

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MICHEL NIKOLAOS STAMOULIS

ALGORITMO GENÉTICO APLICADO À SELEÇÃO MULTICRITÉRIOS
DE ISOLANTES TÉRMICOS EM EDIFICAÇÕES

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2018

MICHEL NIKOLAOS STAMOULIS

**ALGORITMO GENÉTICO APLICADO À SELEÇÃO MULTICRITÉRIOS
DE ISOLANTES TÉRMICOS EM EDIFICAÇÕES**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa. Área de Concentração: Térmica e Fluidos.

Orientador: Prof. Dr. Gerson Henrique dos Santos

Coorientador: Prof. Dr. Angelo Marcelo Tusset

PONTA GROSSA

2018

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa
n.04/19

S783 Stamoulis, Michel Nikolaos

Algoritmo genético aplicado à seleção multicritérios de isolantes térmicos em
edificações. / Michel Nikolaos Stamoulis. 2019.

65 f.; il. 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Gerson Henrique dos Santos

Coorientador: Prof. Dr. Angelo Marcelo Tusset

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa,
2019.

1. Algoritmos genéticos. 2. Materiais isolantes. 3. Conforto humano. 4. Eficiência
industrial. 5. Processo decisório por critério múltiplo. I. Santos, Gerson Henrique dos. II.
Tusset, Angelo Marcelo. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. IV. Título.

CDD 620.1

FOLHA DE APROVAÇÃO

Título de Dissertação Nº 24/2018

ALGORITMO GENÉTICO APLICADO À SELEÇÃO MULTICRITÉRIOS DE ISOLANTES TÉRMICOS EM EDIFICAÇÕES

por

Michel Nikolaos Stamoulis

Esta dissertação foi apresentada às 14 horas do dia **28 de setembro de 2018** como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA, com Área de Concentração em Térmica e Fluidos, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Prof. Dr. Roberto Zanetti Freire
Engenharia de Produção e Sistemas –
(PUC-PR)

Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne
(UTFPR)

Prof. Dr. Gerson Henrique dos Santos
(UTFPR) - *Orientador*



Visto do Coordenador:

**Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena
Pukasiewicz**
Coordenador do PPGEM
UTFPR – Câmpus Ponta Grossa

Dedico este trabalho à minha família,
pelo apoio incondicional nestes anos
de estudo e à Deus, por tornar tudo
possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me dado a vida e a oportunidade de cursar o Mestrado.

Agradeço a minha esposa Karla Volaco Gonzalez Stamoulis por todo apoio que me deu nessa minha jornada e suporte para seguir adiante devido várias circunstâncias adversas e à minha filha Marcela Gonzalez Stamoulis que com sua energia alegria a minha vida.

Aos meus pais, sogros e familiares e em especial ao Dr. Alexei Volaco pelos momentos de incentivo.

Ao professor Dr. Gerson Henrique dos Santos, pela orientação, amizade e confiança quem me ensinou a forma simples e objetiva de fazer pesquisa.

Ao professor Dr. Angelo Marcelo Tusset pela coorientação neste trabalho.

Aos professores Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne e Dr. Roberto Zanetti Freire pela disponibilidade da tarefa de avaliar esse trabalho.

Aos professores Luiz Eduardo Melo Lima e Thiago Antonini Alves por contribuírem nessa minha jornada do mestrado.

Ao amigo Wagner Barth Lenz pela grande contribuição nesse trabalho na parte computacional e programação. Aos meus amigos de caminhada Douglas Pereira Vasconcellos, Carlos Henrique Diedrich, Gabriel Nunes Maia Junior e a todos os amigos que adquiri durante esse período em que estive na UTFPR. Desejo sucesso a todos.

*“Engineering is quite different from science.
Scientists try to understand nature.
Engineers try to make things that do not
exist in nature. Engineers stress invention.”*

(Yuan-Cheng Fung)

RESUMO

STAMOULIS, Michel Nikolaos. **Algoritmo genético aplicado à seleção multicritérios de isolantes térmicos em edificações**. 2018. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018.

A necessidade global de redução do consumo de energia, frente aos problemas econômicos e impactos ambientais em sua geração é responsável por estimular diversas pesquisas com o intuito de melhorar a eficiência energética em edificações. Entre as estratégias utilizadas para aumentar esta eficiência, destaca-se a aplicação de isolantes térmicos no envoltório das edificações. Deste modo, visando contribuir com a melhoria da relação custo x benefício, este estudo tem como objetivo fornecer uma ferramenta de otimização para a escolha do melhor isolante térmico para ser aplicado no telhado de uma edificação industrial do tipo galpão. Além do conforto térmico e custos levados em consideração na escolha, algumas propriedades higrotérmicas também são analisadas, na obtenção do melhor tipo do isolante. Para o uso da técnica de otimização, realizaram-se várias simulações termo-energéticas do ambiente utilizando-se o *software* DOMUS[®]. Neste caso, aplicaram-se 4 tipos de materiais isolantes (poliuretano, poliestireno expandido, lã de rocha e lã de vidro), combinando 10 espessuras diferentes de 0,5 cm a 5 cm, com a finalidade de obter diferentes índices de conforto térmico (PPD - *Predicted Percentage of Dissatisfied*) e carga térmica. Posteriormente, realizou-se o ranqueamento do melhor isolante, a partir dos pesos atribuídos aos parâmetros na função objetiva, utilizando a técnica do algoritmo genético (AG) aplicada à seleção multicritérios, sendo esta implementada no *software* MATLAB[®]. Os resultados de otimização mostraram que o isolante de poliuretano (PU), aplicado com uma espessura de 1 cm, é a melhor opção de instalação no telhado, considerando-se os parâmetros funcionais da edificação, atividade metabólica do ocupante, índice de vestimenta e condições de contorno em que impacta no índice de conforto térmico. Levando-se em conta a norma NBR 15220 que estabelece um coeficiente global de $2 \text{ W/m}^2\text{K}$ para as coberturas com isolamento, a lã de rocha com 2 cm mostrou-se como a melhor escolha. Deste modo, observou-se que a seleção ótima do isolante térmico pode variar em acordo com a função objetiva aplicada e a metodologia para análise de tomada de decisão. Além disso, a utilização do DOMUS[®] combinado com algoritmos de otimização mostrou-se uma ferramenta assertiva na seleção de materiais, promovendo a redução de custos e aumento de eficiência energética em edificações.

Palavras-chave: Isolantes térmicos. Otimização. Algoritmo genético. Seleção multicritérios.

ABSTRACT

STAMOULIS, Michel Nikolaos. **Genetic algorithm applied to multi-criteria selection of buildings thermal insulation**. 2018. 65 p. Thesis (Master in Mechanical Engineering) - Federal University of Technology - Paraná, Ponta Grossa, 2018.

The global necessity of energy consumption reduction, in front of the economic and environment impacts issues due the electricity energy generation is responsible to motivate researches to improving the energy efficiency of buildings. Among the strategies used to improve this energy efficiency, stands out the application of optimized thermal insulation on buildings walls. Thus, in order to contribute to the improvement of the cost x benefit relation, this study aims to provide an optimization tooling for insulation selection choice applied on industrial shed building roof. Beyond the thermal comfort and high cost considered on selection process, some hygrothermic properties also has been analysed to obtain the best insulation layer option. To implement this optimization technique, a several thermo-energetic simulations of the environment were performed using the DOMUS[®] software applying 4 types of insulation material (Polyurethane, Expanded Polystyrene, Rockwool and Glass Wool) combining 10 thickness ranging from 0.5 cm to 5 cm, with purpose of obtaining different thermal comfort indexes (PPD - Predicted Percentage of Dissatisfied) and thermal load. Posteriorly, was executed the best insulation ranking from the weights assigned to the parameters in the objective function, using the technique of the genetic algorithm (AG) applied to the multicriteria selection, being implemented in MATLAB[®] software. The optimization results showed that the polyurethane (PU) insulation, applied with a thickness of 1 cm, is the best installation option on the roof, considering the building functional parameters, occupant metabolic activity, clothes index and contour conditions in which it affects the thermal comfort index. Taking into account the NBR 15220 standard that establishes a global coefficient of $2 \text{ W} / \text{m}^2\text{K}$ for the insulated roof, the Rock Wool with 2 cm thickness proved to be the best choice of insulation layer material. In this way, it was observed that the optimum selection of the thermal insulation could vary according to the objective function applied and the methodology for decision-making analysis. In addition, the use of DOMUS[®] combined with optimization algorithms proved to be an assertive tool in the selection of materials, promoting cost reduction and increased energy efficiency in buildings.

Keywords: Thermal insulation. Optimization. Genetic algorithm. Multi-Criteria selection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação do custo ótimo de isolante	20
Figura 2 - Operação de <i>crossover</i>	28
Figura 3 - Operação de mutação.....	28
Figura 4 - Operações genéticas	29
Figura 5 - Elaboração do modelo no DOMUS®	33
Figura 6 - Fluxograma da metodologia de simulação.....	36
Figura 7 - Fluxograma para a implementação do AG.....	39
Figura 8 - Fluxograma da metodologia de otimização.....	41

LISTA DE GRÁFICO

Gráfico 1 - Valores de conforto térmico para PU.....	42
Gráfico 2 - Valores conforto térmico para EPS.....	43
Gráfico 3 - Valores de PPD para lã de rocha	44
Gráfico 4 - Valores de PPD para lã de vidro	45
Gráfico 5 - Valores de PPD para o PU aplicado em Recife.....	45
Gráfico 6 - Efeito da vestimenta no PPD.....	46
Gráfico 7 - Função objetiva para poliuretano (PU)	47
Gráfico 8 - Função objetiva para poliestireno expandido (EPS).....	48
Gráfico 9 - Função objetiva para lã de rocha.....	48
Gráfico 10 - Função objetiva para lã de vidro.....	49
Gráfico 11 - Ranqueamento dos Isolantes	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Indicadores de conforto térmico e sensação térmica	24
Tabela 2 - Características dos principais isolantes térmicos	34
Tabela 3 - Sumário das características construtivas da edificação	34
Tabela 4 - Parâmetros para avaliação do conforto térmico	35
Tabela 5 - Custos dos isolantes térmicos	37
Tabela 6 - Matriz de valores dos fatores, peso e valor máximo	40
Tabela 7 - Valores da função objetiva para isolantes térmicos	49
Tabela 8 - Resultados de convergência do AG	51
Tabela 9 - Espessura isolantes calculados conforme NBR 15220	52
Tabela 10 - Ranking dos isolantes conforme NBR 15220	53
Tabela 11 - Ranqueamento do isolante ótimo	60

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileiras de Normas Técnicas
AG	Algoritmo Genético
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
HVAC	<i>Heating, Refrigerating and Air Conditioning</i>
MCDA	<i>Multi-Criteria Decision Analysis</i>
NBR	Norma Brasileira
PCM	<i>Phase Change Material</i>
PDD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>
PE	Poliestireno
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
PU	Poliuretano

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Área de transferência de calor	[m ²]
c_{ar}	Calor específico do ar	[J/kg.K]
$C_{p_{iso}}$	Calor específico do material isolante	[J/kg.K]
C_{res}	Perda de calor sensível pela respiração	[W/m ²]
$Custo_{isol}$	Custo do material isolante térmico	[R\$/cm]
\dot{E}_t	Taxa de energia que atravessa envoltório da edificação	[W]
\dot{E}_g	Taxa de energia gerada dentro da edificação	[W]
f_f	Fator de forma	[-]
K_{cl}	Condução de calor da pele até a superfície externa das roupas	[W/m ²]
E_{sk}	Fluxo de perda de calor latente pela pele, através da evaporação	[W/m ²]
E_{res}	Fluxo de perda de calor latente pela respiração	[W/m ²]
h_{ext}	Coefficiente de transferência de calor por convecção do lado externo do envoltório	[W/m ² .K]
I_{cl}	Fator de vestimenta ou índice de vestimenta	[clo]
K_{iso}	Condutividade térmica do material isolante	[W/m ² .K]
l_{iso}	Espessura do material isolante térmico	[cm]
L	Carga térmica do ambiente interno	[W/m ²]
M	Fluxo metabólico de produção de calor	[met]
\dot{m}_{inf}	Taxa de massa de ar por infiltração	[kg / s]
\dot{m}_{vent}	Taxa de massa de ar por meio de ventilação	[kg / s]
\dot{m}_b	Taxa de vapor água da respiração dos ocupantes	[kg / s]
\dot{m}_{ger}	Taxa de geração de vapor interno	[kg / s]
p_a	Pressão de vapor no ar	[kPa]
PMV	Voto Medio Estimado	[-]
$PPD_{isol}(l)$	Índice de conforto térmico relativo a espessura da parede	[-]
$\dot{Q}(t)$	Fluxo de calor que atravessa o envoltório da edificação	[W]
q_r	Radiação solar absorvida	[W/m ²]

R_{lw}	Taxa de resistência térmica de radiação por ondas longas	[-]
t_a	Temperatura do ar	[°C ou K]
T_{bs}	Temperatura de bulbo seco ou temperatura do ambiente interno	[°C ou K]
T_{cl}	Temperatura da superfície da vestimenta	[°C ou K]
T_{ext}	Temperatura externa do envoltório	[°C ou K]
T_{int}	Temperatura do ambiente interno	[°C ou K]
T_n	Temperatura da superfície interna do envoltório	[°C ou K]
T_{sup}	Temperatura de outras superfícies internas	[°C ou K]
T_{rm}	Temperatura radiante média	[°C ou K]
V_{air}	Volume do ambiente	[m ³]
W_c	Trabalho mecânico desenvolvido pelo corpo	[W/m ²]
W_{ext}	Razão de umidade externa	[kg _{agua} /kg _{ar}]
W_{int}	Razão de umidade interna	[kg _{agua} /kg _{ar}]

LETRAS GREGAS

α	Difusividade Térmica	$[m^2/s]$
λ	Condutividade térmica	$[W/m.K]$
$(\varepsilon)_{teto}$	Emissividade de onda longa do teto	$[-]$
μ_{iso}	Fator de resistência difusiva	$[-]$
ρ_{ar}	Densidade do ar	$[kg/m^3]$
ρ_{iso}	Densidade do material isolante	$[kg/m^3]$
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$[W/m^2K^4]$

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS.....	17
1.1.1 Objetivo Geral.....	17
1.1.2 Objetivos Específicos.....	17
1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 CARACTERÍSTICAS DO ISOLAMENTO TÉRMICO.....	19
2.2 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO APLICADAS NO ENVOLTÓRIO DAS EDIFICAÇÕES.....	20
2.3 INDICADORES DE CONFORTO TÉRMICO.....	22
2.3.1 Modelo Adaptativo de Conforto Térmico.....	23
2.3.2 Modelo Balanço Térmico do Corpo Humano.....	23
2.4 ALGORITMOS GENÉTICOS (AG).....	26
2.4.1 Operações Genéticas.....	27
2.4.2 Escolha de Parâmetros.....	29
2.4.2 Análise de Convergência.....	30
2.5 SIMULAÇÕES TERMO-ENERGÉTICA DE AMBIENTES.....	30
3 METODOLOGIA	33
3.1 PROCEDIMENTOS DE SIMULAÇÃO.....	33
3.2 METODOLOGIA APLICADA NA OTIMIZAÇÃO.....	35
3.3 ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIOS.....	36
3.4 PROCEDIMENTO DE OTIMIZAÇÃO.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1 RESULTADOS DOS INDICADORES DE CONFORTO TÉRMICO (PPD).....	42
4.2 RESULTADOS DA FUNÇÃO OBJETIVA.....	47
4.3 RANQUEAMENTO E SELEÇÃO DO ISOLANTE ÓTIMO.....	50
5 CONCLUSÕES	54
REFERÊNCIAS	56
APÊNDICE A – RANQUEAMENTO DO ISOLANTE ÓTIMO	59
APÊNDICE B – CÓDIGO ALGORITMO GENÉTICO IMPLEMENTADO NO MATLAB®	62

1 INTRODUÇÃO

A necessidade humana de climatização, associada ao desenvolvimento tecnológico no mundo moderno, tem causado um significativo aumento do consumo de energia mundial. Nesse contexto, o setor de edificações apresenta uma parcela significativa no consumo de energia, principalmente na utilização de equipamentos eletromecânicos empregados nos processos de aquecimento e refrigeração. Segundo Baniassadi et al (2016), a redução da quantidade de energia gasta em sistemas de HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioned*) é um dos passos mais importantes para a redução da demanda total da energia global.

Diante do problema de reduzir o consumo de energia elétrica nas edificações devido aos sistemas de HVAC, este trabalho busca analisar a aplicação ótima de isolantes térmicos em cobertura das construções, como estratégia para redução de consumo de energia e melhoria do conforto térmico para os usuários. Com este enfoque, Ozel (2008) afirma que o uso de revestimentos isolantes em paredes e telhados resulta em uma redução substancial das cargas de refrigeração e aquecimento, e conseqüentemente, no custo de operação do sistema de condicionamento de ar, especialmente em ambiente em condições climáticas severas.

Várias pesquisas encontradas na literatura visam promover condições de conforto térmico nos ambientes internos das edificações, com menor consumo de energia. Dubrow e Krarti (2010) utilizaram algoritmo genético como ferramenta de simulação para otimização de formas geométricas de edifícios residenciais.

Assim, nos anos 2000, a maioria das pesquisas sobre a melhoria na eficiência energética das edificações, utilizando técnicas de otimização, eram focadas nas formas arquitetônicas dos projetos. Somente na última década, pesquisas relacionadas a estratégias para a redução do consumo de energia através da aplicação de isolantes no envoltório das edificações começaram a ser difundidas. Entre estes trabalhos pode-se citar o de Ferrara et al (2015), que em estudo similar, propuseram analisar o consumo energéticos das edificações e o custo do ciclo de vida de materiais isolantes utilizando algoritmos genéticos, a partir de um banco de dados de casas residenciais na Itália.

Deste modo, procurou-se desenvolver neste trabalho uma ferramenta de otimização, através da técnica do algoritmo genético aplicada à seleção multicritérios, no intuito de auxiliar na obtenção do melhor tipo de isolante disponível no mercado

brasileiro utilizado em telhados para aplicação industrial de uma edificação do tipo galpão. Nesta seleção, levaram-se em consideração o conforto térmico, custo do isolante, a difusividade térmica e a resistência ao transporte de vapor de água, sendo este importante na determinação do crescimento de mofo no isolante. Para a obtenção de um banco de dados relacionado ao comportamento termo-energético da edificação, realizaram-se simulações utilizando-se o *software* DOMUS®. Neste caso, aplicaram-se 4 tipos de material isolante (poliuretano, poliestireno expandido, lã de rocha e lã de vidro), combinando 10 espessuras diferentes, com a finalidade de obter diferentes índices de conforto térmico (PPD - *Predicted Percentage of Dissatisfied*) e carga térmica, considerando o arquivo climático da cidade de Curitiba (PR). Verificou-se também o efeito de um clima quente (Recife - PE) no PPD, utilizando o PU como isolante, com duas espessuras diferentes. No final, realizou-se o ranqueamento do melhor isolante, considerando os pesos atribuídos a cada um dos parâmetros na função objetiva.

1.1 OBJETIVOS

Na sequência apresentam-se os objetivos do trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é elaborar uma ferramenta de otimização, utilizando a técnica do algoritmo genético (AG) baseada na seleção multicritérios, com o intuito de auxiliar na seleção de isolantes térmicos, aplicados em telhados de uma edificação industrial, tipo galpão.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Obter índices de conforto térmico de uma edificação industrial, utilizando o *software* DOMUS® para a simulação termo-energética de edificações,

aplicando-se diferentes tipos e espessura de isolantes utilizados comercialmente em telhados;

- Implementar a ferramenta de otimização no *software* MATLAB®;
- Elaborar um ranqueamento dos isolantes térmicos simulados, fornecendo as melhores soluções aplicadas na cobertura industrial analisada;
- Classificar os isolantes ótimos estudados em acordo com a norma específica para isolamento em cobertura (ABNT, 2003a).

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 2 apresentará a fundamentação teórica sobre as características dos isolantes térmicos, os principais tipos encontrados comercialmente e suas propriedades térmicas de interesse na eficiência energética nas edificações. Posteriormente, a descrição dos elementos de projetos construtivos que afetam a eficiência e os parâmetros físicos que serão considerados nos cálculos do conforto térmico. No final do capítulo, será apresentada a revisão bibliográfica sobre os conceitos de simulação termo-energética e sobre a técnica de otimização utilizada neste trabalho.

O capítulo 3 descreverá o modelo matemático usado pelo *software* de simulação termo-energética de edificações (DOMUS®), as condições de contorno utilizadas, os parâmetros termofísicos, a metodologia adotada na aplicação do algoritmo de otimização, os procedimentos realizados na simulação para obter o índice de conforto térmico, os conceitos da MCDA (*Multi-Criteria Decision Analysis*) e os procedimentos de otimização.

O capítulo 4 apresentará os resultados obtidos através da ferramenta de otimização, apresentando um ranqueamento entre os isolantes, levando-se em conta os pesos atribuídos a cada parâmetro na análise.

No capítulo 5 serão apresentadas as conclusões do trabalho. No apêndice A será apresentada a tabela do ranqueamento dos isolantes na ordem de melhor resultado e no apêndice B, apresenta-se a descrição do algoritmo genético implementado no *software* MATLAB®.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas as características termofísicas do isolamento, uma revisão dos trabalhos relacionados à aplicação de técnicas de otimização no envoltório das edificações, os conceitos dos índices de conforto térmico e o conceito do algoritmo genético (AG).

2.1 CARACTERÍSTICAS DO ISOLAMENTO TÉRMICO

Um procedimento que pode ser adotado para reduzir a carga térmica de um ambiente, e conseqüentemente, a potência dos equipamentos de HVAC, caso sejam necessários, é a utilização de isolantes térmicos no envoltório das edificações.

Segundo Cavalcanti (2011) a maioria dos isolantes térmicos possui uma grande quantidade de ar entre suas fibras ou em pequenas células formadas nos processos de expansão, o que lhes conferem uma alta resistência térmica. Os produtos utilizados comercialmente para isolar termicamente as construções de maneira geral, são divididos em dois tipos: isolantes resistivos, que dificultam a transferência de calor por condução e os isolantes refletivos ou barreiras irradiantes, que melhoram o isolamento aumentando a resistência à passagem do calor por radiação.

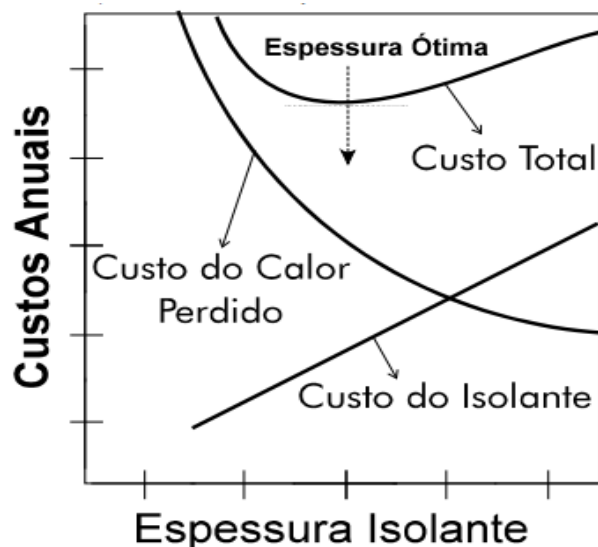
No que tange ao desenvolvimento de materiais é apresentado em um estudo mais específico, realizado por Baniassadi et al (2016). Neste trabalho os autores realizaram experimentos com PCM (*Phase Change Material*), que são materiais capazes de armazenar e liberar calor dentro de uma determinada faixa de temperatura, aumentando a inércia da edificação e estabilizando o clima interno.

Em uma análise de otimização econômica de isolamentos térmicos, a medida em que se aumenta a espessura do isolante, a perda de calor na superfície diminui e em contrapartida, ocorre um aumento no custo do isolamento. A espessura mais econômica de isolamento é aquela para qual a soma dos custos da perda de calor e do custo de isolamento, seja mínima.

De acordo com Cardoso (2006), a soma dos custos (custo do calor perdido adicionado ao custo do isolamento) resultará em uma curva que deverá passar por um mínimo, ou seja, para determinada espessura de isolante haverá um custo mínimo

anual. Colocando em um gráfico a espessura do isolamento e o custo anual, obtém-se uma curva decrescente para o custo do calor perdido e uma curva ascendente para o custo do isolamento. A espessura ótima do isolante é aquela que apresenta um custo total (custo do calor perdido e custo do isolante) mínimo, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Relação do custo ótimo de isolante



Fonte: Cardoso (2006)

Analicamente, considerando o custo do isolamento nas várias espessuras calculadas, determinam-se os custos anuais do isolamento desde que se considere o tempo de amortização para a instalação.

2.2 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO APLICADAS NO ENVOLTÓRIO DAS EDIFICAÇÕES

O projeto de uma edificação energeticamente eficiente deve levar em conta alguns fatores como a localização geográfica, a orientação da edificação e o clima local. Além disso, fatores internos também possuem grande importância, como a finalidade da edificação, períodos de ocupação e as atividades desenvolvidas pelos ocupantes. Outras condições determinantes neste projeto são as características do envoltório, como as áreas de paredes e janelas, materiais utilizados e suas propriedades higrotérmicas. Neste contexto, vários trabalhos têm sido desenvolvidos com o intuito obter o melhor desempenho termo-energético do envoltório utilizando técnicas de otimização.

Bouchlaghem e Letherman (1990), realizaram as primeiras pesquisas em otimização do envelope e performance térmica para manutenção da temperatura interna da edificação aplicando algoritmos complexos híbrido-simplex e não randômico para os cálculos de otimização.

Conforme apresentado anteriormente, os anos 2000 foram marcados por pesquisas orientadas para a forma arquitetônica dos projetos para melhoria na eficiência energética das edificações. As simulações eram direcionadas utilizando modelos matemáticos e algoritmos de otimização focados nas metodologias de pesquisa direta e população estocástica (algoritmo evolucionário) que foi mais difundido. Ghisi e Tinker (2001) apresentaram um estudo de otimização do fechamento de edificações através de uma relação entre paredes e janelas em edifícios de escritórios. Eles executaram aproximadamente 17.600 simulações tendo como referência os princípios de projetos de envelopes construtivos em edificações no Brasil e na Inglaterra. Ainda nessa mesma época, Depecker et al (2001) conduziram estudos sobre *layouts* ótimos de edificações em diferentes condições climáticas e conseguiram definir os menores valores de carga térmica e coeficientes de forma que impactam a eficiência energética em edificações.

Coley e Schukat (2002) utilizaram o algoritmo genético (AG) na solução de problemas de otimização em edificações. Eles inicialmente construíram um modelo térmico com apenas 5 variáveis e aplicaram o AG com o intuito de obter o consumo energético mínimo anual. Wang, Rivard e Zmeureanu (2005) aplicaram algoritmo genético com o objetivo de encontrar uma solução ótima para diferentes orientações e materiais utilizados nas edificações.

Freire, Oliveira e Mendes (2008) apresentaram um estudo de otimização do conforto térmico de um ambiente, através do controle de um sistema de HVAC, baseado no modelo MBPC (*Model Based Predictive Control*). Em um outro estudo, Hamdy, Hasan e Siren (2011) verificaram a possibilidade de integração do conforto térmico à eficiência energética através de um processo de otimização. Eles adotaram o algoritmo genético como ferramenta de otimização implementada no MATLAB® para implementação dos dados em um *software* de simulação de edificação. Os resultados encontrados indicaram um valor ótimo de carga térmica visando a economia de energia aliada ao conforto térmico como método de otimização multi-objetivos, para direcionar projetos residenciais na Finlândia. Outros modelos, baseados em algoritmo genético, podem ser encontrados para otimizar os parâmetros de conforto térmico.

Stavrakakis, Androutsopoulos e Vyörykka (2016), conduziram simulações com finalidade de otimizar o conforto térmico em modelos de edificações com janelas abertas, utilizando o algoritmo genético, baseado em *meta-model*.

Em um outro trabalho, Hamdy, Hasan e Siren (2013) aplicaram o método de otimização baseado em multicritérios, para minimizar o consumo de energia associando-o a uma espessura ótima do isolamento térmico.

Assim, com o desenvolvimento das ferramentas de simulação, grandes esforços têm sido realizados visando à redução do tempo computacional. Neste contexto, Yu et al (2015) aplicaram o algoritmo genético com alimentação em rede neural, a fim de reduzir o erro no cálculo do conforto térmico associado ao menor consumo de energia.

2.3 INDICADORES DE CONFORTO TÉRMICO

As pesquisas para determinação dos índices de conforto térmico podem ser caracterizadas sob duas abordagens: o modelo de balanço térmico e o modelo adaptativo.

A abordagem baseada no modelo de balanço térmico do corpo humano consiste em explicar o conforto térmico das pessoas através da aplicação da física e fisiologia nas trocas de calor existente entre o corpo e o entorno. Para isso são desenvolvidos modelos térmicos que representam de forma empírica as trocas de calor entre o corpo e o ambiente. Os índices baseados nesse modelo são originados a partir de pesquisas realizadas em ambientes fechados com condições climáticas estáveis, assumindo-se que o índice representa as respostas das pessoas em condições variáveis da vida diária.

A abordagem do modelo adaptativo busca estimar as condições de conforto das pessoas através de pesquisas em campo, em situações reais, no ambiente construído. Esta abordagem sugere que as pessoas são mais tolerantes às variações de temperatura em virtude do caráter “adaptativo”. Neste caso, elas assumem no momento em que se adaptam as condições ambientais, ou seja, se uma mudança ocorre para gerar desconforto, as pessoas reagem de forma a restabelecê-lo conforme modelo estabelecido por Nicol e Humphreys (2002).

2.3.1 Modelo Adaptativo de Conforto Térmico

Conforme Mui e Chan (2003), os modelos adaptativos de conforto térmico são representados por equações lineares que descrevem a temperatura interna de projeto ou uma variação aceitável para as condições climáticas de um determinado lugar, podendo ainda considerar o sistema de condicionamento artificial da edificação.

Humphreys e Nicol (1973) formularam o primeiro modelo adaptativo de conforto térmico que considerava a sensação de calor como parte do sistema termo-regulatório do corpo, o qual incorporaria aspectos fisiológicos e comportamentais. Os estudos para o desenvolvimento desse modelo foram realizados principalmente em escolas e em espaços abertos. Ainda, Auliciems e Szokolay (2007) consideraram aspectos fisiológicos e expectativas dos usuários das edificações através de modelos baseados nos parâmetros de temperatura de neutralidade, variando em função da temperatura média mensal externa.

Finalmente, no início dos anos 2000, Dear e Brager (2002) apresentaram um modelo adaptativo, que foi incorporado à ASHRAE 55-2004, em que se estabeleciam limites de conforto para edificações naturalmente ventiladas.

2.3.2 Modelo Balanço Térmico do Corpo Humano

Para aplicar o modelo de balanço térmico, é necessário diferenciar as definições de conforto térmico e neutralidade térmica. Conforto térmico é definido como: “a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico” (ASHRAE, 2003) e neutralidade térmica como: “a condição na qual uma pessoa não prefira nem calor nem frio no ambiente ao seu redor” (FANGER, 1972).

Para Xavier, Pinto e Hatakeyama (2015), a neutralidade térmica é o balanço entre o ambiente e o homem e embora necessária, não é suficiente para a verificação do conforto térmico. Tanabe e Kimura (1987) definem neutralidade térmica como sendo “o estado da mente que expressa satisfação com a temperatura do corpo como um todo”. Em um ambiente considerado termicamente confortável, não se sente nenhum tipo de sensação térmica (frio ou calor), ou seja, a pessoa presente em um ambiente nestas condições apresenta uma neutralidade térmica.

A partir de estudos realizados na Europa e nos Estados Unidos em ambientes fechados, Fanger (1972) estabeleceu uma equação que correlaciona a sensação térmica com quatro variáveis ambientais (temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade) e duas variáveis pessoais (vestimenta e atividade metabólica). Deste modo, a estimativa de conforto térmico foi feita através dos índices denominados de voto médio estimado (PMV) e da percentagem de pessoas insatisfeitas (PPD), onde mostram a média da sensação térmica de um grupo de pessoas expostas ao mesmo ambiente.

O índice PMV pode variar de -3 a +3, onde cada ponto representa a sensação da pessoa relacionada ao ambiente em que se encontra. Esta escala pode ser relacionada à percentagem de pessoas insatisfeitas, conforme descrita na Tabela 1:

Tabela 1 - Indicadores de conforto térmico e sensação térmica

PMV	Sensação Térmica	PPD (%)
+3	Muito quente	100
+2	Quente	75
+1	Levemente quente	25
0	Neutra	5
-1	Levemente Frio	25
-2	Frio	75
-3	Muito Frio	100

Fonte: Fanger (1972)

No modelo desenvolvido por Fanger (1972), considera-se que o corpo humano está em equilíbrio térmico em um ambiente, não ocorrendo acúmulo de energia em seu interior. Deste modo, a equação do balanço de energia entre o corpo e o ambiente, considerando mecanismos de perda de calor por convecção, radiação e evaporação, pode ser escrita como:

$$(M - W) - C_{res} - E_{sk} - E_{res} = K_{cl} = C + R \quad (1)$$

onde M é o fluxo metabólico de produção de calor (met), W , o trabalho mecânico desenvolvido pelo corpo (W/m^2), C_{res} , a perda de calor sensível pela respiração (W/m^2), E_{sk} , a perda de calor latente pela pele, através da evaporação (W/m^2), E_{res} , a perda de calor latente pela respiração (W/m^2), K_{cl} , a condução de calor da pele até a superfície externa das roupas (W/m^2) e $C + R$, as perdas de calor sensível pela pele (W/m^2) por convecção e radiação.

As perdas parciais de calor pela pele através da respiração e por condução, são expressas por equações empíricas que quando substituídas na equação do balanço térmico em função das variáveis ambientais e pessoais, resultam na seguinte equação:

$$\begin{aligned}
 (M - W) - 3,05[5,73 - 0,007(M - W) - p_a] - 0,42[(M - W) - 58,15] \\
 - 0,0173M(5,87 - p_a) - 0,0014M(34 - t_a) \\
 = \frac{[35,7 - 0,028(M - W)] - t_{cl}}{0,155 \cdot I_{cl}} \\
 = 3,9 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)
 \end{aligned} \quad (2)$$

onde p_a representa a pressão de vapor no ar (kPa), t_a , a temperatura do ar (°C), t_{cl} , a temperatura superficial das roupas (°C), I_{cl} , o isolamento térmico das roupas (clo), f_{cl} , a razão de área do corpo vestido e corpo nu (adimensional), T_{rm} , a temperatura radiante média (°C), h_c , o coeficiente de convecção entre ar e roupas (W/m² K).

Na Equação 2, todos os termos são estimados por tabelas de variáveis pessoais ou de medições das variáveis ambientais, exceto a temperatura superficial externa das roupas, que precisa ser calculada iterativamente ao comparar o lado central ao lado direito da equação.

Fanger (1972), também definiu a Carga Térmica (W/m²) que atua sobre o corpo, como a diferença entre o calor gerado pelo corpo e o trocado com o meio ambiente:

$$\begin{aligned}
 Q = M - 3,05 \cdot (5,73 - 0,007 \cdot M - p_a) - 0,42 \cdot (M - 58,15) - 0,0173 \cdot M \cdot (5,87 - p_a) - \\
 - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)
 \end{aligned} \quad (3)$$

Deste modo, para ambientes que não são termicamente neutros (carga térmica diferente de 0), estabeleceu-se a equação do PMV, que considera o equilíbrio de calor entre o ambiente e o corpo como:

$$PMV = [0,0303 \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot L \quad (4)$$

onde Q é a carga térmica (W/m²) e M , a taxa metabólica (W/m²).

Através do PMV é possível obter a porcentagem de pessoas insatisfeitas com o ambiente, o PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*):

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353PMV^4 - 0,2179PMV^2) \quad (5)$$

Tendo em vista que o PPD é considerado ainda hoje como um dos principais índices utilizados para descrever as reações do corpo humano quando submetido a diferentes condições climáticas, o mesmo será adotado nesse trabalho para retratar as condições de conforto térmico dentro do ambiente analisado.

Outros índices, também baseados no modelo de balanço térmico do corpo humano que consideram as temperaturas das condições ambientais, podem ser encontrados na literatura, conforme Auliciems e Szokolay (2007):

Temperatura efetiva (TE): O índice de temperatura efetiva é definido como a sensação equivalente à da temperatura da atmosfera saturada e parada, sem radiação térmica. A TE correlaciona os efeitos da temperatura do ar seco e umidade, embora superestime o efeito da umidade, especialmente em baixas temperaturas. O índice foi desenvolvido a partir de pesquisas laboratoriais e é representado na carta psicrométrica através de “linhas de igual conforto”.

Temperatura Efetiva Corrigida (TEC): O índice é definido como a temperatura de bulbo seco de um recinto fechado, com 50% de umidade relativa, no qual se produziria a mesma troca de calor por radiação, convecção e evaporação do ambiente.

Temperatura Efetiva Padrão (TEP): baseado na TEC, a definição desse novo índice considera um ambiente controlado, similar a um real, ao nível do mar, com 50% de umidade relativa, pessoas em atividade sedentária (1,1 *met*) e resistência das vestimentas de 0,6 *clo*.

2.4 ALGORITMOS GENÉTICOS (AG)

O algoritmo genético (AG) é uma técnica de otimização baseada em uma combinação de inteligência artificial e biologia evolutiva, onde as prováveis soluções sofrem recombinação, mutação e seleção. A utilização do algoritmo genético permite a otimização de processos complexos, onde o objetivo pode ser transiente ou estacionário, em funções contínuas ou descontínuas e com interferência de ruídos (YANG et al, 2014).

Baseado nos mecanismos de seleção natural e da genética, este algoritmo explora informações históricas para encontrar pontos onde são esperados os melhores desempenhos. Isto é feito através de processos iterativos, onde cada

iteração é chamada de geração. Deste modo, a seleção dos indivíduos privilegia os indivíduos mais aptos com maior longevidade e, portanto, com maior probabilidade de reprodução. Estes princípios são imitados na construção de algoritmos computacionais que buscam uma melhor solução para um determinado problema, através da evolução de populações de soluções codificadas através de cromossomas artificiais.

No entanto, esse método tem algumas desvantagens, onde a função de otimização e sua população precisam ser analisadas com cuidado. A dificuldade em determinar se uma solução será mais apta ou não, pode gerar resultados inadequados (YANG et al, 2014).

Para achar a solução otimizada, seguem-se os seguintes passos:

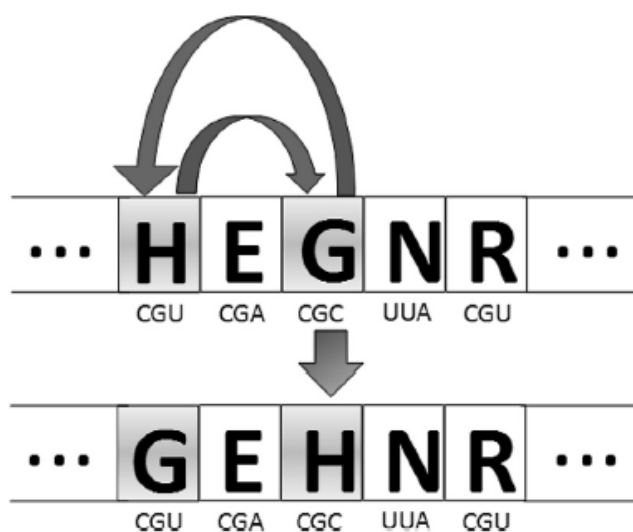
1. Definir a função de custo;
2. Seleção dos critérios de reprodução;
3. Criar a população;
4. Cálculo do custo;
5. Fazer a avaliação dos indivíduos da população após cada geração;
6. Decodificar os resultados obtidos.

2.4.1 Operações Genéticas

Oliveira, Freitas e Tinós (2018) definiram que a otimização genética possui três operações básicas: *crossover*, mutação e seleção. A operação de *crossover* consiste em trocar de cromossomos ou resultados.

Na Figura 2 tem-se um exemplo da operação de *crossover*:

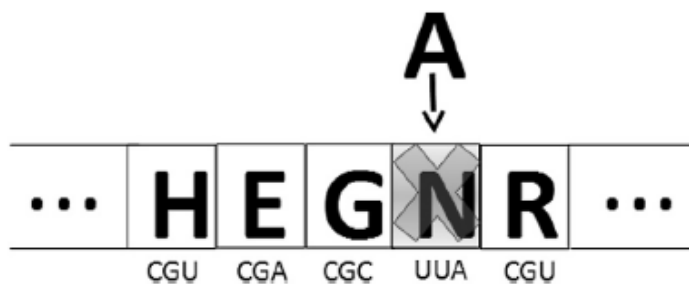
Figura 2 - Operação de *crossover*



Fonte: Oliveira, Freitas e Tinós (2018)

Neste caso, os valores G e H foram trocados. A operação de mutação consiste em mudar uma solução para aumentar a variedade de soluções. Nesta operação, um cromossomo muda o seu valor aleatoriamente para outro valor. A Figura 3 ilustra um exemplo de mutação.

Figura 3 - Operação de mutação



Fonte: Oliveira, Freitas e Tinós (2018)

Observa-se na Figura 3 que o valor "N" é substituído pelo valor "A". A operação de seleção consiste em continuar com os selecionados, com melhores resultados, para a próxima geração. Nesse caso, os vetores respostas passam para a próxima iteração sem sofrer alterações.

Figura 4 - Operações genéticas



Fonte: MathWorks (2018)

Na Figura 4, observa-se que após as operações genéticas, são formados os indivíduos a partir das operações de geração, cruzamento e mutação, e os vetores resultantes são os parâmetros da nova iteração.

2.4.2 Escolha de Parâmetros

A formulação da função a ser otimizada, chamada de função custo, precisa ser cuidadosamente escolhida. Na otimização, a função custo é reduzida ao mínimo.

Na Equação (6) tem-se dois exemplos de função custo:

$$\begin{cases} C = A - y & (a) \\ C = 1/y & (b) \end{cases} \quad (6)$$

sendo que A é uma constante de alto valor e C o custo. No caso “a” tem-se que os valores de y devem ser próximos de A para que o custo seja baixo. Já no caso “b”, os valores de y crescem, pois não são limitados.

Outro fator importante, além da escolha da função correta, é a seleção dos fatores de probabilidade, associados com as operações genéticas. Geralmente usam-se fatores entre 0,7 e 1 para o *crossover* e de 0,001 a 0,05 para a mutação conforme

Carvalho (2018). Esses fatores devem ser considerados para evitar uma busca totalmente aleatória, e ao mesmo tempo, evitar mínimos locais.

O número da população também é um fator importante a ser considerado. Assim como na natureza, uma população pequena poderá levar a uma extinção rapidamente.

2.4.2 Análise de Convergência

Segundo Pozo et al (2005), a análise de convergência serve como critério de parada. Se não houver um ganho significativo na otimização a cada iteração, o processo deve ser parado e o resultado analisado. Os principais critérios de parada são o *stall* e o erro a cada iteração.

O critério *stall* define a quantidade de iterações sem um avanço significativo no custo geral da população. Já o erro a cada iteração representa o valor escolhido pelo programador para que entre as interações não sejam classificadas com *stall*. Este valor, juntamente com o *stall*, determinam a eficiência do algoritmo genético.

2.5 SIMULAÇÕES TERMO-ENERGÉTICA DE AMBIENTES

Utilizou-se para as simulações termo-energéticas, o *software* DOMUS®. Proposto por Mendes, Oliveira e Santos (2005). O modelo matemático usado pelo *software* descreve um balanço de energia em um ambiente submetido a cargas de condução, convecção e radiação solar:

$$\dot{E}_t + \dot{E}_g = \rho_{air} c_{air} V_{air} \frac{dT_{int}}{dt}, \quad (7)$$

em que \dot{E}_t representa a taxa de energia que atravessa o envoltório da edificação (W), \dot{E}_g , a energia gerada internamente (W), ρ_{air} , a densidade do ar (kg/m³), c_{air} , o calor específico do ar (J/kg.K), V_{air} , o volume do ambiente (m³) e T_{int} , a temperatura do ar do ambiente interno (°C).

O Taxa de calor $\dot{Q}(t)$, que atravessa o envoltório da edificação, pode ser calculada pela lei de Newton do resfriamento como:

$$\dot{Q}(t) = hA[T_n(t) - T_{\text{int}}(t)], \quad (8)$$

sendo h , o coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$), A , a área de transferência de calor (m^2) e $T_n(t)$, a temperatura da superfície interna do envoltório ($^\circ\text{C}$).

Para o lado externo do envoltório ($x = 0$), neste modelo propõem-se que as paredes, o teto, as portas e as janelas estão expostas a radiação solar e a convecção:

$$-\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = h_{\text{ext}}(T_{\text{ext}} - T_{x=0}) + \alpha q_r, \quad (9)$$

onde o termo $h_{\text{ext}}(T_{\text{ext}} - T_{x=0})$, representa a transferência de calor por convecção (W/m^2), αq_r , a radiação solar absorvida (W/m^2) e λ , a condutividade térmica ($\text{W}/\text{m K}$).

Para $x=L$ (superfície interna), além da convecção, considera-se a troca de calor por radiação de ondas longas entre as superfícies:

$$\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=L} = h_{\text{int}}(T_{\text{int}} - T_{x=L}) + \sum \sigma f_f \varepsilon \theta (T_{\text{sup}}^4 - T_{x=L}^4), \quad (10)$$

sendo que f_f representa o fator de forma, ε , a emissividade, σ , a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$) e T_{sup} , a temperatura das outras superfícies internas do ambiente (K).

Para o piso, Mendes, Oliveira e Santos (2005) adotaram uma temperatura imposta como condição de contorno, igualando $T_{x=0}$ a uma temperatura do solo, a uma profundidade de 2m. Por outro lado, para o teto foram consideradas perdas de radiação por ondas longas (R_{lw}), como:

$$-\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = h_{\text{ext}}(T_{\text{ext}} - T_{x=0}) + \alpha q_r - (\varepsilon)_{\text{teto}} R_{lw}, \quad (11)$$

em que o termo $(\varepsilon)_{\text{teto}}$ representa a emissividade de onda longa na radiação infravermelha (700nm a 50.000nm) do teto.

Neste modelo, para o balanço de vapor de água, consideraram-se a ventilação, infiltração e a geração interna, de equipamentos e pessoas como:

$$(\dot{m}_{inf} + \dot{m}_{vent})(W_{ext} - W_{int}) + \dot{m}_b + \dot{m}_{ger} = \rho_{ar} V_{ar} \frac{dT_{int}}{dt}, \quad (12)$$

sendo \dot{m}_{inf} , a taxa de massa por infiltração (kg/s), \dot{m}_{vent} , a taxa de massa por ventilação (kg/s), W_{ext} , a umidade específica externa (kg água/kg ar seco), W_{int} , a umidade específica interna (kg água/kg ar seco), \dot{m}_b , o fluxo de vapor de água da respiração dos ocupantes (kg/s), \dot{m}_{ger} , a taxa de geração de vapor interna (kg/s), ρ_{ar} , a densidade do ar (kg ar seco/s) e por fim V_{ar} , o volume do ambiente (m³).

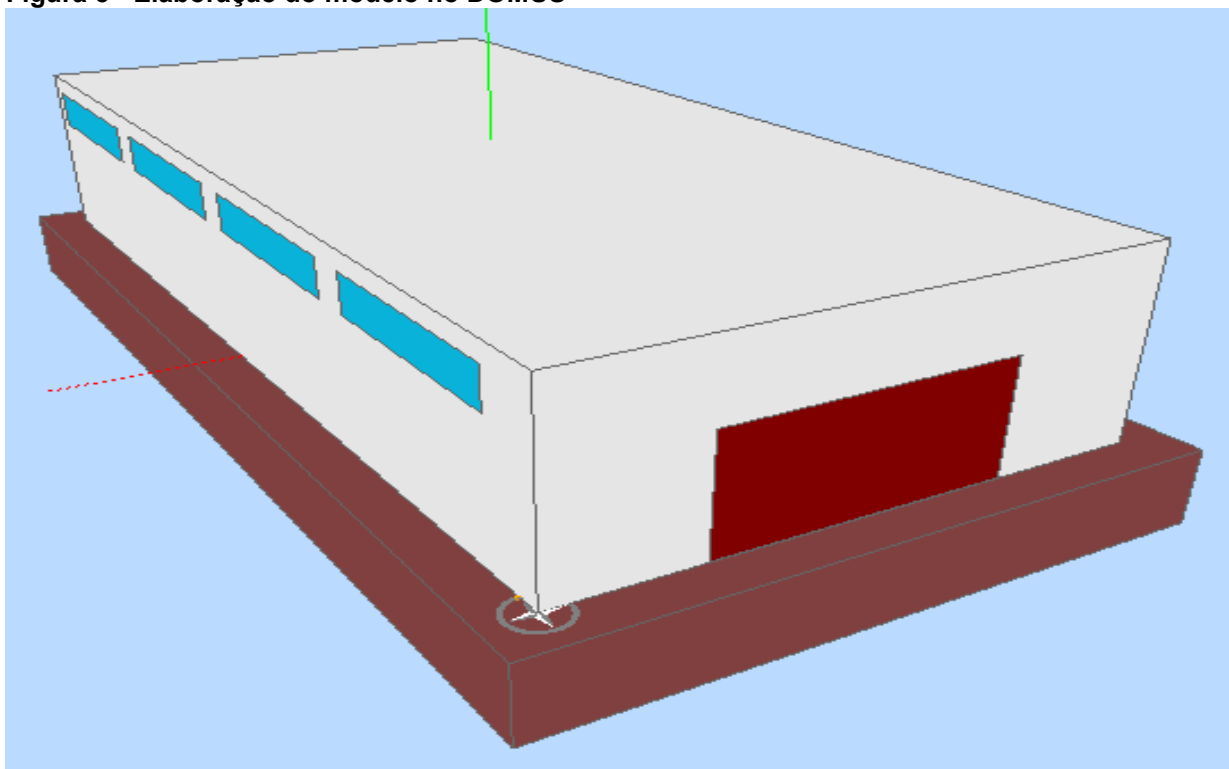
3 METODOLOGIA

Nesta seção são apresentadas as características do modelo e condições de contorno na simulação computacional aplicado no DOMUS[®] para geração dos valores de conforto térmico e a metodologia de otimização MCDA, criada para utilização do código do algoritmo genético implementada no MATLAB[®].

3.1 PROCEDIMENTOS DE SIMULAÇÃO

Para a aplicação da técnica de otimização, utilizaram-se 4 tipos de materiais isolantes (poliuretano, poliestireno expandido, lã de rocha e lã de vidro) no telhado da edificação tipo galpão (Figura 5), variando 10 espessuras diferentes, de 0,5 cm a 5 cm.

Figura 5 - Elaboração do modelo no DOMUS[®]



Fonte: Autoria própria

Apresentam-se, na Tabela 2, as propriedades termofísicas dos isolantes usadas nas simulações:

Tabela 2 - Características dos principais isolantes térmicos

Isolante	Densidade (kg/m ³)	Calor Específico (J/ kg K)	Fator de Resistência à Difusão de Vapor	Condutividade Térmica (W/m.K)
EPS	40	1420	30	0,040
PU	32	1670	44	0,035
Lã de vidro	50	700	1,5	0,045
Lã de rocha	50	750	1,3	0,045

Fonte: ABNT (2003b)

Para as simulações, utilizou-se o arquivo climático da cidade de Curitiba (PR) (TRY - *Test Reference Year*). Somente para a verificação do PPD, apresentado no Gráfico 5, utilizou-se o arquivo climático da cidade de Recife (PE). Deste modo, descreve-se na Tabela 3 um resumo das características adotadas para a edificação.

Tabela 3 - Sumário das características construtivas da edificação

Localização	Curitiba (PR) e Recife (PE)
Zoneamento Bioclimático Brasileiro ¹	1 (Curitiba) e 8 (Recife)
Orientação	Norte / Sul ²
Área Útil	300m ²
Dimensão do Galpão	12m x 25m x 4m
Área da Cobertura	300m ²
Pé direito	4 m
Paredes	Reboco (20 mm) + Tijolo (240 mm) + Reboco (20 mm)
Área de cada portão	18 m ² (6m x 3m)
Número de portões	2
Razão das área de janelas/parede	20 %
Área de cada Janela	5 m ² (5m x 1m)
Número de janelas	8

Fonte: Autoria própria

No intuito de atribuir à carga térmica do ambiente somente as condições climáticas externas, não foram considerados ganhos internos. Na avaliação dos índices de conforto térmico, considerou-se uma pessoa no ambiente realizando uma

¹ Zoneamento Bioclimático Brasileiro possui uma relação de 330 cidades cujos climas foram classificados, segundo os parâmetros e condições de conforto para tamanho e proteção de aberturas (janelas), vedações externas (paredes e coberturas) e estratégias de condicionamento térmico passivo.
² Referência espacial do DOMUS®

atividade moderada, com fluxo metabólico (M) de 1,6 met. Adotou-se um índice de vestimenta (I_{cl}) de 0,691 clo, para um trabalhador trajando uniforme de serviço composto de cueca, calça média, camisa de manga comprida e sapatos. Para a velocidade do ar atribuiu-se um valor de 0,01 m/s.

A Tabela 4 resume os parâmetros utilizados nas simulações realizadas através do *software* DOMUS® :

Tabela 4 - Parâmetros para avaliação do conforto térmico

Taxa Metabólica M (W/m^2)	Índice de Vestimenta (I_{clo})	Velocidade do Ar (m/s)	Temperatura Inicial ($^{\circ}C$)	Umidade Inicial (%)	Passo de tempo de simulação (h)
1,6	0,691	0,01	20	50	1

Fonte: Autoria própria

3.2 METODOLOGIA APLICADA NA OTIMIZAÇÃO

A metodologia proposta no trabalho consiste em elaborar uma ferramenta de otimização para determinar o melhor isolante térmico para ser aplicado no telhado de uma edificação industrial do tipo galpão.

Além do conforto térmico e custos, algumas propriedades higrotérmicas, como o fator de resistência à difusão do vapor (que é uma propriedade importante para não formação de mofo nas coberturas) e a difusividade térmica, também são consideradas na obtenção do isolante térmico, pois espera-se que estes tenham baixa difusividade de forma que trocam calor com ambiente mais lentamente, conservando energia.

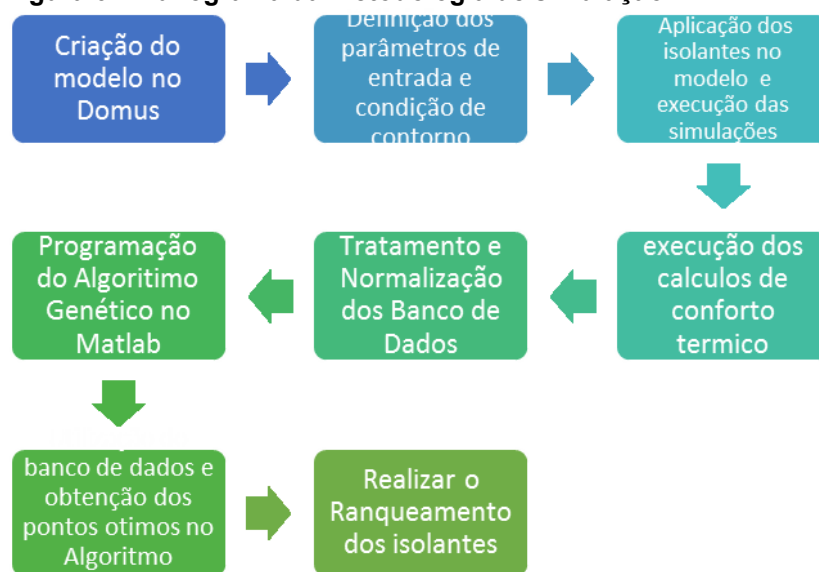
Para esta aplicação, os seguintes procedimentos foram realizados:

1. Definição e desenvolvimento do modelo da edificação no DOMUS®, com parâmetros dimensionais (conforme a Tabela 3);
2. Definição e aplicação das condições de contorno para os cálculos dos índices de conforto térmico (PPD);
3. Obtenção dos índices de conforto térmico, utilizando diferentes tipos de isolantes e espessuras no telhado da edificação;
4. Criação de um banco de dados relacionando os tipos de isolantes, espessuras e índice de conforto térmico (PPD) em suas médias diárias e mensais;

5. Normalização das matrizes dos índices de conforto térmico (PPD) de cada material, custo, fator de resistência à difusão de vapor e de difusividade térmica;
6. Implementação do algoritmo genético no MATLAB®, ajuste dos parâmetros de geração, mutação e cruzamento e critérios de paradas;
7. Aplicação do banco de dados no algoritmo genético, visando encontrar a solução ótima do problema.

A Figura 6 representa a sequência do procedimento metodológico para a análise, que consiste na elaboração e definição das condições de contorno e simulação no DOMUS®, para obtenção do banco de dados de valores de índice de conforto térmico PPD.

Figura 6 - Fluxograma da metodologia de simulação



Fonte: Autoria própria

3.3 ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIOS

De acordo com Civic e Vucijack (2014), para maximizar a eficiência energética a partir da instalação de isolantes em edificações, recomenda-se o uso de otimização multicritérios. Nesta pesquisa, os autores aplicaram a metodologia MCDA com objetivo de minimizar os custos dos isolantes, aumentar a eficiência energética e

reduzir a emissão de CO₂, baseado-se no método de Vikor, para ranqueamento e validação dos critérios selecionados.

Baseando-se na análise de Civic e Vucijack (2014), adotou-se os seguintes critérios neste trabalho para a escolha do isolante:

- a) Índice de pessoas insatisfeitas (PPD) (%) - critério a minimizar;
- b) Custo do isolamento em R\$/cm - critério que deve ser minimizados;
- c) Fator de resistência à difusão de vapor de água (μ_{iso}) - critério a ser maximizado;
- d) Difusividade térmica (α) - critério a ser minimizado.

Considerando os critérios propostos anteriormente, atribui-se o maior peso na função objetiva do algoritmo, ao índice de conforto térmico (PPD). Os custos dos isolamento térmicos variam conforme a densidade, sendo vendidos nas formas de placas ou rolos. Deste modo, adotou-se um custo médio dos materiais analisados para simplificar a metodologia de otimização. Neste caso, realizou-se uma pesquisa de preço real dos isolantes no mercado brasileiro, onde os valores descritos na Tabela 5, referem-se ao custo do material necessário para o recobrimento de uma área de 1m² de telhado.

Tabela 5 - Custos dos isolantes térmicos

Isolante	Forma Comercial	Densidade (kg/m ³)	Custo do Isolante (R\$/cm)
EPS	Placa	40	5,00
PU	Placa	32	17,00
Lã de vidro	Rolo	50	2,30
Lã de rocha	Placa	50	0,75

Fonte: Autoria própria

O fator de resistência de difusão ao vapor (μ), descreve a resistência do material ao fluxo de vapor água através dos seus poros. Como o crescimento de fungos e conseqüentemente, a deteriorização do material estão diretamente relacionados a concentração de umidade, procura-se neste caso, maximizar este critério. Embora seja um parâmetro importante na escolha de isolamentos, ressalta-

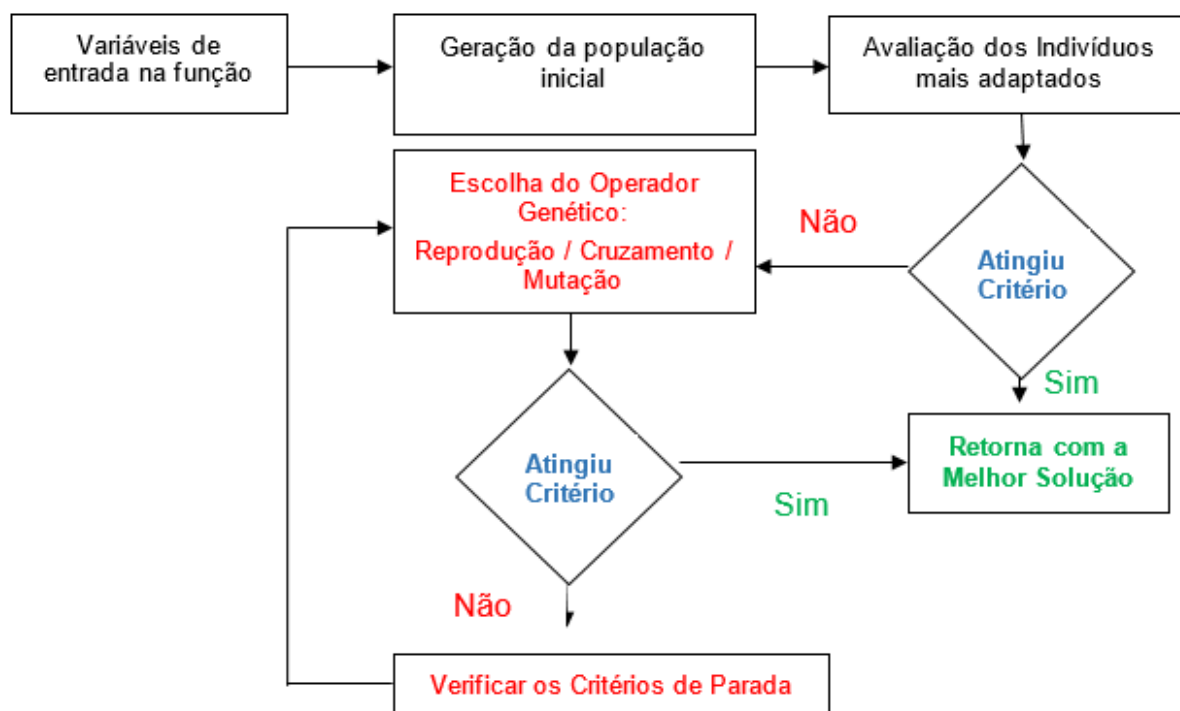
se que neste trabalho, o transporte de massa através do envoltório não foi considerado.

No caso da difusividade térmica (α), ela expressa quão rapidamente um corpo se ajusta por inteiro à temperatura de seu entorno. Deste modo, trata-se de um critério a ser minimizado, pois materiais com um valor baixo desta propriedade, diminuem a troca de calor entre os ambientes interno e externo.

3.4 PROCEDIMENTO DE OTIMIZAÇÃO

Optou-se em utilizar o *software* MATLAB® para implementar o algoritmo genético, por tratar-se de uma ferramenta computacional de fácil programação e possuir o código do algoritmo genético na sua biblioteca de dados. Além disso, segundo Carvalho (2018), o AG possui algumas vantagens em relação a outras técnicas de otimização. As técnicas de busca e otimização tradicionais iniciam-se com um único candidato que, iterativamente, é manipulado utilizando algumas heurísticas diretamente associadas ao problema a ser solucionado. Deste modo, uma vez implementada a função objetiva no algoritmo genético, as operações de geração, cruzamentos e mutações fornecem o resultado do melhor isolante para os critérios e coeficientes aplicados na função objetiva. A Figura 7 ilustra a estrutura básica do código implementado para o funcionamento do AG e para a seleção do melhor isolante.

Figura 7 - Fluxograma para a implementação do AG



Fonte: Autoria própria

Como visto na seção anterior, utilizou-se o método MCDA para realizar o ranqueamento dos isolantes. Neste caso, antes de implementar o AG, deve-se definir os dados de entrada, calcular os valores da matriz normalizada e atribuir peso para cada fator. A normalização da matriz de entrada se faz necessário por ser um método de transformar dados em uma escala comum variando de 0 a 1. O processo de normalização da matriz de entrada dos dados do AG no *software* MATLAB® consistiu na divisão de cada elemento da matriz (denominado elemento-sábio) pelo valor máximo de cada parâmetro.

Para definir a função objetiva do AG, a equação precisa se associar à minimização de custos, maximização da resistência à difusão de vapor, minimização do índice de pessoas insatisfeitas (PPD) e minimização da difusividade térmica, cujos pesos foram atribuídos arbitrariamente como descrita pela Equação 13:

$$F_{obj}(L_{iso}) = 0,6PPD_{iso}(L_{iso}) + 0,25Custo_{iso} + \frac{0,1}{\mu_{iso}L_{iso}} + 0,05\alpha \quad (13)$$

Apresentam-se na Tabela 6, os valores e pesos considerados na função objetiva, utilizada no algoritmo de otimização.

Tabela 6 - Matriz de valores dos fatores, peso e valor máximo

Critérios	EPS	PU	Lã de vidro	Lã de rocha	Max.	Peso (%)
Índice de Conforto Térmico PPD (%)	Valores de PPD, em médias diárias, apresentados nos Gráficos de 1 a 4.					60
Custo do Isolante (R\$/cm)	5,00	17,00	2,30	0,75	17,00	25
Fator de Resistência Difusiva ao Vapor (μ_{iso})	30	44	1,5	1,3	44	10
Difusividade Térmica (m^2/s) ($k/\rho.cp$)	$7,04.10^{-7}$	$6,55.10^{-7}$	$1,29.10^{-6}$	$1,20.10^{-6}$	$1,29.10^{-6}$	5

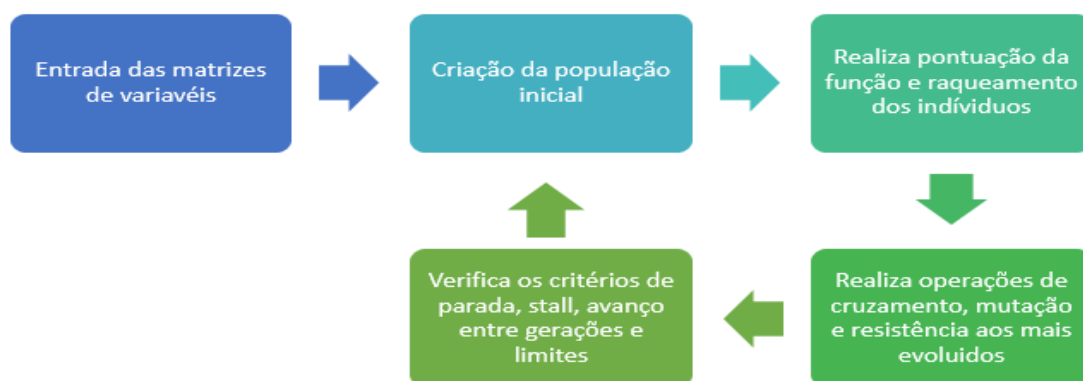
Fonte: A autoria própria

Esses valores normalizados serão os dados de entrada na função objetiva (Equação 13). Assim, após as simulações, os valores de PPD foram divididos pelo maior PPD encontrado e dispostos no código em 4 matrizes correspondente aos diferentes tipos de materiais isolantes e de dimensões 12 x 10, definida pelos 12 meses do ano e pelas 10 espessuras analisadas.

Conforme apresentado anteriormente, o método computacional de otimização do AG baseia-se na geração de uma população inicial, formada por um conjunto aleatório de indivíduos que podem ser vistos como possíveis soluções do problema.

Os dados de entrada no algoritmo genético é uma combinação de matriz que opera uma matriz com os tipos de materiais e espessura dos isolantes. O número máximo da população gerada é de 40 indivíduos, o que se refere à combinação de 4 materiais e de 10 espessuras. Aleatoriamente selecionou-se indivíduos para repetir e compor a população inicial. Adotando-se como critério padrão de programação, selecionou-se 100 vezes o número de variáveis de entrada, gerando uma população inicial de 200 indivíduos. Para o código, foi considerado um fator de mutação aleatória de 1% dos indivíduos, de 5% para o fator de sobrevivência dos indivíduos mais evoluídos e de 94% para cruzamentos das espécies, conforme biblioteca da programação do MATLAB.

A Figura 8 representa a sequência do procedimento computacional para ranqueamento a partir das informações DOMUS®:

Figura 8 - Fluxograma da metodologia de otimização

Fonte: Autoria própria

Em termos de tempo computacional, o algoritmo genético necessitou de cerca de 45 segundos para a convergência, em um computador com processador *Intel Core i5* com 8GB de memória RAM, sendo as simulações repetidas por 3 vezes, a fim de analisar a repetitividade do ranqueamento.

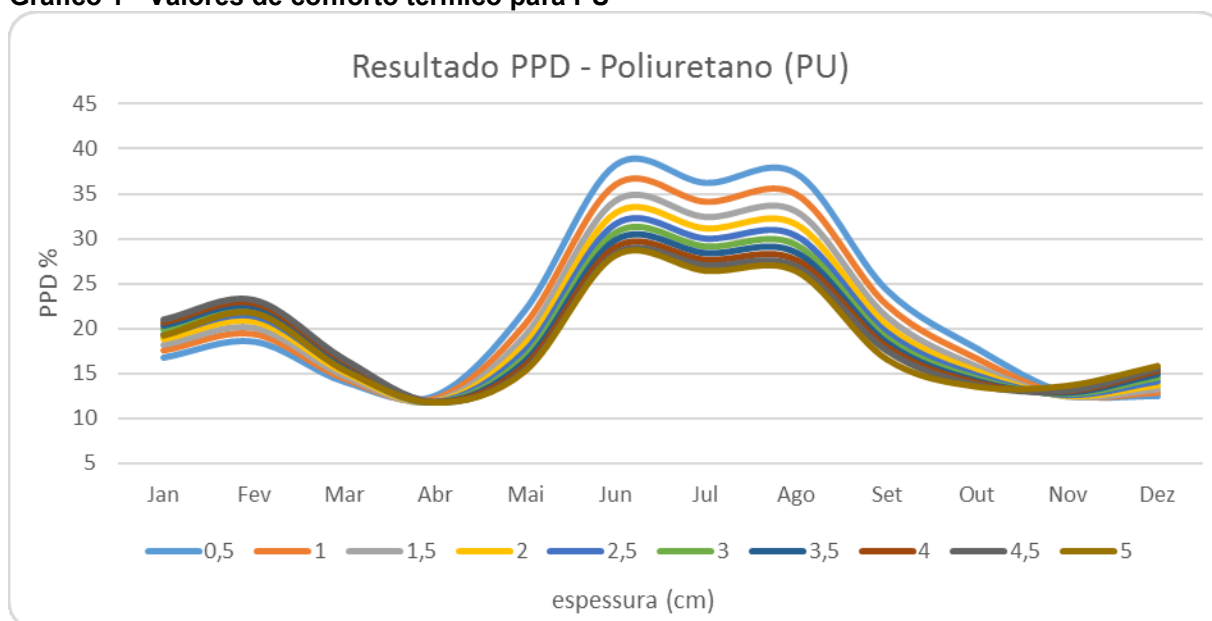
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nas simulações para o desempenho térmico dos isolantes em função dos índices de conforto térmico (PPD), os valores apresentados pela função objetiva e, posteriormente, o ranqueamento da solução do melhor isolante.

4.1 RESULTADOS DOS INDICADORES DE CONFORTO TÉRMICO (PPD)

Os Gráficos de 1 a 4 apresentam os resultados dos valores médios diários de PPD obtidos nas simulações, variando a espessura para os 4 materiais selecionados, utilizando o arquivo climático de Curitiba (PR).

Gráfico 1 - Valores de conforto térmico para PU



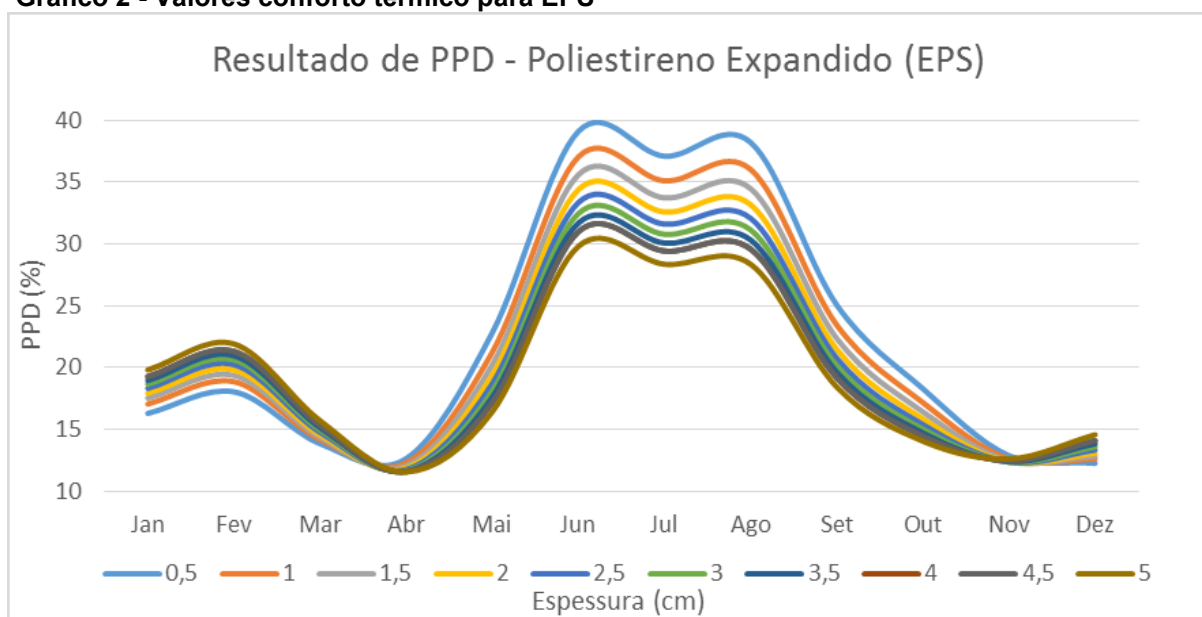
Fonte: Autoria própria

No Gráfico 1, observa-se que para os meses de junho a agosto, os resultados mostraram o pior desempenho devido aos maiores índices de PPD (%), apresentando valores entre 26% e 39% de pessoas insatisfeitas. Do mesmo modo, os meses de abril e novembro mostraram os melhores índice de conforto térmico, variando entre 12% e 13% de pessoas insatisfeitas.

Em relação ao efeito do aumento da espessura, observa-se um comportamento dos valores médios dos índices de conforto térmico inversamente proporcional em

relação aos meses de inverno e verão. No caso do isolante PU, o aumento da espessura de 0,5 cm para 5 cm, ocasionou em uma redução máxima de 14% do PPD (de 39% para 26%) nos meses de inverno e um acréscimo de 5% nos meses de verão (de 18% para 23%). Este efeito não esperado pode ser atribuído ao clima moderadamente frio de Curitiba (PR) e a média diária utilizada, onde os valores do PPD noturnos trazem grande influência nos resultados apresentados.

Gráfico 2 - Valores conforto térmico para EPS



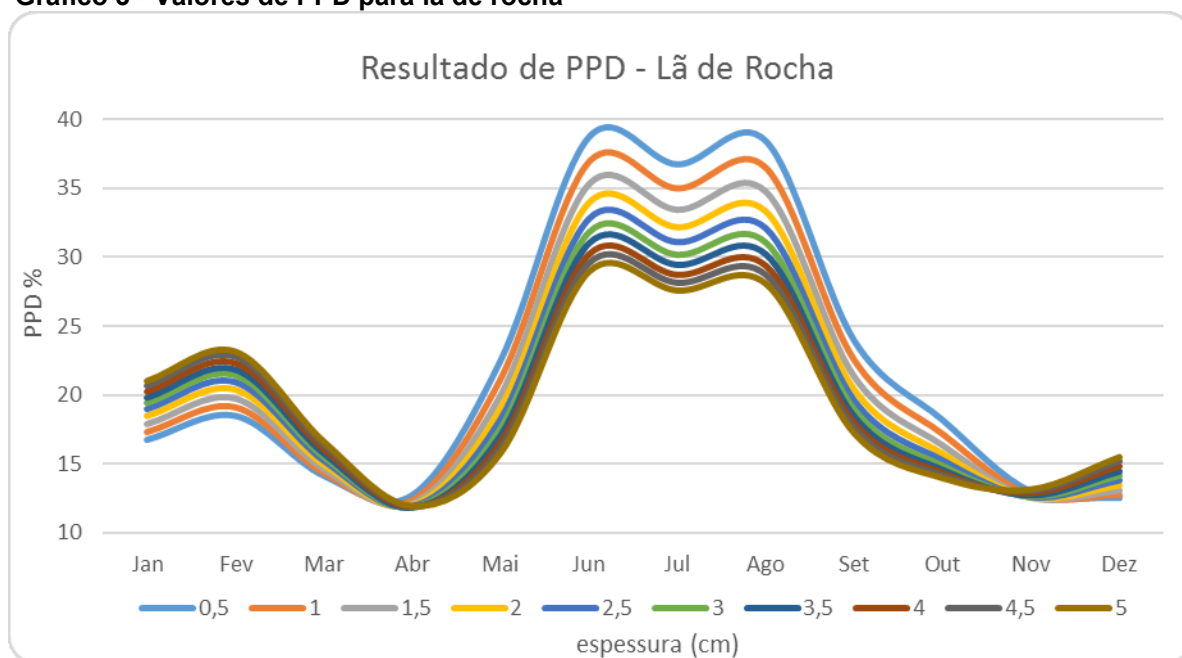
Fonte: Autoria própria

Nas simulações com EPS (Gráfico 2) os resultados mostram que os índices de PPD possuem um comportamento semelhante ao PU. No entanto, observa-se uma pequena redução geral nos índices para o verão e um pequeno aumento no período de inverno.

Os Gráficos 3 e 4 também mostram valores de PPD para a lã de rocha e vidro, muito semelhantes aos verificados para o EPS. Pequena diferença, inferior a 2%, pode ser verificada apenas para as espessuras superiores a 4 cm. Como considerou-se a aplicação do isolante somente do telhado e o arquivo climático utilizado foi o da cidade de Curitiba (clima moderadamente frio), uma menor resistência térmica do isolante poderia melhorar os índices de PPD, principalmente durante o dia, quando a radiação solar está presente. Este mesmo efeito pode ser verificado, quando analisam-se os índices médios de cada isolante, ao longo do ano.

Como adotou-se uma vestimenta padrão constante, nos meses mais frios percebe-se a necessidade de um maior aquecimento do ambiente. Considerando uma cidade com clima mais quente, os índices devem ter um comportamento menos oscilatório ao longo do ano.

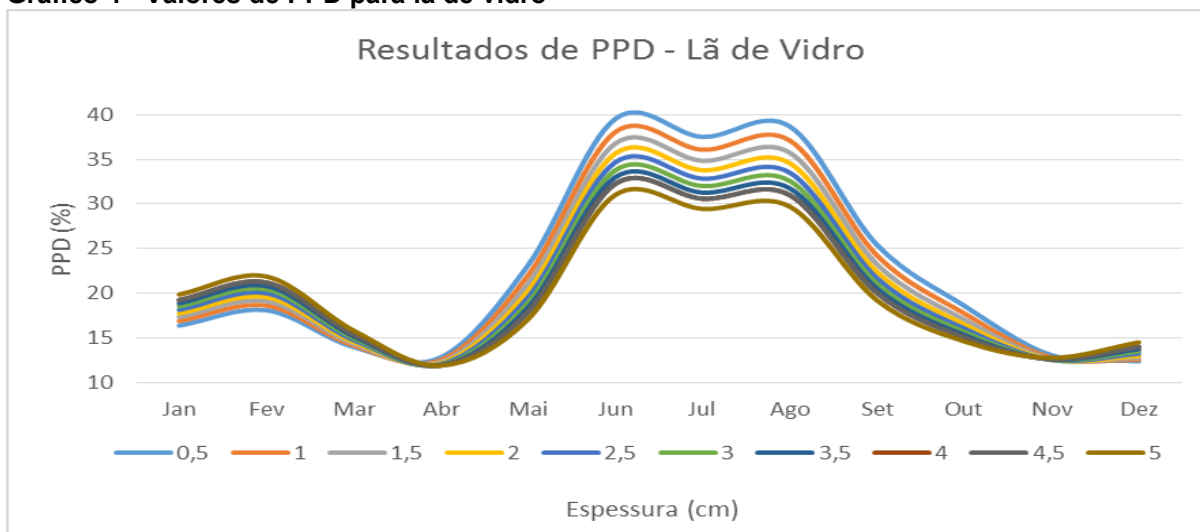
Gráfico 3 - Valores de PPD para lã de rocha



Fonte: Autoria própria

Quando analisa-se somente a espessura, observa-se que a partir de 2,5 cm, o aumento da espessura tende a ter uma menor influência no índices de PPD, principalmente no inverno.

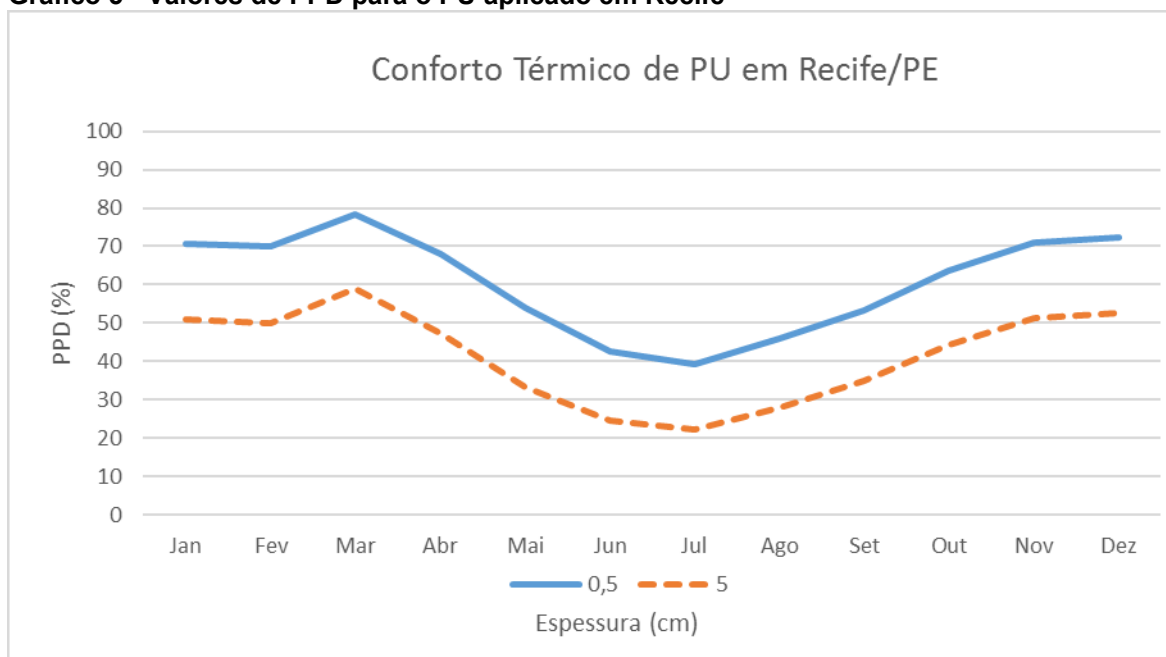
Gráfico 4 - Valores de PPD para lâ de vidro



Fonte: Autoria própria

No intuito de verificar o efeito do isolante para uma cidade de menor latitude, ou seja, localizada próxima a linha do equador, foi realizado simulações considerando a cidade de Recife (PE). O Gráfico 5 apresenta os índices de conforto térmico (PPD%), utilizando o isolante PU nas espessuras mínimas e máximas (0,5 cm e 5 cm), para a cidade de Recife (PE).

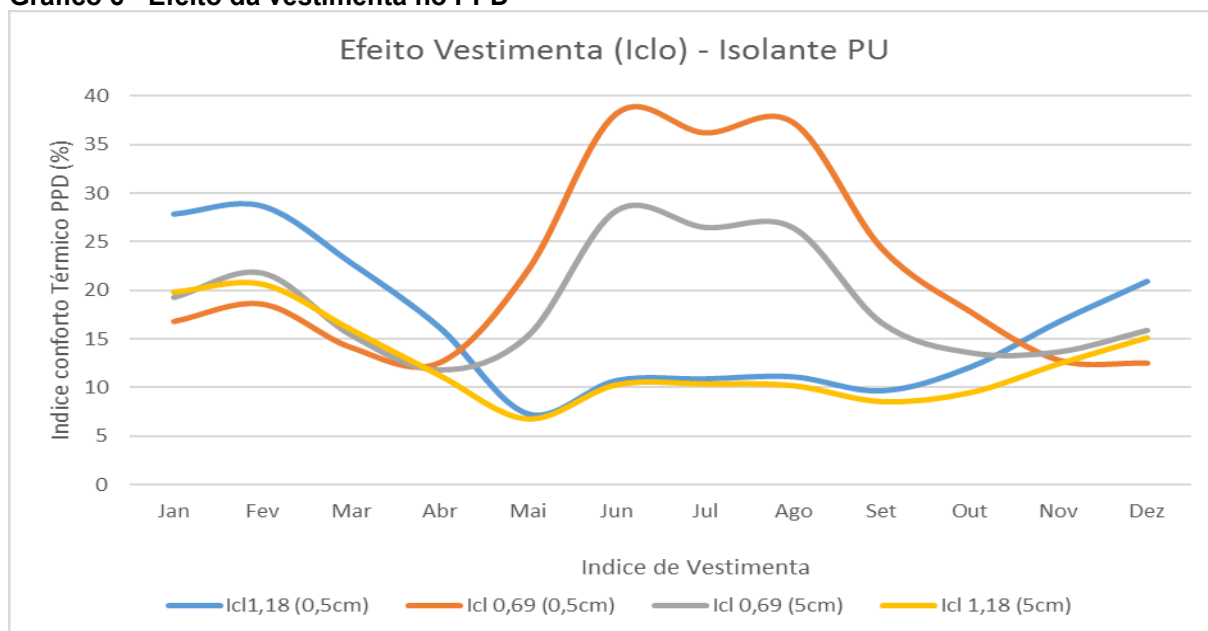
Gráfico 5 - Valores de PPD para o PU aplicado em Recife



Fonte: Autoria própria

Diferente da cidade de Curitiba (PR), Recife (PE) apresenta resultados menos oscilatórios, com uma significativa melhora do conforto térmico ao longo de todo o ano. A fim de verificar o efeito da vestimenta no índice de conforto (Gráfico 6), utilizou-se o PU como isolante (0,5 cm e 5 cm) e o arquivo climático de Curitiba (PR). Consideraram-se os índices de vestimenta de 0,69 clo e 1,18 clo na análise.

Gráfico 6 - Efeito da vestimenta no PPD



Fonte: Autoria própria

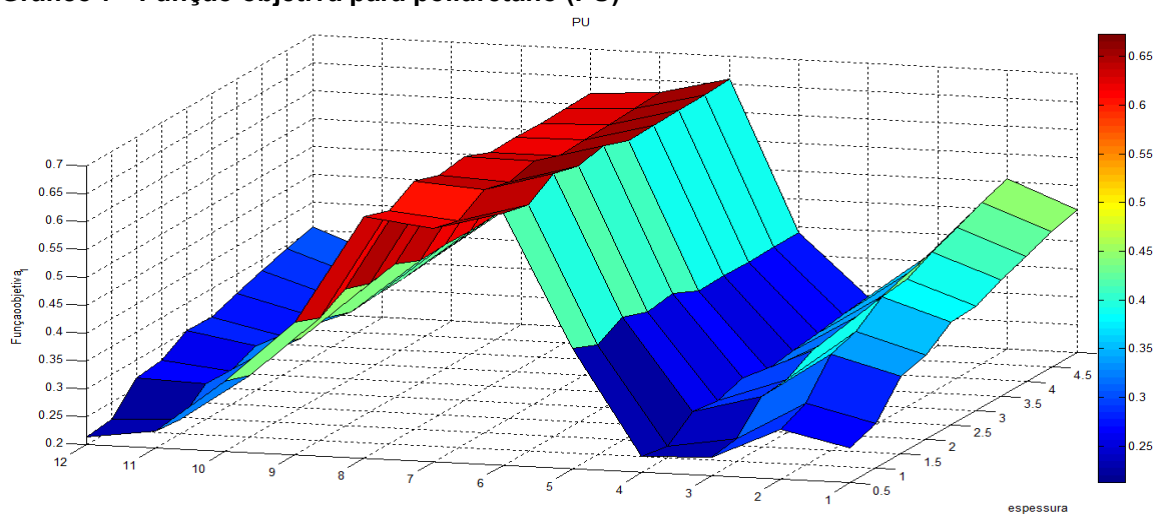
Em relação ao efeito da vestimenta, observa-se que para os meses de inverno, aplicando um índice de vestimenta alto ($I_{cl} = 1,18$ clo), o efeito do isolante não é significativo, pois o agasalho proporciona uma melhor conforto térmico. Entretanto, para um índice de vestimenta baixo ($I_{cl} = 0,69$ clo), para os meses de inverno, os índices de conforto mostraram uma redução de 10% com o aumento da espessura do isolamento. Para o verão, verifica-se que para um índice de vestimenta alto, o aumento da espessura do isolante diminuiu o PPD em 8%. No caso do índice de vestimenta baixo, comportamento oposto tem sido presenciado, sugerindo a necessidade de um aumento da carga térmica para a redução do PPD.

4.2 RESULTADOS DA FUNÇÃO OBJETIVA

Para a análise da função objetiva, considerou-se o índice de conforto térmico (PPD) como o parâmetro x , o custo do isolamento associado à espessura (R\$ / cm) como parâmetro y e o fator de resistência à difusão do vapor, como o parâmetro z .

Os Gráficos de 7 a 10 mostram os valores da função objetiva para cada um dos isolantes térmicos, em função do mês e da espessura.

Gráfico 7 - Função objetiva para poliuretano (PU)

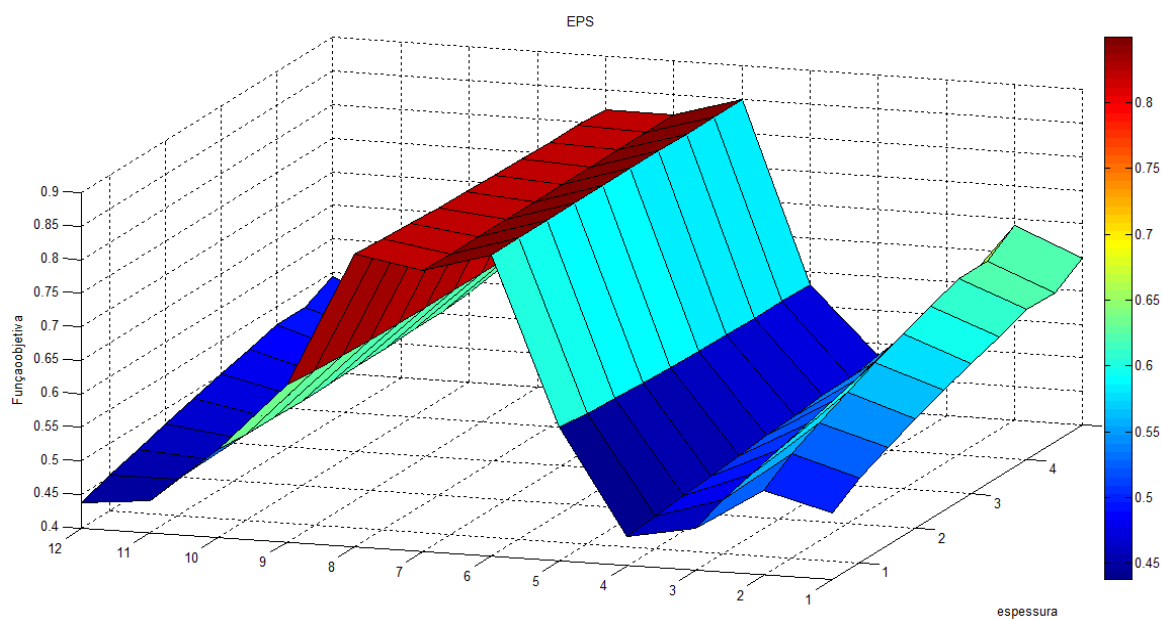


Fonte: Autoria própria

No processo de otimização, a função objetiva possui o melhor resultado, quando o seu valor tende para um mínimo. No caso do PU (Gráfico 7), os melhores valores foram encontrados entre os meses de março a abril, para espessuras de 0,5 cm a 1,0 cm, e no mês de dezembro, para as mesmas espessuras.

Entre os meses de junho a agosto, os valores da função objetiva apresentaram os piores resultados, com comportamento semelhante aos valores do PPD, mostrados no Gráfico 8. Esta característica era esperada, pois o peso global do PPD foi de 60% dentro da função objetiva.

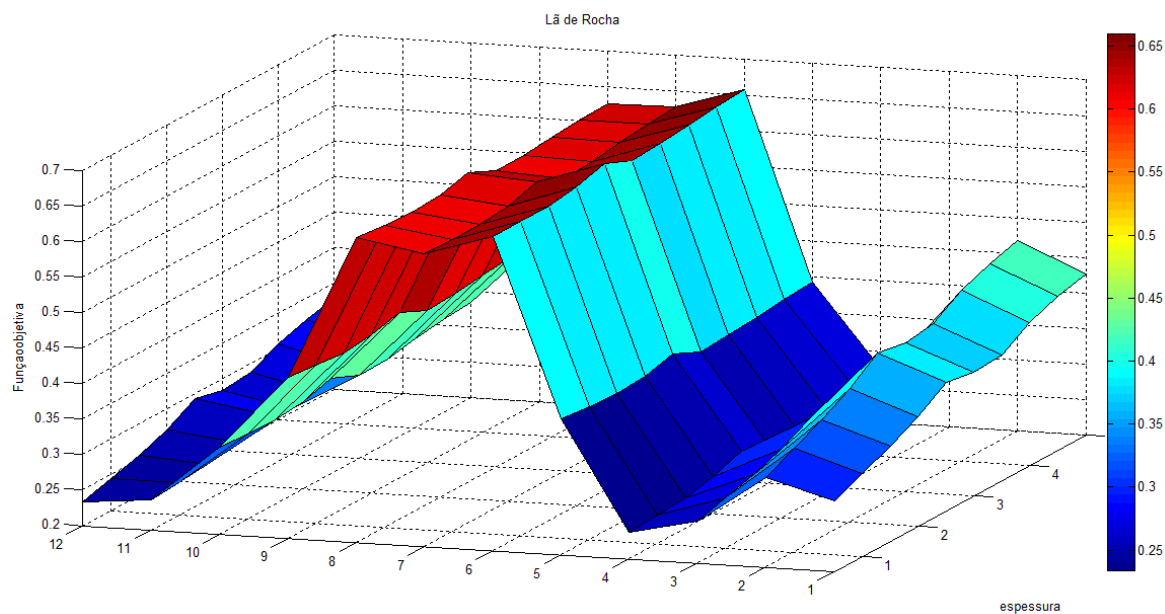
Gráfico 8 - Função objetiva para poliestireno expandido (EPS)



Fonte: Autoria própria

No Gráfico 9 observam-se os valores da função objetiva para o EPS, apresentando o mesmo comportamento do PU, porém, com um pior desempenho. Esse resultado é influenciado pelo alto custo comercial quando comparado aos outros isolantes, uma vez que este critério apresenta o segundo maior fator com alto peso na função objetiva.

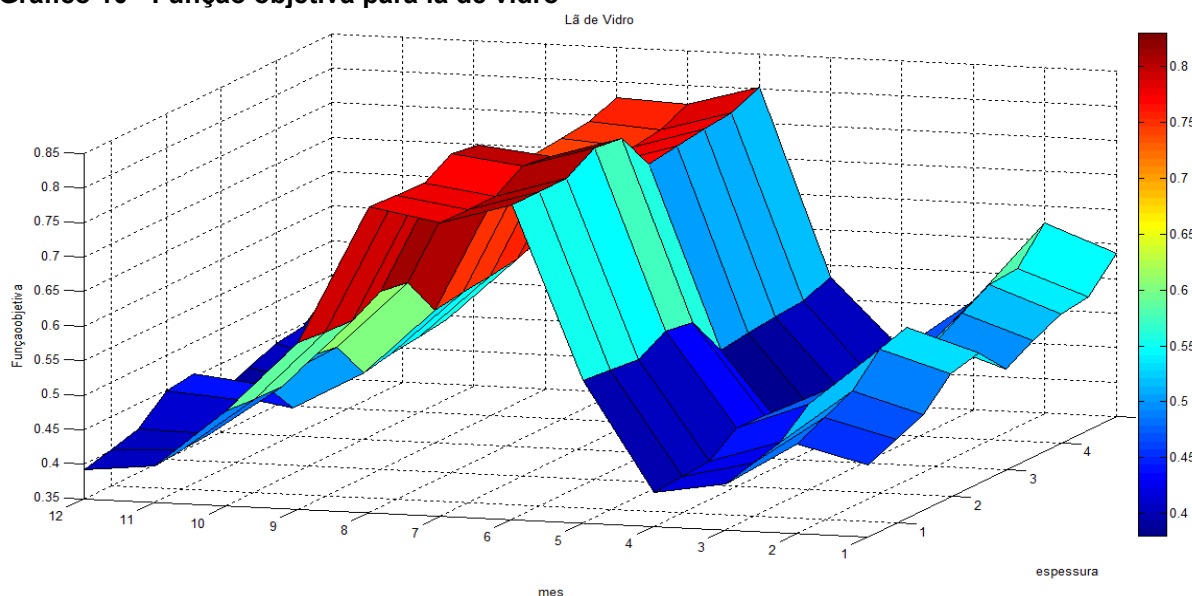
Gráfico 9 - Função objetiva para lã de rocha



Fonte: Autoria própria

O Gráfico 10 mostra a curva gerada no cálculo da função objetiva, para os diferentes meses do ano e espessuras da lã de rocha. Comparando com os resultados dos isolantes PU e EPS, a lã de rocha apresenta ser uma opção de isolante interessante, mesmo tendo um fator de resistência difusiva ao vapor baixo. No caso em que o peso do custo do isolante tivesse um fator de maior relevância na função objetiva, possivelmente a lã de rocha seria o isolante ótimo devido ao seu menor valor comercial.

Gráfico 10 - Função objetiva para lã de vidro



Fonte: Autoria própria

Da mesma forma, a lã de vidro (Gráfico 10) apresenta o mesmo comportamento da lã de rocha, porém, com um pior desempenho. Esse resultado é influenciado pelo maior custo comercial quando comparado à lã de rocha (cerca de 300%).

Através dos Gráficos 7 à 10, verificam-se os valores de máximos e mínimos fornecidos pela função objetiva, apresentados na Tabela 7:

Tabela 7 - Valores da função objetiva para isolantes térmicos

Valor da função objetiva	PU	EPS	Lã de rocha	Lã de vidro
Valor Máximo	0,4453	0,6385	0,4345	0,5858
Valor Mínimo	0,3745	0,5908	0,3850	0,5315

Fonte: Autoria própria

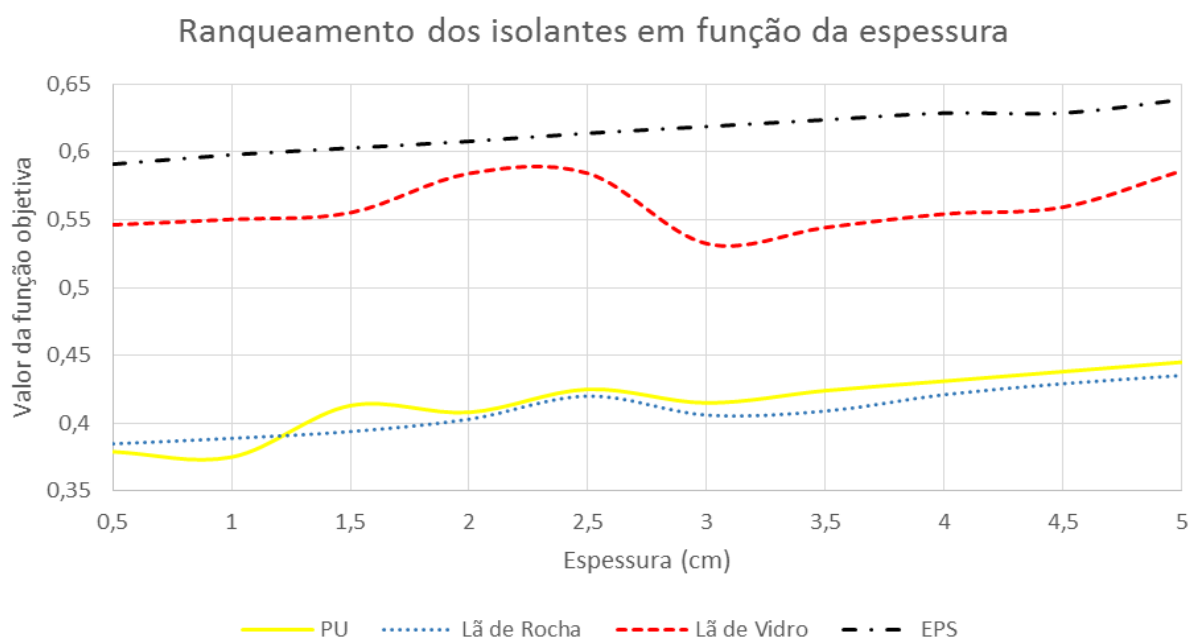
Graficamente, pode-se verificar que o PU e a lã de rocha apresentam os menores valores para a função objetiva. No entanto, levando-se em conta os demais critérios propostos e seguindo os critérios de convergência, pode-se estabelecer um ranqueamento dos isolantes com a respectiva espessura.

4.3 RANQUEAMENTO E SELEÇÃO DO ISOLANTE ÓTIMO

Neste trabalho consideram-se 4 diferentes tipos de materiais e 10 espessuras, gerando deste modo, 40 combinações de isolantes e espessuras. O Gráfico 11 apresenta o ranqueamento do melhor isolante térmico, aplicado como cobertura do galpão industrial modelado.

Ressalta-se que, quanto menor o valor da função objetiva, melhor posicionado no ranqueamento estará o isolante, com sua respectiva espessura. Deste modo, conforme verificado no Gráfico 11, o isolante PU com uma espessura de 1 cm obteve o menor valor da função objetiva.

Gráfico 11 - Ranqueamento dos Isolantes



Fonte: Autoria própria

Verifica-se ainda no Gráfico 11 que dentre os isolantes selecionados, a lã de rocha apresenta os melhores resultados, seguido pelo PU, baseando-se na função

objetiva utilizada. Caso ocorra alguma mudança nos pesos dos coeficientes e inclusão de outras variáveis, a posição dos isolantes pode variar.

O AG possui uma função em que se pode realizar um diagnóstico do processo de interação, para a convergência das soluções obtidas. A Tabela 8 apresenta os resultados do diagnóstico tais como o número de gerações, erros e *stall* das gerações.

Sabe-se que o AG inicia o cálculo com uma população inicial com todos os valores de PPD, custo, fator de resistência à difusão de vapor e difusividade térmica. Posteriormente, cria-se uma nova população de soluções através das operações de *crossover*, mutação e seleção, formando vetores que serão os parâmetros para as novas iterações. Ao analisar a convergência como critério de parada, os valores de erro (*penalty*) e parada (*stall*) podem ser verificados.

Na Tabela 8 observa-se que na vigésima nona geração, o valor da função objetiva converge para um erro de 0,6585 e o *stall* em que é número de vezes que o algoritmo realiza iterações sem avanço significativo no resultado do melhor valor da função objetiva, que no caso das simulações o algoritmo alcança um número de 29 iterações.

Tabela 8 - Resultados de convergência do AG

(continua)

Geração	Número de avaliações da função objetiva	Melhor valor da função objetiva	Média dos valores da função objetiva	Geração de Parada
1	80	0,6592	1,1830	0
2	120	0,6522	1,3740	1
3	160	0,6522	1,2430	2
4	200	0,6522	0,8898	3
5	240	0,6522	0,6903	4
6	280	0,6522	0,6582	5
7	320	0,6522	0,6598	6
8	360	0,6522	0,6658	7
9	400	0,6522	0,6597	8
10	440	0,6522	0,6546	9
11	480	0,6522	0,6631	10
12	520	0,6522	0,6542	11
13	560	0,6522	0,6557	12
14	600	0,6522	0,6533	13

Tabela 8 - Resultados de convergência do AG

				(conclusão)
Geração	Número de avaliações da função objetiva	Melhor valor da função objetiva	Média dos valores da função objetiva	Geração de Parada
15	640	0,6522	0,6558	14
16	680	0,6522	0,6557	15
17	720	0,6522	0,6548	16
18	760	0,6522	0,6585	17
19	800	0,6522	0,6532	18
20	840	0,6522	0,6560	19
21	880	0,6522	0,6531	20
22	920	0,6522	0,6559	21
23	960	0,6522	0,6561	22
24	1000	0,6522	0,6602	23
25	1040	0,6522	0,6614	24
26	1080	0,6522	0,6579	25
27	1120	0,6522	0,6584	26
28	1160	0,6522	0,6585	27
29	1200	0,6522	0,6585	28

Fonte: Autoria própria

A NBR 15220 estabelece um coeficiente global de transferência de calor de $2 \text{ W/m}^2\text{K}$ para coberturas com isolamento para uma área de cobertura de 1 m^2 . Deste modo, através da condutividade térmica, calculam-se as espessuras necessárias para cada tipo de isolante (Tabela 9).

Tabela 9 - Espessura isolantes calculados conforme NBR 15220

Material	Espessura ($L=k/U$) (cm)	Condutividade Térmica ($W/ m K$)
EPS	2,00	0,040
PU	1,75	0,035
Lã de vidro	2,25	0,045
Lã de rocha	2,25	0,045

Fonte: Autoria própria

Com a obtenção das espessuras determinadas pela NBR 15220 para coberturas, como o objetivo é a otimização de material e custo, considera-se as

menores espessuras simuladas para classificar os isolantes térmicos de acordo com o ranqueamento fornecido através do algoritmo genético (Tabela 10).

Tabela 10 - Ranking dos isolantes conforme NBR 15220

Fatores	Lã de rocha	PU	Lã de vidro	EPS
Espessura em cm ($L=K/U$)	2,0	1,5	2,0	2,0
Resultado algoritmo genético	0,4030	0,4130	0,5840	0,6080
Posição no ranqueamento	6	10	29	34
Classificação	1	2	3	4

Fonte: Autoria própria

Paras as espessuras calculadas de forma obter um coeficiente global de transferência de calor $2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, a lã de rocha (2 cm) apresenta-se como a melhor escolha para a aplicação em isolamento de cobertura em um galpão industrial, considerando os critérios de seleção. O PU (1,5 cm), lã de vidro (2,5 cm) e o EPS (2 cm) aparecem na sequência do ranqueamento, respectivamente.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo fornecer uma ferramenta de otimização para a escolha do melhor isolante térmico para ser aplicado no telhado de uma edificação industrial do tipo galpão. Além do conforto térmico e custos levados em consideração na escolha, algumas propriedades higrotérmicas como a resistência à difusão de vapor e a difusividade térmica também foram consideradas, na obtenção do melhor tipo do isolante.

Para o uso da técnica de otimização, realizaram-se várias simulações termo-energéticas do ambiente utilizando-se o *software* DOMUS[®], obtendo assim, valores do índice de conforto térmico (PPD) para o ambiente analisado. Nestas simulações aplicaram-se 40 configurações de diferentes isolantes térmicos (poliuretano, poliestireno expandido, lã de rocha e lã de vidro), combinando 10 diferentes espessuras (de 0,5 a 5 cm). Posteriormente, realizou-se o ranqueamento do melhor isolante, utilizando a técnica do algoritmo genético (AG) aplicada à seleção multicritérios, sendo esta implementada no *software* MATLAB[®]. Os resultados de otimização mostraram que o isolante de poliuretano (PU), aplicado com uma espessura de 1 cm, é a melhor opção de instalação no telhado, considerando-se os parâmetros funcionais da edificação, atividade metabólica do ocupante, índice de vestimenta e condições de contorno em que impacta no índice de conforto térmico.

Levando-se em conta a norma NBR 15220 que estabelece um coeficiente global de $2 \text{ W/m}^2\text{K}$ para as coberturas com isolamento, a lã de rocha com 2 cm mostrou-se como a melhor escolha.

Como sugestões para trabalhos futuros, sugere-se uma maior análise do efeito das vestimentas e do metabolismo de atividades dos usuários, nos índices de conforto térmico. Além da escolha do melhor isolante para ser aplicado na cobertura de uma edificação, o método de otimização utilizado neste trabalho, pode ser implementado para a obtenção da melhor configuração de materiais aplicada no envoltório de uma edificação.

Outros parâmetros de uma edificação também podem ser otimizados na busca do aumento da eficiência energética, como: posicionamento geográfico, localização e áreas de janelas, tonalidade de pintura e acabamento, entre outros.

Ainda sugere-se realizar uma análise da aplicação de isolantes térmicos ótimos de forma a relacionar os índices de conforto térmicos com a eficiência na produtividade de trabalhadores em ambientes climatizados industriais.

E por fim, torna-se interessante analisar a combinação de isolantes aplicada a todos o envoltório da edificação buscando metodologia de tomada de decisão na busca das melhores propriedades termo-energéticas dos materiais, eficiência ótimas e redução do custo das edificações.

REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2003a.

_____. **Projeto 02:135.07-001/2**. Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2003b.

ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). **BSR/ASHRAE Standard 55**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta (USA): ASHRAE, 2003.

AULICIEMS, A.; SZOKOLAY, S. V. **Thermal comfort**. Brisbane (AUS), 2007. (PLEA Notes 3: Passive and low energy architecture international - Design tools and techniques).

BANIASSADI, A.; SAJADI, B.; AMIDPOUR, M.; NOORI, N. **Economic Optimization of PCM and insulation layer thickness in residential buildings**. Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 14, p. 92-99, 2016.

BOUCHLAGHEM, N. M.; LETHERMAN, K. M. Numerical optimization applied to thermal design of buildings. **Building Environment**, v. 25, p. 117-124, 1990.

CARDOSO, A. G. S. **A influência das propriedades térmicas e características construtivas no desempenho térmico de cinco residências unifamiliares localizadas em Itaberá-SP**. Trabalho de Conclusão de Curso (Universidade Federal de Santa Catarina) - Florianópolis, 2006.

CARVALHO, A. P. L. **Algoritmo genético**. São Paulo: USP, 2018. (Departamento da Ciência da Computação). Disponível em: <<http://conteudo.icmc.usp.br/pessoas/andre/research/genetic>>. Acesso em: 9 set. 2018.

CAVALCANTI, M. A. V. **Análise das influências de superfícies refletivas na perda de calor de sistemas térmicos**. 2011. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal (RN), 2011.

CIVIC, A.; VUCIJACK, B. Multi-Criteria optimization of insulation options for warmth of buildings to increase energy efficiency. In: DAAAM INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT MANUFACTURING AND AUTOMATION, 24., **Proceedings...** v. 69, p. 911-920, 2014.

COLEY, D. A.; SCHUKAT, S. Low-energy design: combining computer-based optimization and human judgement. **Building Environment**, v. 37, p. 1241-1247, 2002.

DEAR, R. J.; BRAGER, G. S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 549-561, jul. 2002.

DEPECKER, P.; MENEZO, C.; VIRGONE, J.; LEPERS, S. Design of building shape and energetic consumption. **Building Environment**, v. 36, p. 627-635. 2001.

DUBROW, T. D; KRARTI, M. Genetic algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. **Building and Environment**, v. 45, p. 1574-1581, 2010.

FANGER, P. O. **Thermal comfort: analysis and applications in environment engineering**. New York (USA): McGraw Hill, 1972.

FERRARA, M.; FABRIZIO, E.; VIRGONE, J.; FILIPPI, M. A simulation-based optimization method for cost-optimal analysis of nearly zero energy building. **Energy Building**, v. 84, p. 442-447, 2015.

FREIRE, R.; OLIVEIRA, G.; MENDES, N. Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings. **Energy and Buildings**, v. 40, p. 1353-1365, 2008.

GHISI, E.; THINKER, J. Optimization energy consumption in offices as function of window area and room size. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE (Building Simulations), 7., 2001. **Proceedings...** Rio de Janeiro, 2001.

HAMDY, M.; HASAN, A.; SIREN, K. Impact of adaptive thermal comfort criteria on building energy use and cooling equipment size using a multi-objective optimization scheme. **Energy Building**, v. 43, p. 2055-2067, 2011.

_____. Multi-stage optimization method for cost optimal and nearly zero energy building solutions in line with the EPBD recast. **Energy Building**, v. 56, p. 189-203, 2013.

HUMPHREYS, M. A.; NICOL, J. F. Thermal comfort as part of a self-regulating system. **Building Research & Practice**, v. 1, n. 3, p. 174-179, 1973.

MATHWORKS. Disponível em: <<https://www.mathworks.com>>. Acesso em: 12 ago. 2018.

MENDES, N.; OLIVEIRA, C. R.; SANTOS, G. H. Energy efficiency and thermal comfort analysis using the PowerDomus[®] hygrothermal simulation tool. In: 9th IBPSA INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, 9., **Proceedings...** Montreal (CAN), 2005.

MUI, K. W. H.; CHAN, W. T. D. Adaptive comfort temperature model of air-conditioned building in Hong Kong. **Building and Environment**, v. 38, n. 6, p. 837-852, jun. 2003.

NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. **Energy and Building**, v. 34, p. 563-572, 2002.

OLIVEIRA, L. L.; FREITAS, A. A.; TINÓS, R.; Multi-objective genetic algorithms in the study of the genetic code's adaptability. **Information Sciences**, v. 425, p. 49-61, 2018.

OZEL, M. Dynamic approach and cost analysis for optimum insulation thicknesses of the building external wall. **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, v. 23, p. 879-884, 2008.

POZO, A.; CAVALHEIRO; A. F.; ISHIDA; C.; SPINOSA, E.; RODRIGUES, E. M. **Computação evolutiva**. Curitiba: UFPR, 2005. Disponível em: <<http://www.inf.ufpr.br/aurora/disciplinas/datamining/Ceapostila.pdf>>. Acesso em: 11 ago. 2018.

STAVRAKAKIS, G. M.; ANDROUTSOPOULOS, A. V.; VYORYKKA, J. Experimental and numerical assessment of cool-roof impact on thermal and energy performance of a school building in Greece. **Energy and Buildings**, v. 130, p. 64-84, 2016.

TANABE, S.; KIMURA, K. Thermal comfort requirements under hot and humid conditions. In: ASHRAE FOR EAST CONFERENCE ON AIR CONDITIONING IN HOT CLIMATES, 1., **Proceeding...** Singapore, 1987.

XAVIER, A. A. P.; PINTO, N. M.; HATAKEYAMA, K. Thermal comfort in industrial environment: conditions and parameters. **Procedia Manufacturing**, v. 3, p. 4999-5006, 2015.

WANG, W.; RIVARD, H.; ZMEUREANU, R. G. Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization with genetic algorithms. **Advanced Engineering Informative**, v. 19, p. 5-23, 2005.

YANG, C.; LI, H.; REZGUI, Y.; PETRI, I.; YUCE, B.; CHEN, B.; JAYAN, B. High throughput computing based distributed genetic algorithm for building energy consumption optimization. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 92-101, 2014.

YU, W.; LI, B.; JIA, H.; ZHANG, M.; WANG, D. Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design. **Energy Building**, v. 88, p. 135-143. 2015.

APÊNDICE A – RANQUEAMENTO DO ISOLANTE ÓTIMO

Tabela 11 - Ranqueamento do isolante ótimo

(continua)

Ranque	Isolante Térmico	Espessura (cm)	AG valor
1	PU	1,0	0,375
2	PU	0,5	0,379
3	Lã de rocha	0,5	0,385
4	Lã de rocha	1,0	0,389
5	Lã de rocha	1,5	0,394
6	Lã de rocha	2,0	0,403
7	Lã de rocha	3,0	0,406
8	PU	2,0	0,408
9	Lã de rocha	3,5	0,409
10	PU	1,5	0,413
11	PU	3,0	0,415
12	Lã de rocha	2,5	0,42
13	Lã de rocha	4,0	0,421
14	PU	3,5	0,424
15	PU	2,5	0,425
16	Lã de rocha	4,5	0,429
17	PU	4,0	0,431
18	Lã de rocha	5	0,435
19	PU	4,5	0,438
20	PU	5	0,445
21	Lã de vidro	3,0	0,532
22	Lã de vidro	3,5	0,544
23	Lã de vidro	0,5	0,546
24	Lã de vidro	1,0	0,550
25	Lã de vidro	4,0	0,554
26	Lã de vidro	1,5	0,555
27	Lã de vidro	4,5	0,559
28	Lã de vidro	2,5	0,584
29	Lã de vidro	2,0	0,584
30	Lã de vidro	5	0,586
31	EPS	0,5	0,591

Tabela 11 - Ranqueamento do isolante ótimo

				(conclusão)
Ranque	Isolante Térmico	Espessura (cm)	AG valor	
32	EPS	1,0	0,598	
33	EPS	1,5	0,603	
34	EPS	2,0	0,608	
35	EPS	2,5	0,614	
36	EPS	3,0	0,619	
37	EPS	3,5	0,624	
38	EPS	4,5	0,629	
39	EPS	4,0	0,629	
40	EPS	5	0,639	

Fonte: Aatoria própria.

**APÊNDICE B – CÓDIGO ALGORITMO GENÉTICO IMPLEMENTADO NO
MATLAB®**

CÓDIGO ALGORITMO GENÉTICO IMPLEMENTADO NO MATLAB®

```

function [ valor_final ] = otimizacao_GA(U)
%Material 1=EPS, Material 2= PU, Material 3 = Lã de Rocha,
Material 4= Lã
load('PPD12.mat')
j1=[];
j1(1,1)=U(1);
Material=U(2);
L2=0.5:0.5:5;
L=L2(1,j1);
for t=1:1:12
mes=t;

    if Material ==1
        PPD=Fc_1(mes,L*2);
    end
    if Material ==2
        PPD=Fc_2(mes,L*2);
    end
    if Material ==3
        PPD=Fc_3(mes,L*2);
    end
    if Material ==4
        PPD=Fc_4(mes,L*2);
    end
    Fc(t)=0.6*PPD+0.25*Cost(Material,L*2)+0.1/WR(Material)+0.05*Di
    fterm(Material);
end
valor_final=sum(Fc)/12;
end

```

```

function [ valor_final ] = otimizacao_GA(U)
%Material 1=EPS, Material 2= PU, Material 3 = Lã de Rocha,
Material 4= Lã
load('PPD12.mat')
j1=[];
j1(1,1)=U(1);
Material=U(2);
L2=0.5:0.5:5;
L=L2(1,j1);
for t=1:1:12
mes=t;

    if Material ==1
        PPD=Fc_1(mes,L*2);
    end
    if Material ==2

```

```

        PPD=Fc_2(mes,L*2);
end
if Material ==3
    PPD=Fc_3(mes,L*2);
end
if Material ==4
    PPD=Fc_4(mes,L*2);
end
Fc(t)=0.6*PPD+0.25*Cost(Material,L*2)+0.1/WR(Material)+0.05/Di
fterm(Material);
end
valor_final=sum(Fc)/12;
end

function [] = ga_execute()
clear;clc;close all

var.lb=[1,1];
var.up=[10,4];
options.Display='diagnose';
[x,value,exitflag,output,population,scores]=ga(@otimizacao_GA,
2,[],[],[],[],var.lb,var.up,[],[1 2],options)
save('tes.mat')
z=[];
for i1=1:1:10
    for i2=1:1:4
        u=[i1 i2];
        [g,j]=size(z);
        z(g+1,1)=otimizacao_GA(u)
        z(g+1,2)=i1;
        z(g+1,3)=i2;
    end
end
save('tes.mat')
end

clear;clc;close all

load('resultado.mat')

figure('color',[1 1 1]);
surf(X,Y,Fobj_1)
xlim([0.5 5])
ylim([1 12])
xlabel('espessura')
ylabel('mes')
zlabel('Funçaoobjetiva')
title('EPS')

figure('color',[1 1 1]);

```

```
surf(X,Y,Fobj_2)
xlim([0.5 5])
ylim([1 12])
xlabel('espessura')
ylabel('mes')
zlabel('Funçaoobjetiva_1')
title('PU')

clear;clc;close all;

%l=0:1:10;
%material=1:1:4;
result=[];

for i1=1:1:10;
for i2=1:1:4;
    [i3,~]=size(result);
    result(i3+1,1)=i1;
    result(i3+1,2)=i2;
    result(i3+1,3)=otimizacao_GA([i1,i2]);

end
end

[~,i4]=sort(result(:,3));
result=[result(i4,1),result(i4,2),result(i4,3)]
```