfriadores.

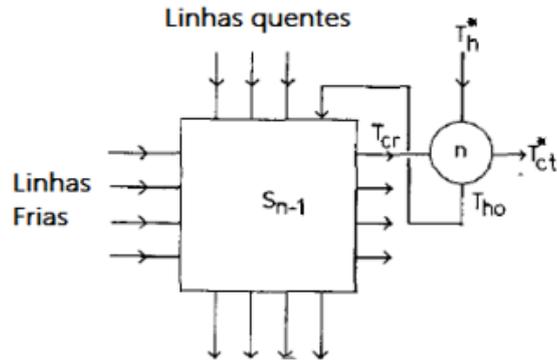


Figura 13 - Etapa de Síntese de uma sub rede

Fonte: Adaptado de Ponton et al. (1974)

O procedimento proposto por (Ponton et al, 1974) gera apenas um processo, que é quase sempre próximo ao processo ótimo obtido com o “Tree Searching or Branch-and-bound”. Além disso, essa heurística pode ser usada em conjunto com o método “Tree Searching or Branch-and-bound” para reduzir a ordem de grandeza do número de redes, pois ao invés de gerar uma árvore que se ramifica de todas as combinações T_{ci}/T_{hi} , ele utilizaria apenas a combinação H/H. Outra vantagem desse método é a rapidez com que uma rede quase ótima pode ser encontrada, comparado aos métodos convencionais.

Os métodos aqui apresentados mostram que com as regras heurísticas é possível uma abordagem mais estruturada de maneira a compreender melhor o problema em questão.

3 - PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

As considerações térmicas para a análise da perda de potência térmica em processos que utilizam fluidos em movimento são abordadas neste capítulo de uma forma generalizada baseando-se em conceitos intrínsecos da Transferência de Calor.

A implementação desse método se fez em quatro etapas: interpretar o problema de perda de potência térmica a partir de expressões funcionais; analisar fisicamente a expressão funcional em que se deseja trabalhar; definir os parâmetros pertinentes da expressão funcional escolhida; associar estes parâmetros às heurísticas de concepção já existentes.

As expressões funcionais são maneiras sobre a qual o engenheiro poderia agir para reduzir a perda de potência térmica. Ligados a este problema, duas vias são possíveis: aumentar a potência térmica e/ou reduzir as perdas de potência térmica. Este trabalho concentrou-se na função reduzir as perdas de potência térmica. Assim, a partir desta função, foi realizada uma análise física para encontrar os parâmetros de influência.

3.1 ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM PROCESSOS COM PERDA TÉRMICA

A potência térmica de um processo envolvendo fluido pode ser obtida a partir da lei da conservação de energia conforme a Equação 1 (Incropera, 2008).

$$\dot{E}_{acu} = \dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} + \dot{E}_{ger} \quad (1)$$

Onde, \dot{E}_{acu} é a taxa de energia acumulada do sistema quando em regime transiente; \dot{E}_{ent} e \dot{E}_{sai} são as formas de energia associadas às fronteiras do sistema por unidade de tempo; e \dot{E}_{ger} é a taxa de energia gerada no sistema. A aplicação do modelo adotado neste trabalho leva em consideração a análise em regime permanente; processos sem geração de energia; fluidos incompressíveis; condutividade térmica e capacidade calorífica constantes.

Sendo assim, neste trabalho, a conservação de energia é reduzida às taxas de energia nas fronteiras do volume de controle, que podem ser: condução, convecção e radiação.

A potência térmica, Φ , de um fluido em movimento é dada pelo produto entre a capacidade calorífica, c_p , a temperatura T , e a vazão mássica \dot{m} conforme a Equação 2 (Pailhès et al., 2011)

$$\Phi = \dot{m}c_p.T \quad (2)$$

A perda de potência térmica em um determinado processo ocorre, por exemplo, devido às perdas de energia por dissipação e pressão, sendo que essa energia pode ser transmitida na forma de convecção, condução e radiação. Neste trabalho, serão consideradas as perdas de potência térmica de um processo que envolva fluidos incompressíveis, por meio da convecção e da condução térmica. A radiação será considerada apenas como uma condição de contorno. O volume de controle em que se deseja trabalhar é mostrado na Figura 14.

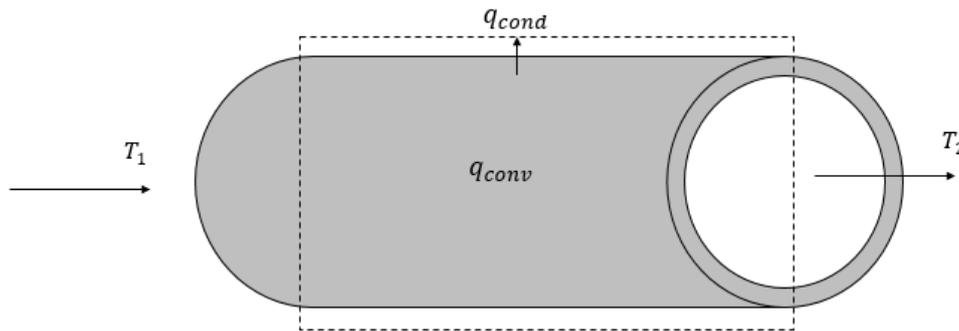


Figura 14 - Esquema do volume de controle

Fonte: O autor (2017)

3.1.1 CONVECÇÃO TÉRMICA

A convecção térmica é o processo de transferência de calor, em um sentido macroscópico, devido ao movimento global de um conjunto de moléculas de um fluido em movimento. A troca de calor por convecção é dada pela lei de Resfriamento de Newton descrita na Equação 3.

$$\Phi_{conv} = \bar{h}A(T_s - T) \quad (3)$$

Onde \bar{h} é o coeficiente de transferência de calor por convecção médio, A é a área de troca térmica, T é a temperatura do fluido na corrente livre ou temperatura média (tratando-se de escoamento externo ou interno respectivamente), e T_s é a temperatura da superfície. O coeficiente convectivo de transferência de calor médio é função de diversos parâmetros tais como, temperatura, velocidade do fluido, posição e propriedades termofísicas do fluido.

A convecção térmica pode ser classificada como natural ou forçada.

3.1.1.1 CONVECÇÃO NATURAL

A convecção natural tem como origem o movimento do fluido gerado pelo campo gravitacional a partir da diferença de densidade entre as partículas quentes e frias existentes no fluido (Çengel, 2011).

O coeficiente de dilatação térmica β está ligada com a mudança da densidade do fluido com a temperatura e pode descrita pela Equação 4 (Özişik, 1985).

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\Delta\rho}{\Delta T} \right) \quad (\textit{pressão constante}) \quad (4)$$

Onde $\Delta\rho$ é variação de massa volumétrica ρ provocada pela variação de temperatura ΔT .

Os números adimensionais são relevantes para a minimização de parâmetros funcionais da convecção. Um número importante para o estudo do comportamento da convecção natural é o chamado número de Grashof (Gr), que compara as forças viscosas diante das forças gravitacionais, de acordo com a Equação 5. Ele caracteriza os movimentos ocasionados no fluido pelos gradientes térmicos (Holman, 2010).

$$Gr = \frac{\beta\rho^2 g\Delta TL^3}{\mu^2} \quad (5)$$

Onde ρ é a massa volumétrica do fluido, g é a aceleração da gravidade, ΔT é o gradiente de temperatura parede-fluido, μ é a viscosidade dinâmica do fluido e L é o comprimento característico da superfície, que muda de acordo com a geometria e a

orientação da superfície. Representações específicas de L para diferentes representações geométricas podem ser visualizadas no ANEXO A.

O coeficiente de convecção \bar{h} em convecção natural pode ser escrito em relação ao número de Nusselt (\overline{Nu}), de acordo com a Equação 6 a seguir (Holman, 2010).

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}k}{L} \quad (6)$$

Onde k é a condutividade térmica do fluido. Sabendo que Nusselt pode ser descrito em função de Prandtl e Grashof e o produto do número de Grashof (G_r) e de Prandtl (P_r) é chamado de Número de Rayleigh (R_a), tem-se a Equação 7 (Holman, 2010):

$$Nu = DR_a^b = D(G_r P_r)^b = D \left(\frac{\beta \rho^2 g \Delta T L^3 C_p}{\mu k} \right)^b \quad (7)$$

Onde, D é uma constante que varia de acordo com a geometria e orientação da superfície, e a dinâmica do escoamento como mostra a tabela 4, C_p é o calor específico a pressão constante e b é um fator que varia de acordo com a dinâmica do escoamento do fluido. Em escoamento laminar $b = 1/4$ e escoamento turbulento $b = 1/3$. Valores conhecidos e estabelecidos para D podem ser visualizadas no ANEXO A (Holman, 2010).

Assim, o coeficiente convectivo médio da Equação 6 pode ser reescrito de acordo com a Equação 8 a seguir.

$$\bar{h} = D \left(\frac{\beta \rho^2 g \Delta T C_p}{\mu^2} \right)^b k^{1-b} L^{3b-1} \quad (8)$$

Substituindo o coeficiente convectivo na Equação 3, tem-se os parâmetros pertinentes no caso da convecção natural, como a diferença de temperatura entre a superfície e o fluido ($T_s - T$), a geometria da superfície (D, L, A), as grandezas físicas ligadas ao fluido (β, ρ, C_p, μ), a dinâmica do fluido (D, b), como mostra a Equação 9.

$$\Phi_{conv} = D \left(\frac{\beta \rho^2 g C_P}{\mu^2} \right)^b k^{1-b} L^{3b-1} A (T_s - T)^{b+1} \quad (9)$$

Sabendo que o valor de b pode ser $1/4$ em escoamento laminar e $1/3$ em escoamento turbulento, é possível fazer uma análise dos sinais do expoente de cada parâmetro. Assim, os sinais do expoente de $\beta, \rho, C_P, \mu, k, (T_s - T)$ e A serão sempre positivos e o sinal do expoente do comprimento característico será igual ou inferior a zero.

Desta forma, quanto maior forem os valores de $\beta, \rho, C_P, k, (T_s - T)$, maior será o fluxo de calor.

3.1.1.2 CONVECÇÃO FORÇADA

Na convecção forçada, o fluido é colocado em movimento pela ação das forças externas que lhe fornece velocidades de deslocamento.

A intensidade da transferência térmica por convecção forçada será uma ligação direta com o regime do movimento do fluido, que é obtido a partir do número de Reynolds. Esse adimensional determina se o regime de escoamento é laminar ou turbulento. Em geral, o escoamento turbulento promove melhores trocas de calor que o laminar. A definição do número de Reynolds, Re , é dada por:

$$Re = \frac{vL\rho}{\mu} \quad (10)$$

Onde v é a velocidade do fluido, L é o comprimento característico, ρ é a massa volumétrica e μ é a viscosidade dinâmica.

Os valores do número de Reynolds se alteram dependendo do tipo do escoamento, externo ou interno, geometria e regime do escoamento.

De forma genérica, a convecção forçada pode ser escrita em função de Nusselt (Nu), Prandtl (Pr) e Reynolds (Re), conforme relação da equação 11.

$$Nu = f(Re, Pr) = C Re^n Pr^{1/3} \quad (11)$$

Substituindo a Equação 6 na Equação 11, é possível obter uma relação para o coeficiente de transferência de calor por convecção forçada:

$$\bar{h} = \frac{C Re^n Pr^{1/3}}{L} = C (\rho v)^n L^{n-1} \mu^{1/3-n} C_p^{1/3} k^{2/3} \quad (12)$$

Onde C é o valor da constante que muda de acordo com a forma, o estado da superfície e a dinâmica do escoamento do fluido, n é o fator ligado a dinâmica do escoamento do fluido, e os outros parâmetros já foram explicados anteriormente. Os valores das constantes n e C podem ser visualizadas no anexo A.

O fluxo de calor por convecção forçada pode ser escrito substituindo a equação 12 na equação 3.

$$\Phi_{conv} = C (\rho v)^n L^{n-1} \mu^{1/3-n} C_p^{1/3} k^{2/3} A (T_s - T) \quad (13)$$

O comprimento característico irá mudar de acordo com a geometria e orientação da superfície. Em casos onde o fluido escoar dentro de uma tubulação, o comprimento característico é igual ao diâmetro hidráulico (d_h) e o sinal do seu expoente será inferior a zero. Sendo assim se o diâmetro hidráulico aumenta, a transferência de calor diminui.

A partir da relação 13, pode-se observar que as grandezas físicas ligadas ao fluido (ρ, μ, C_p, k), a forma da parede da tubulação (C, L, A), a diferença de temperatura entre a superfície e o fluido ($T_s - T$), a dinâmica do fluxo (v, C, n) são parâmetros que influenciarão no processo de convecção forçada.

3.1.2 CONDUÇÃO TÉRMICA

É o processo de transferência de energia através de um meio material, sem transporte de matéria. Ocorre em fluidos imóveis e em sólidos.

A condução térmica é regida pela lei de Fourier, conforme equação 22.

$$\Phi_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (22)$$

Onde, k é a condutividade térmica do meio, A é a superfície de troca e $\frac{dT}{dx}$ é o gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor.

A velocidade do fluido em contato com a superfície sólida é baixa em razão das forças viscosas. Nessa região, o calor é transferido por condução, de acordo com o modelo proposto por Fourier, o que gera um gradiente de temperatura no fluido (Özişik, 1985).

A condução de calor no fluido é relevante principalmente em casos que haja mudança de fase e casos de convecção natural, para baixos valores de coeficientes convectivos.

Na parede da tubulação, a transferência de calor se dá unicamente através da condução, pois se trata de um meio sólido.

A partir da integração da equação 22, considerando que a condução ocorra em uma única direção, a equação pode ser reescrita conforme a equação 23.

$$\Phi_{cond} = -\frac{kA}{\Delta x} (T_s - T) \quad (23)$$

Onde Δx é a espessura da superfície, T_s é a temperatura da superfície da parede e T é a temperatura do fluido.

Analisando a relação 23, observa-se que a transferência de calor por condução é ligada a grandeza física ligada a parede (k), a forma da parede ($\Delta x, A$) e a diferença de temperatura entre o fluido e a parede ($T_s - T$).

Outro conceito muito importante é sugerido pela equação 23, a resistência térmica, que é a razão entre um potencial motriz e a correspondente taxa de transferência. Em uma parede plana ela pode ser descrita pela equação 24. No anexo A, é possível encontrar as relações das resistências térmicas para diferentes geometrias.

$$R_{t,cond} = \frac{\Delta x}{KA} \quad (24)$$

3.2 PARÂMETROS PERTINENTES DOS PROCESSOS QUE ENVOLVAM PERDA TÉRMICA E ASSOCIAÇÃO ÀS HEURÍSTICAS DE CONCEPÇÃO

Sendo assim, os principais parâmetros aqui citados, foram agrupados e apresentados nas tabelas 1, 2 e 3 e em seguida associados as heurísticas a partir dos anexos C, D e E.

Tabela 1: Parâmetros pertinentes no processo de convecção natural

Grupos		Parâmetros
Características do Fluido	Propriedades Físicas	$k, \rho, \mu, C_p, L, \beta$
	Temperatura	$T_s - T$
Geometria		A, L, D
Dinâmica do fluxo		D, b

Fonte: O autor (2017)

Tabela 2: Parâmetros pertinentes no processo de convecção forçada

Grupos		Parâmetros
Características do Fluido	Propriedades Físicas	k, ρ, μ, C_p, L
	Temperatura	$T_s - T$
Geometria		A, L, C
Dinâmica do fluxo		C, n, v

Fonte: O autor (2017)

Tabela 3: Parâmetros pertinentes no processo de condução térmica

Grupos		Parâmetros
Características da superfície	Forma	$A, \Delta x$
	Propriedade física	k
Temperatura		$T_s - T$

Fonte: O autor (2017)

É importante frisar que independente do seu objetivo, seja aumentar ou diminuir a transferência de calor, os parâmetros de influência serão os mesmos, mas a maneira de agir com eles será diferente.

Para mostrar como a ligação dos parâmetros às heurísticas foi realizada, suponha-se que um engenheiro deseja agir sobre a condução para reduzir as perdas térmicas. Desta forma, ele poderá modificar as características da superfície, seja sua forma ou sua propriedade física, ou a temperatura da superfície, como mostra a Tabela 3.

A seleção das heurísticas a partir das características da superfície foi feita da seguinte maneira: após ter definido o objetivo (reduzir as perdas de potência térmica), o próximo passo é escolher a zona em que se deseja agir. Sabendo que a parede da superfície é que será responsável pela transmissão do fluxo de calor para o meio externo, escolheu-se a opção “Agir sobre a transmissão”. Sobre o terceiro nível foram escolhidos os caminhos ligados aos componentes, como mostra a figura 15.

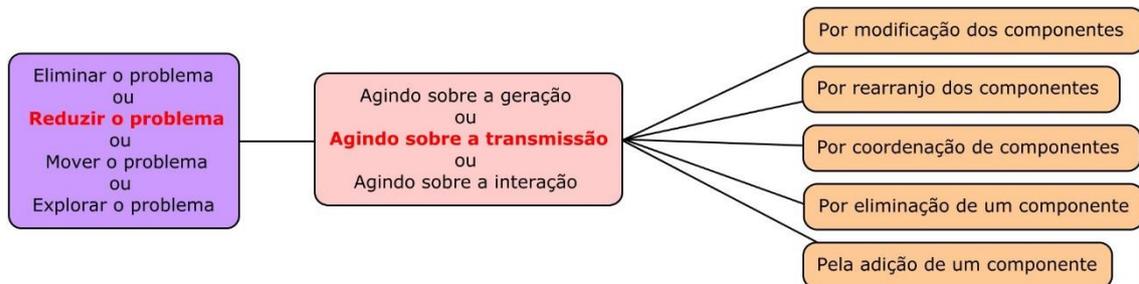


Figura 15 - Ramos das heurísticas

Fonte: Adaptado de Morillon (2009)

Existem cinco possibilidades para trabalhar sobre os componentes: modificando-os, rearranjando-os, coordenando-os de maneira diferente, eliminando-os ou adicionando novos componentes.

O método proposto tem a finalidade de dar aos engenheiros possíveis caminhos para resolver seu objetivo. Assim, quando foi feita a escolha das heurísticas sobre os próximos níveis da árvore, colocou-se todas as possibilidades que tinham relações com os parâmetros em questão. Desta forma, foi possível organizar todas as heurísticas relacionadas às características da parede da superfície, como mostra o anexo E.

4 – APLICAÇÃO

Seguindo a mesma ideia iniciada no capítulo anterior onde se deseja agir sobre a condução, o engenheiro encontrará no anexo E diversas possibilidades de heurísticas para atingir seu objetivo. Para demonstrar a utilização e a coerência da metodologia, foram escolhidas três heurísticas diferentes para reduzir a perda da energia térmica.

4.1 HEURÍSTICA 1: « REDUZIR O PROBLEMA/ AGINDO SOBRE A TRANSMISSÃO/ ATRAVÉS DA MODIFICAÇÃO DE COMPONENTES/ GLOBALMENTE»

Os possíveis caminhos ligados à heurística « Reduzir o problema > Agindo sobre a transmissão > Por modificação de componentes > Globalmente » são mostrados na Figura 16.

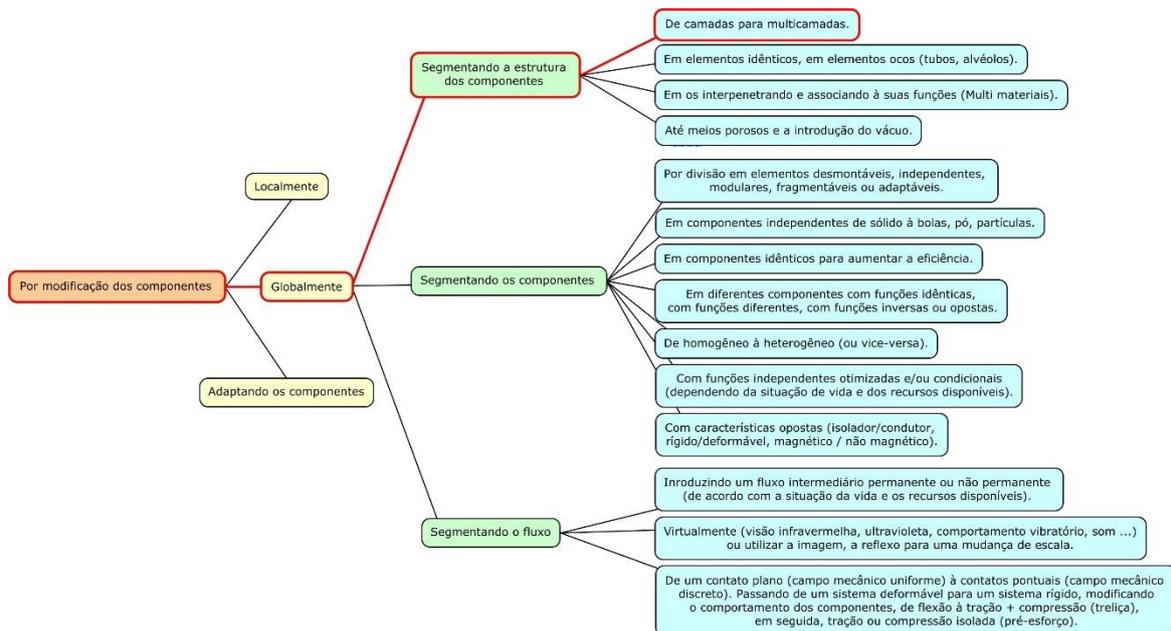


Figura 16 - Caminhos ligados à heurística « Reduzir o problema > Agindo sobre a transmissão > Por modificação dos componentes »

Fonte: Adaptado de Morillon (2009)

Observa-se que a modificação global de componentes pode ser realizada através de três caminhos, segmentando a estrutura, segmentando os componentes ou segmentando o fluxo.

Escolhendo o caminho em vermelho representado na Figura 16, « *Reduzir o problema > Agindo sobre a transmissão > Por modificação dos componentes > Globalmente > Segmentando a estrutura > De camadas para multicamadas* », é possível modificar a condutividade térmica e a espessura da parede com o intuito de diminuir a perda de potência térmica por condução.

A ficha de interpretação tem como objetivo oferecer uma compreensão mais clara da heurística escolhida e propor ideias para possíveis aplicações. Por vezes, a ficha pode mostrar uma aplicação direta ao que se deseja trabalhar ou uma associação simples, pois é importante lembrar que as fichas foram criadas levando em conta os problemas gerais da Engenharia. A ficha a seguir mostra uma aplicação direta para o caso térmico no primeiro exemplo, um sistema de isolamento de edifícios.



Figura 17 - Ficha de interpretação ligada a heurística « *Reduzir o problema Agindo sobre a transmissão Por modificação de componentes Globalmente Segmentando a estrutura dos componentes de camadas para multicamadas* »

Fonte: Adaptado de Calle-Escobar (2014)

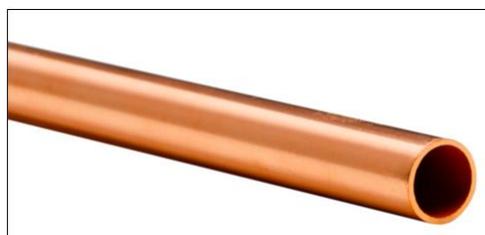
Levando em conta esse exemplo o engenheiro poderia escolher diferentes materiais e espessuras para aumentar a resistência ao fluxo de calor e a eficiência energética do sistema. É importante frisar que a escolha dos materiais vai depender das condições de contorno em que se está trabalhando.

O estudo realizado por Glouannec et al. (2014) confirma a eficácia da escolha da heurística. Seu objetivo era reduzir a perda de calor em um furgão refrigerado. Para isso, ele utilizou materiais com diferentes propriedades, uma camada refletiva, um aerogel e

uma camada com mudança de fase, materiais que atendiam as suas necessidades. Com o aumento de 20% da espessura da parede do furgão conseguiu uma redução energética de 36% comparada a um caso de referência.

Neste caso, essa redução foi possível aumentando a espessura da parede utilizando materiais com baixa condutividade, porém poderão existir problemas em que a espessura terá um valor previamente especificado, ou seja, só poderá ser alterada a condutividade da parede. Um exemplo para esta situação será apresentado a seguir.

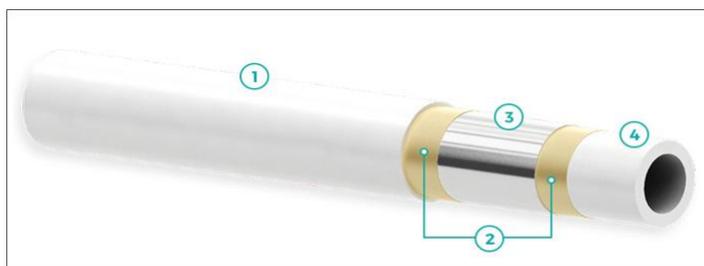
Em uma residência antiga, deseja-se instalar uma nova rede de distribuição de água quente, já que a antiga tubulação era feita de cobre, um material extremamente condutor. O polietileno reticulado (PEX) é um material que apresenta condutividade térmica igual à $0,17\text{W/m}^\circ\text{C}$, no entanto apresenta limitações em relação a dilatações térmicas, superiores a tubulações metálicas. Para solucionar esse problema, surgiu a ideia de utilizar um tubo multicamadas que consiste em agregar uma matéria plástica (polietileno reticulado) com uma fina camada de um elemento metálico (Alumínio) na constituição de um tubo, já que ele absorve a expansão térmica, evitando, assim, a formação de trincas nos tubos.



Tubo de cobre (Leroy Merlin, 2016)

Tubo de Cobre

Espessura: 20mm



Estrutura do tubo multicamadas (Friopex, 2016)

Multicamadas – PEX

Espessura: 20mm

1- Polietileno (6 mm)

2- Adesivo (Espessura desprezada)

3- Alumínio (2 mm)

4- Polietileno (12 mm)

Figura 18 - Dimensões do tubo de cobre e do tubo multicamadas

Fonte: O autor (2017)

Afim de comparar a resistência térmica entre as tubulações de cobre e multicamadas, suas dimensões foram mantidas iguais, como mostra a Figura 18. Aplicando a equação da resistência térmica de condução para paredes cilíndricas,

disponível na Tabela 3 do anexo A, é possível obter os resultados dispostos na tabela a seguir.

Tabela 4: Resistência térmica por condução

Tipo da Tubulação		Condutividade Térmica (W/m.k)	Resistência Térmica por unidade de comprimento (m.k/W)
Cobre		372	$9,5 \cdot 10^{-5}$
Multicamadas	Polietileno	0,17	0,19
	Alumínio	204	
Polietileno		0,17	0,21

Fonte: Incropera (208)

Observa-se que a nova tubulação, de multicamadas, apresenta uma resistência térmica muito maior que a tubulação de cobre, que por consequência reduzirá a perda térmica por condução. Outra análise que pode ser feita é comparando a tubulação de multicamadas com uma tubulação apenas de polietileno. A resistência destas tubulações é semelhante, e a inserção da camada de alumínio permite a utilização do tubo em maiores temperaturas, sem grande prejuízo para a eficiência térmica.

4.2 HEURÍSTICA 2: « REDUZIR O PROBLEMA/ AGINDO SOBRE A TRANSMISSÃO/ ATRAVÉS DA MODIFICAÇÃO DE COMPONENTES/ ADAPTANDO OS COMPONENTES/ POR EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS »

O segundo possível caminho escolhido também está ligada à heurística « Reduzir o problema/Agindo sobre a transmissão/Através da modificação de componentes ». Porém desta vez, escolheu-se modificar os componentes os adaptando. Ligados à esta opção tem-se duas possíveis vias, adaptar os componentes através da evolução dos materiais ou através da evolução da forma. O caminho escolhido foi adaptar os componentes através da evolução dos materiais, como mostra a Figura 19.



Figura 19 - Caminhos ligados à heurística « Reduzir o problema/Agindo sobre a transmissão/Através da modificação de componentes/Adaptando os componentes/Por evolução dos materiais»

Fonte: Adaptado de Morillon (2009)

Escolhendo o caminho em vermelho, o engenheiro terá a seguinte heurística a interpretar: « Reduzir o problema Agindo sobre a transmissão Através da modificação de componentes Adaptando os componentes Por evolução dos materiais Para materiais porosos ou multimateriais».

A ficha de interpretação ligada à esta heurística é mostrada a seguir.



Figura 20 - Ficha de interpretação ligada a heurística « Reduzir o problema Agindo sobre a transmissão Através da modificação de componentes Adaptando os componentes Por evolução dos materiais Para materiais porosos ou multimateriais»

Fonte: Calle-Escobar (2014)

Observando o primeiro exemplo da ficha, meio poroso, o engenheiro poderá ter a ideia de utilizar materiais porosos para melhorar a resistência da condução térmica, os

preenchendo com ar, gases pesados ou até mesmo os colocando sob vácuo (Spagnol, 2007).

Os materiais porosos apresentam, como o nome já diz poros, “lacunas”, que irão reduzir os pontos térmicos através de uma matriz sólida. Esses pontos passam a ser muito tortuosos em comparação à uma matriz toda sólida e por consequência longos, como mostra a Figura 21. Isso faz com que sua condutividade térmica seja baixa. Devido a esta característica muitos isolantes são feitos deste tipo de material (Quenard, 2005).

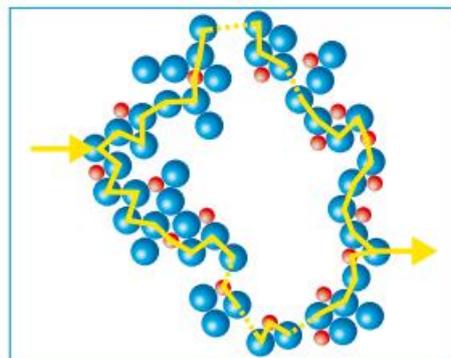


Figura 21 - Pontos térmicos em um isolante poroso

Fonte: Catálogo Promat

O Aerogel é um exemplo de isolante poroso que tem apenas aproximadamente 5% de sólido. Os restantes 95% são compostos por ar em poros extremamente pequenos, cerca de 20nm, o que reduz o livre percurso médio do gás, e conseqüentemente a sua condutividade térmica. A Figura 22 compara a condutividade térmica do aerogel em relação aos isolantes convencionais (Coquard et al., 2013).

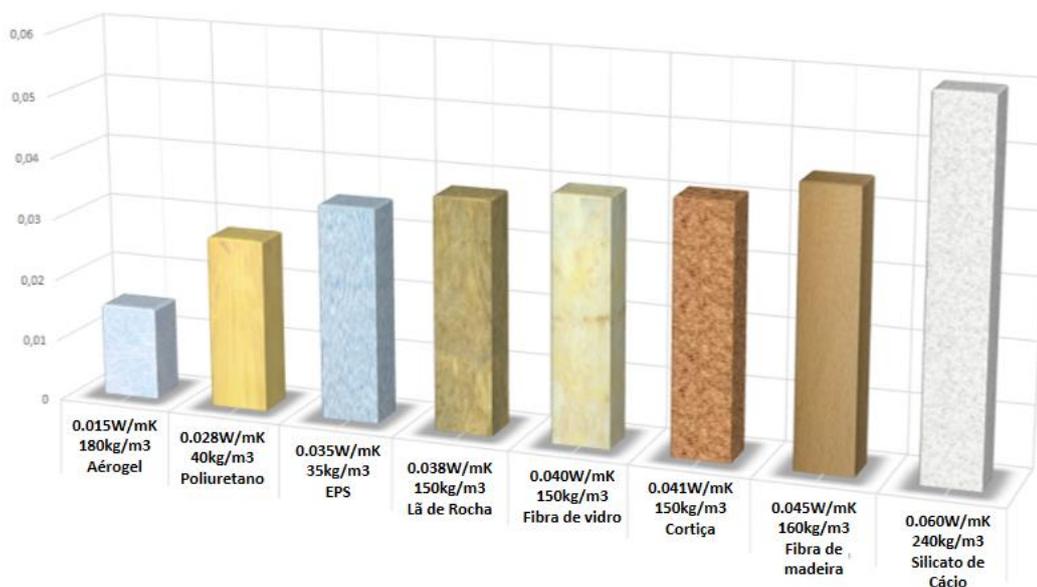


Figura 22 - Condutividade térmica de diversos materiais isolantes

Fonte: Ecofine

Observa-se que o aerogel apresenta uma condutividade térmica (k) bem menor em relação aos materiais apresentados. Sabendo que a condutividade térmica é inversamente proporcional a resistência térmica, nota-se que a resistência térmica do material poroso tomado como exemplo irá reduzir ainda mais a perda de potência térmica. O que comprova a validade da heurística.

4.3 HEURÍSTICA 3: « REDUZIR O PROBLEMA/ AGINDO SOBRE A TRANSMISSÃO/ ATRAVÉS DA MODIFICAÇÃO DE COMPONENTES/ ADAPTANDO OS COMPONENTES/ POR EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS »

O terceiro exemplo também está ligado a heurística « Reduzir o problema/Agindo sobre a transmissão/Através da modificação de componentes/Adaptando os componentes/Por evolução dos materiais». Desta vez, o caminho escolhido foi utilizando revestimento de propriedades diferentes, como mostra a figura a seguir.

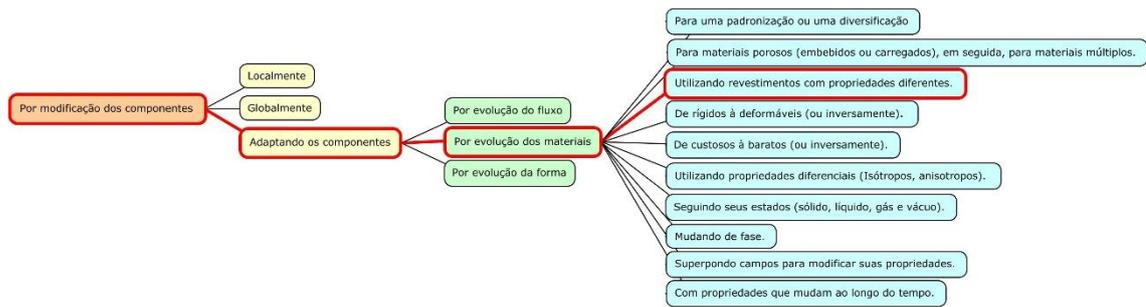


Figura 23 - Caminhos ligados à heurística « Reduzir o problema/Agindo sobre a transmissão/Através da modificação de componentes/Adaptando os componentes/Por evolução dos materiais»

Fonte: Adaptado de Morillon (2009)

Ligada à essa heurística, o engenheiro terá a ficha de interpretação a seguir.

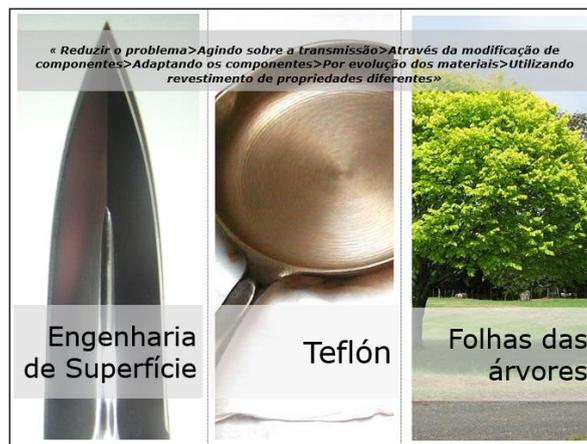


Figura 24 - Ficha de interpretação ligada a heurística « Reduzir o problema Agindo sobre a transmissão Através da modificação de componentes Adaptando os componentes Por evolução dos materiais Utilizando revestimento de propriedades diferentes»

Fonte: Calle-Escobar (2014)

O segundo exemplo da ficha acima mostra a utilização do Teflon, um revestimento que tem um coeficiente de atrito extremamente baixo, o que permitiria reduzir as perdas convectivas. Este não seria o efeito desejado, mas baseado neste exemplo, o engenheiro pode escolher um revestimento que apresenta uma baixa condutividade térmica e que trabalha como um isolante, evitando desta forma o fluxo por condução.

A utilização de um revestimento modificaria a espessura da superfície em que o fluxo de calor deverá atravessar, aumentando desta forma a resistência térmica, como mostra a Figura 25.



Figura 25 - Revestimento Foamglas

Fonte: Catálogo Isolex

Para exemplificar o que foi mencionado acima, suponha-se que se deseja isolar uma tubulação cilíndrica de 10cm de diâmetro com revestimento de vidro celular, que apresenta condutividade térmica igual à 0,055W/(m.K). Considerando as seguintes informações: regime estacionário, transferência de calor unidimensional na direção radial, propriedades constantes do isolante, troca térmica por radiação entre a superfície externa do isolante e a superfície vizinha desprezível. A resistência térmica da tubulação após a instalação do isolante pode ser calculada através da relação abaixo, conforme anexo A.

$$R = \frac{\ln(r/r_i)}{2\pi k} \quad (26)$$

Onde r/r_i é a espessura do isolante, k é a condutividade térmica do isolante, r é o diâmetro da tubulação com a adição do isolante.

Sabendo disso, foi possível plotar um gráfico da resistência térmica em relação à diferentes espessuras do isolante.

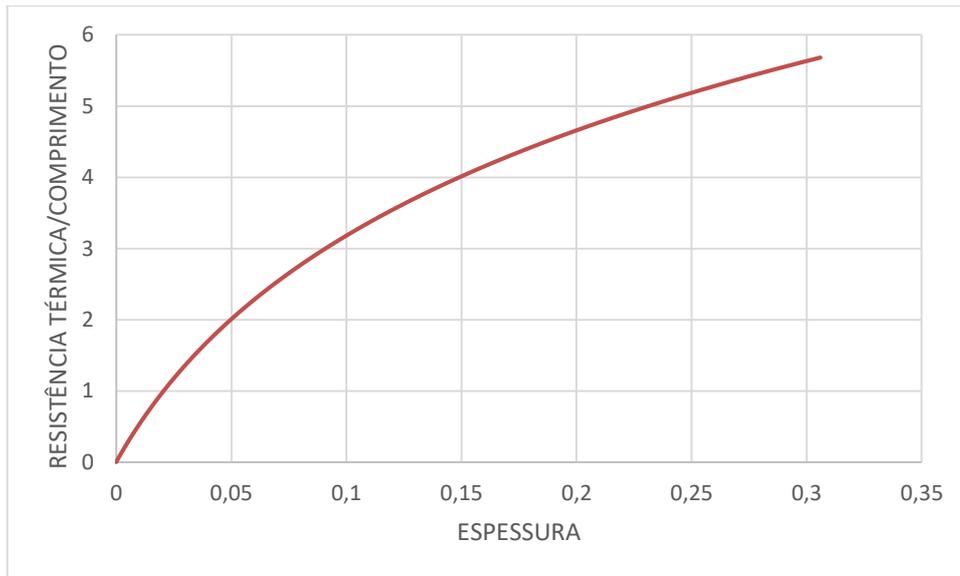


Figura 26 - Resistência térmica por unidade de comprimento x Espessura

Fonte: O autor (2017)

Observa-se que à medida que a espessura do isolante aumenta, a resistência térmica por condução aumenta. Isso faz com que a perda térmica diminua já que ela é inversamente proporcional ao fluxo térmico.

5 - CONCLUSÃO

A decomposição do problema na forma de parâmetros que o geram permite ao utilizador visualiza-lo de maneira mais clara. A ligação entre o problema e as heurísticas também foi otimizada. Uma vez identificado o parâmetro sobre o qual se deseja agir, as heurísticas referentes a este parâmetro são previamente selecionadas, reduzindo as chances de heurísticas irrelevantes aparecerem para o utilizador.

A metodologia apresenta um desafio, visto que a união dos parâmetros às heurísticas depende da experiência do conceptor. Dessa forma podem haver ligações que poderiam ser feitas por alguns conceptores, mas que ficam de fora no método aqui desenvolvido. A associação das heurísticas aos parâmetros pertinentes neste estudo foi feita com o auxílio de alguns engenheiros para que se pudesse ter o máximo de ideias possíveis.

Neste trabalho, foram consideradas as perdas de potência térmica de um processo que envolve fluidos incompressíveis por meio da convecção e da condução. Diante de uma vasta gama de ideias para solucionar o problema da perda térmica por condução, tomou-se como escolha três heurísticas, modificar a parede da tubulação para multicamadas, utilizar um revestimento com a propriedade desejada e utilizar materiais porosos.

Viu-se que, com a utilização de multicamadas, é possível unir materiais com propriedades diferentes para se obter uma parede com uma maior resistência térmica. Além disso, as limitações encontradas por um material podem ser sanadas. O estudo realizado por Glouannec et al. (2014) confirma a eficácia da escolha da heurística.

Outra maneira de se reduzir a perda térmica é utilizando isolantes feitos de materiais porosos, já que a condutividade térmica deste tipo de material é baixa comparada aos isolantes convencionais. Além da utilização de materiais com baixa condutividade, foi mostrado que, à medida que se aumenta a espessura de um revestimento isolante, é possível aumentar ainda mais a resistência térmica.

As heurísticas aqui escolhidas mostram que o engenheiro pode agir de várias maneiras para atingir seu objetivo. No entanto, existem outras heurísticas ligadas à condução térmica e que lhe darão ideias diferentes.

É importante mencionar que a metodologia utilizada no presente trabalho foi pensada para propor ideias de solução para o problema da perda de potência térmica, mas poderia ser aplicada para auxiliar na resolução de qualquer problema mecânico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aerogel. Disponível em: <http://www.ecofine.it/aerogel>. Acessado em: 10/2017.

Altshuller, Genrich S. (1964). Bases of the Inventive Process. *Voronezh: Tsentralnochernozemnyi Publishing House*.

Brandt, Christopher; Fieg, Georg; Luo, Xing (2011). Efficient synthesis of heat exchanger networks combining heuristic approaches with a genetic algorithm. *Heat Mass Transfer* 47: 1019-1026.

Bueno, Fabrício (2009). Métodos heurísticos: Teoria e implementações. IFSC, Araranguá.

Calle-Escobar, M., Mejía-Gutiérrez, R., Nadeau, J. and Pailhes, J. (2014). Heuristics-based design process. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 10(4), pp.369-386.

Catálogo Promat (2010). Brochure HPI – Microporeux pour isolations hautes températures.

Catálogo Foamglas: Isolant thermique em verre cellulaire. Disponível em: <http://www.btp-solution.com/Doc%20GENERALE%20FOAMGLAS.pdf>. Acessado em: 11/2017.

Catálogo Isolex: Floamglas Insulation. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/0Bz3tLuu5NeGmU2t3UXIzdHpRY0U/view>. Acessado em: 10/2017.

Coquard, R.; Baillis, D.; Grigorova, V.; Enguehard, F.; Quenard, D.; Levitz, P (2013) Modelling of the conductive heat transfer through nano-structured porous silica materials. *Journal of Non-Crystalline Solids*. pp 103-115.

Fourier, J. B. (1822). *Theorie analytique de la chaleur*. Paris.

Friopex (2016). Sistema multicamadas para condução de gases refrigerantes. Disponível em: <http://www.friopex.com.br/#sistema>. Acessado em: 12/2666017.

Gigerenzer, G. and Todd, P. (2001). Simple heuristics that make us smart. 1st ed. New York: Oxford University Press.

Holman J. P. (2010). Heat transfert. 10th Edition. New York.

Incoprera, Frank P.; Dewitt, David P.; Bergman, Theodore L.; Lavine, Adrienne S. (2008). Fundamentos de transferência de calor e de massa. 6th Edição.

Kalogirou, Soteris A. (2004) "Solar thermal collectors and applications". *Progress in energy and combustion science*, pp 231-295.

Martínez-Patiño, Jesús; Picón-Núñez, Martín; Serra, Luis M. and Verda Vittorio (2012). Systematic approach for the synthesis of water and energy networks, pp 458-464.

Morillon, T (2009). Mise en place de standards technologiques pour la maîtrise des pertes de rendement en face externe de veine de turbine haute pression. Thèse de doctorat, Arts et Métiers ParisTech.

Özişik, M. N (1985). Heat Transfer: A Basic approach.

Pailhès, J., Sallaou, M., Nadeau, J. and Fadel, G. (2011). Energy Based Functional Decomposition in Preliminary Design. *Journal of Mechanical Design*, 133(5), p.051011.

Glouannec, P., Michel, B., Delamarre, G. and Grohens, Y. (2014). Experimental and numerical study of heat transfer across insulation wall of a refrigerated integral panel van. *Applied Thermal Engineering*, 73(1), pp.196-204.

Polovinkin, A. I. (1988). The ABC of engineering creativity. Mashinostroenie, Moscow.

Polovinkin, A. I. (1991). Theory of new technique design: Laws of technical systems and their applications. Informelektro, Moscow.

Ponton, J. and Donaldson, R. (1974). A fast method for the synthesis of optimal heat exchanger networks. *Chemical Engineering Science*, 29(12), pp.2375-2377.

Quenard, D.; Sallée, H. (2005). Micro-nano porous materials for high performance thermal insulation. Proceedings of the 2nd International Symposium on Nanotechnology in Construction, Euskalduna Palace Bilbao, Spain.

Sallou, M.; Pailhes J.; Nadeau Jean Pierre (2009). Structuration fonctionnelle d'une base de composants en conception préliminaire. 19^{ème} Congrès Français de Mécanique. Marseille, France.

Spagnol, Sandra (2007). Modelling of the conductive heat transfer through nano-structured porous silica materials. Ph. D, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Toulouse, Université de Toulouse, France.

Tech-Faq (2015). The venture effect. Disponible em: <http://www.tech-faq.com/venturi-effect.html>. Acessado: 07/2017.

Zähr M., Friedrich D., Kloth T.Y., Goldmann G., Tributsch H. (2010). Bionic photovoltaic panels bio-inspired by green leaves. *Journal of Bionic Engineering*. pp 284-293.

Çengel Y. A. and Ghajar A. J. (2011). Heat and Mass transfert: Fundamentals and Applications. 4th Edition.

ANEXO A: CORRELAÇÕES

Tabela 1: Representações de L para diversas configurações

Geometria, Orientação	Comprimento Característico L
Em torno de uma tubulação horizontal	$L = d_e$
Sobre uma placa vertical ou uma tubulação vertical	$L = H$
Sobre uma placa horizontal	$L = x$

Fonte: Adaptado de Çengel (2011)

Tabela 2: Constantes D da expressão do número de Nusselt em convecção natural para superfícies isotérmicas

Geometria, orientação	D em convecção Laminar	D em convecção forçada
Placa e cilindro verticais	0,59 $10^4 \leq Ra \leq 10^9$	0,10 $10^9 \leq Ra \leq 10^{13}$
Placa horizontal aquecida por baixo	0,27 $10^5 \leq Ra \leq 10^{10}$	
Placa horizontal aquecida por cima	0,54 $10^4 \leq Ra \leq 10^6$	0,15 $10^6 < Ra \leq 10^{11}$
Cilindro horizontal	0,53 $10^4 \leq Ra \leq 10^9$	0,13 $10^9 \leq Ra \leq 10^{12}$

Fonte: Adaptado de Holman (2010)

Tabela 3: Resistência térmica de condução para diferentes geometrias

Geometria	Comprimento Característico L
Parede plana	$\frac{L}{kA}$
Parede cilíndrica	$\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk}$
Parede esférica	$\frac{(1/r_1) - (1/r_2)}{4\pi k}$

Fonte: Adaptado de Incropera (2008)

Tabela 4: Constantes C e n da expressão do número de Nusselt em convecção forçada

Geometria	Valores constantes	Condições
Placa isotérmica	$C = 0,664, n = 0,5$	Escoamento externo $Re < 5 \cdot 10^5; Pr \geq 0,6$
	$C = 0,0296, n = 0,8$	Escoamento externo $5 \cdot 10^5 < Re < 10^8; 0,6 \leq Pr \geq 60$
Cilindro	$C = 0,683, n = 0,466$	Escoamento externo $40 < Re < 4 \cdot 10^3$
	$C = 0,193, n = 0,618$	Escoamento externo $4 \cdot 10^3 < Re < 4 \cdot 10^4$
	$C = 0,027, n = 0,805$	Escoamento externo $4 \cdot 10^4 < Re < 4 \cdot 10^5$
	$C = 0,023, n = 0,8$	Escoamento interno $Re \geq 10^4; 0,6 \leq Pr \geq 60$

Fonte: Adaptado de Incropera (2008)

ANEXO C: HEURÍSTICAS LIGADAS À CONVECÇÃO NATURAL

Convecção Natural							
Parâmetros	Heurísticas						
Características do fluido ($k, \rho, \mu, \beta, \alpha, \gamma, \sigma$)	Agindo sobre o fluxo	Modificando as variáveis de estado	Localmente				
			Globalmente				
			Localmente	Introduzindo uma substância			
	Agindo sobre a geração/ transmissão...	Por modificação dos componentes	Globalmente	Segmentando os componentes	Em componentes idênticos para aumentar a eficiência		
					De homogêneo à heterogêneo (ou vice-versa)		
			Adaptando os componentes	Por evolução dos materiais	Em componentes independentes cada vez menores		
					Com características opostas		
					(Isolante/condutor, rígido/deformável, magnético/não magnético)		
					Para uma padronização ou uma diversificação		
					Utilizando propriedades diferenciais (Isotrópicos, anisotrópicos)		
				Seguindo seus estados (sólido, líquido, gás e vácuo)			
				Mudando de fase			
				Superpondo campos para modificar suas propriedades			
				Com propriedades que mudam ao longo do tempo			
Geometria (A, L, D)	Agindo sobre a geração/ transmissão...	Por modificação dos componentes	Localmente	Introduzindo uma substância			
			Globalmente	Segmentando a estrutura dos componentes	De camadas para multicamadas		
					Em elementos idênticos, em elementos ociosos		
				Segmentando os componentes	Os interpenetrando e associando suas funções (Multi materiais)		
					Até meios porosos e a introdução do vácuo		
			Adaptando os componentes	Por evolução da forma	Em componentes independentes cada vez menores		
					Em componentes idênticos para aumentar a eficiência		
					De homogêneo à heterogêneo (ou vice-versa)		
					Segmentando o fluxo	De um contato plano (campo mecânico uniforme) à contatos pontuais (campo mecânico discreto)	
						De 1D à 2D até 3D	Linear, circular, espiral
				Em uma visão alternativa	Plano, curva		
					Simétrico/Assimétrico		
					Convexo/Côncavo		
				Adaptada aos materiais	De acordo com as solicitações mecânicas		
					De acordo com a fabricação		
				Coerente com a utilização de um revestimento			
				Por memória de forma			
			Otimizada de acordo com os critérios C/CF	Massa			
				Custo			
				Solicitações			
				Dimensão			
Dinâmica do fluxo (P, β)	Agindo sobre o fluxo	Modificando as variáveis de estado	Localmente				
			Globalmente				
	Agindo sobre a geração/ transmissão...	Por modificação dos componentes	Globalmente	Segmentando os componentes	Localizando as ações		
					Introduzindo uma substância		
			Adaptando os componentes	Por evolução dos materiais	Em componentes idênticos para aumentar a eficiência		
					De homogêneo à heterogêneo (ou vice-versa)		
				Segmentando os componentes	Em componentes independentes cada vez menores		
					Para uma padronização ou uma diversificação		
					Utilizando propriedades diferenciais (Isotrópicos, anisotrópicos)		
					Seguindo seus estados (sólido, líquido, gás e vácuo)		
				Mudando de fase			
				Superpondo campos para modificar suas propriedades			
				Com propriedades que mudam ao longo do tempo			
				De 1D à 2D até 3D			
				Linear, circular, espiral			
				Plano, curva			
				Simétrico/Assimétrico			
				Convexo/Côncavo			

ANEXO D: HEURÍSTICAS LIGADAS À CONVECÇÃO FORÇADA

Convecção Forçada										
Parâmetros	Heurísticas									
Governar (Governing)	Agindo sobre a geração/transmissão...	Por modificação dos componentes	Globalmente	Segmentando a estrutura dos componentes	De câmara para multicâmaras. Em elementos idênticos, em elementos ocos (tubos, aberturas). Os interpenetrando e associando suas funções (Multi materiais). Até meios porosos e a introdução do vácuo. Em componentes independentes cada vez menores.					
				Segmentando os componentes	Em elementos idênticos para aumentar a eficácia. De homogêneos à heterogêneos. As características opostas (isolante/condução, rígido/deformável, magnético/não magnético).					
				Segmentando o fluxo	Passando de um contato plano à contatos pontuais. De 1D à 2D até 3D.					
				Adaptando os componentes	Por evolução da forma		De uma visão alternativa. Adaptada aos materiais. Otimizado de acordo com os critérios do CICT.	Linear, circular, espiral. Plano, curvo. Simétrico/asimétrico. Côncavo/Convexo. De acordo com as soldagens, excêntricas. De acordo com a fabricação. Coerente com a utilização de um revestimento. Por renúncia de forma. Materiais. Custo. Soldagens. Dimensão.		
					Mudando a orientação de um componente		Para posições horizontais, verticais... Para utilizar ou compensar a gravidade... Para evitar as contradições. Afastando da zona de conflito. Analisar fluxos e fazer modelização. Por experimentação.			
			Por rearranjo dos componentes	Mudando a orientação de um componente	Para posições horizontais, verticais... Para utilizar ou compensar a gravidade... Para evitar as contradições. Afastando da zona de conflito. Analisar fluxos e fazer modelização. Por experimentação.					
			Por coordenação dos componentes	A partir dos parâmetros pertinentes...						
			Por eliminação de um componente	Eliminar o mais crítico e realizar suas funções através de outros componentes.						
			Por adição de um componente	Controlando uma ação residual.						
			Modificando as variáveis de estado	Globalmente						
Comunicação de fluxo (Flow Interplay)	Agindo sobre a geração/transmissão...	Por modificação dos componentes	Localmente	Introduzindo uma substituição	Em componentes idênticos para aumentar a eficácia. De homogêneo à heterogêneo (ou vice-versa). Em componentes independentes cada vez menores. Com características opostas (isolante/condução, rígido/deformável, magnético/não magnético). Para uma padronização ou uma diversificação. Utilizando propriedades diferentes (isotrópicos, anisotrópicos). Segundo seus estados (sólido, líquido, gás e vácuo). Mudando de fase. Superpondo campos para modificar suas propriedades. Com propriedades que mudam ao longo do tempo.					
			Globalmente	Segmentando os componentes						
				Adaptando os componentes	Por evolução dos materiais					
			Diminuído do fluxo (Flow Cuts)	Agindo sobre o fluxo	Por modificação dos componentes		Adaptando os componentes	Discontinuando o componente	Por passagem de um sistema rígido à um sistema articulado à um sistema flexível/deformável à um sistema fluido à um sistema com campos controlados. Passando de um sistema rígido à um sistema deformável por modificação do comportamento dos componentes, de tração ou compressão simples à tração + compressão em segunda ordem.	
								Ajustando os ritmos	Por acoplamento de fase, em oposição de fase, em ressonância controlada ou em compensação. Transformando uma ação contínua em uma ação periódica ou pulsada. Por modificação da frequência ou da amplitude de uma energia periódica ou de uma energia periódica.	
								Modificando os movimentos entre os componentes	Por substituição de um movimento retilíneo por um movimento de rotação (ou inversamente). Por introdução de movimentos sinuosos. Substituindo o deslocamento pelo rolamento (ou inversamente). Para não lutar contra a gravidade (ou os efeitos centrífugos) ou utilizar a gravidade (ou os efeitos centrífugos).	
								Seguindo a lógica MATHEM de evolução dos campos	Pela substituição (ou superposição) de um fluxo mecânico por um outro fluxo do tipo mecânico, térmico, químico, óptico, acústico... Pela utilização (ou superposição) de um campo magnético, elétrico ou eletromagnético. Por evolução dos campos de estacionários à dinâmicos, de constante à variável de abstrato à estruturado.	
							Por coordenação dos componentes	Seguindo a lógica MATHEM de evolução dos campos	Substituindo (ou superpondo) um fluxo mecânico por um outro fluxo mecânico, térmico, químico, óptico, acústico... Utilizando (ou superpondo) um campo magnético elétrico ou eletromagnético. Por evolução dos campos estacionários à dinâmico, de constante à variável de abstrato à estruturado. Por acoplamento de fase, em oposição de fase, em ressonância acoplada ou em compensação.	
								Ajustando os ritmos	Transformando uma ação contínua em uma ação periódica ou pulsada. Por modificação da frequência e da amplitude de uma ação ou de uma energia periódica. Por aumento das frequências de vibração até as frequências ultrassônicas.	
								Por evolução dos campos estacionários à dinâmico, de constante à variável, de abstrato à estruturado.		
En agissant sur les flux	Mudando a natureza do fluxo									

ANEXO E: HEURÍSTICAS LIGADAS À CONDUÇÃO TÉRMICA

Condução Térmica											
Parâmetros	Heurísticas										
Temperatura (T)	Agindo sobre o fluxo	Modificando as variáveis de estado	Localmente Globalmente Localmente	Introduzindo uma substância							
Características da superfície (A, Δx, k)	Agindo sobre a geração/ transmissão...	Por modificação dos componentes	Globalmente	Segmentando a estrutura dos componentes							
				Segmentando os componentes							
					Segmentando o fluxo						
						Por evolução dos materiais					
							Adaptando os componentes				
								Por evolução da forma			
									Otimizada de acordo com os critérios C&CF		
										Por rearranjo dos componentes	
											Por coordenação dos componentes
		Por adição de um componente									
			Localmente	De camadas para multicamadas Em elementos idênticos, em elementos ocos Os interpenetrando e associando à suas funções (Multi materiais). Até meios porosos e a introdução do vácuo Em componentes independentes cada vez menores Em diferentes componentes com funções idênticas, com funções diferentes, com funções inversas ou opostas. Em componentes idênticos para aumentar a eficiência Com características opostas (Isolante/condutor, rígido/deformável, magnético/não magnético) Introduzindo um fluxo intermediário permanente ou não permanente (de acordo com a situação da vida e os recursos disponíveis). Passando de um contato plano à contatos pontuais. Para uma padronização ou uma diversificação Para materiais porosos, em seguida, para materiais múltiplos Utilizando revestimentos com propriedades diferentes De custosos à baratos (ou inversamente) Utilizando propriedades diferenciais (Isotrópicos, anisotrópicos) Seguindo seus estados (sólido, líquido, gás e vácuo). Mudando de fase. Sobrepondo campos para modificar suas propriedades Com propriedades que mudam ao longo do tempo							
			Globalmente		Linear, circular, espiral Plano, curvo Simétrico/Assimétrico Convexo/Côncavo						
			Localmente		De acordo com as solicitações mecânicas De acordo com a fabricação Coerente com a utilização de um revestimento Por memória de forma						
			Globalmente		Massa Custo Solicitações Dimensão						
			Localmente		Horizontal, vertical, inclinada, invertida						
			Globalmente		Afastando da zona de conflito						
			Localmente		Análise física fina e modelização Por experimentação						
			Globalmente		Eliminar o mais crítico e realizar suas funções úteis através de outros componentes						
			Localmente		Contornando uma ação prejudicial						