



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE  
CURSO DE Mestrado Profissional em Eficiência Energética e Sustentabilidade

## **Simulações termoenergéticas em brises: Análise de otimização multiobjetivo e algoritmos genéticos aplicado em projeto baseado em desempenho**

**Camila Carli da Silva**

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

**Simulações termoenergéticas em brises: Análise de otimização  
multiobjetivo e algoritmos genéticos aplicado em projeto baseado em  
desempenho**

**CAMILA CARLI DA SILVA**

Projeto para aprovação do Mestrado Profissional apresentada na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração de Eficiência Energética.

**Orientador: Prof. Dr. Arthur Santos Silva**

**CAMPO GRANDE**

**SET / 2024**



Serviço Público Federal  
Ministério da Educação

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



## FOLHA DE APROVAÇÃO

CAMILA CARLI DA SILVA

**SIMULAÇÕES TERMOENERGÉTICAS EM BRISES: ANÁLISE DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO E ALGORITMOS GENÉTICOS APLICADO EM PROJETO BASEADO EM DESEMPENHO**

Redação final do Trabalho de Conclusão de Curso, aprovada pela Banca Examinadora em **27 de setembro de 2024** na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade.

### Banca examinadora:

Dr. Arthur Santos Silva (Interno)

Dra. Ana Paula da Silva Milani (Interno)

Dr. Marcio José Sorgato (Externo)

Dr. Andrés Batista Cheung (Interno) (Suplente)

Dra. Helena Rodi Neumann (Interno) (Suplente)

NOTA  
MÁXIMA  
NO MEC

UFMS  
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por Ana Paula da Silva Milani, Professora do Magistério Superior, em 27/09/2024, às 09:50, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA  
MÁXIMA  
NO MEC

UFMS  
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por Marcio José Sorgato, Usuário Externo, em 27/09/2024, às 13:13, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA  
MÁXIMA  
NO MEC

UFMS  
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por Arthur Santos Silva, Professor do Magisterio Superior, em 06/11/2024, às 08:37, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufms.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador 5140165 e o código CRC B1D9E597.

FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA

Av Costa e Silva, s/nº - Cidade Universitária

Fone:

CEP 79070-900 - Campo Grande - MS

## **AGRADECIMENTOS**

O trabalho foi realizado com apoio da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS/MEC/Brasil); da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes/Brasil) - Código de Financiamento 001; e da Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado do Mato Grosso do Sul (FUNDECT) à bolsa de estudos da pós-graduação.

## RESUMO

A construção civil é um dos setores que mais impacta o meio ambiente durante todo o ciclo de vida da edificação, sendo que um dos fatores que contribui para isto é o consumo de energia. Há estudos que mostram a importância das decisões de estratégias nas etapas iniciais do projeto de edifícios para diminuir o consumo de energia. Tendo isso em mente, este estudo propõe uma verificação de rotina de projeto para encontrar a forma de brises que permita ao ambiente ter mais iluminação natural com menos consumo de energia. Por serem soluções conflitantes utilizou-se a otimização multiobjetivo com a abordagem de algoritmos genéticos e NSGA II. A função-objetivo do problema foi minimizar a área do brise e a carga térmica de resfriamento e maximizar a iluminação natural. Para isso foram selecionados os seguintes indicadores: Área do brise (m<sup>2</sup>), CgTT (kWh/ano) e UDI – *Useful Daylight Illuminance* (%). O estudo de caso foi um modelo de pavimento subdividido em cinco zonas, quatro perimetrais e uma central com tipologia de escritório em Campo Grande (MS), sendo que a análise foi realizada em uma zona. Os parâmetros de projeto foram as diretrizes das NBR 15220-3, NBR 15575 e INI-C e as variáveis foram as coordenadas cartesianas dos brises. Para análise foi utilizado o Grasshopper® junto ao Rhinoceros® e os plug-ins do Ladybug Tools® (os quais possuem a base no EnergyPlus®, OpenStudio® e Radiance®) e o Wallacei® (que utiliza a abordagem NSGA II). Além da otimização, foi feita uma análise de sensibilidade, por meio do plug-in Colibri® e do software R®, para verificar quais elementos mais impactam na carga de resfriamento e iluminação natural. Foi gerado uma população de 1000 indivíduos e selecionadas soluções da Fronteira de Pareto. Os modelos otimizados apresentaram vantagens como permitir mais iluminação natural em todo o ambiente e redução de área do brise (o qual teria menos necessidade de material), porém resultando em um pequeno aumento no consumo de energia para resfriamento. Desta forma a otimização multiobjetivo pode auxiliar o profissional nos estágios iniciais de projeto.

## ABSTRACT

The construction industry is one of the sectors that most significantly impacts the environment throughout the building's life cycle, one of the factors that contributes to this is energy consumption. There are studies about the importance of strategic decisions in the early stages of building design to reduce energy consumption. So, this study proposes a design routine verification to identify the form of shading devices (brises) that allows for more natural lighting while minimizing energy consumption. These are conflicting solutions, because that multi-objective optimization was employed using genetic algorithms and the NSGA II approach. The objective function of the problem was to minimize the area of the shading device and the cooling load while maximizing natural lighting. For this purpose, the following indicators were selected: Area (m<sup>2</sup>), CgTT (kWh/ano), and UDI (%) – Useful Daylight Illuminance (%). The case study was a floor model subdivided into five zones—four peripheral and one central, with an office typology in Campo Grande (MS), and the analysis was conducted in one zone. The design parameters were guided by NBR 15220-3, NBR 15575, and INI-C, and the variables were the cartesian coordinates of the brises. The analysis was conducted using Grasshopper® along with Rhinoceros® and the Ladybug Tools® plugins (which are based on EnergyPlus®, OpenStudio®, and Radiance®) and Wallacei® (which uses the NSGA II approach). In addition to optimization, a sensitivity analysis was conducted using the Colibri® plugin and software R® to identify which elements have the most significant impact on cooling load and natural lighting. A population of 1000 individuals was generated, and solutions from the Pareto Front were selected. The optimized models showed advantages such as allowing more natural lighting throughout the whole environment and reducing the shading device area (which would require less material), but with a slight increase in cooling energy consumption. Thus, multi-objective optimization can assist professionals in the early stages of design.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - <i>City Hall</i> .....	24
Figura 2 - Abordagens para o algoritmo evolutivo.....	31
Figura 3 - Evolução do algoritmo genético conforme Coello (2006).....	32
Figura 4 - Abordagens encontradas na literatura para algoritmo genético .....	35
Figura 5 - Etapas do fluxo de trabalho .....	39
Figura 6 - Localização do estudo de caso .....	45
Figura 7 - Carta solar e a Rosa da radiação cidade de Campo Grande, MS. ....	45
Figura 8 - Gráfico de temperatura de bulbo Campo Grande (MS), com valores das médias horárias, e médias de mínimas e máximas horárias, para cada mês.....	46
Figura 9 - Gráfico de umidade Campo Grande (MS), com valores das médias horárias, e médias de mínimas e máximas horárias, para cada mês. ....	46
Figura 10 - Gráfico de radiação solar Campo Grande (MS), com valores das médias horárias, e médias de mínimas e máximas horárias, para cada mês. ....	47
Figura 11 - Zonas perimetrais do modelo .....	48
Figura 12 - Limites de ar do modelo .....	48
Figura 13 - Pontos cardeais originais do modelo .....	49
Figura 14 - Subdivisão do comprimento do brise .....	50
Figura 15 - Componente <i>LB Download Weather</i> .....	50
Figura 16 - Componentes <i>HB ConstrutionSet</i> e <i>HB ModifierSet</i> .....	51
Figura 17 – Componentes <i>HB Program Type</i> .....	51
Figura 18 - Componente <i>HB Simulation Parameter</i> .....	52
Figura 19 - Componentes <i>HB Room from Solid</i> e o <i>HB IdealAir</i> .....	52
Figura 20 - Componente <i>HB Model to OSM</i> .....	53
Figura 21 - Componentes <i>HB Annual Daylight</i> e <i>HB Daylight Control Schedule</i> .....	53
Figura 22 - Componentes para otimização e análise .....	61
Figura 23 - Orientação solar do modelo de otimização .....	62
Figura 24 - Carta solar do modelo.....	63
Figura 25 - Radiação incidente na fachada do modelo .....	63
Figura 26 - Comparação das últimas gerações para o indicador CgTT (kWh/ano) .....	73
Figura 27 - Comparação das últimas gerações para o indicador UDI (%) .....	73

Figura 28 - Comparação das últimas gerações para o indicador Área (m <sup>2</sup> ) .....	74
Figura 29 - Comparação das últimas gerações para o indicador C <sub>ilum</sub> (kWh/ano) .....	74
Figura 30 - Modelos base - sem e com brise retangular respectivamente .....	76
Figura 31 - Forma dos brises e gráfico diamante dos clusters do pavimento térreo .....	80
Figura 32 - Modelo do pavimento tipo .....	82
Figura 33 - Forma dos brises e gráfico diamante dos clusters do pavimento térreo .....	82
Figura 34 - Forma dos brises e gráfico diamante dos clusters do pavimento cobertura .....	85
Figura 35 - Edifício construído .....	87
Figura 36 - Forma dos brises e gráfico diamante dos clusters do modelo completo .....	89
Figura 37 - Forma dos brises e gráfico diamante dos clusters do modelo com brises iguais .....	93
Figura 38 - Fluxograma da verificação de projeto .....	112
Figura 39 - Boxplot C <sub>gTT</sub> (kWh/ano) – Análise de sensibilidade sem dimerização .....	113
Figura 40 - Boxplot UDI (%) – Análise de sensibilidade sem dimerização .....	115
Figura 41 - Boxplot UDI <sub>low</sub> (%) – Análise de sensibilidade sem dimerização .....	116
Figura 42 - Boxplot UDI <sub>up</sub> (%) – Análise de sensibilidade sem dimerização .....	117
Figura 43 - Boxplot C <sub>ilum</sub> (kWh/ano) – Análise de sensibilidade sem dimerização .....	118
Figura 44 – Boxplot C <sub>gTT</sub> (kWh/ano) – Análise de sensibilidade com dimerização .....	119
Figura 45 – Boxplot UDI (%) – Análise de sensibilidade com dimerização .....	121
Figura 46 - Boxplot UDI <sub>low</sub> (%) – Análise com dimerização .....	122
Figura 47 - Boxplot UDI <sub>up</sub> (%) – Análise de sensibilidade com dimerização .....	124
Figura 48 - Boxplot C <sub>ilum</sub> (kWh/ano) – Análise de sensibilidade com dimerização .....	125
Figura 49 - Gráfico da evolução do indicador C <sub>gTT</sub> (kWh/ano) do Teste 01 .....	128
Figura 50 - Gráfico da evolução do indicador UDI (%) do Teste 01 .....	129
Figura 51 - Gráfico da evolução do parâmetro Área (m <sup>2</sup> ) do Teste 01 .....	129
Figura 52 - Gráfico da evolução do parâmetro C <sub>ilum</sub> (kWh/ano) do Teste 01 .....	130
Figura 53 - Gráfico de dispersão C <sub>gTT</sub> (kWh/ano) x UDI (%) do Teste 01 .....	131
Figura 54 - Gráfico de dispersão C <sub>gTT</sub> (kWh/ano) x Área (m <sup>2</sup> ) do Teste 01 .....	131
Figura 55 - Gráfico de dispersão UDI (%) x Área (m <sup>2</sup> ) do Teste 01 .....	132
Figura 56 – Boxplot do UDI <sub>low</sub> (%) e UDI <sub>up</sub> (%) do Teste 01 .....	132
Figura 57 - Gráfico da evolução do indicador C <sub>gTT</sub> (kWh/ano) do Teste 02 .....	133
Figura 58 - Gráfico da evolução do indicador UDI (%) do Teste 02 .....	134
Figura 59 - Gráfico da evolução do indicador Área (m <sup>2</sup> ) do Teste 02 .....	134



Figura 60 - Gráfico da evolução do indicador $C_{ilum}$ (kWh/ano) do Teste 02.....	135
Figura 61 - Gráfico de dispersão $C_{gTT}$ (kWh/ano) x UDI (%) do Teste 02 .....	135
Figura 62 - Gráfico de dispersão $C_{gTT}$ (kWh/ano) x Área ( $m^2$ ) do Teste 02 .....	136
Figura 63 - Gráfico de dispersão UDI (%) x Área ( $m^2$ ) do Teste 02 .....	136
Figura 64 - Boxplot do $UDI_{low}$ (%) e $UDI_{up}$ (%) do Teste 02 .....	137
Figura 65 - Gráfico da evolução do indicador $C_{gTT}$ (kWh/ano) do Teste 03.....	138
Figura 66 - Gráfico da evolução do indicador UDI (%) do Teste 03 .....	138
Figura 67 - Gráfico da evolução do indicador Área ( $m^2$ ) do Teste 03.....	139
Figura 68 - Gráfico da evolução do parâmetro $C_{ilum}$ (kWh/ano) do Teste 03.....	139
Figura 69 - Gráfico de dispersão $C_{gTT}$ (kWh/ano) x UDI (%) do Teste 03 .....	140
Figura 70 - Gráfico de dispersão $C_{gTT}$ (kWh/ano) x Área ( $m^2$ ) do Teste 03 .....	141
Figura 71 - Gráfico de dispersão UDI (%) x Área ( $m^2$ ) do Teste 03 .....	141
Figura 72 - Boxplot do $UDI_{low}$ (%) e $UDI_{up}$ (%) do Teste 03 .....	142
Figura 73 - Gráfico da evolução do indicador $C_{gTT}$ (kWh/ano) do Teste 04.....	143
Figura 74 - Gráfico da evolução do indicador UDI (%) do Teste 04 .....	143
Figura 75 - Gráfico da evolução do indicador Área ( $m^2$ ) do Teste 04.....	144
Figura 76 - Gráfico da evolução do parâmetro $C_{ilum}$ (kWh/ano) do Teste 04.....	144
Figura 77 - Gráfico de dispersão $C_{gTT}$ (kWh/ano) x UDI (%) do Teste 04 .....	145
Figura 78 - Gráfico de dispersão $C_{gTT}$ (kWh/ano) x Área ( $m^2$ ) do Teste 04 .....	145
Figura 79 - Gráfico de dispersão UDI (%) x Área ( $m^2$ ) do Teste 04 .....	146
Figura 80 - Boxplot do $UDI_{low}$ (%) e $UDI_{up}$ (%) do Teste 04.....	146

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Medidas das zonas do modelo .....	47
Tabela 2 - Propriedades físicas e construtivas dos materiais .....	54
Tabela 3 - Propriedades físicas brise .....	55
Tabela 4 - Temperatura do solo ao longo do ano.....	55
Tabela 5 - Configuração da Schedule .....	56
Tabela 6 - Propriedades físicas dos componentes para o modelo lumínico .....	56
Tabela 7 - Orientações solar para análise de sensibilidade .....	58
Tabela 8 – Propriedades físicas dos vidros.....	59
Tabela 9 - Propriedades físicas do modelo de otimização .....	64
Tabela 10 - Características das primeiras otimizações .....	65
Tabela 11 - Indicadores para otimização.....	66
Tabela 12 - Dados obtidos para a análise de sensibilidade sem dimerização.....	69
Tabela 13 - Dados obtidos para a análise de sensibilidade com dimerização .....	70
Tabela 14 - Comparação das variáveis significativas para as análises.....	71
Tabela 15 - Resumo da comparação entre as primeiras e as últimas gerações.....	75
Tabela 16 - Valores das simulações energéticas e lumínicas dos modelos base .....	77
Tabela 17 - Mapa de calor para CgTT (kWh/ano) e UDI (%) dos modelos base .....	78
Tabela 18 – Valores normalizados dos clusters do Pavimento Térreo .....	80
Tabela 19 - Informações do Indivíduo 16 (Pavimento térreo) .....	81
Tabela 20 - Valores normalizados dos clusters do Pavimento Tipo .....	84
Tabela 21 - Informações do Indivíduo 17 (Pavimento tipo) .....	84
Tabela 22 - Valores normalizados dos clusters do Pavimento Cobertura .....	86
Tabela 23 - Informações do Indivíduo 41 (Pavimento cobertura) .....	86
Tabela 24 - Valores das Simulações energéticas e lumínicas do Edifício construído .....	87
Tabela 25 - Mapa de calor para CgTT (kWh/ano) e UDI (%) dos modelos construído.....	88
Tabela 26 - Comparação dos valores dos indicadores CgTT (kWh/ano) e UDI (%) para o Edifício Construído.....	88
Tabela 27 - Valores normalizados dos clusters do Modelo Completo .....	91
Tabela 28 - Informações do Indivíduo 37 (Modelo completo).....	92
Tabela 29 - Valores normalizados dos clusters do Modelo com brises iguais .....	94

Tabela 30 - Informações do Indivíduo 30 (Modelo com brises iguais) .....	95
Tabela 31 - Modelos finais para análise .....	96
Tabela 32 - Valores para aquecimento e equipamentos elétricos .....	97
Tabela 33 - Valores para análise comparativa dos cinco modelos .....	99
Tabela 34 - Mapa de calor com médias de iluminação entre 300 lux e 3000 lux .....	100
Tabela 35 - Anova CgTT (kWh/ano) – Análise de sensibilidade sem dimerização .....	114
Tabela 36 - Anova UDI (%) - Análise de sensibilidade sem dimerização .....	115
Tabela 37 - Anova UDI <sub>low</sub> (%) - Análise de sensibilidade sem dimerização .....	116
Tabela 38 - Anova UDI <sub>up</sub> (%) – Análise de sensibilidade sem dimerização .....	118
Tabela 39 - Anova CgTT (kWh/ano) - Análise de sensibilidade com dimerização.....	120
Tabela 40 - Anova UDI (%) - Análise de sensibilidade com dimerização.....	121
Tabela 41 - Anova UDI <sub>low</sub> (%) - Análise de sensibilidade com dimerização .....	123
Tabela 42 - Anova UDI <sub>up</sub> (%) - Análise com dimerização .....	124
Tabela 43 - Anova C <sub>ilum</sub> (kWh/ano) – Análise de sensibilidade com dimerização .....	126
Tabela 44 - Estatística descritiva UDI (%) do Teste 01 .....	132
Tabela 45 - Estatística descritiva UDI (%) do Teste 02 .....	137
Tabela 46 - Estatística descritiva UDI (%) do Teste 03 .....	141
Tabela 47 - Estatística descritiva UDI (%) do Teste 04 .....	146

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 OBJETIVOS .....	18
1.1.1 Objetivo Geral .....	18
1.1.2 Objetivos específicos.....	18
1.2 JUSTIFICATIVA .....	18
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>22</b>
2.1 PROJETO BASEADO EM DESEMPENHO .....	22
2.2 ILUMINAÇÃO NATURAL.....	26
2.3 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO .....	28
2.4 ALGORITMO EVOLUTIVO E ALGORITMOS GENÉTICOS .....	32
2.5 NONDOMINATED SORTING GENETIC ALGORITHM II (NSGA II) .....	35
2.6 TOMADA DE DECISÃO .....	37
<b>3 MÉTODO</b> .....	<b>39</b>
3.1 DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS: PARÂMETROS E ALGORITMO.....	40
3.1.1 Conjunto de ferramentas computacionais.....	40
3.1.2 Critérios de desempenho.....	42
3.2 ESTUDO DE CASO.....	44
3.2.1 Análise do clima e carta solar .....	44
3.2.2 Modelo geométrico.....	47
3.2.3 Modelagem do brise .....	49
3.2.4 Modelo energético.....	50
3.2.5 Modelo lumínico .....	56
3.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	57
3.4 OTIMIZAÇÃO.....	60
3.4.1 Configuração da otimização .....	62
3.4.2 Otimização preliminar: verificação dos parâmetros .....	64
3.4.3 Otimização final: edifício com cinco pavimentos.....	65
3.4.4 Escolha das soluções e análise dos resultados .....	67
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>68</b>

4.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	68
4.2 OTIMIZAÇÃO PRELIMINAR: VERIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DO ALGORITMO .....	71
4.3 OTIMIZAÇÃO FINAL: EDIFÍCIO COM CINCO PAVIMENTOS.....	75
4.3.1 Modelos base .....	76
4.3.2 Modelo Construído .....	79
4.3.2.1 Pavimento térreo .....	79
4.3.2.2 Pavimento tipo.....	81
4.3.2.3 Pavimento cobertura .....	85
4.3.3 Modelo construído final.....	86
4.3.4 Modelo completo.....	89
4.3.5 Modelo com brises iguais .....	92
4.4 ANÁLISE DOS EDIFÍCIOS .....	95
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>101</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>105</b>
<b>APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DA VERIFICAÇÃO DE PROJETO .....</b>	<b>112</b>
<b>APÊNDICE B – RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....</b>	<b>113</b>
ANÁLISE DE SENSIBILIDADE SEM DIMERIZAÇÃO.....	113
ANÁLISE DE SENSIBILIDADE COM DIMERIZAÇÃO .....	118
<b>APÊNDICE C – ANÁLISE DOS RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO PRELIMINAR.....</b>	<b>127</b>
TESTE 01 .....	127
TESTE 02 .....	133
TESTE 03 .....	137
TESTE 04 .....	142

## 1 INTRODUÇÃO

Não é de hoje que o mundo busca promover harmonia entre os seres humanos e a natureza, o debate sobre desenvolvimento sustentável e sustentabilidade retoma a década de 1960 quando se iniciou a observação de novos fenômenos naturais, como as chuvas ácidas (CBIB, 2012). De acordo com o relatório “Nosso Futuro Comum”, o conceito de desenvolvimento sustentável é:

*“Aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem a suas próprias necessidades” (Comissão Mundial Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1991, Pg. 46).*

Entretanto não é essa a realidade e hoje há impactos que foram causados pelas ações do ser humano e entre eles está a mudança climática. De acordo com *The Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) as atividades do ser humano, principalmente aquelas em que há emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE)<sup>1</sup>, contribuem para o aquecimento global. De acordo com o IPCC (2020), houve um aumento de 1,1°C na superfície global entre os anos de 1850 e 2020, o que foi causado devido ao uso insustentável de energia, do solo e das mudanças, estilos de vida, padrões de consumo e produção, originando impactos adversos em alguns setores, como a segurança alimentar e hídrica.

Além disso, a emissão de GEE aumentou em todos os principais setores, sendo que no setor energético houve um aumento de 34%; o setor industrial aumentou 24%; o setor da agricultura, florestas e uso do solo aumentou 22%; o setor do transporte aumentou 15%; e o setor de edifícios aumentou 6% (IPCC, 2020).

A cada ano há aumento na demanda de energia, conforme a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Brasil consumiu 509TWh<sup>2</sup> em 2022, e houve aumento de aproximadamente 2,4% comparado ao ano anterior. Do valor consumido no país o setor industrial representa 36,2%, o residencial 30,0% e o comercial 18,2% (EPE, 2023). A construção civil é um dos setores que mais impacta o meio ambiente pelo uso de energia durante o ciclo de vida da edificação, sendo que em países desenvolvidos esse valor fica entre 40% e 50% da energia consumida do país (Du Plessis, 2002).

---

<sup>1</sup> Conforme o site ABNT Online os gases de efeito estufa (GEE) são gases presentes naturalmente na atmosfera que absorvem parte da radiação infravermelha emitida pelo Sol e refletida pela superfície terrestre, dificultando evasão da radiação para o espaço. Os gases são: Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Metano (CH<sub>4</sub>), óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O), Hexafluoreto de Enxofre (SF<sub>6</sub>) e duas famílias de gases, Hidrofluorcarbono (HFC) e Perfluorcarbono (PFC).

<sup>2</sup> TWh – Terawatt-hora equivale a 10<sup>12</sup> Wh ou 3,6x10<sup>15</sup> joules. Para comparação Quilowatt-hora equivale a 1000Wh ou 3,6x10<sup>6</sup> joules.

Entretanto é necessário ir além do consumo de energia, é necessário analisar o impacto que o ambiente causa na saúde do usuário, visto que o ser humano passa quase 90% do tempo dentro de ambientes fechados (Klepeis *et al.*, 2001). Estudos demonstram que o ambiente construído afeta a fisiologia e o comportamento das pessoas, desta forma a arquitetura pode impactar a saúde, felicidade e função fisiológica do homem (St-Jean; Clark; Jemtrud, 2022).

Entre as características que impactam o usuário está a iluminação natural. A quantidade de iluminação natural possui relação com a qualidade de sono, saúde e bem-estar dos trabalhadores, pois ambientes com mais de 50% das horas ocupadas acima de 300 lux aumentam o tempo e a eficiência do sono, impactando no ciclo circadiano (Lee; Boubekri, 2020).

Além disto, a iluminação natural associada com vistas naturais promove menores sintomas de desconforto ocular e estresse, maior saturação arterial de oxigênio (o qual está relacionado com os sintomas da Síndrome do Edifício Doente, como a fadiga), além de reduzir 82% do consumo da energia de iluminação (Jiang *et al.*, 2022). A iluminação natural também reflete em decisões econômicas, em um ambiente urbano denso, como Manhattan (Nova Iorque, EUA), inquilinos pagam entre 5% e 6% a mais no valor do aluguel dos escritórios para terem acessos a espaços com mais iluminação natural, independente de outros fatores, como certificado LEED (Turan *et al.*, 2020).

Nesse sentido, o projeto de edificações engloba a análise de vários fatores que impactam nas decisões do arquiteto, tais como o aquecimento, o resfriamento e a demanda de energia do edifício, o que implica em haver soluções ambientais holísticas (Gercek, 2019). Por isso é preciso haver novas maneiras de se conceber e projetar edificações para que se atendam as novas demandas. Para desenvolver um projeto eficaz é necessário fazer escolhas de estratégias passivas nos estágios iniciais, pois pode melhorar o desempenho energético, iluminação e ventilação natural (Tian *et al.*, 2018). Entretanto, essas estratégias possuem variedades de soluções, o que dificulta a definir qual a melhor opção para o projeto.

O design digital é um dos processos que auxilia no desenvolvimento do projeto arquitetônico. Conforme Oxman (2008) o design digital é quando há uma transformação e geração do modelo geométrico, além de permite análises das simulações de desempenho solar ou estrutural e essa análise do processo de simulação com a geração da forma em ambiente digital é chamado de *Performative Design* ou *performance-based design* (projeto baseado em desempenho), o qual se torna determinante para a criação da forma arquitetônica.

O projeto baseado em desempenho é uma alternativa que auxiliará os profissionais a elaborarem projetos mais eficientes energeticamente desde as primeiras etapas. Acredita-se que a integração de análise de desempenho no estágio inicial em conjunto a simulação computacional contribuirá para melhores projetos, dessa forma, autores buscam compreender melhor o conceito de projeto baseado em desempenho (Lin; Gerber, 2014).

Esse projeto explora simulações computacionais para auxiliar a encontrar soluções e geometria associadas a determinados objetivos, e é isso que diferencia do método tradicional, pois são os indicadores de desempenho oriundos da simulação que norteiam a geração da volumetria (Queiroz; Pereira, 2020). Um recurso abordado nos últimos anos é o uso da “parametria” (ou simulação paramétrica), que aliada ao desempenho térmico melhora a eficiência energética do edifício. Conforme Santana *et al.* (2015), a simulação paramétrica pode auxiliar os arquitetos no processo de projeto, fornecendo soluções para que seja analisado o desempenho e dessa forma possa criar soluções mais apropriadas ao caso.

Porém, os projetos que prezam pela eficiência energética requerem um trabalho colaborativo entre diversas áreas (desde a arquitetura ao sistema de ventilação e ar-condicionado) (Tian *et al.*, 2018). Portanto, quando se desenvolve um projeto paramétrico baseado em desempenho há mais de uma condicionante que influencia as decisões das estratégias arquitetônicas, aumentando a quantidade de informações que será analisada. Assim, dentro do conceito de parametria existe a abordagem estatística de otimização multiobjetivo, o qual permite analisar a interação entre os parâmetros de entrada e os impactos no desempenho da edificação, pois utiliza métodos iterativos, com progressivas melhoras no modelo até encontrar uma solução que satisfaça determinadas condições de otimização delimitada pelo analista, além de outras restrições e convergências (Santana *et al.*, 2015).

Gercek *et al.* (2019) analisaram a sensibilidade de variáveis no desempenho de edifícios residenciais, por meio da avaliação do consumo de energia para aquecimento, refrigeração e emissões de CO<sub>2</sub>, considerando a Turquia como contexto de simulação para analisar o desempenho do modelo para os cenários climáticos de 2020, 2050 e 2080. O estudo permite compreender que é necessário conscientizar os profissionais sobre a importância das decisões no processo inicial de projeto (Gercek *et al.*, 2019).

As pesquisas em torno de modelagem paramétrica com otimização multiobjetivo com foco no desempenho térmico avançou nos últimos anos, principalmente para encontrar um método e



análises estatísticas que auxiliem os projetistas a criarem e selecionarem a melhor solução para os projetos. Santana *et al.* (2015) estudaram como a forma da volumetria pode impactar de maneira significativa a eficiência energética, por meio de modelos de regressão linear multivariada e concluíram que o uso do método se justifica para agilizar a análise do desempenho térmico. Os autores utilizaram métodos de regressão linear para aplicar a otimização e determinarem o nível de eficiência energética de unidades habitacionais conforme o Programa Brasileiro de Etiquetagem do Inmetro. Os autores determinaram como parâmetros a profundidade e largura dos ambientes internos em um modelo de unidade habitacional. Como resultado obtiveram 55 modelos que variaram a forma e, dentre esses, 9% alcançaram nível de eficiência A, 87% nível B e 4% nível C.

Além de buscarem o desempenho térmico, há estudos que adicionam a variável de desempenho lumínico e propõem processos de otimização baseada em simulação. Silva et al. (2018) utilizaram processos de otimização baseada em simulação para gerar novas configurações espaciais e volumétricas a partir de parâmetros como Intensidade do Uso Energético (EUI, do inglês Energy Use Intensity) e iluminância útil de luz natural (UDI, do inglês Useful Daylight Illuminance), os autores obtiveram resultados significativos na área relacionando a iluminação natural com o consumo energético a partir da geração de formas e volumetrias, alcançando melhoria de 5% nos níveis de EUI e 20% de UDI em relação ao caso inicial. E concluíram que podem aplicar em casos de maior complexidade ou avaliar um maior número de parâmetros

Outro aspecto encontrado na literatura é o impacto da fachada dos edifícios na eficiência energética, a qual filtra e promove a interação entre o interior e exterior do edifício (Queiroz; Pereira, 2020). No estudo realizado por Queiroz e Pereira (2020), os autores utilizaram um modelo simplificado para processos de otimização de soluções de materialidade e geometria para o controle solar em fachadas com base em requisitos de desempenho térmico e de iluminação natural para todo o ano. Os critérios utilizados foram a análise de iluminação, desempenho térmico e tamanho da sacada e concluíram que por meio da otimização é possível reduzir custos e estabelecer soluções complexas para que as regras de estéticas interajam com os indicadores de desempenho (Queiroz; Pereira, 2020).

A fim de encontrar as soluções para estudos de otimização, é necessário definir os parâmetros de eficiência energética, os quais são fundamentados a partir de dados estatísticos levantados das edificações (Santana *et al.*, 2015). No Brasil as análises surgiram por regressão multivariada de parâmetros desenvolvidos pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem do Inmetro,

que permitem tomar decisões que impactam materiais, sistemas de ventilação, composição da fachada e forma da edificação (Santana *et al.*, 2015).

Mudar o método de projeto de edifícios pode contribuir para um futuro mais sustentável, porém surgem algumas perguntas. Existe uma diferença significativa no desempenho térmico do edifício ao usar otimização multiobjetivo no processo de projeto? Quais são as dificuldades encontradas na execução da otimização multiobjetivo? Assim a pesquisa visa analisar as variáveis e os parâmetros que influenciam na otimização multiobjetivo e comparar os desempenhos obtidos de uma abertura sem brise, com brise retangular e com brises otimizados.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral é propor uma rotina de verificação de projeto de brises em aberturas de fachada em edificações comerciais, usando otimização multiobjetivo e diferentes critérios de desempenho térmico, lumínico e energético.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Determinar variáveis influentes no consumo de energia, iluminação natural e artificial por meio de análise de sensibilidade, considerando aspectos das aberturas no modelo base;
- Investigar parâmetros adequados para o algoritmo NSGA II de otimização por meio de testes independentes, buscando-se verificar a melhor combinação entre os critérios de desempenho, tamanho da população e quantidade de gerações;
- Propor uma rotina de projeto para a geração de geometrias, usando a parametrização e otimização multiobjetivo, por meio de simulação computacional;
- Comparar os resultados de desempenho térmico e lumínico dos brises gerados com outros métodos tradicionais de projeto, e propor maneiras de tomada de decisão considerando a Fronteira de Pareto.

## **1.2 Justificativa**

A principal motivação desse trabalho, considerando o objetivo de propor uma rotina de projeto baseado em desempenho com otimização multiobjetivo, é auxiliar o profissional da área a

desenvolver o projeto arquitetônico com foco nos estágios iniciais e levar em conta diferentes critérios de desempenho.

Como o cenário mundial busca por alternativas de sustentabilidade, a Resolução da Assembleia Geral da ONU (2015) relata que as principais conferências e cúpulas realizadas têm buscado soluções para o desenvolvimento sustentável, principalmente por ações globais. As expectativas são que possamos ser uma sociedade socialmente justa e que os impactos produzidos por nós sejam menores do que a capacidade do meio ambiente de se recuperar (CBIB, 2012).

Conforme a Resolução da ONU (Assembly, 2015), o desenvolvimento sustentável possui três dimensões: econômica, social e ambiental. Na esfera ambiental há preocupação com o esgotamento dos recursos naturais e a degradação ambiental, como resultado há desertificação, secas, degradação dos solos escassez da água doce, perda da biodiversidade e aumento na temperatura global que colocam em risco as sociedades e sistemas biológicos (Assembly, 2015). Os edifícios podem colaborar para diminuir esses impactos ao serem projetados tendo como meta o uso racional de energia de acordo com as condições geográficas, climáticas e culturais, contribuindo para soluções inovadoras de energia renovável (Mossin *et al.*, 2018).

Outra questão que se discute há 30 anos é a saúde dos trabalhadores. A *World Health Organization* (WHO) defendeu, em 1994, a urgência de desenvolver a saúde ocupacional dos trabalhadores, visto que o ponto focal das atividades é o local de trabalho. A organização defende que os empregadores são responsáveis por planejar e organizar um ambiente de trabalho seguro e saudável (World Health Organization, 1994), e um dos indicadores que proporciona um ambiente saudável é a iluminação natural.

Ao rever o processo de criação de projeto é possível melhorar as demandas de eficiência energética e promover a saúde mental e o bem-estar do usuário do edifício, fomentado as metas da ODS 7 e ODS 3, respectivamente. De acordo com Andrade e Ruschel (2012) as práticas digitais tornam os projetos mais conscientes e sustentáveis, pois consideram a eficiência energética, a redução do consumo de materiais e outras forças relacionadas à sustentabilidade (e.g., critérios de desempenho), como instrumentos propulsores da geração da forma.

Entre os métodos estudados há o projeto baseado em desempenho aliado à otimização multiobjetivo, que apresenta resultados significativos para área de simulação de edificações. Conforme Oxman (2008), o projeto baseado em desempenho pode ser um fator determinante e um

método de criação, visto que rompe com o tradicional projeto de “criar formas” para “encontrar formas”. Assim, o método é importante para os estágios iniciais de projeto, pois as decisões impactam diretamente na eficiência energética da edificação (Costa *et al.*, 2018).

O projeto baseado em desempenho geralmente é considerado como uma abordagem de projeto que possui o desempenho do edifício como fator orientador no projeto para, assim, explorar as simulações e modificar a forma geométrica para otimizar o objetivo (Oxman, 2008). A otimização multiobjetivo aparece como uma ferramenta auxiliar para diminuir as dúvidas a respeito de qual alternativa seria a mais adequada. Para Lin e Gerber (2014), a otimização multiobjetivo pode complementar os processos do projeto baseado em desempenho ao fornecer o feedback quantitativo do desempenho desejado. Um conjunto de alternativas de projeto pode ser gerado, avaliado e classificado de acordo com vários critérios, reduzindo a latência do ciclo de projeto e melhorando os aspectos de incertezas do projeto (Lin; Gerber, 2014).

De acordo com o estudo de Costa *et al.* (2021), ao analisar globalmente todas as possibilidades de otimização avaliadas para a forma da edificação, houve uma redução de 24% do consumo de energia em relação ao modelo inicial. Esse resultado mostra o potencial de usar a otimização multiobjetivo para propor edificações mais eficientes.

Tanto o projeto baseado em desempenho quanto a otimização multiobjetivo apresentam resultados significativos na literatura que contribuem para o desenvolvimento sustentável. É possível atender as demandas de eficiência energética em um processo de projeto que combine as duas metodologias melhorando assim o setor da construção civil.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

Este trabalho está subdividido nos seguintes tópicos:

- Introdução, que consta: um resumo sobre o desenvolvimento sustentável, a situação energética mundial, projeto baseado em desempenho e abordagens estatísticas encontradas na literatura;
- Revisão bibliográfica, que consta: explicação sobre o conceito e características dos métodos de otimização multiobjetivo, algoritmos evolutivos e genéticos, NSGA, projeto baseado em desempenho e iluminação natural;

- Método, a qual consta: explicação sobre os softwares, as etapas desenvolvidas no algoritmo, as configurações realizadas e os parâmetros escolhidos;
- Resultados, que consta: apresentação dos resultados;
- Conclusão, a qual consta: conclusão e considerações finais sobre o estudo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi estruturada em seis conceitos principais:

1. Projeto baseado em desempenho: abordagem que une o conceito de otimização multiobjetivo com a eficiência energética;
2. Iluminação natural: breve explicação sobre usar a iluminação natural como estratégia de projeto;
3. Otimização multiobjetivo: consta seu conceito e as abordagens que foram desenvolvidas para encontrar as soluções;
4. Algoritmos evolutivos e algoritmos genéticos: estudos desenvolvidos para solucionar os problemas da Otimização multiobjetivo;
5. *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II*: apresentação deste método, o qual é usado para resolver os algoritmos genéticos;
6. Tomada de decisão: apresentação de estudos que propõem um fluxo para diminuir as opções de soluções obtidas na otimização multiobjetivo.

### 2.1 Projeto baseado em desempenho

De acordo Caldas (2002), a interação entre características de design, clima, ocupantes, sistemas mecânico e elétrico é complexa, e somente com a simulação é possível compreender todos os fatores envolvidos no processo. Entre as técnicas que contribuem para essa interação está o sistema de modelagem paramétrica, a qual permite estimar rapidamente os resultados de simulações de desempenho, como o uso de energia do edifício, quantidade de material, disponibilidade de luz natural, entre outros para que possa alcançar metas que são preocupações globais de projeto, tais como custo, pegada de carbono, eficiência de recursos e conforto térmico (Brown; Mueller, 2019).

O avanço das ferramentas computacionais para desenvolvimento de projetos possibilitou que o desempenho tenha maior peso nas tomadas decisão nos projetos, contudo os projetistas encontram dificuldade para explorar adequadamente as alternativas de projeto e as suas consequências sobre o consumo de energia devido aos desafios entre design e desempenho energético (Lin; Gerber; 2014). Entre as perspectivas estudadas sobre, há o *Performance-based design* (ou projeto baseado em desempenho), o qual pode ser considerado uma abordagem na qual a performance do edifício é um fator guia para o projeto, na arquitetura pode alterar as propriedades

geométricas baseada nas análises de desempenho conforme os objetivos da otimização (Oxman, 2008).

As simulações durante o processo fornecem feedbacks e orientações que podem simplificar e aprimorar o progresso de projeto, auxiliando os profissionais a identificarem padrões e descobrirem informações úteis, além de sugerir conclusões e dar suporte à tomada de decisões durante a exploração das opções de desenho (Brown; Muller, 2019). Atualmente a análise de desempenho acaba ocorrendo após a fase inicial de projeto, o que resulta em um conjunto limitado de soluções, entretanto se o contrário fosse feito desde o início, haveria outros problemas, como os dois grupos de fatores que mais contribuem para os desafios (Lin; Geber, 2014):

1. A interoperabilidade entre os softwares e diferentes conhecimentos de domínios, que poderia ser resolvido por meio de um modelo de dados, padronização de processos e o desenvolvimento de uma estrutura colaborativa;
2. Falta de um método de pesquisa inteligente que possua uma avaliação rápida e análise dos resultados para auxiliar na tomada de decisão de projeto nos estágios iniciais de projeto, e como consequência se subdivide em dificuldade de analisar os resultados e falta de uma técnica de otimização.

Ainda assim, as simulações podem permitir maior controle sobre o desempenho, fornecendo maneiras de manipular a geometria e a análise de dados extraídos pode auxiliar a automatizar partes do processo, especialmente para importantes tipologias de construção (Brown; Muller, 2019). Oxman (2008) cita alguns projetos que utilizaram o Projeto baseado em desempenho, como o *City Hall* (Figura 1), projetado por *Foster and Partners* em 2001.

De acordo com o site do escritório de arquitetura a forma do edifício é derivada de uma esfera geometricamente modificada, desenvolvida por meio de técnicas de modelagem computacional. A forma atinge um desempenho energético ideal, minimizando a área de superfície exposta a luz solar direta, além de estratégias de sombreamentos ativos e passivos, sistemas de refrigeração e técnicas que economizam energia; dessa forma, o edifício utiliza apenas um quarto de energia do que outro da mesma categoria (Foster and Partners, 2023).

Figura 1 - City Hall



Fonte: Foster and Partners (2023)

Entre as questões teóricas e metodológicas relacionadas ao projeto baseado em desempenho está o conceito de morfogênese, que é a chave para gerar a forma a partir do desempenho, o qual é o potencial de integração entre abordagem computacional com design generativo, dessa forma o projeto baseado em performance e outras abordagens podem mudar o paradigma da arquitetura, a qual deixa-se de fazer a forma para encontrar a forma (Oxman, 2008).

O *multidisciplinary design optimization* (MDO) utiliza a modelagem paramétrica aliada às técnicas de otimização e tem sido considerada como uma solução em potencial para fornecer um método de pesquisa inteligente para um feedback eficiente com a finalidade de resolver problemas com multiobjetivos, esse processo de design vem sendo utilizado na indústria aeroespacial e automobilística demonstrando ser eficaz por integrar múltiplos domínios especializados e decisões impactantes no processo de design do produto, apresentando também potencial ao ser aplicado na indústria da construção civil e potencialmente eficaz para superar as limitações dos processos atuais de projeto baseado em desempenho (Lin; Gerber, 2014).

O design de otimização multiobjetivo tem potencial de auxiliar as tomadas de decisões no projeto arquitetônico, pois permite fazer análises de desempenho nos estágios iniciais fornecendo alternativas de projeto, que podem ser geradas, avaliadas e classificadas de acordo com vários critérios (Lin *et al.*, 2024). Permitindo aos profissionais respostas rápidas para apoiar suas decisões, entender qual é a melhor solução de geometria para o edifício, proporção das áreas de envidraçamento, qual o melhor tipo de vidro, entre outros, dessa forma é possível se concentrar no melhor conjunto possível de soluções iniciais para orientar o projeto (Queiroz; Westphal; Pereira,



2020). Dessa forma vários estudos surgiram na área de projeto de arquitetura como foco na aplicação do *multidisciplinary design optimization*.

Em seu estudo, Silva *et al.* (2018) tiveram como objetivo otimizar a iluminação natural e consumo de energia para gerar novas configurações espaciais e volumétricas de uma edificação existente, para alcançar o objetivo fizeram a seguinte divisão na metodologia:

1. Pré-processamento: a qual foi construída pela escolha da edificação e análise das características, decisões iniciais para a parametrização da edificação, seleção dos parâmetros que serão avaliados, modelagem da edificação e simulação do caso inicial;
2. Processamento: que consiste na otimização do modelo, o qual foi constituído por definir o método e avaliar os índices, configuração da ferramenta de otimização, execução da simulação e realização do processo da otimização;
3. Pós-processamento: o qual foi estabelecida a metodologia de análise.

Como resultado obtiveram uma redução de 30%, equivalente a 14 kWh/(m<sup>2</sup>.ano), no consumo de energia comparado ao existente, além de uma melhora de 20% nos níveis de iluminação natural (Silva *et al.*, 2018).

Os autores Lin e Gerber (2014) exploram o *Evolutionary Energy Performance Feedback for Design* (EPPFD), o qual fornece um feedback mais rápido do desempenho nos estágios iniciais do design. Para os autores, o EPPFD é uma abordagem que utiliza os dois componentes essenciais de *multidisciplinary design optimization*, design paramétrico e otimização multiobjetivo:

*“O EPPFD incorpora ambos os conceitos análise de energia e exploração de projeto de geometria simples a complexa, a fim de fornecer um feedback de desempenho energético para a tomada de decisões de projeto em estágio inicial” (Lin; Gerber, 2014, p.61)*

Lin e Gerber (2014) abordam o desenvolvimento e validação inicial atendendo a duas necessidades encontradas, variar os ângulos de uma geometria complexa e fornecer um melhor feedback para desempenho com múltiplas funções objetivo, utilizando os indicadores *energy use intensity* (EUI), *net present value* (NPV), e *spatial programming compliance* (SPC) e definem em seis etapas o processo de aplicação:

1. Geração inicial do design e alternativas, no EPPFD o design original é um modelo paramétrico e um arquivo com restrições. Nessa etapa o usuário além de modelar a geometria, configura manualmente os parâmetros, intervalos aplicáveis, informações do local, os requisitos do programa e as informações financeiras disponíveis;

2. Transferência do modelo do software de modelagem para o de análise de energia;
3. Configuração do modelo de energia;
4. Executar análise;
5. Avaliar os resultados;
6. Tomar uma decisão.

Após a configuração inicial no sistema automatizado na etapa 1, as próximas etapas são repetidas até que o loop de automação seja interrompido pelo usuário. Ao final do ciclo há dois caminhos: (1) o projeto avança para a próxima etapa com a solução escolhida fornecida com base na análise fornecida pela EEPFD, ou (2) o usuário implementa manualmente as alterações e recomeçar o ciclo (Lin; Geber, 2014).

O estudo de Queiroz e Pereira (2020) buscou otimizar soluções para o controle solar utilizando os indicadores de radiação solar, *Useful Daylight Illuminance* (UDI) e área dos elementos de proteção solar. Sua metodologia consistia em três etapas: (1) seleção do case base e estabelecimento do modelo paramétrico de controle solar; (2) formulação do modelo analítico-geométrico integrado e (3) compilação das soluções de otimização e discussão. Com a metodologia aplicada, os autores fizeram a análise de sete soluções e concluíram que com base nos valores encontrados, é possível a otimização auxiliar nas decisões de projeto.

Com a finalidade de explorar adequadamente as alternativas do projeto baseado em desempenho é necessário subdividir o processo, para obter um feedback eficiente ao resolver os problemas da otimização multiobjetivo e auxiliando nas tomadas de decisão dos estágios iniciais do projeto arquitetônico.

## **2.2 Iluminação natural**

Usar a iluminação natural como um dos fatores que norteiam as escolhas de projeto pode apresentar vantagens. A principal fonte da luz natural é a radiação solar, ela pode ser direta ou indireta, sendo mais desejável que a luz artificial em salas comerciais e escritórios, porque ajuda aliviar a tensão e serve como estímulo ambiental (Lamberts; Dutra; Pereira, 2013) e a unidade de medida da iluminação é o lux (Neufert, 2013).

É importante a integração do projeto de iluminação com as necessidades térmicas e acústicas, visto que a luz natural penetra nos ambientes internos pelas aberturas, as quais também podem transmitir calor e som para o interior (Lamberts; Dutra; Pereira, 2013). Otimizando a luz

natural há redução do consumo de energia com a iluminação artificial; entretanto, é necessário ter cautela com esta estratégia para que não haja excesso de brilho ou calor causando desconforto aos usuários e aumento do consumo de energia para resfriar o local (Hakimazari *et al.*, 2024).

Deve-se ter em consideração a quantidade de iluminação que incide no ambiente, pois se a iluminância for muito baixa pode não contribuir de forma útil para a percepção do ambiente visual ou dificultar a realizações de tarefas. Porém se houver muita iluminação pode causar desconforto visual ou térmico levando os usuários a utilizarem persianas por exemplo e assim necessitando de iluminação artificial. Em ambos os casos há consumo de energia com iluminação artificial, desta forma é essencial que estipule uma faixa de valores para a iluminância diurna (Nabil; Mardaljevic, 2005).

Li *et al.* (2024) utilizaram a otimização objetiva com a finalidade de buscar o melhor projeto para aplicação de sistema tubular de orientação de luz natural em escritórios de pequenos edifícios. Os objetivos são conflitantes, pois os autores buscaram minimizar o uso de energia e maximizar a iluminação natural. Os autores variaram parâmetros, como o raio da abertura do tubo e conseqüentemente, o *Useful Daylight Illuminance* (UDI) melhorou entre 53,2% e 66,3% e o *Energy Usage Intensity* (EUI) (soma do consumo do aquecimento, resfriamento e iluminação artificial) reduziu entre 13,4% e 78,4%.

Em sua pesquisa, Hakimazari *et al.* (2024) tinham como objetivo melhorar o consumo de energia e o conforto térmico e visual em um escritório. Os autores investigaram e definiram valores ótimos de variáveis da geometria do elemento de sombreamento e da janela para otimizar os indicadores *Energy Usage Intensity* (EUI), *Spatial Daylight Autonomy* (sDA), *Daylight Glare Probability* (DGP), e *Thermal Comfort* (Tc). Os indicadores melhoram seus valores em 13,9%, 43,6%, 52,77% e 3,69% respectivamente, além do valor do *Useful Daylight Illuminance* (UDI) aumentar de 25,8% para 68,4%.

Uma estratégia aliada a iluminação natural é a dimerização da iluminação artificial. Um dos objetivos é garantir que o plano de trabalho tenha a mesma iluminância determinada como ideal independente da condição da luz do dia. Além disso, o uso das opções do controle da dimerização com eficiência, associado a outras estratégias passivas, pode alcançar quase 80% de economia de energia (Byun *et al.*, 2024).

Assim, a dimerização tem sido utilizada em simulações que buscam otimizar iluminação natural e consumo de energia. Para poder compreender a relação entre as variáveis e os indicadores, Nasrollahzadeh (2021) realizou a simulação em etapas, sendo que primeiro foi necessário extrair as informações da luz natural e do sistema de controle de luz. Para isso foi configurada a dimerização, pois caso fosse necessário a iluminação artificial iria desligar ou diminuir parcialmente para manter o valor da iluminância escolhida durante o dia. Em seguida essas informações foram usadas para a simulação energética completar o processo, o qual avaliou o desempenho do consumo energético abrangendo aquecimento, resfriamento, iluminação e equipamentos.

Outro aspecto da iluminação natural é a influência sobre a saúde do ser humano, tanto física quanto mental. Woo *et al.* (2021) realizaram um experimento de duas semanas com trinta trabalhadores para quantificar os impactos físicos e mental da exposição à luz natural. Os participantes passaram dez dias em dois escritórios idênticos com exceção do tratamento das janelas. Uma janela possui transmitância visível variável durante o dia (entre 58% e 0,5%) e a outra janela era padrão (transmitância visível de 58%) com persianas de rolo (transmitância visível de 1,5%) instaladas. Ao trabalhar no escritório com o vidro transmitância variável, a qual permitia mais iluminação natural e vista para o exterior, os participantes eram 48% menos propensos a relatar fadiga ocular e 77% menos propensos a se sentirem deprimidos. De acordo com os autores o estudo demonstra a importância das estratégias de iluminação natural nos projetos que promovem a saúde física e mental dos ocupantes.

É necessário ter cautela ao utilizar a iluminação natural como estratégia arquitetônica para que não aumente a temperatura do ambiente ou cause desconforto visual aos ocupantes. Entretanto com a otimização multiobjetivo é possível encontrar soluções que permitam que se explore os benefícios da iluminação natural.

### **2.3 Otimização multiobjetivo**

De acordo com o dicionário (Oxford Languages, 2023), otimizar significa “criar condições mais favoráveis, tirar o melhor partido possível”. Entretanto, ao projetar um edifício não é fácil otimizar, porque são várias estratégias a serem exploradas que, sem o auxílio do computador, o projetista poderia demorar anos para encontrar todas as soluções.

Conforme Coello (2006) a otimização se refere a encontrar soluções para um problema com limitações ou restrições; quando há somente um objetivo, procura-se pela melhor solução possível

ou próximo a ela. De acordo com o autor, quando há mais de um objetivo para otimizar simultaneamente, é possível que haja conflitos entre eles, e quando isso ocorre o processo é chamado de otimização multiobjetivo, suas soluções possuem uma compensação entre os objetivos, o qual cada resultado possui valores diferentes para os indicadores e, dependendo da solução, os valores podem ser inversamente ou diretamente proporcionais. A otimização multiobjetivo tem dois componentes principais as variáveis de projeto (as variáveis independentes as quais o profissional tem controle) e os objetivos (Stewart; Palmer; DuPont, 2021).

A otimização multiobjetivo tem sido utilizada em projetos de edifícios para encontrar soluções para diferentes objetivos como layout do espaço, projeto estrutural, acústico, sistemas de ar-condicionado e obter o menor consumo de energia (Kheiri, 2018). E quando há vários objetivos a serem considerados, torna-se impraticável otimizar um problema sem ajuda de um especialista ou da otimização multiobjetivo (Stewart; Palmer; DuPont, 2021). Dessa forma, há várias abordagens na otimização que podem ser usadas para desenvolver o projeto arquitetônico ou retrofit, sendo que a diferença está na amostragem, nos métodos usados para alcançar os objetivos e nos algoritmos de busca (Kheiri, 2018).

Tendo em vista o conceito de “dominância” para comparar as diferentes soluções da otimização, pode-se dizer que existem dois tipos de otimização multiobjetivo: soluções que podem ter o conceito de dominância e com conceito de não-dominância. Para que uma solução seja dominante é necessário que supere outra solução em pelo menos um dos objetivos, enquanto aos demais pode ser equivalente ou também ser superiores (Herrera *et al.*, 2021).

Dentre as abordagens matemáticas para encontrar as soluções para a otimização multiobjetivo há o conceito chamado de Edgeworth-Pareto ou Ótimo de Pareto, o qual possui o conceito de não-dominância. As soluções Ótimas de Pareto podem ajudar os profissionais a decidirem entre as melhores alternativas, pois são denominadas como soluções não-dominadas (Kheiri, 2018). Quando a solução não diminui o valor de um indicador sem causar aumento simultâneo em pelo menos um indicador é chamado de Ótimo de Pareto, e como há mais uma solução chama-se de conjunto de Ótimo de Pareto (Coello, 2006).

Dentro do conjunto de alternativas com mais de um objetivo, é possível estabelecer a fronteira de Pareto. As técnicas de otimização multiobjetivo tem como intuito encontrar essa fronteira, a qual é um critério de análise para a otimização formada por todas as soluções não-dominadas do problema (Herrera *et al.*, 2021). Conforme Coello (2006), a abordagem Ótima de

Pareto apresenta algumas limitações, como apresentar apenas uma solução a cada execução. Nessa lacuna científica existe um tipo de heurística, os algoritmos evolutivos, que podem lidar com amostras maiores. Conforme Herrera *et al.* (2021), esses algoritmos:

*“[...] se baseiam nos conceitos darwinistas de reprodução sexuada, mutação e seleção natural para otimizar uma população de soluções candidatas ao longo de diversas gerações. Esses mecanismos garantem aos algoritmos evolutivos a capacidade de gerar diversidade na população e utilizar naturalmente o conceito de dominância, tornando-os uma opção atrativa para a otimização de múltiplos objetivos” (Herrera et al., 2021, p.1).*

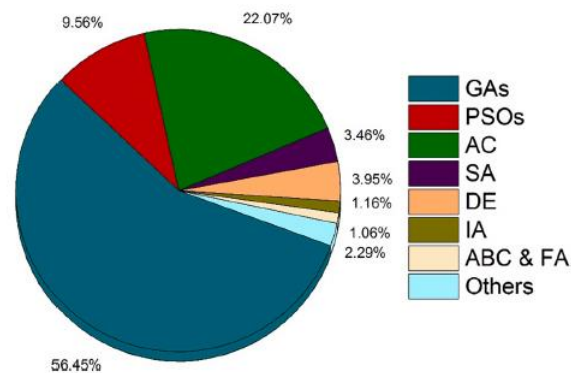
Dessa forma, autores optam pela abordagem dos Algoritmos Evolutivos, os quais lidam simultaneamente com um conjunto de soluções possíveis, chamada de população, além de fornecer mais de uma solução para o Conjunto de Pareto. Essa abordagem foi nomeada na literatura como *multi-objective evolutionary algorithm* (MOEA).

No decorrer do tempo outros métodos surgiram para que pudessem encontrar uma solução com mais de um objetivo. Em seu artigo de revisão sobre algoritmos genéticos, Wang e Sobey (2020) encontraram os principais algoritmos evolutivos utilizados em estudos, que são: *Genetic Algorithms* (GAs), *Particle Swarm Optimisations* (PSOs), *Ant Colony* (AC), *Simulated Annealing* (SA), *Differential Evolution* (DE), *Immune Algorithms* (IA), *Artificial Bee Colony* (ABC) e *Firefly Algorithm* (FA).

Uma das vertentes mais exploradas foram os algoritmos genéticos. Em seus estudos, Wang e Sobey (2020) mapearam o surgimento dos principais métodos de algoritmos genéticos e seus desdobramentos na história. Estes tiveram seu início com Turing em 1950, quando descreveu o potencial de inspiração biológica para a máquina, que incluía a capacidade de mutação e de exibir a sobrevivência do mais apto (Wang; Sobey, 2020).

Porém, o mais eficiente é o algoritmo genético (Figura 2), o qual ocupa 56% dos métodos estudados em publicações nos últimos 30 anos (Wang; Sobey, 2020). De acordo com o gráfico *Ant Colony* (AC) representa 20,07%, *Particle Swarm Optimizations* (PSOs) com 9,56%, e em seguida *Differential Evolution* (DE), *Simulated Annealing* (AS), Outros, *Immune Algorithms* (IA) e por último *Artificial Bee Colony* (ABC) and *Firefly Algorithms* (FA). O algoritmo genético pesquisa a solução dentro de uma amostragem aleatória e usa os operadores para direcionar o processo de acordo com os valores da função-objetivo (Caldas; Norford, 2002).

Figura 2 - Abordagens para o algoritmo evolutivo



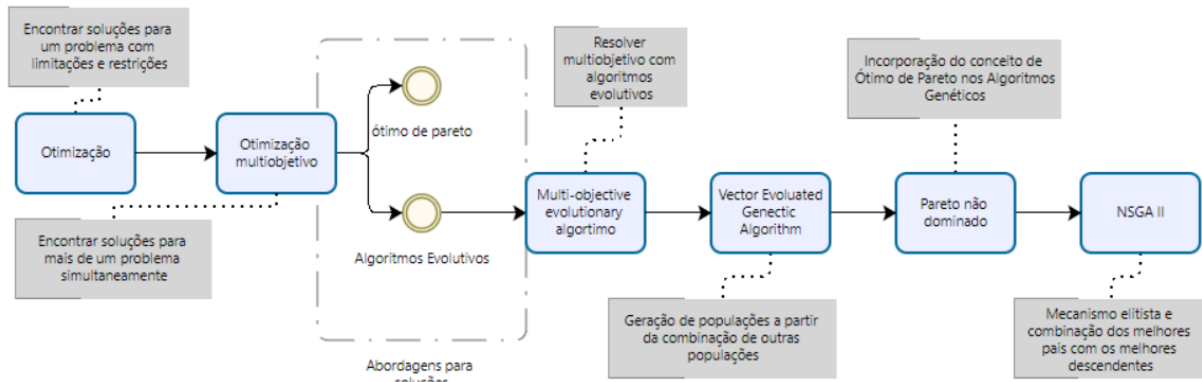
Fonte: Wang; Sobey (2020)

Há registros que, por volta de 1983, foi introduzido o conceito de *Vector Evaluated Genetic Algorithm* (VEGA), que consistia em um algoritmo genético simples com mecanismo de solução, isto significa que a cada geração há várias subpopulações geradas conforme cada função-objetivo, as quais são combinadas entre si para obter uma nova subpopulação, para que o *Genetic Algorithm* (GA) faça o cruzamento e mutação (Coello, 2006).

Após VEGA surgiram outras abordagens para otimizar a busca pelas soluções dos objetivos nos algoritmos genéticos. Porém, após as tentativas, incorporaram o conceito de Pareto nos algoritmos genéticos. Conforme Wang e Sobey (2020) apesar dos algoritmos genéticos serem bons para resolver problemas eles exigem muito esforço computacional para encontrar a verdadeira fronteira de Pareto, dessa forma, outros métodos de pesquisas são combinados com os algoritmos genéticos para encontrar soluções ideais com baixo esforço computacional.

Entre esses métodos estão (Figura 3): *Nondominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA), *Niched-Pareto Genetic Algorithm* (NPGA), *Multi-Objective Genetic Algorithm* (MOGA), *Strength Pareto Evolutionary Algorithm* (SPEA), *Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2* (SPEA2), *Pareto Archived Evolution Strategy* (PAES) e *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA II) (Coello, 2006).

Figura 3 - Evolução do algoritmo genético conforme Coello (2006)



Fonte: Autora (2023)

Com o tempo a ideia inicial de otimização foi desenvolvida, e foram criados e combinados novos métodos à medida que iam surgindo os problemas. Devido a isso muitos conceitos e abordagem foram surgindo, porém com o mesmo objetivo: contribuir e facilitar as decisões do ser humano em seus diversos projetos, não somente na Indústria da Construção.

## 2.4 Algoritmo evolutivo e algoritmos genéticos

O algoritmo evolutivo é uma das abordagens mais eficientes para solucionar a otimização multiobjetivo. De acordo com Friese *et al.* (1997, p.2) “algoritmo evolutivo ajusta o parâmetro do modelo ao banco de dados experimentais incluindo todos os problemas adicionais causados por incertezas e dados experimentais”.

Os sistemas de algoritmo evolutivo são baseados na teoria da evolução por intermédio da seleção natural de Darwin (Janssen, 2009) e na Teoria de Herança de Mendel (Wang; Sobel, 2020). O algoritmo evolutivo pode ter um conjunto de soluções possíveis (população) no mesmo momento que permite encontrar indivíduos na solução de Pareto em uma execução do algoritmo, além de combinar os melhores pais com os melhores filhos obtidos (Coello, 2006).

Janssen (2009) explica que um processo iterativo é aplicado em uma população de indivíduos em várias etapas evolutivas que criam, transformam e excluem os indivíduos. Com os algoritmos genéticos foi possível desenvolver o mecanismo de elitismo, o qual é usado para reter a melhor solução entre gerações e melhorar o desempenho dos algoritmos, o que permite aumentar a velocidade da pesquisa, além de manter as soluções não-dominadas (Wang; Sobel, 2020).



Dessa forma os autores Wang e Sobel (2020) complementam que a ideia é acasalar os indivíduos mais aptos com as crianças da próxima geração, as quais são, em média, mais aptas. Conforme Coelho (2006):

*“A ideia básica é encontrar o conjunto de soluções que são Pareto não-dominados entre a população. Essas soluções recebem uma classificação mais alta e são eliminadas de futuras disputas. Outro conjunto de soluções Pareto não-dominados são determinadas a partir da população restante e recebem o próximo nível de maior classificação. Este processo continua até toda população esteja adequadamente classificadas” (Coello, 2006, p.30, tradução própria).*

Os indivíduos possuem características, como se fossem informações genéticas, os genótipos e os fenótipos. Janssen (2009) esclarece que os genótipos são informações usadas para criar o modelo e o fenótipos é o modelo de design, estes são avaliados e depois recebem valores de aptidão relativa. São conceitos semelhantes utilizados para o DNA do ser humano na área da biologia.

Janssen (2009) explica como funciona o processo iterativo dos algoritmos, e a criação de indivíduos com novos genótipos, a qual é feita a partir da reprodução dos genótipos dos pais usando operadores genéticos como *crossover* e mutação. Quanto mais são criados indivíduos aptos, mais a população evolui e se adapta para atingir os objetivos estabelecidos anteriormente (Janssen, 2009). Entretanto, para a população evoluir, os indivíduos têm os genótipos avaliados pelo seu valor de aptidão:

*“[...] o processo de avaliação de aptidão consiste em quatro subprocessos: 1) o genótipo é mapeado para um conjunto de parâmetros, 2) os parâmetros são usados para gerar um fenótipo, 3) o fenótipo é usado para realizar um conjunto de avaliações e 4) as avaliações são usadas para calcular a aptidão (Janssen, 2009, p.261, tradução própria).*

Lin e Gerber (2014) apresentam uma estrutura sobre a descrição da otimização multiobjetivo baseada em algoritmo genético. Ao aplicar o algoritmo genético a um problema se estabelece um relacionamento entre o problema e o seu respectivo conjunto de soluções é definido, dessa forma a exploração sistemática e a avaliação das soluções podem ser alcançadas. Os autores Caldas e Norford (2002) explicam as terminologias dos algoritmos genéticos:

1. Indivíduos: solução individual para um problema;
2. População: conjunto de soluções existentes em cada etapa;
3. Geração: cada nova população de indivíduos que é criada;
4. Cromossomo: é uma *string*, conjunto de informações, que representa cada indivíduo, é composto por alelos (os alelos são os códigos binários);
5. Fitness (aptidão): corresponde ao valor da função objetivo naquele ponto.

De acordo com Calda e Norford (2002) os operadores genéticos controlam a evolução das gerações, e existem três tipos principais:

1. Reprodução: quando uma determinada solução é escolhida conforme seu fitness (aptidão);
2. Crossover: acontece quando dois cromossomos são escolhidos aleatoriamente e trocados depois de criarem um indivíduo;
3. Mutação: envolve mudar de forma aleatória um alelo do cromossomo em uma solução para procurar novas soluções.

A otimização multiobjetivo possui um método implementado para completar a rotina de automação, e sua estrutura é descrita por Lin e Gerber (2014):

1. Formulação do problema: definição dos genes dos algoritmos genéticos, configuração dos parâmetros, restrições e faixas de variação;
2. População inicial: população gerada mediante a distribuição uniforme dos valores dos parâmetros entre as faixas de variação;
3. Primeira geração: etapa que acontece a primeira seleção, crossover e mutação;
4. Avaliação: caso tenha encontrado as soluções desejadas, finaliza a otimização, caso contrário executa mais um ciclo para criação de uma geração até obter a solução ótima.

Caldas e Norford (2002) explicam que, baseados em estudos paramétricos anteriores, a população ideal varia de 30 a 200 indivíduos. Para resolver o problema o algoritmo genético inicia gerando uma série de possíveis soluções, avalia-as e aplica os operadores genéticos nessa população inicial conforme o fitness de cada indivíduo. Isso resulta em uma nova população com a média fitness maior do que a anterior, e assim o ciclo se repete até o número de gerações definido pelo usuário:

*“Apesar de sua aparente simplicidade, os algoritmos genéticos provaram ter alta eficácia na resolução de problemas complexos para os quais os algoritmos convencionais baseados em derivadas de escala provavelmente ficariam presos nas soluções” (Caldas; Norford, 2002, p.176, tradução própria).*

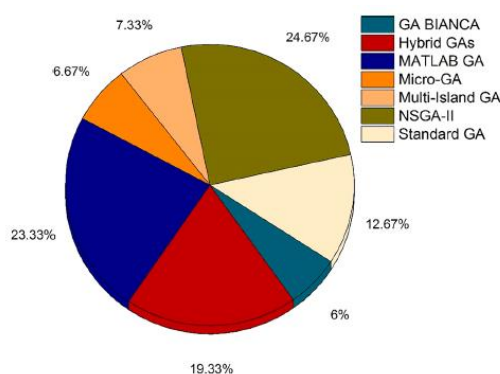
Como na ecologia, os algoritmos genéticos possuem nichos, que seriam definidos como ajustes de uma espécie que vive sob determinadas condições ambientais (Wag; Sobey, 2020). Dessa forma, os nichos dos algoritmos genéticos se diferenciam pelas formações das subpopulações de suas populações, e cada subpopulação corresponde a uma subtarefa do problema da otimização. Assim, as técnicas dos nichos ajudam a melhorar a capacidade dos algoritmos genéticos de resolver

a otimização multiobjetivo, e entre essas técnicas está o *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA II) (Wag; Sobey, 2020).

## 2.5 Nondominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA II)

Entre os métodos que são combinados com o algoritmo genéticos, o NSGA II é mais eficiente e se tornou mais popular (Figura 4), representando 24,67% dos estudos publicados nos últimos anos. Ele encontra a solução com poucos parâmetros e com diversidade de população com base na classificação rápida não-dominada, além de ser um dos algoritmos mais antigos que apresenta os melhores desempenhos (Wang, Sobey; 2020).

Figura 4 - Abordagens encontradas na literatura para algoritmo genético<sup>3</sup>



Fonte: Wang; Sobey (2020)

O NSGA II apresenta o melhor desempenho em vários problemas práticos, fazendo uma seleção excelente quando o problema de otimização não categorizado ou quando há mais de uma característica dominante (Wang; Sobey; 2020). Conforme Herrera *et al.* (2021):

*“O Nondominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) é um algoritmo evolutivo para otimização multiobjetivo que lida com uma população de tamanho fixo. Ele avalia a qualidade das soluções na população dividindo-as, de acordo com sua dominância, em grupos chamados “ranks” e busca garantir a diversidade na população ao longo das gerações por meio da métrica de “crowding distance” (Herrera et al., 2021, p.2)*

Há um processo de reprodução entre as populações para que mantenha a quantidade de indivíduos determinados anteriormente, para isso são realizadas classificações para garantir que as gerações tenham os melhores resultados. O NSGA II possui o seguinte procedimento (VERMA *et al.*, 2021):

<sup>3</sup> Os autores Wang e Sobey (2020) utilizam GA como abreviatura para *Genetic Algorithms*.

- Há uma população inicial  $P$  de tamanho  $N$ . A partir da população  $P$ , uma nova população  $Q$  é criada com base na reprodução de cruzamento ou mutação entre os indivíduos da população  $P$ ;
- Depois disso a população  $P$  e  $Q$  são combinadas e formam uma nova população  $R$ , a classificação dos indivíduos não-dominados é feita na população  $R$  conforme o nível de não-dominação;
- O próximo processo é selecionar  $N$  indivíduos da população  $R$  para criar a próxima população  $P_{t+1}$ . Caso a quantidade de indivíduos seja maior ou igual  $N$ , apenas  $N$  indivíduos serão selecionados para formar a frente de Pareto da população  $P_{t+1}$ ; porém se a população for menor ou igual a  $N$ , eles serão enviados diretamente para a próxima geração, e o restante dos indivíduos serão enviados para a análise da métrica *crowding distance*, esse último passo é realizado até que a população  $P_{t+1}$  tenha em sua próxima geração a mesma quantidade de indivíduos  $N$ ;
- As demais gerações ( $P_{t+2}$ ,  $P_{t+3}$ ,  $P_{t+4}$ ...) seguem o mesmo processo que  $P_{t+1}$  até que os critérios de parada determinados no início sejam alcançados.

O NSGA II avalia as soluções conforme a sua dominância, divide a população em grupos chamados de “ranks”, conforme as relações de dominância entre os indivíduos da população, e para garantir a diversidade das gerações e distinguir a qualidade de indivíduos utiliza uma métrica chamada de “*crowding distance*” (Herrera *et al.*, 2021).

Durante o processo de classificação vários indivíduos são selecionados, podendo resultar em uma quantidade maior do que a determinada. Dessa forma, o *crowding distance* os elimina em uma área lotada e mantém o número de indivíduos, e essa eliminação depende das distancias entre dois indivíduos e sua relação com cada objetivo (Wang; Sobey, 2020). Resumindo, o NSGA II é baseado em quatro princípios (Verma *et al.*, 2021):

1. *Non-dominated sorting*: os indivíduos da população são classificados conforme a dominância de Pareto. Os primeiros indivíduos não-dominado são atribuídos a primeira classificação e são removidos da população inicial. Após isso, os segundos indivíduos não-dominantes que ficaram na população são classificados, e assim por diante até que todos os indivíduos sejam classificados;

2. *Elite-preserving operator*: a solução não dominada encontrada em uma geração passará para a outra geração, até que alguma solução a domine, ou seja apenas as melhores soluções são transferidas para a próxima geração;
3. *Crowding distance*: é o cálculo da distância média entre duas soluções de cada objetivo para estimar a densidade em torno de uma solução particular;
4. *Selection operator*: é a seleção de uma população para a próxima geração, é feita uma classificação dos membros e usado o *crowding distance*. Há duas regras para a seleção: (a) se houver populações com diferentes classificações é selecionada aquela com melhor classificação e (b) se ambas tiverem a mesma classificação, então a que tiver maior distância da aglomeração é selecionada para próxima geração.

Assim sendo o NSGA II possui o mecanismo elitista, o qual escolhe a solução conforme a posição não-dominada e a região em que se encontra, combinando os melhores pais com os melhores descendentes obtidos (Coello, 2006).

## 2.6 Tomada de decisão

A otimização multiobjetivo possui vantagem de apresentar soluções para objetivos conflitantes, já que, conforme visto na literatura, não há somente uma solução ótima, e sim um conjunto de soluções ótimas para que o profissional faça sua escolha. Na rotina da abordagem da otimização multiobjetivo, o profissional é conhecido como Tomador de Decisão (no inglês, *decision maker*, DM), esse é responsável por formular o problema do design, definir pesos para os objetivos, aplicar preferências e transformar multiobjetivo em um só, intervir em diferentes pontos do algoritmo para alcançar o objetivo e selecionar as soluções obtidas. Desta forma, o tomador de decisão pode intervir antes, durante e depois da otimização (Showkatbakhsh; Makki, 2022). Desse modo há estudos sobre otimização multiobjetivo que além de sugerirem um fluxo de trabalho, propõe etapas para diminuir a quantidade de opções obtidas nos resultados.

Em sua pesquisa, Kyropoulou (2022) propõe um fluxo de trabalho para otimizar ambientalmente o sombreamento de espaços educacionais ao ar livre, sendo que, dentre as etapas propostas está a filtragem de soluções de uma população otimizada para que o tomador de decisão possa selecionar a solução final. Para isso, Kyropoulou (2022) seleciona seis soluções: (1) a que possui melhor posição no rank do objetivo 01; (2) a que possui melhor posição no rank do objetivo 02; (3) a que possui melhor posição no rank do objetivo 03; (4) a que representa diferença relativa

entre os objetivos quando está configurado para 0; (5) a que possui média de classificação; e (6) a que tem melhor média na última geração. Após essa filtragem, o autor faz comparação dos valores e gráficos e escolhe uma opção. Em outro estudo, que tem como finalidade determinar formas espaciais para sala de aula utilizando design paramétrico e algoritmos evolutivos, Mo *et al.* (2022) propõem a seguinte filtragem: (1) buscou as soluções extremas de cada objetivo; (2) as que satisfizeram aproximadamente as condições; e (3) as que foram mais bem classificadas de toda população que se encontravam na Fronteira de Pareto. A partir dessa seleção os autores analisaram seus gráficos e valores para compará-las.

De acordo com Showkatbakhsh e Makki (2022) há duas etapas para diminuir o conjunto de soluções obtidas na otimização multiobjetivo. A primeira é uma abordagem quantitativa que pode ser subdividida em:

1. Aplicar o *clustering* nas soluções da Fronteira de Pareto: os clusters são soluções que se encontram no centro de subgrupos das soluções da Fronteira de Pareto, é uma representação das demais, por exemplo, se o tomador de decisão escolher subdividir as soluções em cinco grupos, haverá cinco clusters representando cada grupo;
2. Selecionar os outliers de cada objetivo: são as soluções nas extremidades das características morfológicas;
3. Compromisso global: é a solução mais próxima do ideal, é utilizado a medida Euclidiana para encontrar a solução mais próxima do ponto base;
4. A última seleção é a que possui o mesmo peso para todos os objetivos.

Após a filtragem das soluções, a segunda etapa consiste em analisar as opções a partir de métricas relevantes que não foram incluídas na execução algorítmica e classificá-las. A classificação é feita por ponderação e atribuição de pesos de acordo com a prioridade, após isso é feita a soma e selecionada as soluções com maiores valores, reduzindo assim as opções. Conforme os autores essas métricas são subjetivas, tem em consideração a aparência resultante das soluções (“fenótipos”) e pode depender de fatores externos, como stakeholders que não estavam envolvidos no processo (Showkatbakhsh; Makki, 2022).

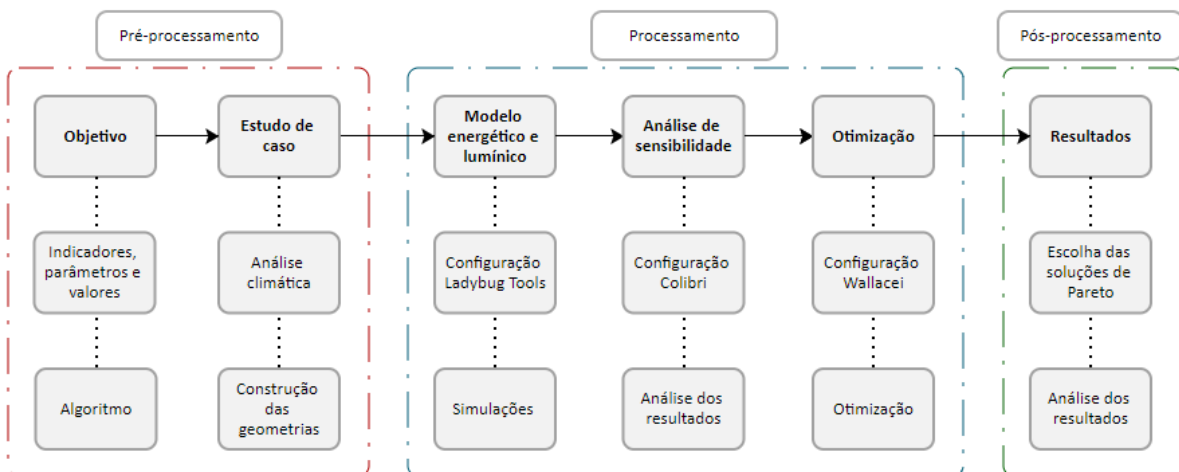
Os estudos citados propõem abordagens quantitativas de reduzir as soluções obtidas pela otimização multiobjetivo diminuindo escolhas baseadas no subjetivo. Dessa forma, é necessário que tenha um profissional com o conhecimento sobre o projeto a ser desenvolvido para tomar as decisões.

### 3 MÉTODO

Estudos em relação ao projeto baseado em desempenho propõem em sua metodologia subdividir em etapas a simulação para auxiliar no processo, principalmente por usar mais de uma ferramenta para alcançar os objetivos. Assim, optou-se pelos seguintes softwares e plugins: Rhinoceros®, Grasshopper®, Ladybug® junto com Honeybee®, Colibri®, software R® e Wallacei® e para delimitar o método, o fluxo de trabalho foi dividido em seis etapas conforme (Figura 5):

1. Definição do objetivo: definição do objetivo, indicadores, parâmetros, valores e algoritmo;
2. Seleção do estudo de caso: análise climática da cidade de Campo Grande e primeira etapa do algoritmo (construção do modelo geométrico e do brise);
3. Configurações do modelo energético e do modelo lumínico: definição da segunda etapa do algoritmo, as configurações no Ladybug® e Honeybee®. E depois é feita as simulações termo energéticas e lumínica, cuja médias dos respectivos resultados são os indicadores para a otimização (carga térmica de resfriamento e porcentagem de tempo de iluminação natural);
4. Análise de sensibilidade: etapa para verificar a relação entre os parâmetros, com uso do plugin Colibri® e do software R®;
5. Otimização: última etapa do algoritmo, o ajuste dos parâmetros do Wallacei® e a otimização;
6. Análise dos resultados: escolha das soluções de Pareto e comparações dos resultados.

Figura 5 - Etapas do fluxo de trabalho



Fonte: Autora (2024)

### 3.1 Definição dos objetivos: parâmetros e algoritmo

Para estruturar o algoritmo foi definido como objetivo diminuir o consumo total de energia e aumentar o nível de iluminação natural no ambiente. Esse objetivo é conflitante, pois a iluminação natural pode aquecer o ambiente, possibilitando o aumento do consumo de energia com resfriamento. Dessa forma, a teoria da otimização multiobjetivo é utilizada para buscar as melhores soluções do problema (Herrera, 2021). A programação visual pode ser definida em quatro etapas:

1. Construção da geometria: tanto da célula quanto o brise foram criados por meio da programação visual no Grasshopper® ao invés do Rhinoceros®, para que as medidas pudessem ser parametrizadas, principalmente as dimensões do brise. Nessa etapa subdividiu-se em duas: (1) construção da estrutura da célula base; e (2) a construção do brise;
2. Configuração dos plugins Ladybug Tools®: nessa etapa foi importado o arquivo epw da cidade de Campo Grande, definido os *schedules*, materiais e componentes construtivos e as configurações para obter informações sobre o consumo de energia e iluminação natural (modelo energético e lumínico);
3. Configuração do Colibri®: para a análise de sensibilidade os parâmetros que variaram foram a área da abertura, orientação solar, Fator Solar e a presença e ausência do brise. E os valores de saída foram o consumo de resfriamento e a porcentagem média de tempo de iluminação natural.
4. Configuração do Wallacei®: as informações como o número de gerações e quantidade de indivíduos foram adicionadas para obter as soluções ótimas de Pareto.

#### 3.1.1 Conjunto de ferramentas computacionais

Rhinoceros® é um software de modelagem 3D de formato livre que permite trabalhar com curvas *Non-Uniform Rational B-Splines* (NURBS)<sup>4</sup>, superfícies e sólidos, geometria de subdivisão (SubD)<sup>5</sup>, nuvens de pontos e malhas poligonais. O Grasshopper® é um editor de algoritmo integrado ao Rhinoceros® permitindo que se explorem formas usando algoritmos generativos (Davidson, 2023). Para análise de sensibilidade foi utilizado o plugin Colibri®, o qual auxilia na iteração de todas as combinações possíveis de vários parâmetros e compila os resultados em um arquivo CSV (Food4rhino; 2024).

---

<sup>4</sup> NURBS “são representações matemáticas da geometria 3D que podem descrever com precisão qualquer forma” (MCNEEL, 2023).

<sup>5</sup> SubD “é um novo tipo de geometria que pode criar formas editáveis e altamente precisas. Ao contrário de outros tipos de geometrias, o SubD combina precisão da forma livre e ainda permite edição rápida” (MCNELL, 2023).



Ladybug® e Honeybee® são plugins que se complementam. Neste trabalho foi utilizado a versão 1.6.0 do Ladybug Tools® para realizar a etapa de simulações térmicas e lumínicas tanto para a análise de sensibilidade quanto para a otimização multiobjetivo. De acordo com os desenvolvedores (Ladybug, 2023) a linha base desse conjunto de ferramentas está conforme os padrões da ASHRAE 90.1. O plugin Ladybug® realiza análises de dados climáticos a partir de arquivos EnergyPlus Weather (EPW) e os importa para o Grasshopper®, oferece suporte às avaliações iniciais de projeto como estudos climáticos em geral, de radiação solar e modelagem de horas da luz solar, permitindo a visualização instantânea dos resultados caso haja alteração no modelo (Ladybug Tools, 2022). O plugin Honeybee® também pertence à coleção Ladybug Tools®, e realiza simulações de iluminação natural usando Radiance® e modelos termoenergéticos usando o OpenStudio® e EnergyPlus® (Ladybug Tools, 2022).

O EnergyPlus® é um programa de simulação termoenergética do edifício que modela o consumo de energia para resfriamento, aquecimento, ventilação, iluminação e cargas internas. O usuário configura a geometria, os materiais de construção, modos de operação e sistemas do edifício, e o programa calcula as cargas de aquecimento e resfriamento para manter os setpoints definidos nos sistemas de condicionamento de ar (Energyplus, 2021).

O Radiance® é um programa para simulação e visualização da iluminação, que permite prever a iluminação, a qualidade visual, aparência dos espaços, avaliar as novas tecnologias de iluminação artificial e iluminação natural. Os arquivos de entrada são a geometria, materiais, luminárias, hora e data e as condições do céu, e os resultados obtidos incluem a radiância espectral, irradiância e índices de brilho (Radiance, 2019).

O OpenStudio® é um programa que dá suporte à modelagem energética do edifício usando EnergyPlus® e análise de luz natural usando Radiance®, a ferramenta que fornece uma interface para acessar o mecanismo de modelagem (Openstudio, 2008). O software R® é uma linguagem e ambiente para a computação estatística e elaboração de gráficos, fornece ampla variedade de técnicas estatística e de gráficos, os quais podem incluir símbolos matemáticos e fórmulas (The R foundation, 2024).

O Wallacei® é uma ferramenta que permite simulações evolutivas no Grasshopper®, e auxilia os usuários a compreenderem melhor as execuções evolutivas e tomar decisões mais assertivas em todos os estágios da simulação. Ele utiliza o algoritmo *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II*

(NSGA-2) como algoritmo evolutivo primário e o utiliza o método *K-means* como algoritmo de agrupamento (Wallacei, 2022).

Entre os valores de entrada do Wallacei®, existem: (1) os genes que são os valores alterados para obter as soluções (são componentes do Grasshopper® como *sliders* ou *genepools*) e (2) os fitness *objectives*, que são os indicadores que serão otimizados (podem ser para maximizar ou minimizar os valores) (Wallacei, 2019). Com relação aos parâmetros, o Wallacei® possui a seguinte subdivisão: *Population (Generation Size e Generation Count)* e *Algorithm Parameters (Crossover Probability, Mutation Probability, Crossover Distribution Index, Mutation Distribution Index e Random Seed)*. É por meio desses parâmetros que se configura a quantidade e quais soluções serão obtidas. Com o auxílio dessas ferramentas, o objetivo do algoritmo é encontrar as melhores soluções de brises para um espaço comercial.

### 3.1.2 Critérios de desempenho

Os critérios de desempenho escolhidos para este estudo foram o *Useful Daylight Illuminance* em % (UDI) e o consumo de energia para resfriamento em kWh/ano (CgTT). Os objetivos estabelecidos para a otimização multiobjetivo foram dois: (1) maximizar o UDI (%), para que houvesse maior incidência de iluminação natural útil no ambiente, economizasse energia e tivesse benefícios sobre o bem-estar dos usuários e (2) minimizar o CgTT (kWh/ano), com a finalidade de reduzir o consumo de energia.

De acordo com Nabil e Mardaljevic (2005) o UDI é um fator de luz diurna que se baseia em uma série temporal anual de valores absolutos de iluminância sob céus realistas gerados a partir de dados meteorológicos padrão. Conforme os autores o UDI é um percentual da ocorrência anual de iluminâncias sobre o plano de trabalho onde todas as iluminâncias estão dentro da faixa de 100 lux e 2000 lux (Nabil; Mardaljevic, 2005). O Ladybug Tools®, o qual possui uma base na ASHRAE 90.1 – 2004, defini como porcentagem de horas ocupadas que a iluminância fica entre um determinado mínimo e máximo (Ladybug, 2023).

A INI-C (2021) não possui um parâmetro intitulado *Useful daylight illuminance*, porém possui Autonomia da Luz Natural (ALN), o qual é definido pela norma como percentual das horas de ocupação ao longo do ano, em que determinada iluminância é alcançada ou ultrapassada em plano de análise considerando-se apenas a iluminação natural. De acordo com a INI-C, é necessário apresentar no mínimo 300 lux em pelo menos 50% das horas diurnas.

Assim o UDI representa o percentual de horas ocupadas em que a iluminação se encontra entre os limites estipulados, sendo que para este estudo foi definido o valor mínimo de 300 lux e máximo de 3000 lux. O UDI (%) apresenta como resultado um valor para cada dia do ano, entretanto os inputs para a Análise de sensibilidade e Otimização apenas permite um valor, desta forma foi utilizado a média dos resultados extraídos. O Wallacei® apenas minimiza os valores, desta forma foi necessário realizar a subtração da média do UDI (%) para que esse critério fosse maximizado conforme o objetivo estipulado. Portanto, apenas para as etapas de otimização multiobjetivo e o cálculo de valores normalizados, o UDI (%) foi configurado para ser 100-UDI, e nas demais análises dos resultados, foi feito o cálculo reverso dos valores extraídos do Wallace (UDI-100). Para fazer a análise desse indicador, a malha foi subdividida em 1,00 m por 1,00 m no plano horizontal, a 0,75 m do piso e distante 0,30 m das paredes, conforme o Anexo C – Iluminação Natural da INI-C.

Para compreender melhor o comportamento da iluminação natural, além do UDI (%) foram analisados o  $UDI_{low}$  (valores abaixo de 300 lux) e  $UDI_{up}$  (valores acima de 3000 lux). Outra informação extraída das simulações foi o Consumo de Iluminação ( $C_{ilum}$  – kWh/ano), por meio do output Lighting do Ladybug Tools®.

O indicador de carga térmica de resfriamento é resultado do sistema de ar-condicionado *IdealLoads*. Conforme o Ladybug Tools® (2023), o output Cooling (kWh/ano) se refere a soma do calor sensível e latente que deve ser removido de cada ambiente, assim é a quantidade de energia necessária para remover o calor de um ambiente para mantê-lo em uma temperatura determinada, este output representa a carga térmica para resfriamento anual em kWh/ano ( $C_{gTT}$ ). Tendo em vista o clima de Campo Grande – MS e a tipologia de edificação definida, optou-se por não calcular o consumo de energia para aquecimento ambiental, por representar pouca demanda. Como o plugin Ladybug® não permite que configure somente o resfriamento (24 °C), foi necessário estipular também o setpoint para aquecimento (18 °C) em um primeiro momento, para depois sobrescrever essa informação com o setpoint de aquecimento igual a 0 °C. Além de ser configurado um *schedule* de *availability*, o qual o resfriamento funcionará das 8h às 19h.

Neste estudo foi considerado que o ar-condicionado fosse do modelo split, por causa foi considerado o desempenho da máquina, para isso foi utilizado o valor 6,89 para o Índice de desempenho de resfriamento sazonal (IDRS). De acordo com a INI-C (2021) IDRS é “razão entre a quantidade anual total de calor que o equipamento pode remover do ar interno, quando operado para refrigeração no modo ativo, e a quantidade anual total de energia consumida pelo equipamento durante o

mesmo período”. Desta forma a o consumo de energia para resfriamento foi calculado conforme a Equação (1).

$$C_{resf} = C_{gTT} / IDRS = C_{gTT} / 6,89 \quad (1)$$

Para a análise final, será feito o cálculo do *Energy Usage Intensity* (EUI) que consiste no uso de energia por metro quadrado. O método utilizado será o mesmo da pesquisa dos autores Li *et al.* (2024), que para obter o EUI<sub>total</sub> (kWh/ano), foi somado o EUI<sub>heating</sub>, EUI<sub>resf</sub> e EUI<sub>ilum</sub>. Nesta pesquisa heating não será contabilizado, pois não será simulado. Desta forma o EUI<sub>total</sub> será composto pela soma do C<sub>resf</sub> (kWh/ano) de cada pavimento com a soma do C<sub>ilum</sub> (kWh/ano) de cada pavimento.

### 3.2 Estudo de caso

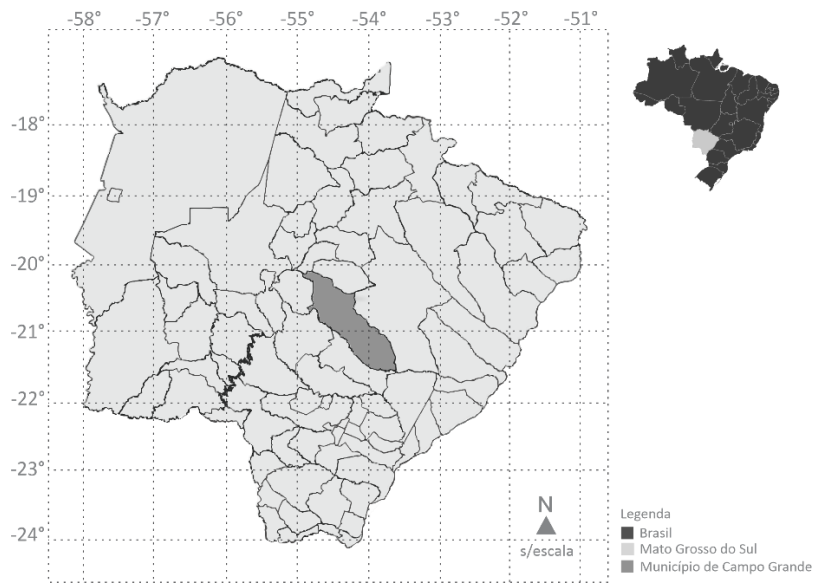
O estudo de caso está localizado em Campo Grande - MS; de acordo com a NBR 15220-3 (ABNT, 2005), a cidade pertence à Zona Bioclimática 6. O arquivo climático utilizado foi o SWERA, pois foi o único que foi compatível com Ladybug Tools®, os demais arquivos apresentaram erro ao realizar a simulação. Por ser um caso hipotético, o entorno foi desconsiderado, mesmo sabendo que o sombreamento decorrente da obstáculos e construções vizinhas podem afetar o desempenho térmico, energético e lumínico, especialmente de uma edificação verticalizada. Entre as possibilidades que poderiam alterar está a sombra dos elementos no entorno, a qual poderia diminuir a necessidade de resfriamento e o comportamento da luz natural, que seria diferente devido a reflexão nos elementos.

#### 3.2.1 Análise do clima e carta solar

O estudo de caso está localizado em Campo Grande - MS. A cidade está localizada 20°26'37" Sul de Latitude e 54°38'52" Oeste de Longitude (Figura 6). De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, a cidade possui clima tropical com estação seca (Alvares *et al.*, 2013), apresenta temperatura média do mês mais frio superior a 18°C e estação seca de pequena duração (de Maio a Setembro) (Ivasko *et al.*, 2021).

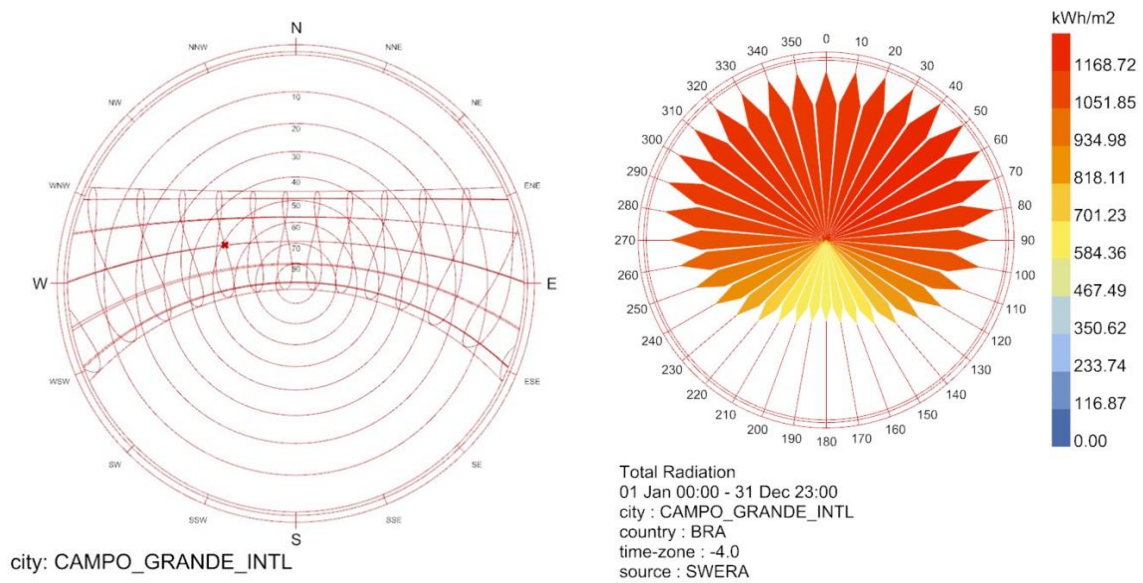
A carta solar da cidade (Figura 7), mostra que a trajetória do sol é mais voltada para o norte e pela Rosa da Radiação é possível visualizar que a maior incidência de radiação é proveniente da orientação norte. Ambas as cartas foram extraídas do Ladybug Tools®.

Figura 6 - Localização do estudo de caso



Fonte: Autora (2024)<sup>6</sup>

Figura 7 - Carta solar e a Rosa da radiação cidade de Campo Grande, MS.



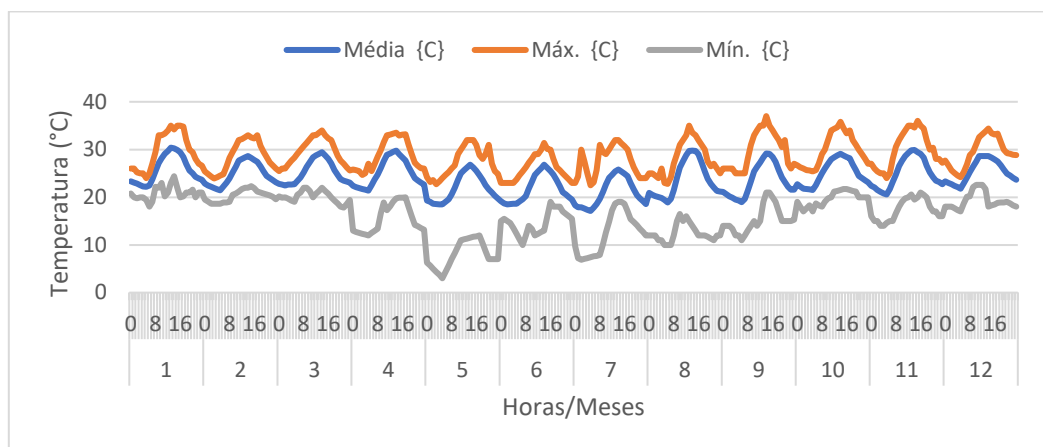
Fonte: Autora (2024)

Conforme o arquivo climático SWERA, a cidade possui as características de temperatura de bulbo seco conforme a Figura 8. Pelo gráfico é possível notar que a média da cidade fica concentrada

<sup>6</sup> Mapa adaptado a partir das informações fornecidas Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, acessado em fevereiro de 2024. Fontes: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapas, 2024. 08. Mapa físico do Mato grosso do Sul. Disponível em: <<https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa408>>. Acessado em: 15 fev. 2024. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapas, 2024. Downloads. Disponível em: <[https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html?caminho=cartas\\_e\\_mapas/mapas\\_municipais/colecao\\_de\\_mapas\\_municipais/2020/MS/](https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html?caminho=cartas_e_mapas/mapas_municipais/colecao_de_mapas_municipais/2020/MS/)>. Acessado em: 15 de fev. 2024.

entre 20°C e 30°C, durante o ano. Outro ponto evidente são os meses de maio, junho e julho, que correspondem ao final do outono e início de inverno, é o período o qual estão concentradas as temperaturas mais baixas. Assim a possui grande amplitude de temperatura ao decorrer do ano.

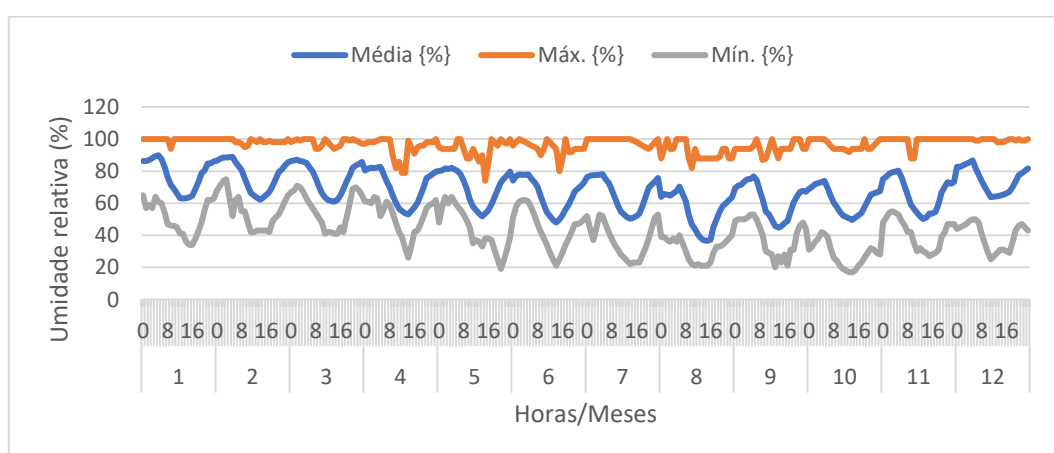
Figura 8 - Gráfico de temperatura de bulbo Campo Grande (MS), com valores das médias horárias, e médias de mínimas e máximas horárias, para cada mês.



Fonte: Autora (2023)

A umidade relativa é alta durante os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, que corresponde ao verão, período que há chuvas constantes. Ao contrário do inverno, no gráfico (Figura 9) é possível analisar que os meses de junho, julho, agosto e setembro a umidade relativa é baixa, o que caracteriza o inverno como seco.

Figura 9 - Gráfico de umidade Campo Grande (MS), com valores das médias horárias, e médias de mínimas e máximas horárias, para cada mês.

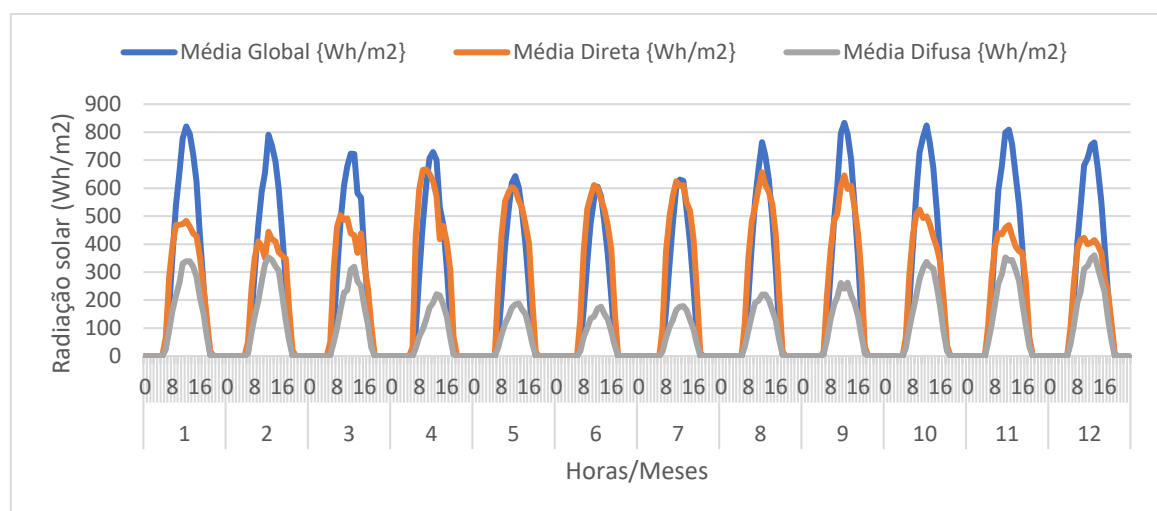


Fonte: Autora (2023)

Conforme a Figura 10, é possível notar que nos meses de inverno Campo Grande, apesar do índice de radiação global ser a menor, a radiação direta é maior que no demais períodos do ano. Já

nos meses de verão o índice de radiação global é maior, porém os valores dos índices direta e difusa são semelhantes.

Figura 10 - Gráfico de radiação solar Campo Grande (MS), com valores das médias horárias, e médias de mínimas e máximas horárias, para cada mês.



Fonte: Autora (2023)

### 3.2.2 Modelo geométrico

Para realizar o estudo optou-se por utilizar o exemplo de edificação da INI-C, com 5 zonas térmicas para análise. Com o objetivo de manter áreas iguais para as zonas perimetrais, o modelo possui 20,00m de comprimento por 20,00 de profundidade, totalizando 400,00m<sup>2</sup> de área. As zonas perimetrais possuem comprimento de 20,00m e profundidade de 4,50m, o núcleo central possui 11,00m de comprimento e 11,00m de profundidade (Tabela 1).

Tabela 1 - Medidas das zonas do modelo

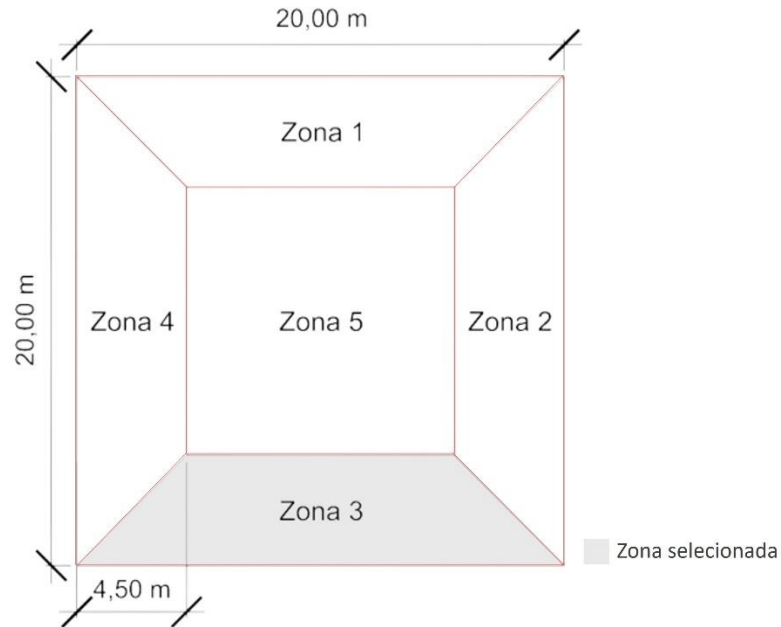
Medidas das zonas				
Zona	Tipo	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Área (m <sup>2</sup> )
1	Perimetral	20,00	4,50	69,75
2	Perimetral	20,00	4,50	69,75
3	Perimetral	20,00	4,50	69,75
4	Perimetral	20,00	4,50	69,75
5	Central	11,00	11,00	121,00
Área total (m <sup>2</sup> )				400,00

Fonte: Autora (2024)

A geometria da abertura foi parametrizada e localizada na Zona 3 (Figura 11), assim fixou-se seu comprimento (18,00m) no centro da parede e permitiu-se que sua altura variasse conforme o

Percentual de Área de Abertura na Fachada (PAF), o qual variou para a análise de sensibilidade e para a otimização. Apenas a área da Zona 3 foi considerada nas simulações.

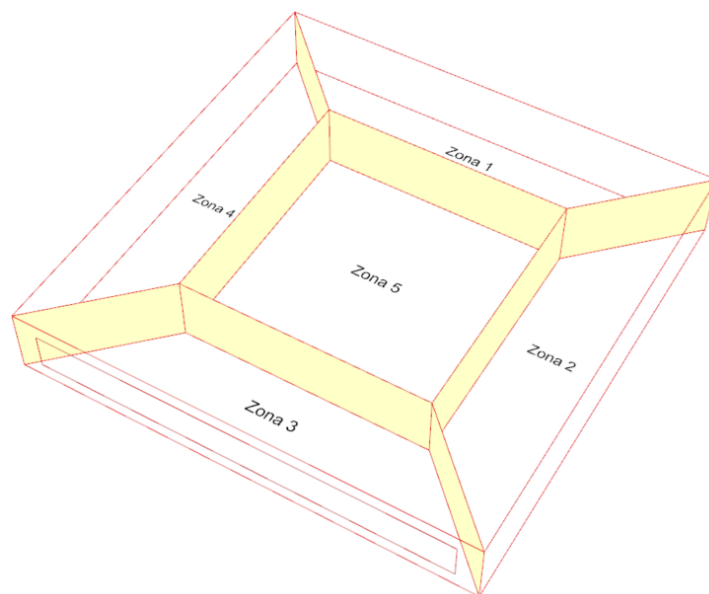
Figura 11 - Zonas perimetrais do modelo



Fonte: Autora (2024)

Ao construir as zonas perimetrais, o Ladybug® criou paredes internas no modelo (Figura 12), para solucionar isto foi configurado para que estas paredes tivessem o comportamento de limites de ar (*Air boundary*) e adiabáticas.

Figura 12 - Limites de ar do modelo

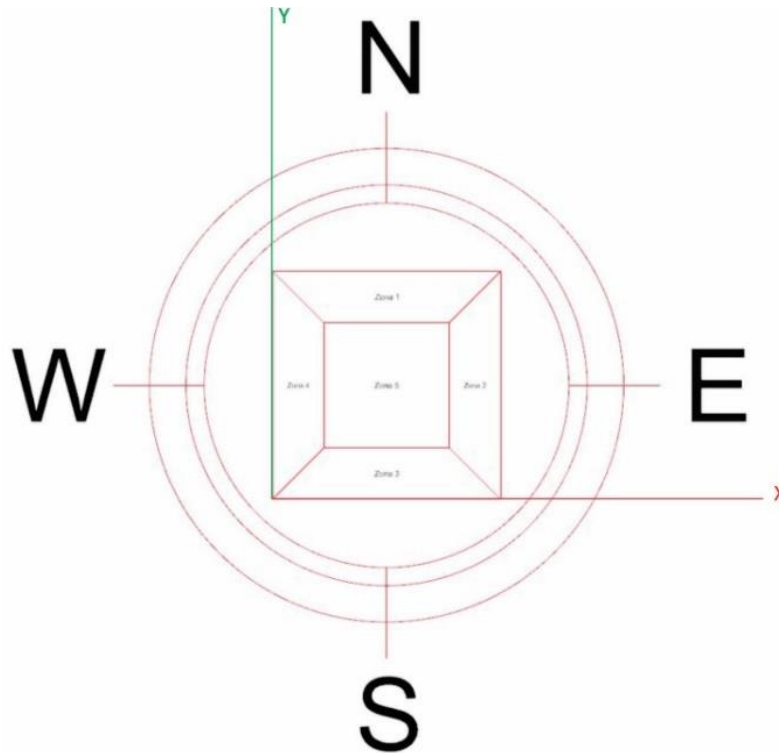


Fonte: Autora (2024)



Ao modelar uma geometria no Rhinoceros®, a configuração inicial do programa para o norte é oposta ao eixo X, conforme a Figura 13, dessa forma a zona perimetral 3 está para o Sul. Além disso, a configuração dos pontos cardeais no Ladybug® ocorre no sentido anti-horário.

Figura 13 - Pontos cardeais originais do modelo

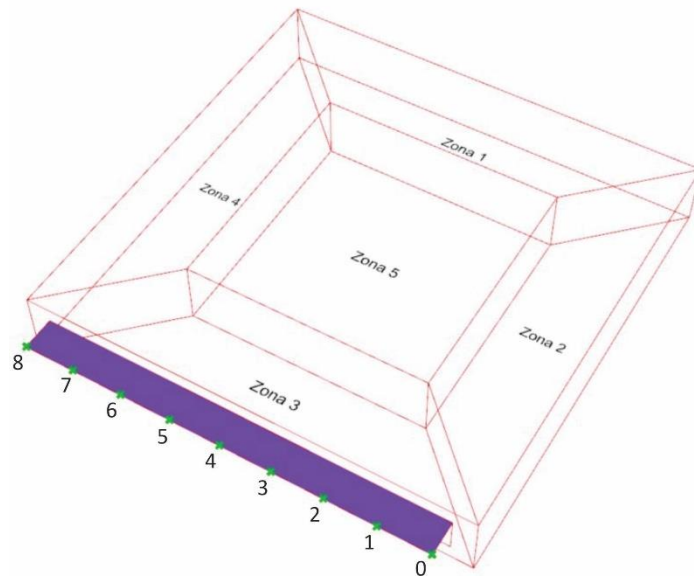


Fonte: Autora (2024)

### 3.2.3 Modelagem do brise

O comprimento do brise foi subdividido em 9 coordenadas equidistantes (Figura 14) para que a profundidade fosse parametrizada e alterasse sua localização conforme a otimização multiobjetivo. Dessa forma o comprimento do brise foi fixado acompanhando o comprimento da abertura (18,00m) para que não houvesse alteração na quantidade de pontos da subdivisão.

Figura 14 - Subdivisão do comprimento do brise



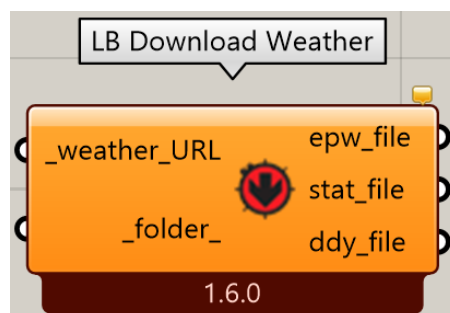
Fonte: Autora (2024)

A abertura da janela varia conforme o valor escolhido do PAF, assim a profundidade foi determinada que ela acompanhasse a altura da abertura para que o brise a protegesse, deste modo a profundidade máxima do brise é feita a partir da tangente de  $45^\circ$  da altura da abertura.

### 3.2.4 Modelo energético

A configuração do modelo energético e lumínico no Ladybug® foi subdivida em blocos:

- Geografia: configurações do arquivo climático (SWERA) e suas informações e posição do norte (o Norte no Ladybug® é configurado no sentido anti-horário). O principal componente desta etapa é o *LB Download Weather* (Figura 15);

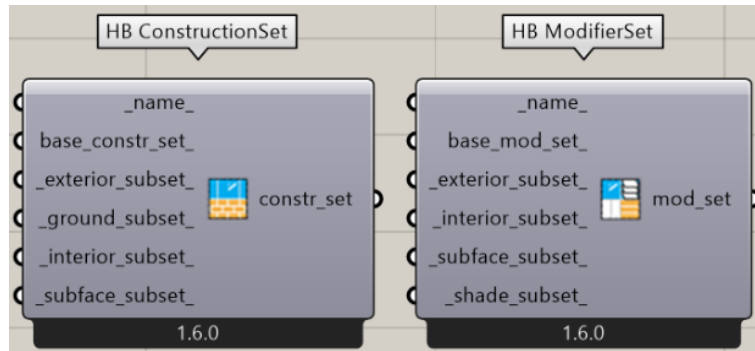
Figura 15 - Componente *LB Download Weather*

Fonte: Ladybug®

- Materiais: contém dois blocos de propriedades físicas de cada material que compõe a geometria, o primeiro para o modelo energético (para ser analisado pelo EnergyPlus®)

e o segundo para o modelo lumínico (para ser analisado pelo Radiance®), os componentes principais são *HB ConstructionSet* e *HB ModifierSet*, respectivamente (Figura 16);

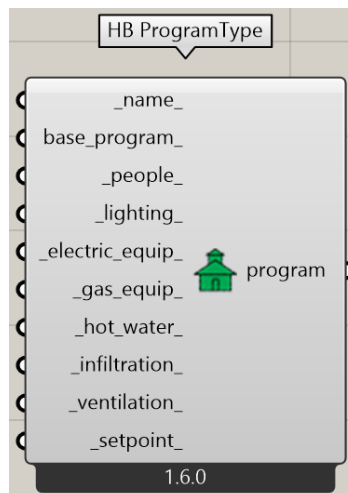
Figura 16 - Componentes *HB ConstructionSet* e *HB ModifierSet*



Fonte: Ladybug®

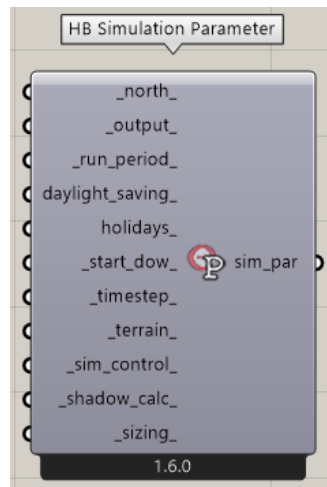
- *Schedules*: foram configuradas rotinas típicas de: (1) carga interna; (2) iluminação; (3) equipamentos e (4) setpoint, neste item o principal componente é o *HB Program Type* (Figura 17);

Figura 17 – Componentes *HB Program Type*



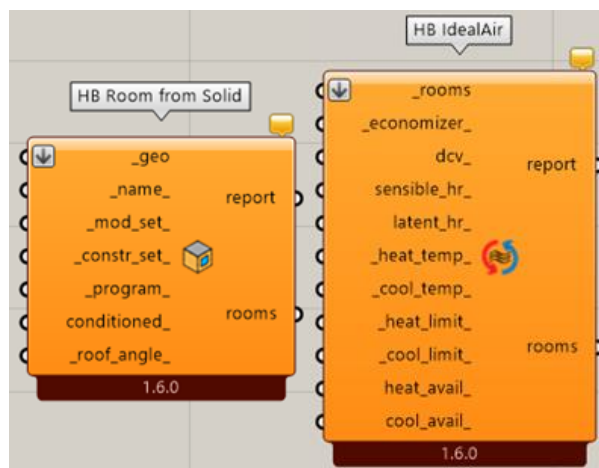
Fonte: Ladybug®

- Simulação: configurações como norte, informações de output, período de simulação, controle de simulação, cálculo de sombra e parâmetros de dimensionamento. O principal componente é o *HB Simulation Parameter* (Figura 18);

Figura 18 - Componente *HB Simulation Parameter*

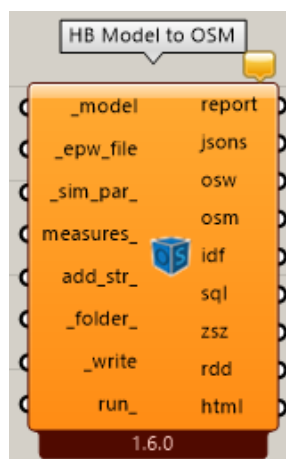
Fonte: Ladybug®

- Modelo: nessa etapa houve a configuração entre os componentes da geometria (paredes, portas e cobertura) com seus respectivos materiais, além das propriedades do componente *Ideal Air* (configuração do sistema do ar-condicionado) e sua rotina de disponibilidade. Os componentes dessas etapas são o *HB Room from Solid* e o *HB IdealAir*, respectivamente (Figura 19);

Figura 19 - Componentes *HB Room from Solid* e o *HB IdealAir*

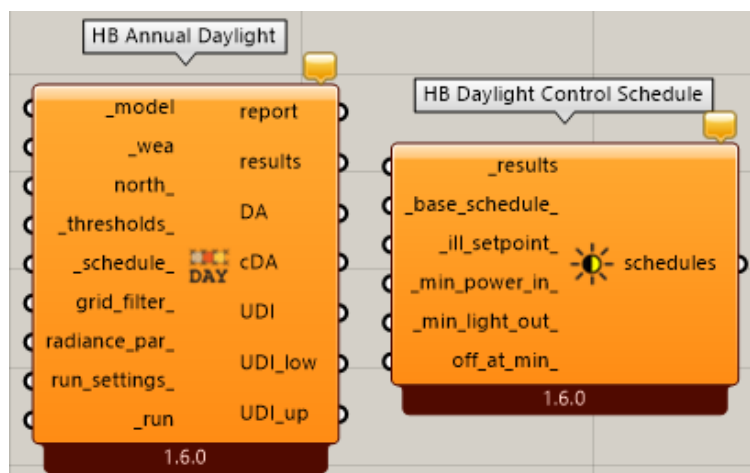
Fonte: Ladybug®

- Carga térmica: neste bloco a configuração dos componentes do Honeybee® foi para simular a carga térmica e extrair os resultados para que se pudesse calcular o valor do indicador para ser otimizado, tendo como componente principal o *HB Model to OSM* (Figura 20);

Figura 20 - Componente *HB Model to OSM*

Fonte: Ladybug®

- Iluminação natural: neste bloco foram configuradas informações de componentes do Honeybee® para extrair os valores finais para indicador de iluminação, além da dimerização, os componentes principais para esta etapa são o *HB Annual Daylight* e *HB Daylight Control Schedule* (Figura 21);

Figura 21 - Componentes *HB Annual Daylight* e *HB Daylight Control Schedule*

Fonte: Ladybug®

Para compor o modelo energético, as propriedades construtivas dos materiais das células são as indicadas para a Zona Bioclimática 6, para isso foi consultado a Anexo da Portaria do INMETRO nº 50/2013, as informações das propriedades físicas dos materiais foram pesquisadas no Catálogo de propriedades térmicas do LabEEE<sup>7</sup> e NBR 15220-3 (ABNT, 2005), em seguida inseridas no Ladybug Tools®.

<sup>7</sup> LabEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina.

Assim como o EnergyPlus®, os materiais no Ladybug® são configurados em camadas em série e por causa disso foi necessário utilizar um modelo equivalente para o elemento parede para sua correta quantificação energética. Dessa forma utilizou o componente equivalente, desenvolvido por Weber *et al.* (2017), bloco cerâmico 9 furos (14x19x29cm) com argamassa interna e externa com 2,5cm de espessura, duas camadas de cerâmica com 1,30cm cada e uma de ar. A ordem dos materiais na Tabela 2 é a mesma aplicada nas configurações do plugin, pois a ordem influencia nos resultados da simulação.

Tabela 2 - Propriedades físicas e construtivas dos materiais

PROPRIEDADES FÍSICAS							
Material	Espessura	Condutividade térmica	Densidade de massa	Calor específico	Absortância solar	Absortância visível	Resistência térmica
	(m)	(W/mk)	(kg/m <sup>3</sup> )	(J/kgK)	-	-	(m <sup>2</sup> C/W)
<b>PAREDE</b>							
Argamassa externa	0,025	1,15	2000	1000	0,5	0,5	
Cerâmica	0,0165	0,9	1600	920	-	-	-
Ar	-	-	-	-	-	-	0,297
Cerâmica	0,0165	0,9	1600	920	-	-	-
Argamassa interna	0,025	1,15	2000	1000	0,5	0,5	-
<b>COBERTURA</b>							
Telha metálica	0,004	55	7800	460	0,4	0,5	-
Poliuretano	0,04	0,03	30	1670	-	-	-
Telha metálica	0,004	55	7800	460	0,4	0,5	-
Camada de ar	-	-	-	-	-	-	0,18
Argamassa	0,01	1,15	2000	1000	-	-	-
EPS	0,07	0,04	35	1420	-	-	-
Concreto	0,04	0,9	1600	920	-	-	-
Telha metálica	0,004	55	7800	460	0,4	0,5	-
<b>PISO</b>							
Concreto	0,1	0,9	1600	920	-	-	-
Cerâmica	0,01	1,75	2200	1000	0,8	0,8	-

Fonte: Autora (2024)

Com relação ao brise, foi adotado 0,70 de absortância solar e absortância visível (Tabela 3). As propriedades dos tipos de vidro serão apresentadas em dois momentos, nas configurações para a Análise de sensibilidade e depois para a Otimização. Foi necessário configurar manualmente a temperatura do solo por meio de texto ASCII do arquivo IDF, por não haver um objeto específico para essa configuração no Ladybug®. A temperatura do solo (Tabela 4) foi configurada de acordo com o arquivo climático de Campo Grande, os valores foram extraídos do EnergyPlus®.

Tabela 3 - Propriedades físicas brise

PROPRIEDADES FÍSICAS				
Elemento construtivo	Refletância solar	Fator solar	Trasmitância	Transmitância visível
	(m)	(W/mk)	(kg/m <sup>3</sup> )	(J/kgK)
BRISE	0,7	-	-	-

Fonte: Autora (2024)

Tabela 4 - Temperatura do solo ao longo do ano

TEMPERATURA ANUAL			
Mês	Temperatura (°C)	Mês	Temperatura (°C)
Janeiro	23	Julho	21
Fevereiro	24	Agosto	20
Março	24	Setembro	20
Abril	24	Outubro	20
Maio	23	Novembro	21
Junho	22	Dezembro	22

Fonte: Autora (2023)

As schedules foram configuradas da seguinte forma (Tabela 5):

- Schedule de ocupação: de segunda a sexta-feira o horário de funcionamento foi determinado das 8h às 19h, com ocupação de 50% nos horários de 12h, 18h e 19h, nos demais 100%. Sábado, domingo e feriados foram considerados sem ocupação. Foi calculado 0,1 pessoa por metro quadrado e a taxa metabólica especificada conforme a ASHRAE 55 (2020), a atividade definida foi digitação, a qual possui um valor metabólico de 65 W/m<sup>2</sup>. Multiplicando pela área média de pele de uma pessoa (i.e., 1,80 m<sup>2</sup>), a taxa metabólica configurada foi de 117 W/pessoa;
- Schedule de iluminação: seguiu os mesmos horários da Schedule de ocupação. Além de determinar 14,1 W/m<sup>2</sup>, a fração radiante e visível foram 0,32 e 0,23 respectivamente;
- Schedule de equipamentos: com os mesmos horários já determinados, foi definido 15 W/m<sup>2</sup> por área, conforme a INI-C e 0,30 para a fração radiante;
- Schedule de setpoint: o aquecimento foi definido a 18°C e o resfriamento a 24°C (apesar do não haver necessidade de configurar aquecimento para a cidade de Campo Grande. Posteriormente, foi adicionado um componente de Schedule à configuração do sistema de ar-condicionado, o qual desliga o aquecimento durante a simulação.

Tabela 5 - Configuração da Schedule

SCHEDULE								
Padrão de uso		0h – 8h	8h – 12h	12h – 13h	13h – 18h	18h – 19h	19h – 23h	
Segunda à Sexta		0	1	0,5	1	0,5	0	
Sábados, Domingos e Feriados		0						
Pessoas		Iluminação			Equipamentos		Setpoint	
peessoa/m <sup>2</sup>	Taxa metabólica	W/m <sup>2</sup>	Fração radiante	Fração visível	W/m <sup>2</sup>	Fração visível	Aquecimento	Resfriamento
0,1	117	14,10	0,32	0,23	15	0,30	18°C	24°C

Fonte: Autora (2024)

O período de análise da simulação foi configurado com o início em 1° de janeiro às 0h e com finalização no dia 31 de dezembro às 23h.

### 3.2.5 Modelo lumínico

É necessário configurar o material duas vezes, pois as informações do modelo energético não são contabilizadas pelo Radiance®. Assim foi necessário informar as propriedades física do mesmo componente construtivo para o modelo energético e para o modelo lumínico, porém com parâmetros específicos para o Radiance® (Tabela 6).

O parâmetro configurado para iluminação nos materiais foi a transmitância visível (vidro) ou a refletância visível (materiais opacos). Os valores dos materiais opacos e do vidro foram configurados para que recebessem o mesmo valor de transmitância visível do componente construtivo do modelo energético.

Tabela 6 - Propriedades físicas dos componentes para o modelo lumínico

PROPRIEDADES FÍSICAS		
Elemento construtivo	Material	Refletância visível
Parede interna	Argamassa	0,5
Parede externa	Argamassa	0,4
Cobertura	Telha metálica	0,5
Forro	Forro de gesso	0,7
Piso	Cerâmica	0,2
Abertura	Vidro <sup>8</sup>	-
Brise	-	0,7

Fonte: Autora (2024)

<sup>8</sup> Assim como no modelo energético, as propriedades dos tipos de vidro serão apresentadas em dois momentos, nas configurações para a Análise de sensibilidade e depois para a Otimização.



O UDI (%) foi configurado para que fosse calculado o percentual de horas quando a iluminância ficasse entre 300 lux e 3000 lux. Porém para poder compreender melhor o comportamento da iluminação natural, foram extraídos os resultados do  $UDI_{low}$  e  $UDI_{up}$ . O  $UDI_{low}$  representa os resultados para a porcentagem do tempo que está abaixo do limite inferior do UDI (%) determinado em porcentagem (valores abaixo do limite inferior de 300 lux), enquanto o  $UDI_{up}$  são os valores que estão acima do limite superior determinado (valores acima de 3000 lux).

Como um dos objetivos da iluminação natural é diminuir o consumo de energia, foi usado a dimerização do sistema de iluminação artificial. Desta forma, a iluminação artificial completaria a iluminância estipulada conforme diminuísse a iluminação natural ao decorrer do dia. Para a dimerização, o ponto de ajuste da iluminância foi de 500 lux, assim a partir desse valor as luzes elétricas são diminuídas. Foi determinado que o valor mínimo de potência da iluminação dimerizável é de 30% de seu valor nominal. Devido a dimerização, o consumo da energia da iluminação artificial variou durante as simulações sendo necessário extrair essa informação durante as simulações. Neste estudo esse consumo será denominado como  $C_{ilum}$  (kWh/ano).

### 3.3 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi feita para elencar os elementos construtivos que mais impactam no modelo energético e lumínico. Assim foram escolhidos os seguintes parâmetros para variarem durante as simulações:

1. Percentual de Área de Abertura da Fachada (PAF): INI-C estipula como condição de referência 50% de PAF para edificações de escritório, assim foi determinado o valor máximo de referência, 50%, e um valor inferior, 30%;
2. Orientação solar: foi configurado para que fosse simulado os quatro pontos cardiais. O software Rhinoceros® considera como fachada norte aquela oposta ao eixo X como configuração inicial e o Ladybug® rotaciona a orientação solar no sentido anti-horário, desta forma os valores em graus não seguem o padrão, para este estudo foi mantido a configuração obtida do Rhinoceros® e Ladybug® (Tabela 7);

Tabela 7 - Orientações solar para análise de sensibilidade

Orientação solar	
<p><b>Fachada selecionada voltada para o Sul</b> Padrão: 180° Estudo: 360°/0°</p>	<p><b>Fachada selecionada voltada para o Oeste</b> Padrão: 270° Estudo: 90°</p>
<p><b>Fachada selecionada voltada para o Norte</b> Padrão: 360°/0° Estudo: 180°</p>	<p><b>Fachada selecionada voltada para o Leste</b> Padrão: 90° Estudo: 270°</p>

Fonte: Autora (2024)

3. Tipo de vidro: foram escolhidos da biblioteca disponibilizada pelo Honeybee® dois tipos de vidro com valores de transmitância visível diferentes. As propriedades (Tabela 8) desse parâmetro foram utilizadas para o modelo energético e para o modelo lumínico;

Tabela 8 – Propriedades físicas dos vidros

<b>Propriedades físicas dos vidros</b>		
<b>Modelo energético</b>		
<b>Tipo de vidro</b>	<b>Generic Clear Glass</b>	<b>ECREF-1 colored 6mm</b>
<b>Espessura (m)</b>	0,006	0,006
<b>Transmitância solar</b>	0,77	0,099
<b>Refletância solar frente</b>	0,07	0,219
<b>Refletância solar atrás</b>	0,07	0,219
<b>Emissividade frente</b>	0,84	0,84
<b>Emissividade atrás</b>	0,84	0,84
<b>Condutividade (W/mK)</b>	1,00	1,00
<b>Transmitância visível</b>	0,88	0,155
<b>Refletância visível frente</b>	0,08	0,073
<b>Refletância visível atrás</b>	0,08	0,073
<b>Modelo lumínico</b>		
<b>Transmitância visível</b>	0,88	0,155

Fonte: Autora (2024)

4. Brise: o último fator que variou foi a presença (área de 27m<sup>2</sup>) ou ausência do brise na abertura da fachada da zone 3.

Quanto aos dados de saída foram os critérios de desempenho CgTT (kWh/ano) e UDI (%). Os valores do UDI (%) na Análise de sensibilidade são os valores originais, não foi feita a subtração 100-UDI como na otimização. Após a extração dos dados, foram realizadas duas análises estatísticas utilizando o software R<sup>®</sup> para gerar os gráficos em cada situação:

- Boxplot para cada indicador (CgTT e UDI): para compreender a relação entre os elementos construtivos com o respectivo indicador e qual elemento mais impacta em cada indicador;
- Análise de variância (ANOVA) para cada indicador: para esta verificação, analisou cada elemento construtivo com cada indicador e combinação de dois elementos construtivos para cada indicador.

ANOVA é um método estatístico usado para compreender se há uma diferença significativa entre as médias dos grupos de dados que estão sendo comparados, sua finalidade é determinar se as diferenças observadas são devidas ao acaso ou se são estatisticamente significativas. A Anova exibe o grau de liberdade (*degrees of freedom* – DF), soma dos quadrados (*sum of square* – Sum Sq), média dos quadrados (*mean squares* – Mean Sq), estatística F (*F value*) e valor-p para a estatística F (Pr(>f)). Desta forma foi analisada a estatística F (quanto maior seu valor maior a probabilidade que

haja uma diferença significativa entre os grupos) e o  $Pr(>F)$  (se o valor de  $p$  for menor que a significância pré-definida<sup>9</sup> indica que a diferença é estatisticamente significativa).<sup>10</sup>

Os resultados desta análise (item 4.1) nortearam as escolhas de configuração dos modelos energético e lumínico para as próximas etapas deste método.

### 3.4 Otimização

Por utilizar algoritmos genéticos, mais especificamente o NSGA-II, o Wallace utiliza os termos “indivíduo” (que são as soluções encontradas na otimização), “população” (o conjunto de indivíduos podendo ser a população de uma geração ou população total da otimização) e “geração” (cada nova população gerada em cada reprodução). Outra característica da ferramenta é que sua contagem, seja de indivíduo ou de geração, inicia com 00, por exemplo, se foi configurado para ter 10 gerações, sua legenda será Gen00 até Gen09. O Wallacei® possui um componente para realizar otimização e componentes para analisar os resultados (Figura 22). Conforme as instruções do Wallacei (2019), o componente para a otimização tem quatro tipos de input (1 – 4) e quatro outputs (5 – 8):

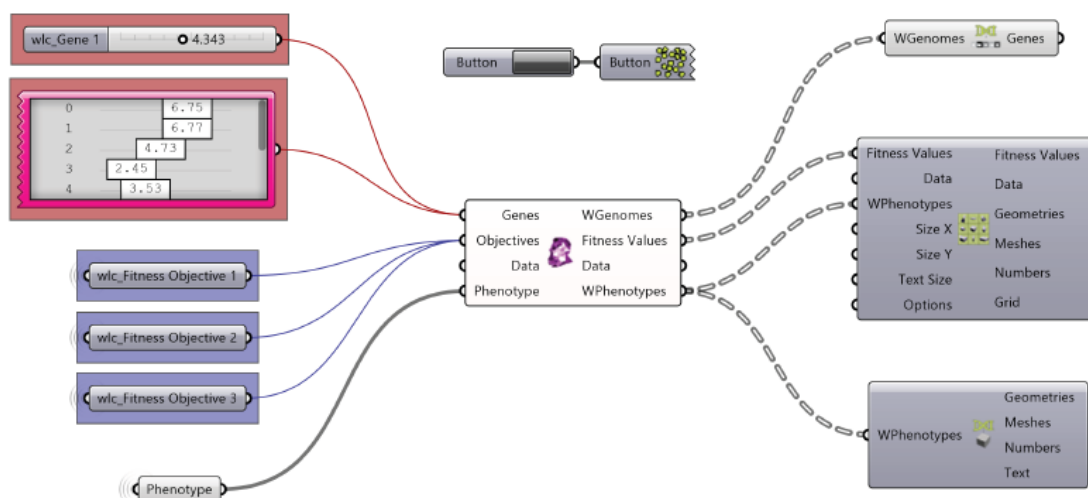
1. *Genes*: aceita somente *sliders* ou *genepools*, são os valores que serão alterados após a simulação, é como se fossem as características do DNA que formaram a aparência física;
2. *Fitness Objectives*: são os valores dos indicadores que serão otimizados, seriam os objetivos os quais se pretendem atingir;
3. *Data*: qualquer tipo de dados a serem salvos para cada solução (esse input é opcional para realizar a otimização);
4. *Phenotype*: é a aparência do modelo antes de ser modificado pelo resultado da simulação;
5. *Genomas*: são os valores das soluções das populações escolhidas;
6. *Fitness Values*: são os novos valores dos indicadores conforme as soluções escolhidas;
7. *Data*: gera todas os dados inseridos em todas as populações na população;
8. *Phenotypes*: são as novas características aparências físicas do modelo de acordo com as soluções escolhidas.

---

<sup>9</sup> Valor pré-definido de 0,05

<sup>10</sup> FM2S, FM2S Educação e consultoria, 2024. ANOVA: O que é e como utilizar?. Disponível em: <<https://fm2s.com.br/blog/anova>>. Acessado em: 03 set 2024.

Figura 22 - Componentes para otimização e análise



Fonte: Wallacei (2019)

A ferramenta possui três abas para a simulação:

1. *Wallacei Settings*: a qual podemos determinar o tamanho da população pelo *Generation Size* (quantos indivíduos por geração) e *Generation Count* (quantas gerações haverá na simulação). Neste estudo a quantidade de indivíduos e gerações foram determinadas após testes (item 3.4.2). Também pode ser ajustado os parâmetros dos algoritmos, que são o *Crossover Probability*, *Mutation Probability*, *Crossover Distribuion Index*, *Mutation Index* e *Random Seed*, os quais não foram alterados em nenhuma otimização. Nesta aba é possível visualizar os gráficos se formando das soluções já encontradas;
2. *Wallacei Analytcs*: nesta aba é possível estudar todas as soluções encontradas e cruzar as informações entre os *Fitness Objectives*. É possível selecionar as soluções pela geração ou *Fitness Objectives*, e depois fazer uma análise por meio dos gráficos:
  - a) *Diamond Chart*: é possível analisar os valores do *Fitness Values* em uma única solução, assim é possível analisar os valores juntos;
  - b) *Standard Deviation*: apresenta os níveis de variação/convergência de cada geração da população. Um desvio padrão baixo indica que a maioria dos valores estão grupados em torno da média (menos variação da população), enquanto um fator de desvio padrão alto indica que os valores estão mais distantes da média (mais variação dentro da população).

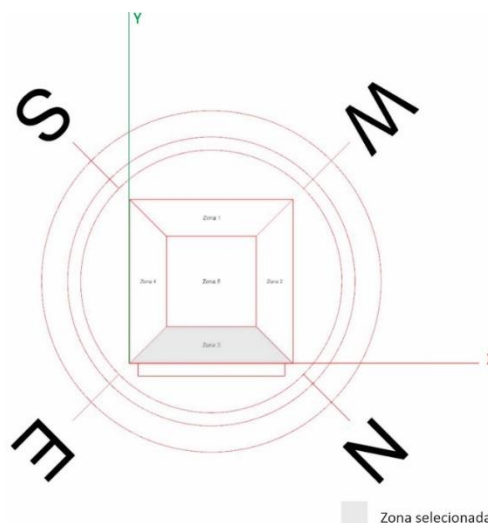
- c) *Fitness Values*: exibe os valores de cada *Fitness Objective* para cada solução da população de forma independente.
  - d) *Standard Deviation Value Trendline*: apresentar o valor do desvio padrão para cada *Fitness Objective*, destacando tendencias específicas na variação/convergência de cada geração.
  - e) *Mean Value Trendline*: apresenta o valor médio de cada *Fitness Objective* para cada geração.
3. *Wallacei Selection*: esta aba é para analisar os resultados da simulação com o objetivo de seleção e exportação. É possível selecionar as soluções de acordo com as abordagens. No estudo optou-se por selecionar as que pertenciam à Frente de Pareto. A aba possui gráficos para que se possa analisar as soluções exportadas.

Após as soluções serem exportadas, é necessário configurar os componentes de análise do Wallacei® no Grasshopper® para visualizá-las, compará-las e exportá-las. Em este estudo foi optado por alterar somente a quantidade de indivíduos e gerações no *Wallacei Settings* e foram exploradas somente as soluções de Pareto no *Wallacei Selection*.

### 3.4.1 Configuração da otimização

Para a otimização a fachada foi configurada para ficar a 45° nordeste (Figura 23), por ser uma das orientações com maior incidência solar em Campo Grande. Como o Ladybug® determina a orientação no sentido anti-horário, o valor inserido no plugin foi de 225° (o equivalente a 45° nordeste).

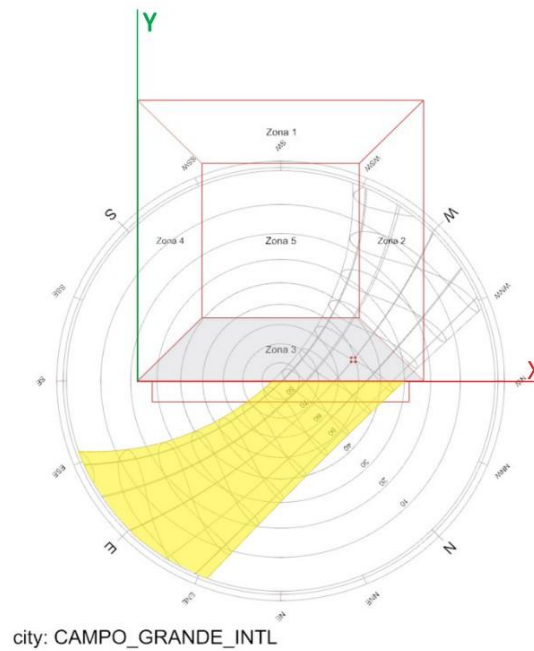
Figura 23 - Orientação solar do modelo de otimização



Fonte: Autora (2024)

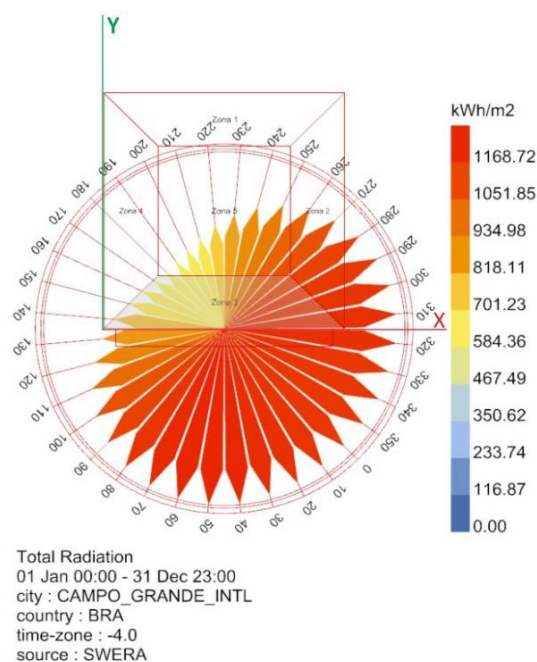
A Carta Solar (Figura 24 e Figura 25) nesta orientação indica que a Zona 3 receberá mais radiação durante o período da manhã. No solstício de inverno a fachada receberá radiação até 12h, nos equinócios de outono e primavera receberá até o início da tarde e no solstício de inverno receberá até o meio da tarde. Por terem relação significativa para o UDI (%), o PAF foi configurado para ser 50% e o tipo de vidro foi o Generic Clear Glass (Tabela 9).

Figura 24 - Carta solar do modelo



Fonte: Autora (2024)

Figura 25 - Radiação incidente na fachada do modelo



Fonte: Autora (2024)

Tabela 9 - Propriedades físicas do modelo de otimização

Propriedades físicas dos vidros	
Modelo energético	
Tipo de vidro	Generic Clear Glass
Espessura (m)	0,006
Transmitância solar	0,77
Refletância solar frente	0,07
Refletância solar atrás	0,07
Emissividade frente	0,84
Emissividade atrás	0,84
Condutividade (W/mK)	1,00
Transmitância visível	0,88
Refletância visível frente	0,08
Refletância visível atrás	0,08
Modelo lumínico	
Transmitância visível	0,88

Fonte: Autora (2024)

A otimização foi realizada em duas etapas. A primeira foi feita para verificar quais parâmetros seriam os indicadores finais e qual seria a quantidade de gerações e indivíduos nas simulações subsequentes. A segunda foram as simulações finais, para obter os resultados.

### 3.4.2 Otimização preliminar: verificação dos parâmetros

Nesse estudo realizadas quatro otimizações cada uma com população de 1000 indivíduos, com base a zona 3 do modelo desenvolvido anteriormente, com o intuito de verificar quais os indicadores finais e qual a melhor opção, mais gerações do que indivíduos ou mais indivíduos que gerações. Neste estudo os Genes foram conectados a 9 *sliders*, que são as coordenadas da geometria dos brises e no parâmetro Função Objetivo (*Objectives Fitness*) receberam os outputs dos critérios de desempenho CgTT (kWh/ano) e a média do UDI (%).

Entretanto, houve o questionamento sobre otimizar a Área (m<sup>2</sup>) do brise, dessa forma foi feita a investigação para saber se seria considerado como indicador ou se seus valores seriam apenas extraídos como resultado. Assim o objetivo das otimizações foi minimizar o CgTT (kWh/ano), maximizar o UDI (%) e verificado se minimizaria a Área (m<sup>2</sup>). Os outros dados extraídos foi o C<sub>ilum</sub> (kWh/ano), o qual é o consumo de energia da iluminação elétrica e os valores complementares ao UDI (%), UDI<sub>low</sub> (%) e UDI<sub>up</sub> (%), que são os valores abaixo e acima, respectivamente, da faixa de lux determinado para o UDI (entre 300lux e 3000lux) para que se pudesse compreender melhor o comportamento da iluminação natural. As otimizações preliminares tiveram as seguintes características (Tabela 10):



Tabela 10 - Características das primeiras otimizações

Características das otimizações					
Simulação	Gerações	Indivíduos	Indicadores	Dados extraídos	Resultado: Fronteira de Pareto
Teste 01	10	100	CgTT (kWh/ano)	- Área (m <sup>2</sup> ) - Distância dos pontos y, em relação ao eixo x - C <sub>ilum</sub> (kWh/ano) - UDI <sub>low</sub> (%) e UDI <sub>up</sub> (%)	Indivíduos 0, 1 e 2 da Geração 09 (última)
			UDI (%)		
Teste 02	10	100	CgTT (kWh/ano)	- Distância dos pontos y, em relação ao eixo x - C <sub>ilum</sub> (kWh/ano) - UDI <sub>low</sub> (%) e UDI <sub>up</sub> (%)	Todos os indivíduos (100) da geração 09 (última)
			UDI (%)		
			Área (m <sup>2</sup> )		
Teste 03	100	10	CgTT (kWh/ano)	- Área (m <sup>2</sup> ) - Distância dos pontos y, em relação ao eixo x - C <sub>ilum</sub> (kWh/ano) - UDI <sub>low</sub> (%) e UDI <sub>up</sub> (%)	Indivíduos 0, 1 e 2 da Geração 99 (última)
			UDI (%)		
Teste 04	100	10	CgTT (kWh/ano)	- Distância dos pontos y, em relação ao eixo x - C <sub>ilum</sub> (kWh/ano) - UDI <sub>low</sub> (%) e UDI <sub>up</sub> (%)	Todos os indivíduos (10) da Geração 99 (última)
			UDI (%)		
			Área (m <sup>2</sup> )		

Fonte: Autora (2024)

Os resultados foram analisados por meio de dois tipos de gráficos. O primeiro por gerações, com o objetivo de compreender a evolução da população, para isso foi evidenciada a primeira geração e a última. Os valores UDI (%), UDI<sub>low</sub> (%) e UDI<sub>up</sub> (%) são porcentagens, assim foram destacados os valores absolutos (a qual é feita a subtração entre o primeiro e o último indivíduo) e os relativos (que é calculada a diferença percentual sobre os percentuais já obtidos). E o segundo foram feitas combinações entre os parâmetros CgTT (kWh/ano), UDI (%), UDI<sub>low</sub> (%), UDI<sub>up</sub> (%), Área (m<sup>2</sup>) e C<sub>ilum</sub> (kWh/ano) com o intuito de verificar as otimizações. A partir dos resultados (item 4.2) obtidos nesta análise, foram feitas as configurações para a etapa seguinte com relação a quais indicadores escolhidos e a quantidade de gerações e indivíduos.

### 3.4.3 Otimização final: edifício com cinco pavimentos

O objetivo desta etapa é analisar o desempenho de três otimizações finais com dois modelos base (um sem brise e outro com o brise sem alteração de forma). Todos os modelos possuem cinco pavimentos para que houvesse diversidade de tipologias de pavimentos. Essas tipologias seguem de acordo com INI-C: (1) pavimento térreo, o qual as paredes externas e o piso externo estão em contato com o ambiente externo, (2) pavimento tipo, três andares seguintes que possuíam apenas as paredes externas em contato com o ambiente externo e (3) pavimento cobertura, o qual tanto o

telhado quanto as paredes externas estavam em contato com o ambiente externo. Desta forma os modelos são:

1. Modelo base sem brise: o qual a abertura não possui nenhuma proteção;
2. Modelo base com brise original: neste caso o brise possui 18m de comprimento por 1,50m de altura, totalizando 27m<sup>2</sup> de área;
3. Modelo construído: o qual foi realizado três otimizações por tipologia, (1) pavimento térreo (o forro foi configurado para ser adiabático), (2) pavimento tipo (o chão do segundo pavimento e a cobertura do quarto pavimento foram configurado como adiabáticos) e (3) pavimento cobertura (o chão foi considerado adiabático);
4. Modelo completo: o qual todos os pavimentos foram otimizados simultaneamente;
5. Modelo com brises iguais: o qual todos os pavimentos foram otimizados juntos e os brises tiveram a mesma forma geométrica.

Foi mantido as configurações de modelagem, dimerização, propriedades físicas, geográficas e climáticas anteriores. A partir dos resultados da Otimização preliminar (item4.2), para que também houvesse otimização na área do brise, assim a otimização foi configurada para que tivesse 20 gerações com 50 indivíduos, resultados em uma população de 1000 indivíduos. Conforme os resultados anteriores foi escolhido por ter três indicadores (Tabela 11). E foram extraídos os valores do  $C_{ilum}$  (kWh/ano),  $UDI_{low}$  (%) e  $UDI_{up}$  (%).

Tabela 11 - Indicadores para otimização

Indicadores		
Tipo	Descrição	Indicador
Função objetivo	Energia elétrica	CgTT (kWh/ano)
Função objetivo	Iluminação natural	UDI (%)
Função objetivo	Grandeza geométrica	Área (m <sup>2</sup> )

Fonte: Autora (2023)

A otimização do Modelo construído durou 44h44 (pavimento térreo – 11h48, pavimento tipo – 20h57 e pavimento cobertura – 11h59), o Modelo completo durou 31h04 e o Modelo com brises iguais durou 29h22. Após as otimizações, optou-se por analisar os indivíduos da fronteira de Pareto. Depois da extração destes indivíduos, cabe ao profissional escolher de acordo com seu conhecimento e interpretação qual seria a melhor opção para o projeto.

### 3.4.4 Escolha das soluções e análise dos resultados

Este estudo não possui o objetivo de explorar as diferentes abordagens de escolha de solução para a otimização multiobjetivo. Dessa forma, as escolhas da otimização final (item 4.3) foram feitas em duas etapas. A primeira etapa consiste na seleção de cinco clusters da Fronteira de Pareto da última geração. Na segunda foi feita a normalização dos indicadores CgTT (kWh/ano), UDI (%) e Área (m<sup>2</sup>) e não houve adição de peso entre os indicadores. A normalização do UDI (%) foi realizada pelos valores complementares (100-UDI), visto que a intenção foi padronizar os resultados e o UDI (%) foi o único indicador que foi maximizado. Depois foi feita a soma dos valores normalizados e escolhida uma solução que buscasse equilíbrio entre os valores e o subjetivo da autora.

Nas otimizações que tiveram mais de um pavimento, foram feitas duas somas ao final. A primeira dos valores normalizados dos indicadores e depois a soma de todos os pavimentos, resultando em um único valor para cada solução.

Após a seleção, as escolhas tiveram seus valores comparados para a análise final (item 4.4). Nesta fase, foram analisados o CgTT (kWh/ano), a carga térmica total anual ( $C_{rest}$ ), UDI (%),  $UDI_{low}$  (%),  $UDI_{up}$  (%), Área (m<sup>2</sup>),  $C_{ilum}$  (kWh/ano) e Custo de energia (o qual somou o Consumo de energia com  $C_{ilum}$  (kWh/ano) e multiplicou pela tarifa da Aneel vigente).

## 4 RESULTADOS

Este item está subdividido em quatro partes. A primeira é a Análise de Sensibilidade, cuja o objetivo é compreender a influência de quatro parâmetros sobre o CgTT (kWh/ano), UDI (%) e  $C_{ilum}$  (kWh/ano) em duas situações diferentes, uma sem dimerização e outra com. A segunda é a Otimização Preliminar, que é a análise para verificar a quantidade de indivíduos e gerações, além da definição dos indicadores.

A partir dos resultados da Otimização Preliminar foi feita a Otimização Final (terceira parte). Foram três otimizações. Primeira subdividiu-se em três, pavimento térreo, pavimentos tipos e pavimento cobertura. A segunda otimização foi feita com cinco pavimentos juntos e cada brise resultou em uma forma diferente. E a última, também com os cinco pavimentos juntos, porém os cinco brises resultaram em uma única geometria. A última etapa é a Análise comparativa. Após a escolha final de um modelo para cada Otimização Final, é feita comparação com os modelos bases (APÊNDICE A – Fluxograma da verificação de projeto).

### 4.1 Análise de sensibilidade

Para compreender melhor o comportamento do modelo, foram realizadas duas análises de sensibilidade, uma sem dimerização da iluminação e outra com dimerização, a qual tem seu consumo energético de iluminação artificial variado conforme sobre influência da incidência da iluminação natural e seus valores são contabilizados depois ao realizar a simulação termoenergética.

Os parâmetros que variaram foram a presença e ausência de brise, o percentual de abertura da fachada (de 30% a 50%), a orientação solar da fachada (norte, sul, leste e oeste) e o tipo de vidro (Generic Clear Glass e Ecref-1 Colored 6mm). Foram extraídos os seguintes valores: CgTT (kWh/ano), UDI (%), UDIlow (%), UDIlup (%) e  $C_{ilum}$  (kWh/ano). Para compreender melhor cada variável e sua influência nos indicadores CgTT (kWh/ano), UDI (%) e  $C_{ilum}$  (kWh/ano). Foi feito a análise do Gráfico boxplot e Análise da Variância (ANOVA) dos parâmetros e das combinações entre si, a análise completa dos gráficos encontra-se no APÊNDICE B – Resultados da Análise de Sensibilidade.

Na análise sem dimerização, os valores de  $C_{ilum}$  (kWh/ano) (Tabela 12) ficaram constantes (2.812,74 kWh/ano), pois a iluminação artificial não altera conforme a incidência da iluminação natural no ambiente. O modelo sem brise apresentou maiores valores para CgTT (kWh/ano), e como não houve proteção solar na abertura, o ambiente necessitou de mais carga térmica para resfriamento. Exceto quando a abertura estava voltada para sul, a qual consumiu menos energia

para resfriamento em ambos os modelos. Quanto a iluminação natural, em algumas opções do modelo com brise apresentou valores maiores do que os mesmos no modelo sem brise (Tabela 12) considerando o UDI (%). Esse fato ocorreu devido à diminuição dos valores do indicador  $UDI_{up}$  (%) nos modelos com brise, que controlou melhor as iluminâncias acima de 3000lux no ambiente, as quais podem causar excesso de brilho e ofuscamento.

Tabela 12 - Dados obtidos para a análise de sensibilidade sem dimerização

Dados análise de sensibilidade sem dimerização							
Modelo sem brise							
PAF (%)	Orientação Solar	Tipo de vidro	CgTT (kWh/ano)	UDI (%)	$UDI_{low}$ (%)	$UDI_{up}$ (%)	$C_{lum}$ (kWh/ano)
30	90 (Oeste)	Clear Glass	10570,04	52,08	21,56	26,35	2812,74
50	90 (Oeste)	Clear Glass	11348,35	40,46	20,76	38,77	2812,74
30	180 (Norte)	Clear Glass	10517,52	50,71	23,33	25,96	2812,74
50	180 (Norte)	Clear Glass	11164,69	41,77	22,02	36,21	2812,74
30	270 (Leste)	Clear Glass	10554,02	56,96	24,62	18,42	2812,74
50	270 (Leste)	Clear Glass	11601,97	49,21	22,54	28,25	2812,74
30	360 (Sul)	Clear Glass	8777,84	62,16	23,62	14,22	2812,74
50	360 (Sul)	Clear Glass	8994,35	54,28	21,97	23,75	2812,74
30	90 (Oeste)	Colored 6mm	10568,15	30,13	64,37	5,49	2812,74
50	90 (Oeste)	Colored 6mm	11175,30	42,70	49,19	8,11	2812,74
30	180 (Norte)	Colored 6mm	10302,27	28,06	65,89	6,05	2812,74
50	180 (Norte)	Colored 6mm	10800,74	38,98	52,48	8,55	2812,74
30	270 (Leste)	Colored 6mm	10068,68	21,73	73,70	4,57	2812,74
50	270 (Leste)	Colored 6mm	10624,72	33,33	60,39	6,28	2812,74
30	360 (Sul)	Colored 6mm	8871,45	21,47	78,53	0,00	2812,74
50	360 (Sul)	Colored 6mm	9093,25	35,66	64,34	0,00	2812,74
Modelo com brise							
PAF (%)	Orientação Solar	Tipo de vidro	CgTT (kWh/ano)	UDI (%)	$UDI_{low}$ (%)	$UDI_{up}$ (%)	$C_{lum}$ (kWh/ano)
30	90 (Oeste)	Clear Glass	9255,48	73,00	23,78	3,22	2812,74
50	90 (Oeste)	Clear Glass	9621,00	54,71	21,48	23,81	2812,74
30	180 (Norte)	Clear Glass	9045,35	71,88	27,13	0,99	2812,74
50	180 (Norte)	Clear Glass	9107,98	57,05	23,54	19,41	2812,74
30	270 (Leste)	Clear Glass	9200,41	70,25	29,27	0,48	2812,74
50	270 (Leste)	Clear Glass	9496,16	60,04	24,57	15,39	2812,74
30	360 (Sul)	Clear Glass	8660,81	71,84	28,03	0,13	2812,74
50	360 (Sul)	Clear Glass	8633,82	64,55	23,68	11,76	2812,74
30	90 (Oeste)	Colored 6mm	9389,67	9,57	90,16	0,28	2812,74
50	90 (Oeste)	Colored 6mm	9719,21	35,78	62,49	1,73	2812,74
30	180 (Norte)	Colored 6mm	9095,78	4,97	94,91	0,12	2812,74
50	180 (Norte)	Colored 6mm	9114,44	31,70	67,95	0,36	2812,74
30	270 (Leste)	Colored 6mm	9141,40	4,33	95,56	0,11	2812,74
50	270 (Leste)	Colored 6mm	9172,89	26,26	73,02	0,72	2812,74
30	360 (Sul)	Colored 6mm	8718,10	1,81	98,19	0,00	2812,74
50	360 (Sul)	Colored 6mm	8711,52	23,40	76,60	0,00	2812,74

Fonte: Autora (2024)

Na análise com dimerização o indicador  $C_{ilum}$  (kWh/ano) tem seus valores variados (Tabela 13). Ao comparar os valores extraídos dos dois modelos, pode-se verificar que o maior impacto da configuração de dimerização foi com o consumo de energia que foi reduzido, pois tanto o  $C_{gTT}$  (kWh/ano) quanto o  $C_{ilum}$  (kWh/ano) apresentaram valores menores com dimerização. Isso indica o potencial da combinação entre iluminação natural e iluminação artificial dimerizada como estratégia para melhorar o desempenho do edifício.

Tabela 13 - Dados obtidos para a análise de sensibilidade com dimerização

Dados análise de sensibilidade com dimerização							
Modelo sem brise							
PAF (%)	Orientação Solar	Tipo de vidro	$C_{gTT}$ (kWh/ano)	UDI (%)	UDI <sub>low</sub> (%)	UDI <sub>up</sub> (%)	$C_{ilum}$ (kWh/ano)
30	90 (Oeste)	Clear Glass	8533,44	52,10	21,48	26,42	552,07
50	90 (Oeste)	Clear Glass	9348,64	40,40	20,76	38,85	514,41
30	180 (Norte)	Clear Glass	8779,89	50,90	23,38	25,72	608,30
50	180 (Norte)	Clear Glass	9525,41	41,85	21,93	36,22	554,82
30	270 (Leste)	Clear Glass	8597,61	56,98	24,70	18,32	661,34
50	270 (Leste)	Clear Glass	9535,54	49,20	22,57	28,23	581,28
30	360 (Sul)	Clear Glass	6893,05	62,11	23,65	14,24	636,91
50	360 (Sul)	Clear Glass	7047,55	54,27	21,96	23,77	560,69
30	90 (Oeste)	Colored 6mm	9547,88	30,01	64,49	5,50	1664,34
50	90 (Oeste)	Colored 6mm	9932,40	42,88	48,95	8,16	1323,35
30	180 (Norte)	Colored 6mm	9412,14	28,10	65,86	6,05	1713,77
50	180 (Norte)	Colored 6mm	9647,49	39,04	52,42	8,54	1416,81
30	270 (Leste)	Colored 6mm	9208,90	21,67	73,77	4,56	1898,74
50	270 (Leste)	Colored 6mm	9494,92	33,33	60,39	6,28	1603,59
30	360 (Sul)	Colored 6mm	8161,34	21,37	78,63	0,00	2016,13
50	360 (Sul)	Colored 6mm	8120,19	35,51	64,49	0,00	1708,83
Modelo com brise							
PAF (%)	Orientação Solar	Tipo de vidro	$C_{gTT}$ (kWh/ano)	UDI (%)	UDI <sub>low</sub> (%)	UDI <sub>up</sub> (%)	$C_{ilum}$ (kWh/ano)
30	90 (Oeste)	Clear Glass	7355,00	72,94	23,93	3,13	656,89
50	90 (Oeste)	Clear Glass	7622,72	54,65	21,51	23,84	540,87
30	180 (Norte)	Clear Glass	7293,50	71,87	27,21	0,92	756,50
50	180 (Norte)	Clear Glass	7250,83	57,13	23,48	19,39	605,94
30	270 (Leste)	Clear Glass	7495,92	70,16	29,43	0,41	828,73
50	270 (Leste)	Clear Glass	7649,83	59,94	24,56	15,50	645,01
30	360 (Sul)	Clear Glass	6940,13	71,70	28,19	0,11	813,47
50	360 (Sul)	Clear Glass	6770,91	64,52	23,70	11,78	621,24
30	90 (Oeste)	Colored 6mm	8858,68	9,60	90,13	0,27	2207,03
50	90 (Oeste)	Colored 6mm	8716,69	36,02	62,29	1,69	1663,13
30	180 (Norte)	Colored 6mm	8660,01	5,26	94,61	0,13	2307,41
50	180 (Norte)	Colored 6mm	8265,38	31,48	68,16	0,36	1814,27
30	270 (Leste)	Colored 6mm	8723,02	4,27	95,62	0,11	2349,84
50	270 (Leste)	Colored 6mm	8387,99	26,31	72,97	0,72	1921,60
30	360 (Sul)	Colored 6mm	8349,20	1,85	98,15	0,00	2386,28
50	360 (Sul)	Colored 6mm	8017,37	23,30	76,70	0,00	2010,42

Fonte: Autora (2024)

Ao comparar os modelos dimerizados (Tabela 13), o  $C_{gTT}$  (kWh/ano) apresenta menores valores para o modelo com brise, além disso é possível notar que a porcentagem de tempo do  $UDI_{low}$  (%) é maior, indicando que a luminância esteve abaixo de 300 lux por mais tempo. Entretanto ao analisar os valores do  $UDI_{up}$  (%), o brise reduziu a incidência da iluminação acima de 3000 lux, diminuindo assim a probabilidade de ofuscamento dos usuários. Quanto ao  $C_{ilum}$  (kWh/ano) é possível observar que o consumo é maior quando utilizasse o vidro com menor transmitância visível.

O maior impacto da dimerização foi em relação ao consumo de energia e em suas variáveis (Tabela 14), visto que ela foi configurada para suprir com iluminação artificial quando a incidência de iluminação natural não ficasse entre o espectro de luminância determinada. Assim quanto mais os elementos construtivos impedem a iluminação natural mais é necessário que haja iluminação artificial. Quanto ao consumo de resfriamento, houve redução em seus valores, indicando sua relação com a iluminação artificial.

Tabela 14 - Comparação das variáveis significativas para as análises

Variáveis significativas para os modelos		
Parâmetros	Análises de sensibilidades	
	Sem dimerização	Com dimerização
$C_{gTT}$ (kWh/ano)	Brise, PAF e Brise:Orientação	Brise, vidro e orientação
UDI (%)	Vidro, Brise:Vidro e PAF:Vidro	Vidro, Brise:Vidro e PAF:Vidro
$UDI_{low}$ (%)	Vidro, PAF e o brise	Vidro, o PAF e brise
$UDI_{up}$ (%)	Vidro, brise e PAF	Vidro, brise e PAF
$C_{ilum}$ (kWh/ano)	-	Vidro, brise e Brise:Vidro

Fonte: Autora (2024)

Assim para este estudo de caso, conforme as propriedades geográficas, climáticas e físicas do modelo, para a próxima etapa foi escolhido utilizar a dimerização, PAF de 50, além da presença de brise prezando pelo menor consumo de energia. Para obter melhores resultado de iluminação natural, foi escolhido o vidro Generic Clear Glass.

#### 4.2 Otimização preliminar: verificação dos parâmetros do algoritmo

Esta etapa foi realizada com o objetivo de investigar quantidade de indivíduos e gerações, além de determinar se a área do brise será otimizada ou não. Para facilitar a análise dos resultados nesta seção foi apresentado o comportamento da última geração de cada teste para os indicadores  $C_{gTT}$  (kWh/ano), UDI (%), Área (m<sup>2</sup>) da Zona 3 e  $C_{ilum}$  (kWh/ano). A análise mais aprofundada dos testes encontra-se no APÊNDICE C – Análise dos resultados da Otimização preliminar. Para realizar essa análise foram destacadas e selecionadas a primeira geração e a última geração de cada teste

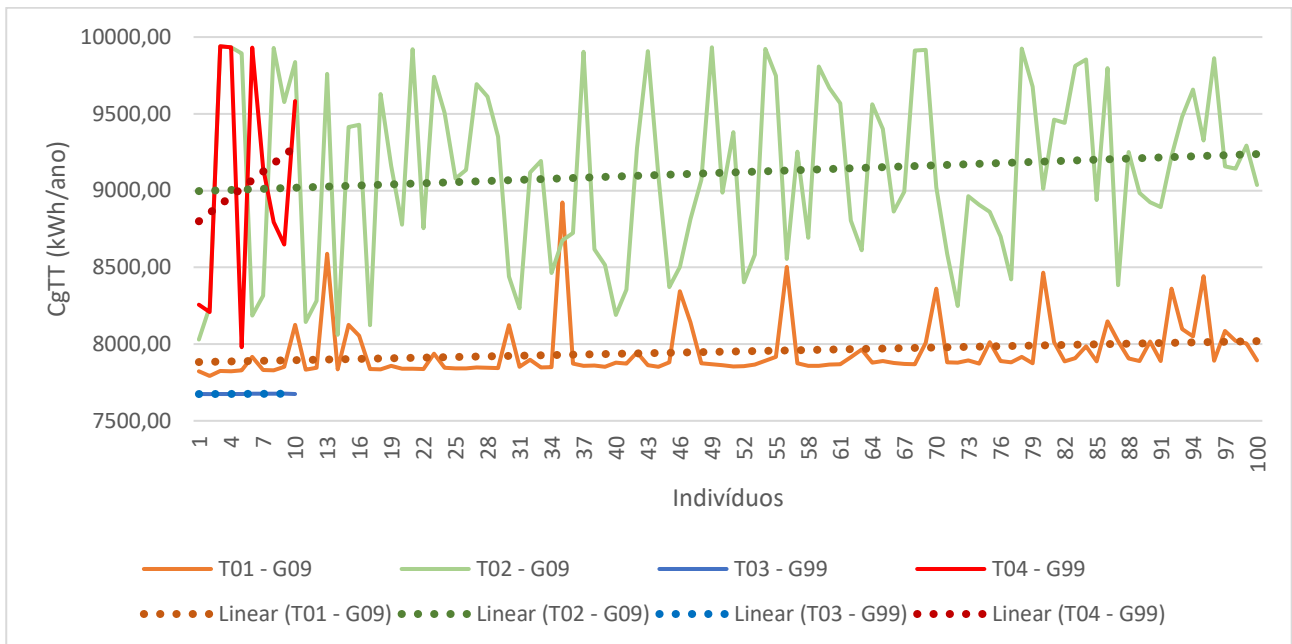
para compreender o comportamento dos indivíduos. Em relação ao UDI (%), seus resultados já são extraídos em porcentagem, então somente para este indicador foi evidenciado os valores absolutos e relativos. Foram realizados quatro testes de otimização:

- Teste 01: 10 gerações com 100 indivíduos, o objetivo foi minimizar o CgTT (kWh/ano) e maximizar o UDI (%), última geração G09;
- Teste 02: 10 gerações com 100 indivíduos, o objetivo foi minimizar CgTT (kWh/ano) e Área (m<sup>2</sup>) e maximizar UDI (%), última geração G09;
- Teste 03: 100 gerações com 10 indivíduos, o objetivo foi minimizar o CgTT (kWh/ano) e maximizar o UDI (%), última geração G99;
- Teste 04: 100 gerações com 10 indivíduos, o objetivo foi minimizar CgTT (kWh/ano) e Área (m<sup>2</sup>) e maximizar UDI (%), última geração G99.

Os testes que obtiveram os menores resultados para o indicador CgTT (kWh/ano) foram os testes 01 e 03 (Figura 26), pois foram os que não otimizaram o indicador Área (m<sup>2</sup>), resultando nas maiores áreas do brise (Figura 28), apontando a relação inversamente proporcional entre esses dois indicadores. E apesar desses testes terem apresentado valores superiores de UDI (%) (Figura 27), ambos obtiveram maior consumo de iluminação. Indicando que apesar de estarem dentro da faixa de lux (300lux – 3000lux) de iluminação natural, houve necessidade de complementar com a iluminação artificial (Figura 29), provavelmente por terem maior área de brise. Apesar dos testes 02 e 04 terem otimizado o indicador Área (m<sup>2</sup>), seus resultados apresentaram padrões diferentes, principalmente por o teste 02 ter sido o único que conseguiu minimizar a área do brise. Porém ao analisar os gráficos, é possível notar que o comportamento inicial dos indivíduos é semelhante, visto que as linhas dos gráficos se sobrepõem, indicando que poucos indivíduos não foram suficientes para obter os melhores resultados na otimização utilizando a área como indicador, mesmo tendo mais gerações. Dessa forma o teste 02 convergiu mais e conseguiu reduzir mais a área.

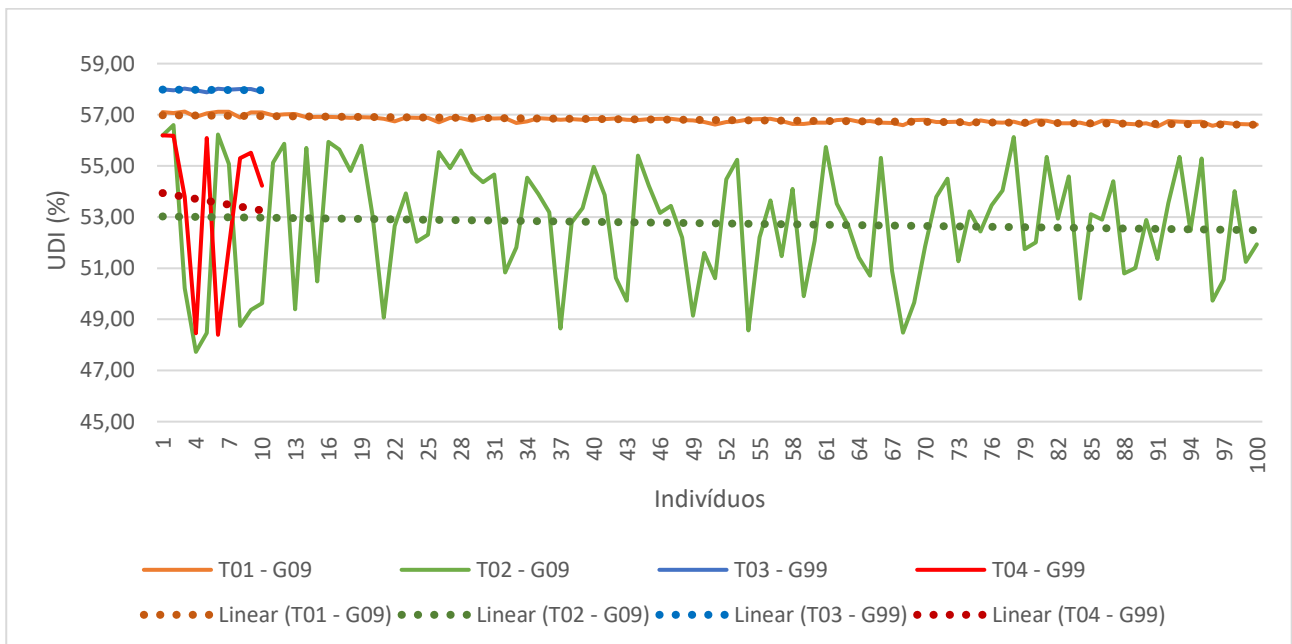


Figura 26 - Comparação das últimas gerações para o indicador CgTT (kWh/ano)

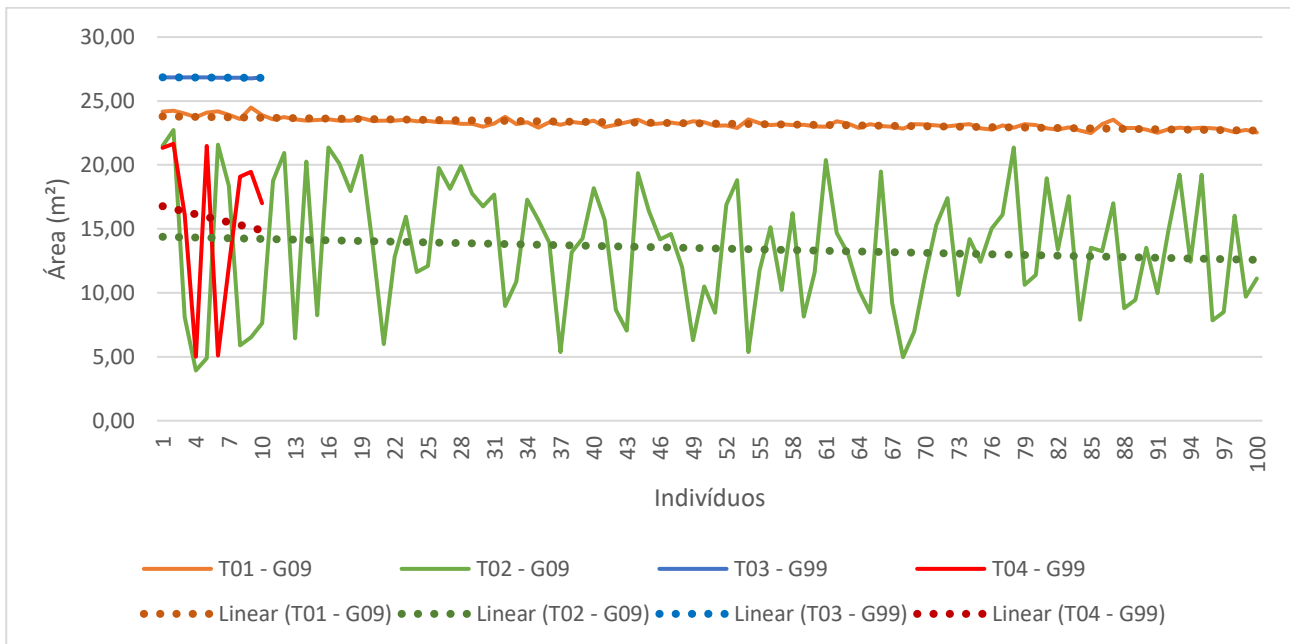


Fonte: Autora (2024)

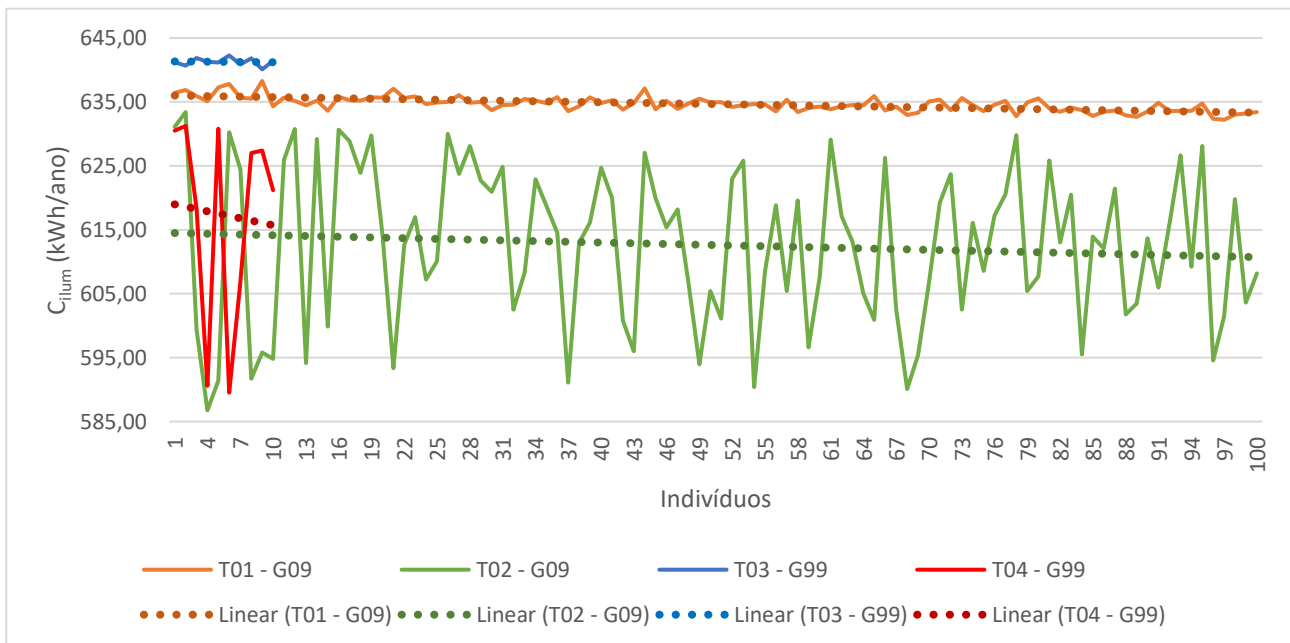
Figura 27 - Comparação das últimas gerações para o indicador UDI (%)



Fonte: Autora (2024)

Figura 28 - Comparação das últimas gerações para o indicador Área (m<sup>2</sup>)

Fonte: Autora (2024)

Figura 29 - Comparação das últimas gerações para o indicador C<sub>ilum</sub> (kWh/ano)

Fonte: Autora (2024)

Para facilitar a análise final dos testes, a Tabela 15 mostra um resumo se houve redução ou aumento, assim como seu percentual, da primeira geração para a última para cada teste e indicador, conforme as análises do APÊNDICE C – Análise dos resultados da Otimização preliminar.

Tabela 15 - Resumo da comparação entre as primeiras e as últimas gerações

Comparação entre a primeira e a última geração				
	CgTT (kWh/ano)	UDI (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Cilum (kWh/ano)
<b>Teste 01</b>	↓ 19,01%	↑ 7,88%	↑ 71,64%	↑ 3,85%
<b>Teste 02</b>	↓ 7,13%	↑ 0,21%	↓ 0,46%	↑ 0,24%
<b>Teste 03</b>	↓ 22,24%	↑ 10,18%	↑ 101,61%	↑ 4,95%
<b>Teste 04</b>	↓ 8,39%	↑ 1,89%	↑ 18,94%	↑ 1,09%

Fonte: Autora (2024)

Conforme os valores extraídos dos testes pode-se concluir que:

- Teste 01 e 03, os quais possuíam apenas dois indicadores, foi possível observar a evolução por gerações, as faixas de valores da primeira geração é diferente da última, sendo que esta possui menor variabilidade;
- Teste 02 e 04, os quais possuíam três indicadores, tiveram alta variabilidade de valores e os indivíduos de todas as gerações se encontravam dentro da mesma faixa de valores, se sobrepondo;
- A relação entre os indicadores CgTT (kWh/ano) x UDI (%) e CgTT (kWh/ano) x Área (m<sup>2</sup>) apresentaram a mesma correlação em todos os testes, entretanto nos testes 02 e 04 os valores apresentaram mais dispersos, enquanto nos outros testes as primeiras gerações os valores estavam dispersos, mas se convergiam em direção aos resultados da Fronteira de Pareto, aderindo melhor a linha de tendência. Porém em todos os testes essa dispersão de valores indica que há outros fatores que influenciam mais no indicador CgTT (kWh/ano) do que o UDI (%) e a Área (m<sup>2</sup>);
- Quanto a relação UDI (%) x Área (m<sup>2</sup>), em todos os testes a correlação indica forte dependência entre eles.

Devido a redução do indicador Área (m<sup>2</sup>), além de melhorias nos demais, a otimização final será baseada no Teste 02, será feita com os três indicadores e com mais indivíduos do que gerações.

#### 4.3 Otimização final: edifício com cinco pavimentos

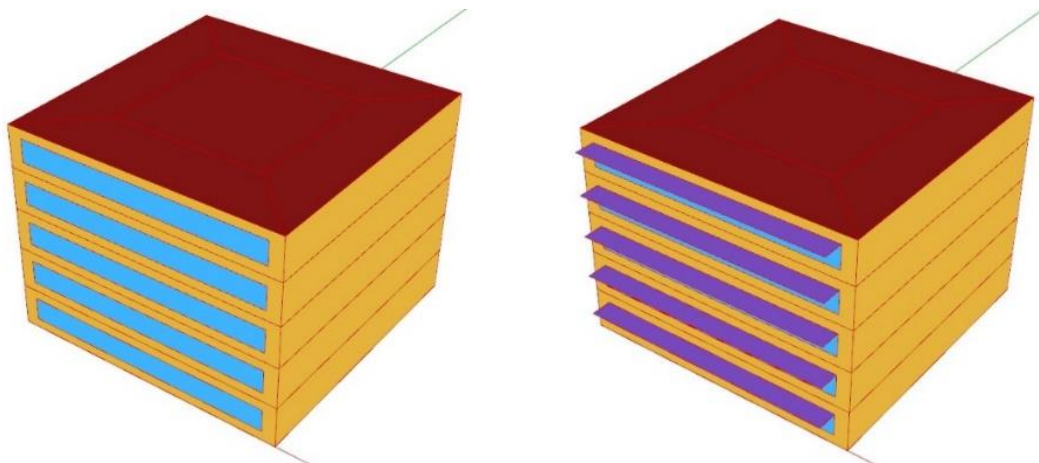
Foram feitas três otimizações com configurações diferentes, após foi eleita uma solução para cada otimização. Para compreender melhor os resultados esses três modelos foram comparados aos modelos bases, os cinco modelos analisados, conforme o item 3.4.3 são: (1) modelo base sem brise, (2) modelo base com brise original, (3) modelo construído, (4) modelo completo e (5) modelo com brises iguais.

### 4.3.1 Modelos base

Para verificar o comportamento do algoritmo, foi feita a análise de dois modelos bases de cinco pavimentos: o primeiro sem brise e o segundo com brise original, o qual seria em sua dimensão total (27m<sup>2</sup>) (Figura 30). As condições geográficas e propriedades físicas são as mesmas configurações da otimização.

Foram realizadas simulações energéticas e lumínicas para que pudessem ser usadas como parâmetros na análise da Otimização final. Foi extraído os valores dos indicadores C<sub>gTT</sub> (kWh/ano) e UDI (%) da zona 3 (Tabela 16 e Tabela 17). Nesta etapa os valores do UDI (%) não foram submetidos a subtração e foi feita a média dos valores do grid para cada pavimento. Além dos valores dos indicadores, também foram obtidos os valores do C<sub>ilum</sub> (kWh/ano), UDI<sub>low</sub> (%) e do UDI<sub>up</sub> (%).

Figura 30 - Modelos base - sem e com brise retangular respectivamente



Fonte: Autora (2024)

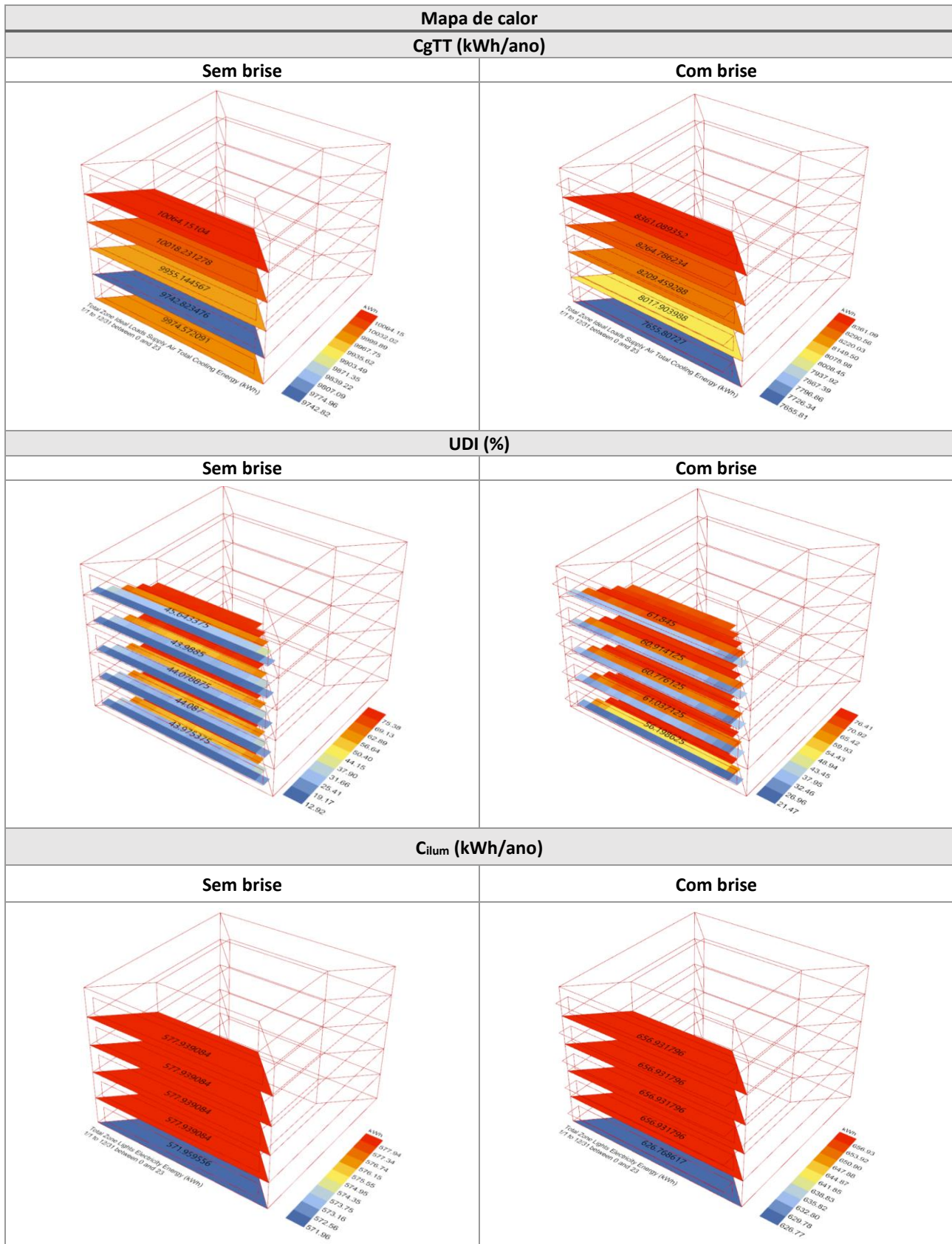
Tabela 16 - Valores das simulações energéticas e lumínicas dos modelos base

<b>Simulações energética e lumínicas</b>		
<b>CgTT (kWh/ano)</b>		
<b>Pavimento</b>	<b>Sem brise</b>	<b>Com brise</b>
<b>Térreo</b>	9.974,57	7.655,81
<b>Pavimento tipo 01</b>	9.742,82	8.017,90
<b>Pavimento tipo 02</b>	9.955,14	8.209,46
<b>Pavimento tipo 03</b>	10.018,23	8.264,79
<b>Cobertura</b>	10.064,15	8.361,09
<b>UDI (%)</b>		
<b>Pavimento</b>	<b>Sem brise</b>	<b>Com brise</b>
<b>Térreo</b>	43,98	56,20
<b>Pavimento tipo 01</b>	44,09	61,04
<b>Pavimento tipo 02</b>	44,08	60,78
<b>Pavimento tipo 03</b>	43,99	60,91
<b>Cobertura</b>	45,64	61,85
<b>UDI<sub>low</sub> (%)</b>		
<b>Pavimento</b>	<b>Sem brise</b>	<b>Com brise</b>
<b>Térreo</b>	22,30	24,11
<b>Pavimento tipo 01</b>	22,34	24,49
<b>Pavimento tipo 02</b>	23,00	24,44
<b>Pavimento tipo 03</b>	22,31	24,45
<b>Cobertura</b>	22,48	24,86
<b>UDI<sub>up</sub> (%)</b>		
<b>Pavimento</b>	<b>Sem brise</b>	<b>Com brise</b>
<b>Térreo</b>	33,73	19,70
<b>Pavimento tipo 01</b>	33,58	14,48
<b>Pavimento tipo 02</b>	33,59	14,78
<b>Pavimento tipo 03</b>	33,70	14,64
<b>Cobertura</b>	31,88	13,30
<b>C<sub>ilum</sub> (kWh/ano)</b>		
<b>Pavimento</b>	<b>Sem brise</b>	<b>Com brise</b>
<b>Térreo</b>	571,96	626,77
<b>Pavimento tipo 01</b>	577,94	656,93
<b>Pavimento tipo 02</b>	577,94	656,93
<b>Pavimento tipo 03</b>	577,94	656,93
<b>Cobertura</b>	577,94	656,93

Fonte: Autora (2024)

É possível notar que no modelo sem brise há um consumo maior de resfriamento, porém um consumo menor com iluminação artificial em todos os pavimentos. O modelo com brise aumentou o UDI (%) e UDI<sub>low</sub> (%), entretanto diminuiu o UDI<sub>up</sub> (%), o que indica menor possibilidade de ofuscamento e houve aumento do consumo de iluminação artificial. Desta forma os modelos base mostram os casos extremos de consumo de energia.

Tabela 17 - Mapa de calor para CgTT (kWh/ano) e UDI (%) dos modelos base



Fonte: Autora (2024)

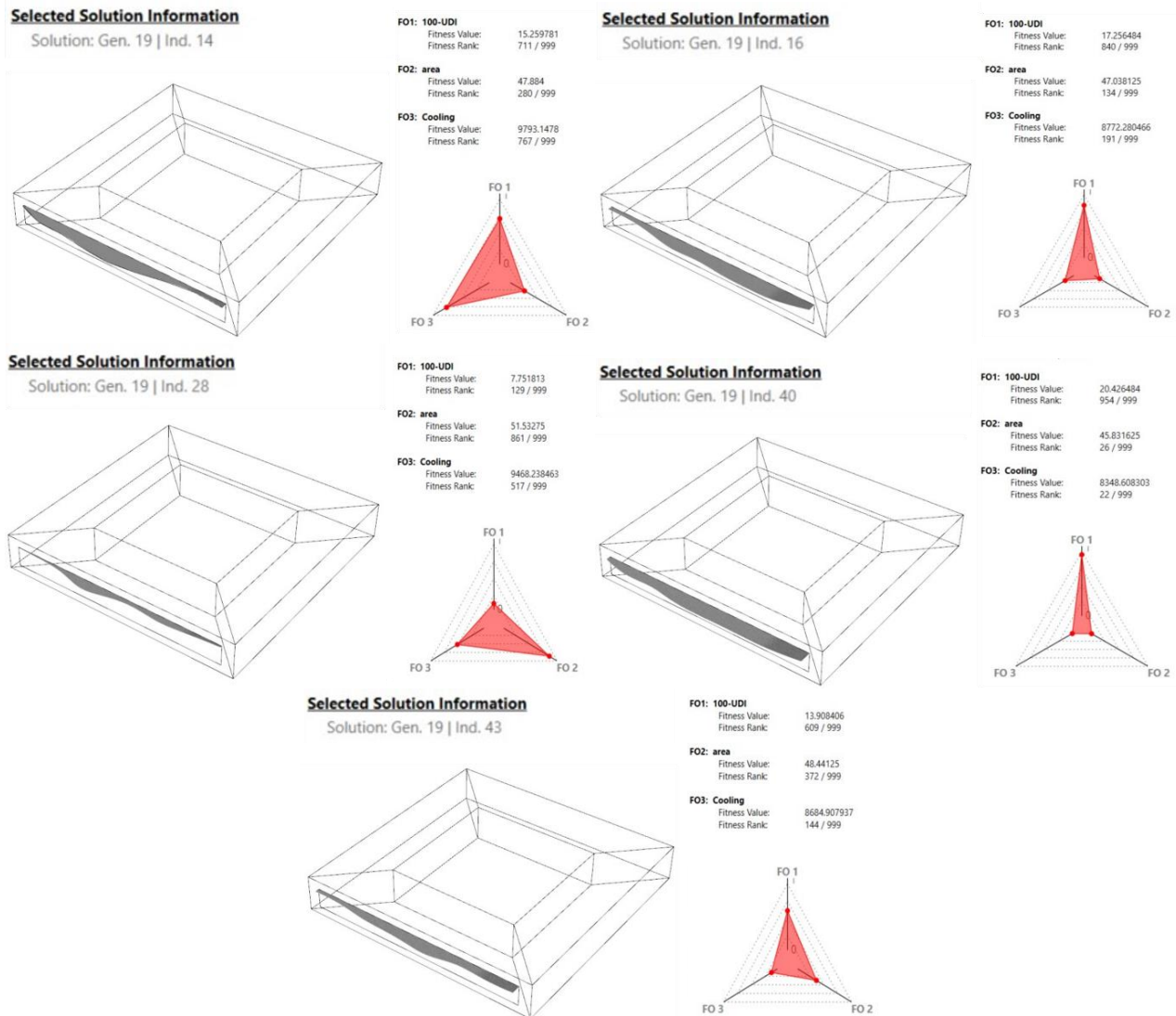
### **4.3.2 Modelo Construído**

O modelo construído é resultado de três simulações. A primeira para o pavimento térreo, a segunda para o pavimento tipo com três pavimentos e a última para a cobertura. Assim foi necessário construir o edifício a partir da seleção dos pavimentos. Foram realizadas três otimizações, desta forma houve três análises, uma para cada tipo de tipologia. Para cada uma foram selecionados 5 clusters da Fronteira de Pareto (última geração) e normalizado os valores dos indicadores (CgTT (kWh/ano), UDI (%) e Área (m<sup>2</sup>)) e somado os valores normalizados de cada indicador. Entretanto, como o Pavimento tipo é composto por 3 pavimentos, foram somados os resultados da soma dos valores normalizados de cada indivíduo. Para a escolha final foi levando em consideração o total dos valores normalizados e escolha subjetiva.

#### **4.3.2.1 Pavimento térreo**

O pavimento térreo foi configurado para que as paredes externas e piso tivessem contato com o exterior, são elementos construtivos que permitem a passagem de calor, no entanto seu forro foi configurado para que não houvesse transmissão de calor, sendo assim é adiabático. Os indivíduos da fronteira de Pareto na simulação do pavimento térreo encontram-se na geração 19. A Figura 31 mostra os brises dos 5 clusters e os respectivos gráficos diamante. Nota-se que não há polígono simétrico, pois sempre tende a um critério. A Tabela 18 mostra os valores dos 5 clusters, além dos valores normalizados.

Figura 31 - Forma dos brises e gráfico diamante dos clusters do pavimento térreo



Fonte: Autora (2024)

Tabela 18 – Valores normalizados dos clusters do Pavimento Térreo

Pavimento térreo							
Ind.	CgTT (kWh/ano)	100-UDI (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Valores normalizados			
				CgTT (kWh/ano)	100-UDI (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Soma
14	9793,15	47,88	15,26	1	0,929196	0,747059	2,68
16	8772,28	47,04	17,26	0,895757	0,912781	0,844809	2,65
28	9468,24	51,53	7,75	0,966823	1	0,379498	2,35
40	8348,61	45,83	20,43	0,852495	0,889369	1	2,74
43	8684,91	48,44	13,91	0,886835	0,940009	0,680901	2,51

Fonte: Autora (2024)

Para compor o modelo do edifício construído foi escolhido o indivíduo 16. No rank da soma dos valores normalizados, encontra-se em terceiro. Possui consumo de resfriamento de 8.772,28 kWh/ano e UDI (%) de 52,96% conforme a Tabela 19. Além disso, há pouco percentual do tempo



com a iluminação natural está acima de 3000 lux e abaixo de 300 lux (cerca de 23,52% em ambos os indicadores).

Tabela 19 - Informações do Indivíduo 16 (Pavimento térreo)

Características do Indivíduo 16								
CgTT (kWh/ano)	UDI (%)	UDI <sub>low</sub> (%)	UDI <sub>up</sub> (%)	Área (m <sup>2</sup> )	C <sub>lum</sub> (kWh/ano)			
8772,28 <sup>11</sup>	52,96	23,52	23,52	17,26	608,98			
Distância do eixo x (m)								
0	1	2	3	4	5	6	7	8
0,59	1,35	1,31	1,34	0,96	1,28	0,70	0,31	0,37
Mapa de calor								
CgTT (kWh/ano)				UDI (%)				

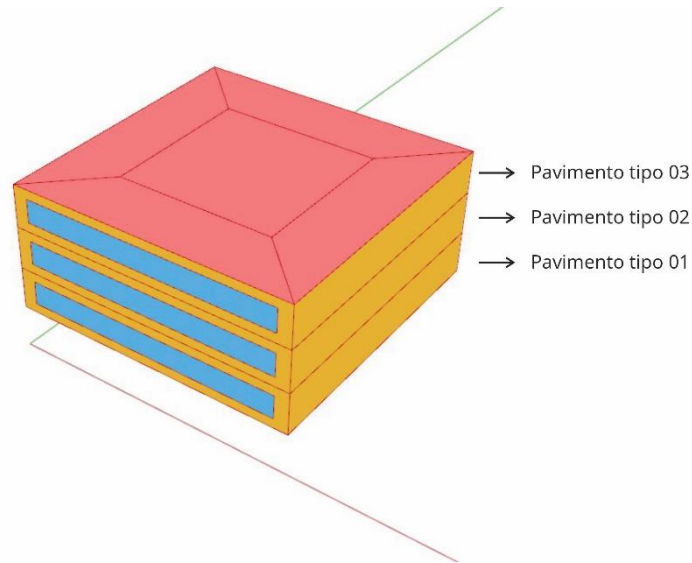
Fonte: Autora (2024)

#### 4.3.2.2 Pavimento tipo

O pavimento tipo é composto por três pavimentos (Figura 32). Nesta simulação somente as paredes externas permitem a passagem de calor e os pisos internos localizados entre os pavimentos tipo 02 e 03. O piso do pavimento tipo 01 e a cobertura do pavimento tipo 03 não permitem a transmissão de calor, são assim adiabáticos, pois abaixo e acima dos pavimentos tipos estariam o pavimento térreo e o pavimento cobertura. A Figura 33 mostra as formas e os gráficos de diamante dos clusters. O gráfico dessa tipologia apresentou cinco critérios, CgTT (kWh/ano), 100-UDI (valor inverso do UDI) e três áreas. Não houve simetria entre as soluções, porém há tendência de ter dois ou três critérios mais otimizados.

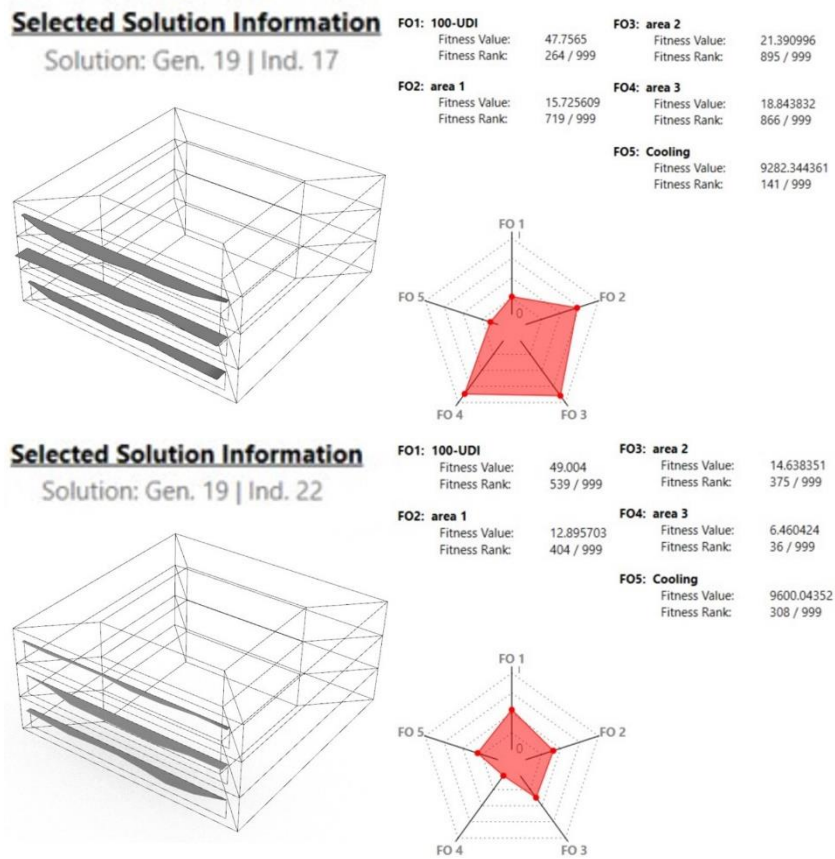
<sup>11</sup>. Para cada simulação, o Radiance busca pontos aleatórios de iluminação, por causa disso, toda vez que simular os valores dos resultados não serão idênticos. E no algoritmo desenvolvido, o cálculo do Cooling depende do UDI e da dimerização. Desta forma os valores da tabela e das imagens do indivíduo há uma pequena diferença, mesmo que possuam todas as características iguais, mas foram extraídos em momentos diferentes do estudo. Isso acontecerá com os demais indivíduos.

Figura 32 - Modelo do pavimento tipo



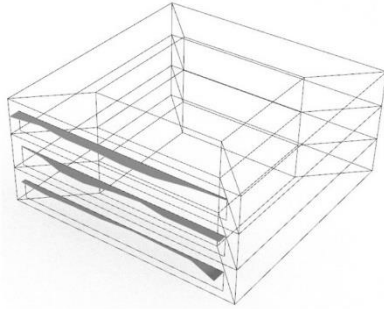
Fonte: Autora (2024)

Figura 33 - Forma dos brises e gráfico diamante dos clusters do pavimento térreo

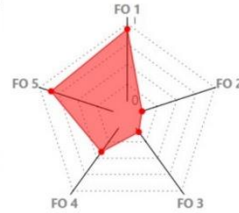


**Selected Solution Information**

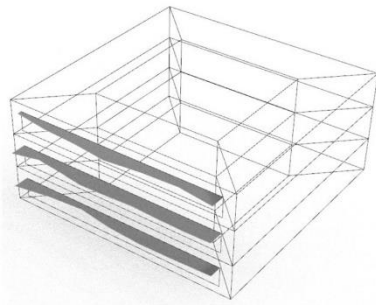
Solution: Gen. 19 | Ind. 34



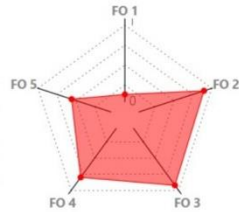
<b>FO1: 100-UDI</b>	Fitness Value: 52.2365 Fitness Rank: 933 / 999	<b>FO3: area 2</b>	Fitness Value: 10.640352 Fitness Rank: 100 / 999
<b>FO2: area 1</b>	Fitness Value: 7.368069 Fitness Rank: 49 / 999	<b>FO4: area 3</b>	Fitness Value: 13.077847 Fitness Rank: 404 / 999
		<b>FO5: Cooling</b>	Fitness Value: 10007.277653 Fitness Rank: 850 / 999

**Selected Solution Information**

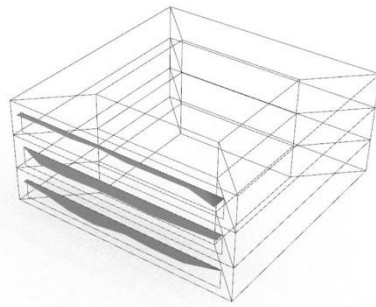
Solution: Gen. 19 | Ind. 46



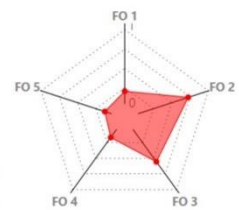
<b>FO1: 100-UDI</b>	Fitness Value: 47.074125 Fitness Rank: 133 / 999	<b>FO3: area 2</b>	Fitness Value: 21.926905 Fitness Rank: 920 / 999
<b>FO2: area 1</b>	Fitness Value: 18.255752 Fitness Rank: 896 / 999	<b>FO4: area 3</b>	Fitness Value: 17.343273 Fitness Rank: 797 / 999
		<b>FO5: Cooling</b>	Fitness Value: 9825.20135 Fitness Rank: 557 / 999

**Selected Solution Information**

Solution: Gen. 19 | Ind. 49



<b>FO1: 100-UDI</b>	Fitness Value: 47.420625 Fitness Rank: 204 / 999	<b>FO3: area 2</b>	Fitness Value: 17.165305 Fitness Rank: 555 / 999
<b>FO2: area 1</b>	Fitness Value: 15.755924 Fitness Rank: 723 / 999	<b>FO4: area 3</b>	Fitness Value: 9.523582 Fitness Rank: 167 / 999
		<b>FO5: Cooling</b>	Fitness Value: 9235.331857 Fitness Rank: 129 / 999



Fonte: Autora (2024)

Ao analisar a Tabela 20, é possível notar que a soma final com os menores valores são os indivíduos que possuem menor área de brise. O indivíduo escolhido foi o 17, é o quarto valor no rank dos valores normalizados, com total de 7,90. É um indivíduo com valores próximos de consumo de resfriamento e possui iluminação natural adequada acima de 50% em todos seus pavimentos (Tabela 21).

Tabela 20 - Valores normalizados dos clusters do Pavimento Tipo

Pavimento tipo								
Ind.	CgTT (kWh/ano)	100-UDI (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Valores normalizados				Total
				CgTT (kWh/ano)	100-UDI (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Soma	
17	9282,34	47,76	15,73	0,92	0,91	0,72	2,55	7,90
	9419,33	43,68	21,39	0,93	0,84	0,98	2,74	
	9253,85	43,53	18,84	0,92	0,83	0,86	2,61	
22	9600,04	49,00	12,90	0,95	0,94	0,59	2,48	7,25
	9513,96	46,91	14,64	0,94	0,90	0,67	2,51	
	10001,57	51,46	6,46	0,99	0,99	0,29	2,27	
34	10007,28	52,24	7,37	0,99	1,00	0,34	2,33	7,27
	10053,07	49,68	10,64	0,99	0,95	0,49	2,43	
	10113,45	48,01	13,08	1,00	0,92	0,60	2,52	
46	9825,20	47,07	18,26	0,97	0,90	0,83	2,71	8,14
	9939,79	42,97	21,93	0,98	0,82	1,00	2,81	
	10007,44	44,47	17,34	0,99	0,85	0,79	2,63	
49	9235,33	47,42	15,76	0,91	0,91	0,72	2,54	7,48
	9325,31	45,24	17,17	0,92	0,87	0,78	2,57	
	9967,11	49,66	9,52	0,99	0,95	0,43	2,37	

Fonte: Autora (2024)

Tabela 21 - Informações do Indivíduo 17 (Pavimento tipo)

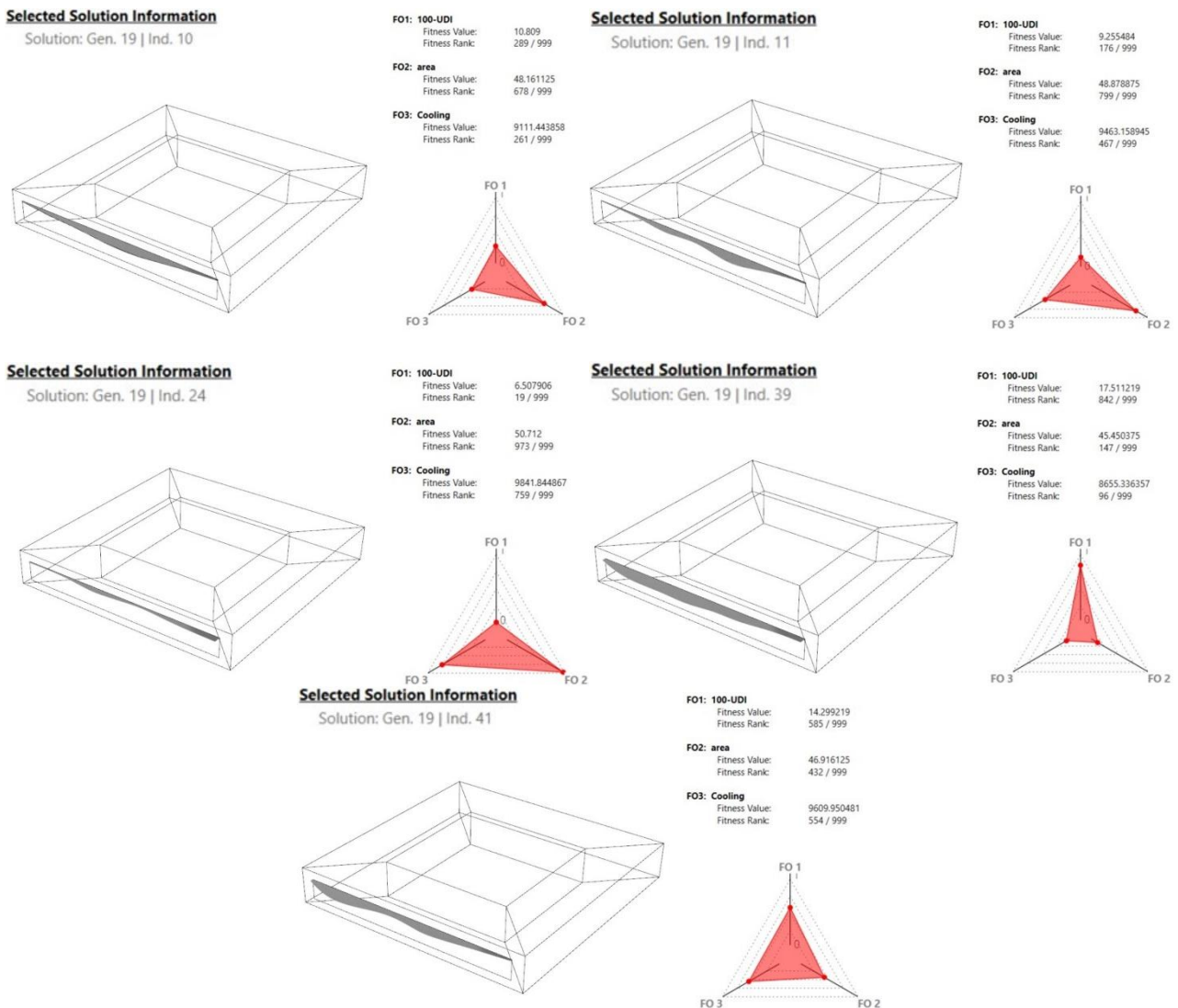
Características do Indivíduo 17									
Pav.	CgTT (kWh/ano)	UDI (%)	UDI <sub>low</sub> (%)	UDI <sub>up</sub> (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Cilum (kWh/ano)			
Tipo 01	9282,34	52,24	23,43	24,32	15,73	606,18			
Tipo 02	9419,33	56,32	23,91	19,77	21,39	619,87			
Tipo 03	9253,85	56,47	23,85	19,68	18,84	619,87			
Distância do eixo x (m)									
Pav.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Tipo 01	1,05	1,08	0,85	0,73	1,09	0,83	1,03	0,92	0,25
Tipo 02	1,24	1,39	0,46	1,37	1,26	1,19	1,36	1,15	1,33
Tipo 03	0,32	1,12	1,29	0,94	1,43	1,34	1,24	1,04	0,30
Mapa de calor									
CgTT (kWh/ano)					UDI (%)				

Fonte: Autora (2024)

### 4.3.2.3 Pavimento cobertura

O modelo do pavimento cobertura foi configurado para que as paredes externas e a cobertura tivessem contato com o ambiente externo, permitindo que houvesse transmissão de calor, O seu piso foi configurado para que fosse adiabático, pois representa o contato com a cobertura do pavimento tipo 03. As soluções apresentadas pelos clusters possuem performances diferentes, entre eles o indivíduo 41 se destaca pois o gráfico de diamante indica equilíbrio entre os critérios (Figura 34). O indivíduo 24 possui a menor soma dos valores normalizados, porém seu brise tem a menor forma e indivíduo 39 possui o maior valor e tem o UDI (%) como o critério mais otimizado (Tabela 22).

Figura 34 - Forma dos brises e gráfico diamante dos clusters do pavimento cobertura



Fonte: Autora (2024)

Tabela 22 - Valores normalizados dos clusters do Pavimento Cobertura

Pavimento cobertura							
Ind.	CgTT (kWh/ano)	100-UDI (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Valores normalizados			
				CgTT (kWh/ano)	100-UDI (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Soma
10	9111,44	48,16	10,81	0,93	0,95	0,62	2,49
11	9463,16	48,88	9,26	0,96	0,96	0,53	2,45
24	9841,84	50,71	6,51	1,00	1,00	0,37	2,37
39	8655,34	45,45	17,51	0,88	0,90	1,00	2,78
41	9609,95	46,92	14,30	0,98	0,93	0,82	2,72

Fonte: Autora (2024)

Apesar do indivíduo 41 ser o quarto no rank dos valores normalizados, foi escolhido por apresentar maior simetria no gráfico diamante. Conforme a Tabela 23, possui consumo de resfriamento de 9.609,95kWh/ano e iluminação artificial de 614,45kWh/ano. A iluminação natural incide no ambiente 53,08% das horas, restando um pouco mais de 23% tanto para o UDI<sub>low</sub> (%) quanto para UDI<sub>up</sub> (%).

Tabela 23 - Informações do Indivíduo 41 (Pavimento cobertura)

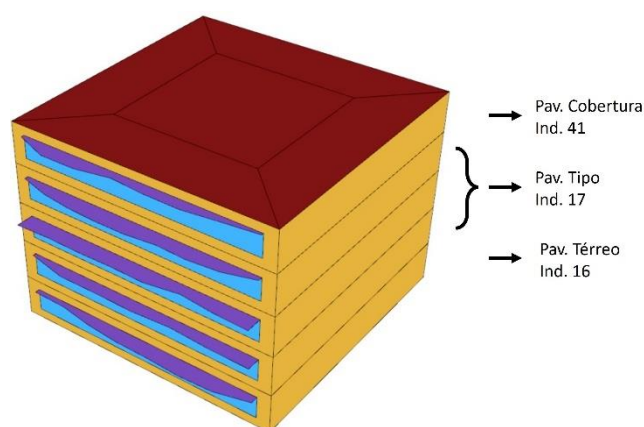
Características do Indivíduo 41								
CgTT (kWh/ano)	UDI (%)	UDI <sub>low</sub> (%)	UDI <sub>up</sub> (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Ci <sub>lum</sub> (kWh/ano)			
9609,95	53,08	23,66	23,25	14,30	614,45			
Distância do eixo x (m)								
0	1	2	3	4	5	6	7	8
0,19	0,46	0,78	1,14	0,55	0,64	1,44	1,31	0,25
Mapa de calor								
CgTT (kWh/ano)					UDI (%)			

Fonte: Autora (2024)

#### 4.3.3 Modelo construído final

Após a análise e seleção do pavimento térreo, pavimento tipo e pavimento cobertura, foram colocados os três indivíduos para construir um edifício de cinco pavimentos (Figura 35). Para modelar os brises foi configurado o algoritmo do modelo base com brise original e alterado as coordenadas de cada ponto de cada brise, conforme os resultados extraídos.

Figura 35 - Edifício construído



Fonte: Autora (2024)

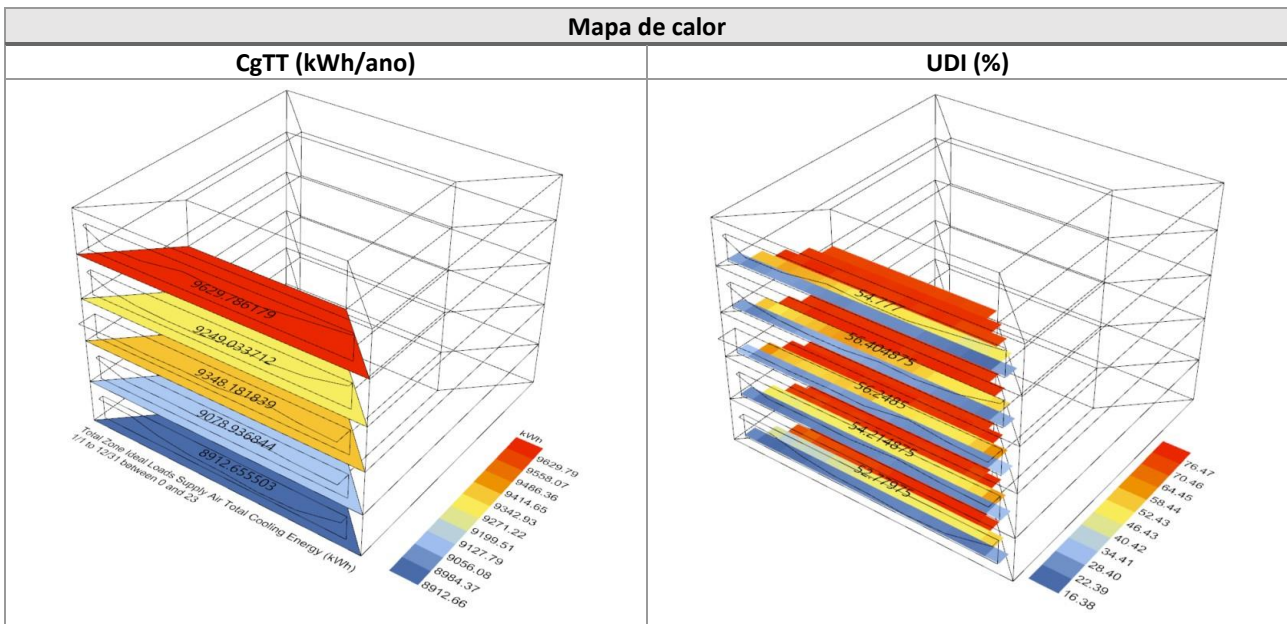
Após a modelagem do Edifício construído foram refeitas as simulações energéticas e lumínicas novamente (Tabela 24), igualmente os modelos base, foram extraídos os resultados dos indicadores  $C_{gTT}$  (kWh/ano) e UDI (%), assim como o  $UDI_{low}$  (%),  $UDI_{up}$  (%) e  $C_{ilum}$  (kWh/ano), além dos mapas de calor (Tabela 25) para análise posterior.

Tabela 24 - Valores das Simulações energéticas e lumínicas do Edifício construído

Simulações energética e lumínicas						
Pavimento	$C_{gTT}$ (kWh/ano)	UDI (%)	$UDI_{low}$ (%)	$UDI_{up}$ (%)	Área (m <sup>2</sup> )	$C_{ilum}$ (kWh/ano)
Térreo	8912,66	52,78	23,52	23,70	17,26	608,78
Pavimento tipo 01	9078,94	54,21	23,53	22,26	15,73	619,82
Pavimento tipo 02	9348,18	56,25	23,91	19,84	21,39	619,82
Pavimento tipo 03	9249,03	56,40	23,88	19,71	18,84	619,82
Cobertura	9629,79	54,78	23,79	21,44	14,30	619,82

Fonte: Autora (2024)

Tabela 25 - Mapa de calor para CgTT (kWh/ano) e UDI (%) dos modelos construído



Fonte: Autora (2024)

A Tabela 26 mostra os valores obtidos para o CgTT (kWh/ano) e UDI (%), conforme foi extraído na otimização, com cada tipologia isolada (por pavimento), e mostra os valores após “construir” o edifício, quando os pavimentos estavam unidos (Edifício construído). Essa comparação foi feita com o intuito compreender o comportamento do modelo.

Tabela 26 - Comparação dos valores dos indicadores CgTT (kWh/ano) e UDI (%) para o Edifício Construído

Comparação dos valores				
CgTT (kWh/ano)				
Pavimento	Por pavimento	Edifício construído	Diferença	%
Térreo	8772,28	8912,66	140,38	1,6%
Pavimento tipo 01	9282,34	9078,94	-203,40	-2,2%
Pavimento tipo 02	9419,33	9348,18	-71,15	-0,8%
Pavimento tipo 03	9253,85	9249,03	-4,82	-0,1%
Cobertura	9609,95	9629,79	19,84	0,2%
UDI (%)				
Térreo	52,96	52,78	-0,18	-0,3%
Pavimento tipo 01	52,24	54,21	1,97	3,8%
Pavimento tipo 02	56,32	56,25	-0,07	-0,1%
Pavimento tipo 03	56,47	56,40	-0,07	-0,1%
Cobertura	53,08	54,78	1,70	3,2%

Fonte: Autora (2024)

Houve diferença nos valores, variando entre aumento de até 3,8% e redução de até 2,2%, na forma de obter os resultados. Caso o profissional opte ou por realizar simulações por pavimento ou por todos os pavimentos juntos, precisa levar em consideração que haverá uma margem de

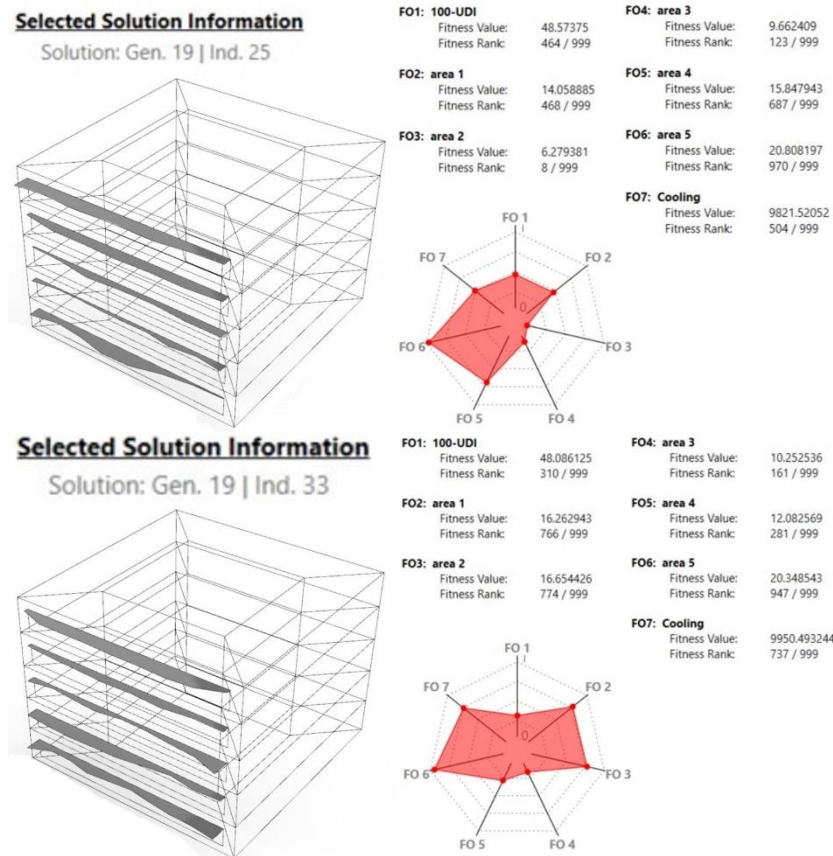


diferença nos valores. Para dar continuidade a verificação de rotina o modelo será utilizado assim com seus valores após a simulação dele construído (Edifício construído).

### 4.3.4 Modelo completo

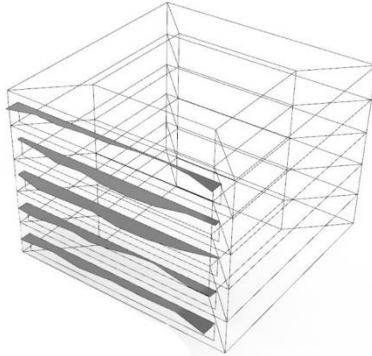
Essa etapa foi feita uma única simulação com todos os pavimentos juntos. Foram extraídas as informações dos indivíduos 25, 33, 37, 48 e 49, os cinco clusters da Solução de Pareto da última geração (Figura 36). Pelos gráficos de diamante nenhum dos indivíduos obteve simetria em seus critérios. Assim como no Pavimento Tipo (4.3.2.2), os valores normalizados foram somados duas vezes, o primeiro com os valores dos indicadores de cada pavimento e depois a soma de cada pavimento (Tabela 27).

Figura 36 - Forma dos brises e gráfico diamante dos clusters do modelo completo

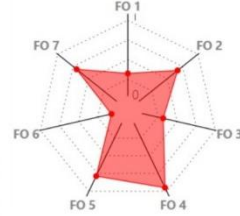


**Selected Solution Information**

Solution: Gen. 19 | Ind. 37

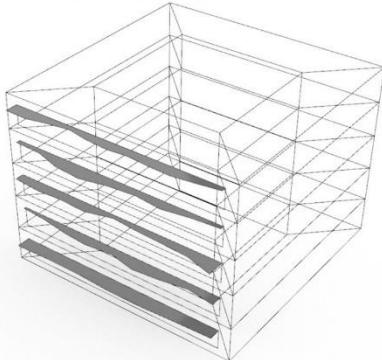


<b>FO1: 100-UDI</b> Fitness Value: 48.20575 Fitness Rank: 325 / 999	<b>FO4: area 3</b> Fitness Value: 19.078389 Fitness Rank: 949 / 999
<b>FO2: area 1</b> Fitness Value: 15.396735 Fitness Rank: 668 / 999	<b>FO5: area 4</b> Fitness Value: 16.93506 Fitness Rank: 785 / 999
<b>FO3: area 2</b> Fitness Value: 12.452637 Fitness Rank: 319 / 999	<b>FO6: area 5</b> Fitness Value: 9.493056 Fitness Rank: 71 / 999
	<b>FO7: Cooling</b> Fitness Value: 9930.127224 Fitness Rank: 692 / 999

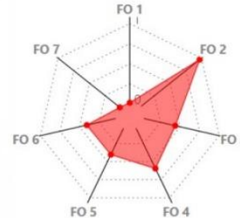


**Selected Solution Information**

Solution: Gen. 19 | Ind. 48

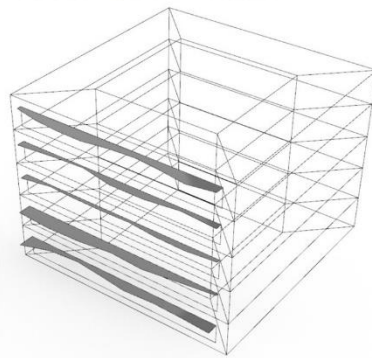


<b>FO1: 100-UDI</b> Fitness Value: 45.88475 Fitness Rank: 14 / 999	<b>FO4: area 3</b> Fitness Value: 13.906092 Fitness Rank: 593 / 999
<b>FO2: area 1</b> Fitness Value: 20.445609 Fitness Rank: 970 / 999	<b>FO5: area 4</b> Fitness Value: 13.528958 Fitness Rank: 401 / 999
<b>FO3: area 2</b> Fitness Value: 13.362874 Fitness Rank: 439 / 999	<b>FO6: area 5</b> Fitness Value: 14.137062 Fitness Rank: 406 / 999
	<b>FO7: Cooling</b> Fitness Value: 8811.287025 Fitness Rank: 16 / 999

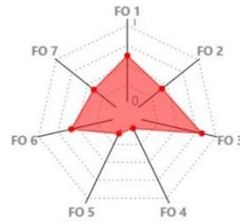


**Selected Solution Information**

Solution: Gen. 19 | Ind. 49



<b>FO1: 100-UDI</b> Fitness Value: 49.13625 Fitness Rank: 620 / 999	<b>FO4: area 3</b> Fitness Value: 6.735278 Fitness Rank: 24 / 999
<b>FO2: area 1</b> Fitness Value: 13.530509 Fitness Rank: 416 / 999	<b>FO5: area 4</b> Fitness Value: 8.872545 Fitness Rank: 99 / 999
<b>FO3: area 2</b> Fitness Value: 17.395551 Fitness Rank: 817 / 999	<b>FO6: area 5</b> Fitness Value: 15.458311 Fitness Rank: 579 / 999
	<b>FO7: Cooling</b> Fitness Value: 9758.320522 Fitness Rank: 395 / 999



Fonte: Autora (2024)

Tabela 27 - Valores normalizados dos clusters do Modelo Completo

Modelo completo								
Ind.	CgTT (kWh/ano)	100-UDI (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Valores normalizados				Total
				CgTT (kWh/ano)	100-UDI (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Soma	
25	9821,52	48,57	14,06	0,97	0,94	0,68	2,59	12,57
	9696,67	51,74	6,28	0,96	1,00	0,30	2,26	
	9660,75	50,06	9,66	0,96	0,97	0,46	2,39	
	9232,27	46,64	15,85	0,92	0,90	0,76	2,58	
	9380,04	42,24	20,81	0,93	0,82	1,00	2,75	
33	9950,49	48,09	16,26	0,99	0,93	0,78	2,70	12,92
	9732,75	45,84	16,65	0,97	0,89	0,80	2,65	
	9845,91	49,48	10,25	0,98	0,96	0,49	2,43	
	9434,02	48,41	12,08	0,94	0,94	0,58	2,45	
	8966,60	42,67	20,35	0,89	0,82	0,98	2,69	
37	9930,13	48,21	15,40	0,99	0,93	0,74	2,66	12,87
	9589,96	48,52	12,45	0,95	0,94	0,60	2,49	
	9400,60	44,88	19,08	0,93	0,87	0,92	2,72	
	9563,94	44,71	16,94	0,95	0,86	0,81	2,63	
	9948,30	48,67	9,49	0,99	0,94	0,46	2,38	
48	8811,29	45,88	20,45	0,87	0,89	0,98	2,74	12,94
	9607,46	46,62	13,36	0,95	0,90	0,64	2,50	
	9939,76	47,76	13,91	0,99	0,92	0,67	2,58	
	9979,35	47,39	13,53	0,99	0,92	0,65	2,56	
	10078,97	45,91	14,14	1,00	0,89	0,68	2,57	
49	9758,32	49,14	13,53	0,97	0,95	0,65	2,57	12,54
	9407,25	45,85	17,40	0,93	0,89	0,84	2,66	
	9915,55	51,23	6,74	0,98	0,99	0,32	2,30	
	10025,29	50,72	8,87	0,99	0,98	0,43	2,40	
	10033,36	45,61	15,46	1,00	0,88	0,74	2,62	

Fonte: Autora (2024)

O indivíduo selecionado foi o 37, está em terceiro no rank dos valores normalizados. De acordo com a Tabela 28, o consumo total de resfriamento é de 48.432,93kWh/ano e possui incidência da iluminação natural entre 51% e 55% das horas.

Tabela 28 - Informações do Indivíduo 37 (Modelo completo)

Características do Indivíduo 37									
Pav.	CgTT (kWh/ano)	UDI (%)	UDI <sub>low</sub> (%)	UDI <sub>up</sub> (%)	Área (m <sup>2</sup> )	C <sub>lum</sub> (kWh/ano)			
Térreo	9930,13	51,79	23,33	24,88	15,40	602,74			
Tipo 01	9589,96	51,48	23,13	25,38	12,45	600,55			
Tipo 02	9400,60	55,12	23,80	21,09	19,08	600,55			
Tipo 03	9563,94	55,29	23,76	20,95	16,94	600,55			
Cobertura	9948,30	51,33	23,21	25,46	9,49	600,55			
Distância do eixo x (m)									
Pav.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Térreo	1,38	0,84	0,19	1,22	0,43	1,44	0,39	0,83	1,04
Tipo 01	0,75	0,94	0,05	0,09	0,80	1,11	0,35	1,39	0,96
Tipo 02	0,15	0,85	1,30	1,43	1,41	0,63	1,48	1,33	0,66
Tipo 03	0,56	0,29	1,44	1,36	1,43	0,67	1,44	0,44	0,37
Cobertura	1,11	0,27	0,08	0,07	0,66	0,32	1,08	0,19	1,27
Mapa de calor									
CgTT (kWh/ano)					UDI (%)				

Fonte: Autora (2024)

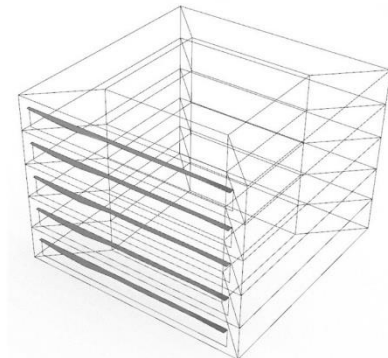
#### 4.3.5 Modelo com brises iguais

Uma terceira opção de otimização que o profissional poderá seguir é o de buscar a mesma forma de brises para todos os pavimentos. O Modelo de brises iguais possui algoritmo semelhante ao Modelo completo, a diferença está na construção da geometria dos brises, o qual é o mesmo valor para a mesma coordenada em cada pavimento. Os indivíduos que representam os cinco clusters são o 11, 19, 30, 36 e 44 (Figura 37). É possível notar que nenhum indivíduo possui o gráfico de diamante simétrico. Os valores normalizados seguiram o mesmo processo do modelo anterior, houve duas somas para obter um valor final (Tabela 29).

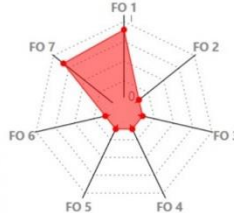
Figura 37 - Forma dos brises e gráfico diamante dos clusters do modelo com brises iguais

**Selected Solution Information**

Solution: Gen. 19 | Ind. 11

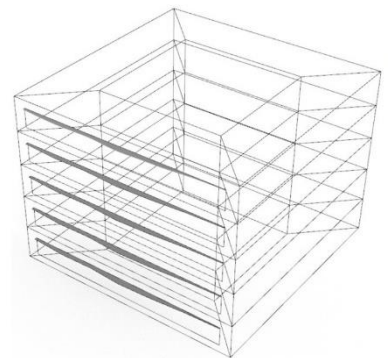


<b>FO1: 100-UDI</b> Fitness Value: 51.62925 Fitness Rank: 896 / 999	<b>FO4: area 3</b> Fitness Value: 7.762551 Fitness Rank: 100 / 999
<b>FO2: area 1</b> Fitness Value: 7.762551 Fitness Rank: 100 / 999	<b>FO5: area 4</b> Fitness Value: 7.762551 Fitness Rank: 100 / 999
<b>FO3: area 2</b> Fitness Value: 7.762551 Fitness Rank: 100 / 999	<b>FO6: area 5</b> Fitness Value: 7.762551 Fitness Rank: 100 / 999
	<b>FO7: Cooling</b> Fitness Value: 9926.873606 Fitness Rank: 839 / 999

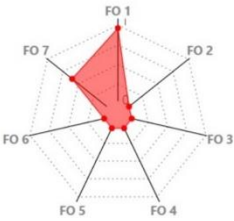


**Selected Solution Information**

Solution: Gen. 19 | Ind. 19

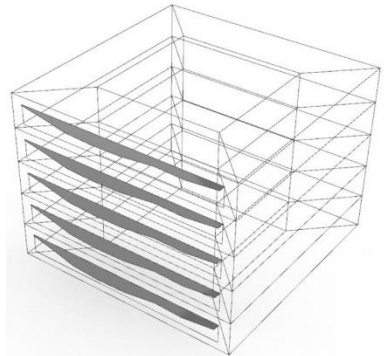


<b>FO1: 100-UDI</b> Fitness Value: 52.34225 Fitness Rank: 961 / 999	<b>FO4: area 3</b> Fitness Value: 6.39071 Fitness Rank: 37 / 999
<b>FO2: area 1</b> Fitness Value: 6.39071 Fitness Rank: 37 / 999	<b>FO5: area 4</b> Fitness Value: 6.39071 Fitness Rank: 37 / 999
<b>FO3: area 2</b> Fitness Value: 6.39071 Fitness Rank: 37 / 999	<b>FO6: area 5</b> Fitness Value: 6.39071 Fitness Rank: 37 / 999
	<b>FO7: Cooling</b> Fitness Value: 9539.821953 Fitness Rank: 599 / 999



**Selected Solution Information**

Solution: Gen. 19 | Ind. 30

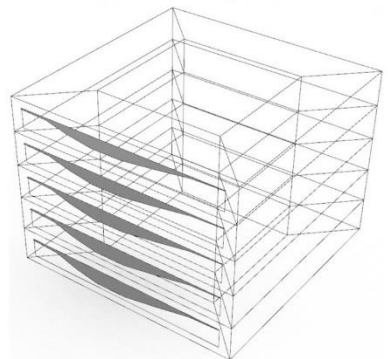


<b>FO1: 100-UDI</b> Fitness Value: 47.496125 Fitness Rank: 311 / 999	<b>FO4: area 3</b> Fitness Value: 16.073767 Fitness Rank: 675 / 999
<b>FO2: area 1</b> Fitness Value: 16.073767 Fitness Rank: 675 / 999	<b>FO5: area 4</b> Fitness Value: 16.073767 Fitness Rank: 675 / 999
<b>FO3: area 2</b> Fitness Value: 16.073767 Fitness Rank: 675 / 999	<b>FO6: area 5</b> Fitness Value: 16.073767 Fitness Rank: 675 / 999
	<b>FO7: Cooling</b> Fitness Value: 8955.011265 Fitness Rank: 323 / 999

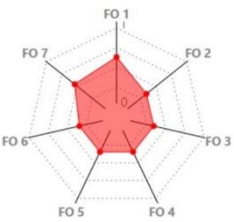


**Selected Solution Information**

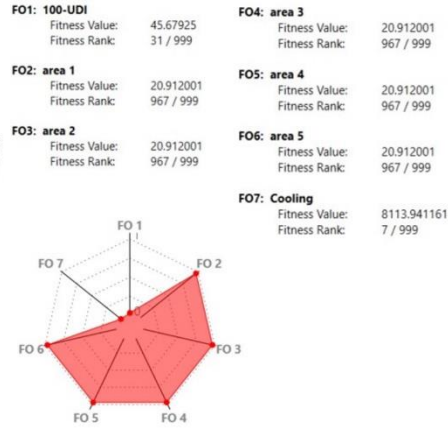
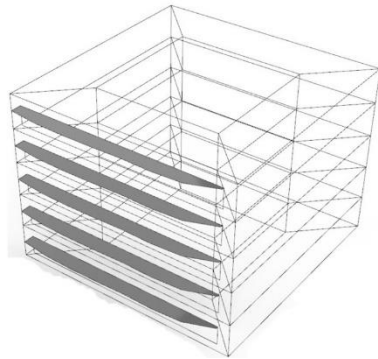
Solution: Gen. 19 | Ind. 36



<b>FO1: 100-UDI</b> Fitness Value: 49.498375 Fitness Rank: 629 / 999	<b>FO4: area 3</b> Fitness Value: 11.558744 Fitness Rank: 343 / 999
<b>FO2: area 1</b> Fitness Value: 11.558744 Fitness Rank: 343 / 999	<b>FO5: area 4</b> Fitness Value: 11.558744 Fitness Rank: 343 / 999
<b>FO3: area 2</b> Fitness Value: 11.558744 Fitness Rank: 343 / 999	<b>FO6: area 5</b> Fitness Value: 11.558744 Fitness Rank: 343 / 999
	<b>FO7: Cooling</b> Fitness Value: 9428.318909 Fitness Rank: 539 / 999



**Selected Solution Information**  
Solution: Gen. 19 | Ind. 44



Fonte: Autora (2024)

Tabela 29 - Valores normalizados dos clusters do Modelo com brises iguais

Pavimento tipo								
Ind.	CgTT (kWh/ano)	100-UDI (%)	Área (m²)	Valores normalizados				Total
				CgTT (kWh/ano)	100-UDI (%)	Área (m²)	Soma	
11	9926,87	51,63	7,76	0,99	0,99	0,37	2,34	11,67
	9746,20	51,28	7,76	0,97	0,98	0,37	2,32	
	9961,18	51,30	7,76	0,99	0,98	0,37	2,34	
	10024,30	51,29	7,76	1,00	0,98	0,37	2,35	
	10069,84	49,59	7,76	1,00	0,95	0,37	2,32	
19	9539,82	52,34	6,39	0,95	1,00	0,31	2,25	11,24
	9433,66	51,97	6,39	0,94	0,99	0,31	2,24	
	9637,87	52,00	6,39	0,96	0,99	0,31	2,26	
	9692,07	52,00	6,39	0,96	0,99	0,31	2,26	
	9725,38	50,38	6,39	0,97	0,96	0,31	2,23	
30	8955,01	47,50	16,07	0,89	0,91	0,77	2,57	12,75
	9015,50	45,44	16,07	0,90	0,87	0,77	2,53	
	9216,07	45,55	16,07	0,92	0,87	0,77	2,55	
	9256,91	45,66	16,07	0,92	0,87	0,77	2,56	
	9298,52	44,11	16,07	0,92	0,84	0,77	2,53	
36	9428,32	49,50	11,56	0,94	0,95	0,55	2,43	12,10
	9375,28	48,21	11,56	0,93	0,92	0,55	2,40	
	9580,13	48,34	11,56	0,95	0,92	0,55	2,43	
	9632,24	48,11	11,56	0,96	0,92	0,55	2,43	
	9665,56	46,85	11,56	0,96	0,90	0,55	2,41	
44	8113,94	45,68	20,91	0,81	0,87	1,00	2,68	13,30
	8357,06	42,63	20,91	0,83	0,81	1,00	2,64	
	8523,85	42,57	20,91	0,85	0,81	1,00	2,66	
	8595,57	42,57	20,91	0,85	0,81	1,00	2,67	
	8667,32	41,32	20,91	0,86	0,79	1,00	2,65	

Fonte: Autora (2024)

O indivíduo selecionado foi o 30, é o quarto no rank dos valores normalizados, e possui equilíbrio em cinco dos setes critérios (Figura 37). Conforme a Tabela 30, o CgTT (kWh/ano) está entre 8.955,01 kWh e 9.29852 kWh e o UDI (%) varia entre 52,50% e 55,89%.

Tabela 30 - Informações do Indivíduo 30 (Modelo com brises iguais)

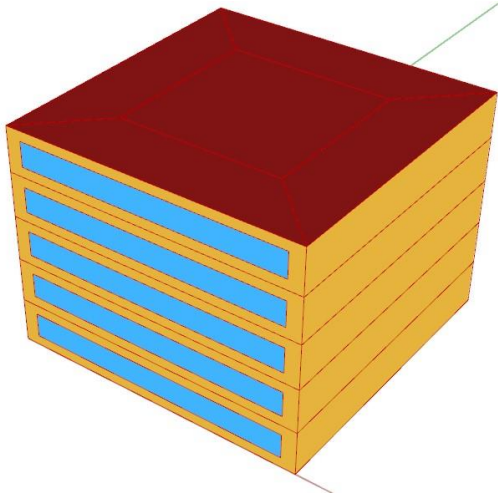
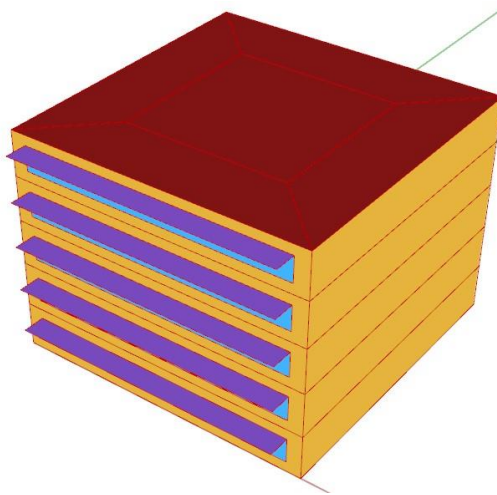
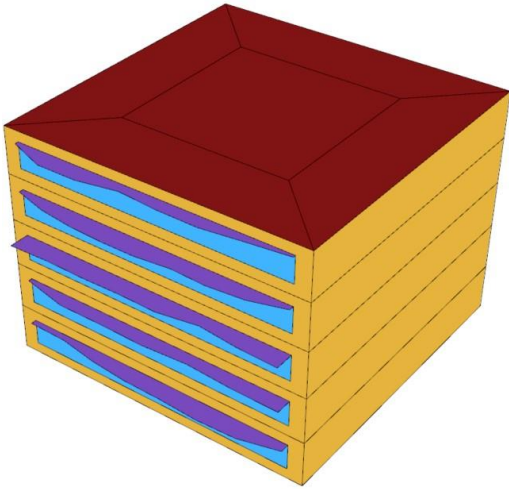
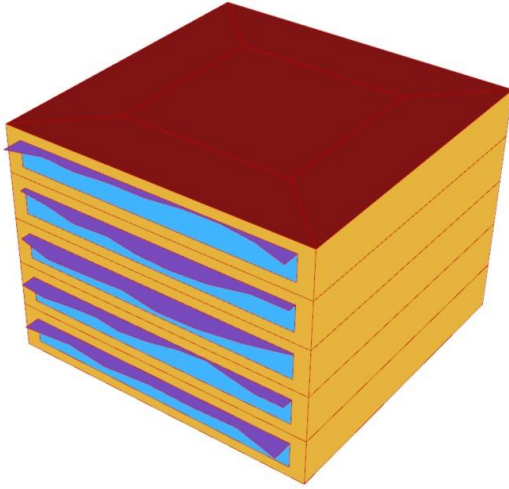
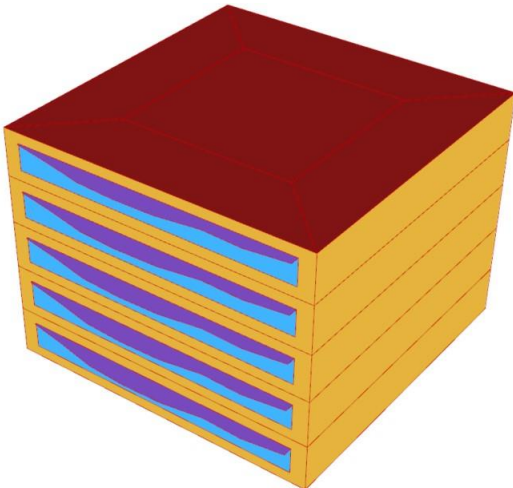
Características do Indivíduo 30									
Pav.	CgTT (kWh/ano)	UDI (%)	UDI <sub>low</sub> (%)	UDI <sub>up</sub> (%)	Área (m <sup>2</sup> )	C <sub>lum</sub> (kWh/ano)			
Térreo	8955,01	52,50	23,46	24,04	16,07	606,96			
Tipo 01	9015,50	54,56	23,66	21,78	16,07	623,64			
Tipo 02	9216,07	54,45	23,59	21,96	16,07	623,64			
Tipo 03	9256,91	54,34	23,61	22,05	16,07	623,64			
Cobertura	9298,52	55,89	23,92	20,19	16,07	623,64			
Distância do eixo x (m)									
Pav.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Térreo	0,58	1,15	0,55	1,16	1,32	1,24	1,14	0,42	0,1
Tipo 01	0,58	1,15	0,55	1,16	1,32	1,24	1,14	0,42	0,1
Tipo 02	0,58	1,15	0,55	1,16	1,32	1,24	1,14	0,42	0,1
Tipo 03	0,58	1,15	0,55	1,16	1,32	1,24	1,14	0,42	0,1
Cobertura	0,58	1,15	0,55	1,16	1,32	1,24	1,14	0,42	0,1
Mapa de calor									
CgTT (kWh/ano)					UDI (%)				

Fonte: Autora (2024)

#### 4.4 Análise dos edifícios

Para análise final foi feita a comparação entre os quatro modelos (Tabela 31). O sem brise, o com brise original, o construído, completo e o com brises iguais.

Tabela 31 - Modelos finais para análise

Modelos de edifícios	
<b>Modelo sem brise</b>	<b>Modelo brise original</b>
	
<b>Modelo edifício construído</b>	<b>Modelo edifício completo</b>
	
<b>Modelo edifício brises iguais</b>	
	

Fonte: Autora (2024)



Com a finalidade de compreender melhor o impacto energético dos prédios foi realizado o cálculo do consumo final de energia ( $EUI_{total}$  – kWh/ano) e seu valor em reais. Para isso foi feita a divisão dos valores do indicador  $C_{gTT}$  (kWh/ano) pelo  $IDRS^{12}$  (6,89) para cada pavimento obtendo a carga térmica total anual ( $C_{resf}$  – Kwh/ano), depois os resultados foram somados com  $C_{ilum}$  (kWh/ano):

$$C_{resf} = C_{gTT} / IDRS$$

$$EUI_{resf} = \sum C_{resfpavimentos}$$

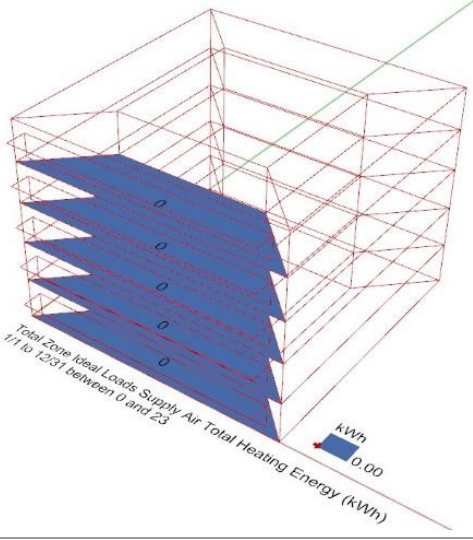
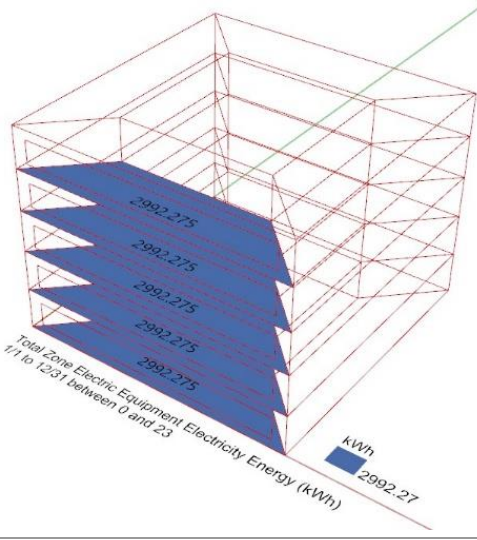
$$EUI_{ilum} = \sum C_{ilumpavimento}$$

$$EUI_{total} = EUI_{resf} + EUI_{ilum}.$$

$$\text{Custo final} = EUI_{total} \times 0,88$$

Como dito anteriormente, o aquecimento, apesar de ter sido configurado por causa do Ladybug, não foi contabilizado nas simulações energéticas (Tabela 32). A configuração dos equipamentos (Tabela 32) não foi alterada no decorrer da verificação da rotina, assim todos os modelos possuem os mesmos valores, por ter sido um valor constante também não foi contabilizado.

Tabela 32 - Valores para aquecimento e equipamentos elétricos

Aquecimento	Equipamentos
 <p>0 kWh</p>	 <p>2992,27 kWh</p>

Fonte: Autora (2024)

<sup>12</sup> Índice de desempenho de resfriamento sazonal

Após esta etapa, os valores finais de cada edifício foram multiplicados pelo valor unitário de kWh vigente em abril/2024 para a cidade de Campo Grande, por ser tratar de um estudo hipotético não foram incluídos os valores das taxas adicionais, além de optar pela bandeira verde. Conforme a Resolução Aneel Nº 3.181 de abril de 2023, o custo unitário do kWh para Classificação B3 – Comercial, Serviços e Outros é de R\$ 0,88047 (Tarifa de Uso do sistema de Distribuição e Tarifa de Energia).

Ao analisar os cinco modelos (Tabela 33), o modelo sem brise apresentou maior gasto com resfriamento e menor consumo com a iluminação artificial. A ausência de brise na abertura aqueceu mais o ambiente e por mais que o  $C_{ilum}$  (kWh/ano) apresentasse valores menores, o ambiente teve menor tempo de iluminância dentro da faixa estipulada. O ambiente recebeu mais iluminância acima de 3000 lux, o que pode causar ofuscamento aos usuários.

Os modelos otimizados escolhidos demonstraram valores medianos. O consumo total de resfriamento ficou entre 6700kWh/ano e 7030kWh/ano. Quanto ao UDI (%) obtiveram comportamentos semelhantes, o qual os ambientes receberam a iluminância entre 300 lux e 3000 lux a maior parte do tempo. Os modelos otimizados reduziram o consumo de resfriamento e houve aumento do consumo de iluminação artificial. Esse aumento se deve, porque houve maior controle sobre a quantidade de iluminância que incidiu sobre o ambiente. Entre os modelos otimizados escolhidos, o modelo otimizado com brises iguais apresentou melhor performance no consumo do resfriamento, com os menores valores. A melhor performance em relação ao UDI (%) foi o modelo construído, com mais tempo de iluminação natural entre 300 lux e 3000 lux.

Pelo fato da abertura do modelo com brise original ter maior área de proteção, conseguiu impedir que o ambiente demandasse menos resfriamento. Entretanto, obteve maior valor de consumo de iluminação artificial, isso se deve principalmente por ter valores mais altos de  $UDI_{low}$  (%), iluminância abaixo de 300 lux, a qual necessita de complemento para fornecer iluminação adequada para realizar atividades sem nenhum incomodo aos usuários.

O modelo com brise original obteve maior percentual de tempo dentro da faixa de iluminância. Contudo, ao analisar o mapa de calor (Tabela 34) das médias de iluminância, é possível notar que a iluminação natural predomina próxima a abertura, e quanto mais longe menos iluminância há. Isso contribui para o aumento dos valores do  $C_{ilum}$  (kWh/ano), pois os usuários que estiverem mais ao fundo do ambiente terão que complementar a iluminação artificial com mais frequência.

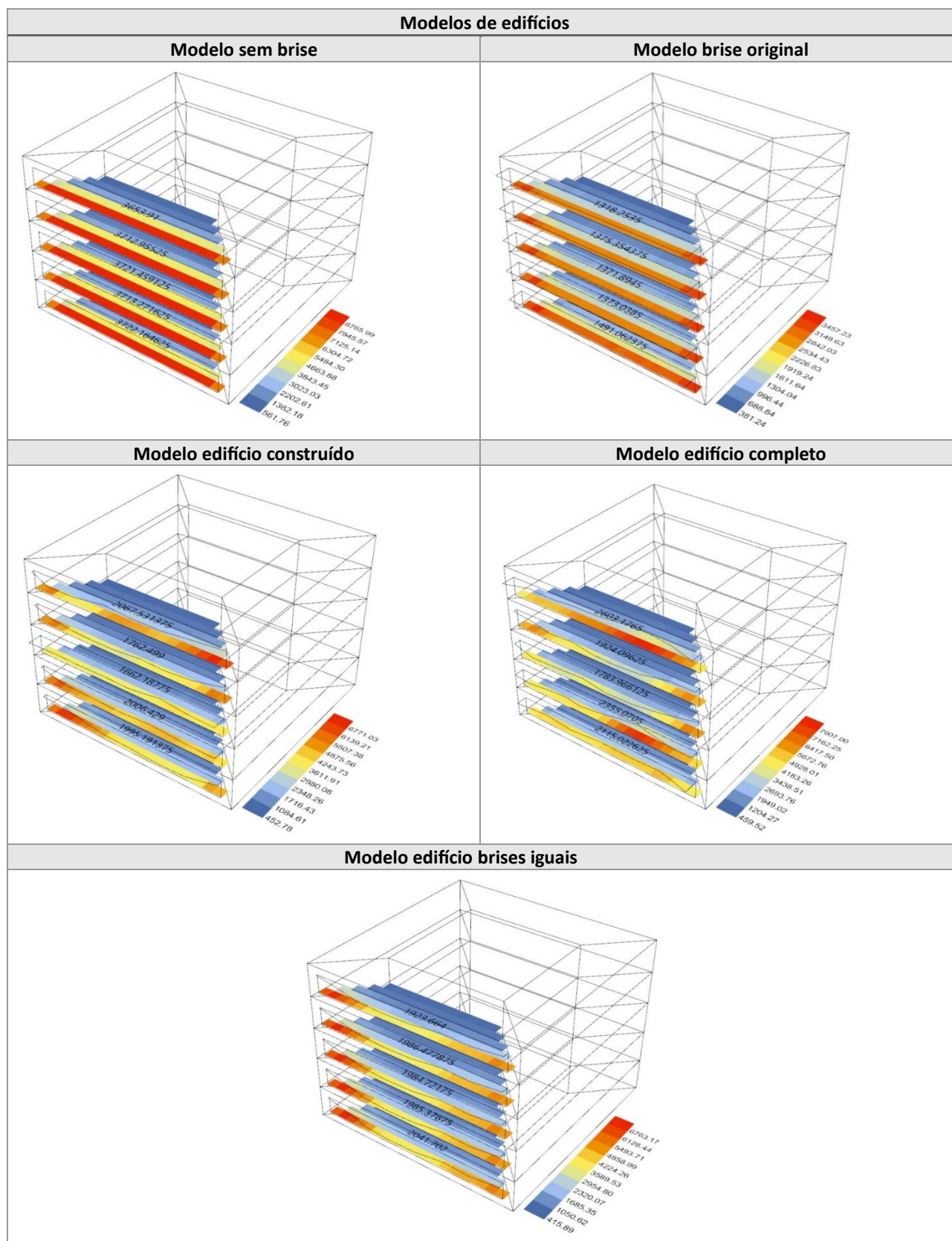
Tabela 33 - Valores para análise comparativa dos cinco modelos

Valores dos cinco modelos									
Pavimento	CgTT (kWh/ano)	C <sub>resf</sub> (CgTT /IDRS)	UDI (%)	UDI <sub>low</sub> (%)	UDI <sub>up</sub> (%)	Área (m <sup>2</sup> )	C <sub>lum</sub> (kWh/ano)	EU <sub>total</sub> (kWh/ano)	Custo energia (R\$)
<b>Modelo sem brise</b>									
<b>Térreo</b>	9.974,57	1.447,69	43,98	22,30	33,73	0	571,96	10.105,04	8.892,44
<b>Tipo 01</b>	9.742,82	1.414,05	44,09	22,34	33,58	0	577,94		
<b>Tipo 02</b>	9.955,14	1.444,87	44,08	23,00	33,59	0	577,94		
<b>Tipo 03</b>	10.018,23	1.454,02	43,99	22,31	33,70	0	577,94		
<b>Cobertura</b>	10.064,15	1.460,69	45,64	22,48	31,88	0	577,94		
<b>Modelo construído</b>									
<b>Térreo</b>	8.912,66	1.293,56	52,78	23,52	23,70	17,26	608,78	9796,13	8.620,59
<b>Tipo 01</b>	9.078,94	1.317,69	54,21	23,53	22,26	15,73	619,82		
<b>Tipo 02</b>	9.348,18	1.356,77	56,25	23,91	19,84	21,39	619,82		
<b>Tipo 03</b>	9.249,03	1.342,38	56,40	23,88	19,71	18,84	619,82		
<b>Cobertura</b>	9.629,79	1.397,64	54,78	23,79	21,44	14,30	619,82		
<b>Modelo completo</b>									
<b>Térreo</b>	9.930,13	1.441,23	51,79	23,33	24,88	15,40	602,74	10034,39	8.830,27
<b>Tipo 01</b>	9.589,96	1.391,86	51,48	23,13	25,38	12,45	600,55		
<b>Tipo 02</b>	9.400,60	1.364,38	55,12	23,80	21,09	19,08	600,55		
<b>Tipo 03</b>	9.563,94	1.388,09	55,29	23,76	20,95	16,94	600,55		
<b>Cobertura</b>	9.948,30	1.443,87	51,33	23,21	25,46	9,49	600,55		
<b>Modelo com brises iguais</b>									
<b>Térreo</b>	8.955,01	1.299,71	52,50	23,46	24,04	16,07	606,96	9740,42	8.571,57
<b>Tipo 01</b>	9.015,50	1.308,49	54,56	23,66	21,78	16,07	623,64		
<b>Tipo 02</b>	9.216,07	1.337,60	54,45	23,59	21,96	16,07	623,64		
<b>Tipo 03</b>	9.256,91	1.343,52	54,34	23,61	22,05	16,07	623,64		
<b>Cobertura</b>	9.298,52	1.349,56	55,89	23,92	20,19	16,07	623,64		
<b>Modelo com brise original</b>									
<b>Térreo</b>	7.655,81	1.111,15	56,20	24,11	19,70	27,00	626,77	9.133,89	8.037,82
<b>Tipo 01</b>	8.017,90	1.163,70	61,04	24,49	14,48	27,00	656,93		
<b>Tipo 02</b>	8.209,46	1.191,50	60,78	24,44	14,78	27,00	656,93		
<b>Tipo 03</b>	8.264,79	1.199,53	60,91	24,45	14,64	27,00	656,93		
<b>Cobertura</b>	8.361,09	1.213,51	61,85	24,86	13,30	27,00	656,93		

Fonte: Autora (2024)

Os modelos otimizados comparados ao modelo de brise original, apresentaram mais consumo de resfriamento e menores valores para o UDI (%), visto que as áreas dos brises foram menores, dessa forma as aberturas estavam mais suscetíveis a maior radiação e incidência acima de 3000 lux. Entretanto, o algoritmo buscou melhorar a iluminação natural em todo o ambiente, não permitindo que somente a área próxima a abertura tivesse acesso a iluminação natural.

Tabela 34 - Mapa de calor com médias de iluminação entre 300 lux e 3000 lux



Fonte: Autora (2024)

## 5 CONCLUSÃO

Um dos setores que mais impacta o meio ambiente é o da construção civil, devido a demanda de aquecimento, resfriamento e energia do edifício durante seu ciclo de vida. Por isso a importância de desenvolver um projeto eficaz, que opte por estratégias passivas nos estágios iniciais do projeto. Entretanto, é preciso encontrar equilíbrio ao projetar um edifício, sendo necessário ter em consideração o impacto que o ambiente construído tem sobre a fisiologia e comportamento do ser humano. Estudos recentes mostram que um dos fatores que afeta a saúde é a exposição à iluminação natural, que dentro de uma faixa proporciona benefícios à saúde. Desta forma o projeto se torna holístico, tendo várias estratégias para que o profissional avalie.

Entre essas estratégias podemos citar a utilização do brise. De acordo com a análise de sensibilidade, o uso deste elemento arquitetônico tem impacto sobre o consumo do resfriamento do ambiente. Este resultado era o esperado visto que o brise protege as aberturas do edifício, desta maneira impede que a radiação solar incida no ambiente eleve demasiadamente as temperaturas internas. Outro fator que influencia o consumo do resfriamento é o tamanho da abertura em relação a fachada. Ao projetar é necessário ter cautela sobre a abertura, pois dependendo da orientação seu tamanho pode permitir maior incidência de radiação, aumentando o consumo com resfriamento ou pode aumentar o consumo com iluminação artificial, pois quanto menor o tamanho menor iluminação natural o espaço terá.

Com relação a iluminação natural, a estratégia que mais influenciou o seu comportamento é a transmitância visível do vidro utilizado. Assim como o brise, não há uma solução universal para sua utilização, a escolha da transmitância visível depende de fatores externos, como a presença do brise ou não, para qual orientação solar este vidro estará instalado, e o tamanho da abertura. A escolha do brise e do tipo de vidro representam apenas uma parte de várias que o profissional precisa decidir durante as fases iniciais de projeto para obter melhor desempenho. Para ajudar com as escolhas dessas novas demandas, várias abordagens de design digital têm sido estudadas para auxiliar em decisões mais assertivas.

Entre as opções está a otimização multiobjetivo, a qual possibilita encontrar soluções para um problema com limitações ou restrições quando há conflitos com mais de um objetivo. Há várias maneiras de encontrar a solução para a otimização, porém uma das mais eficazes é o algoritmo evolutivo. Este se baseia na Teoria da Evolução de seleção natural de Darwin e na Teoria de Herança de Mendel, desta forma as soluções são encontradas a partir de iterações entre as informações pré-

determinadas pelo profissional, e os resultados que alcançarem a melhor performance conforme o objetivo compõem a Fronteira de Pareto. A otimização multiobjetivo fornece opções de escolhas ao profissional conforme objetivos estabelecidos, permitindo que o desempenho de edificação seja pensado desde os estágios iniciais de projeto, e não como algo a se resolver por último, o que poderia prejudicar o desempenho.

Este estudo é uma verificação de etapas para compreender a otimização multiobjetivo, mediante encontrar a forma de brise para que atenda dois objetivos conflitantes para cinco pavimentos de escritório. Desta forma, foi determinado como objetivo encontrar a forma de um brise que minimizasse o resfriamento e sua área, mas maximizasse a incidência de iluminação natural. Esses objetivos são conflitantes, pois quanto maior a área do brise, menor será o consumo de resfriamento pois terá menos incidência solar na abertura, porém há tendência de ter menos iluminação natural no ambiente. Os indicadores escolhidos foram o CgTT (kWh/ano), Área (m<sup>2</sup>) e UDI (%).

O estudo de caso foi feito em Campo Grande, a cidade está localizada na Zona Bioclimática 6 conforme a NBR 15220-3 (ABNT, 2005). Conforme a classificação climática de Köppen-Geiger, a cidade possui clima tropical com estação seca. A carta solar da cidade mostra a trajetória do sol é mais voltada para o norte, assim como a maior incidência de radiação, conforme a Rosa da Radiação. O modelo geométrico foi baseado no exemplo de edificação da INI-C, com zonas perimetrais, totalizando 400m<sup>2</sup>. O modelo energético e lumínico foram configurados de acordo com as propriedades físicas da INI-C e da NBR 15.575-1 (ABNT, 2024). Foram definidos em três caminhos de projeto dos brises para um edifício de cinco pavimentos, com a finalidade de compreender o comportamento da otimização multiobjetivo.

Ao comparar os resultados com modelos bases, os modelos otimizados possuem vantagens quanto ao modelo sem brise. Consomem menos energia para resfriar o ambiente e restringem o ofuscamento da iluminação natural, e esse ofuscamento poderia induzir os usuários a utilizarem elementos para bloquear o excesso de luz, e como consequência o uso de iluminação artificial para complementar, aumentando o consumo de energia. Ao verificar os resultados dos modelos otimizados com o modelo com brise original, esperava-se que o último tivesse melhor desempenho quanto ao consumo de resfriamento. Dessa forma, acreditava-se que os modelos otimizados obtivessem melhores percentuais de UDI (%), e que permitissem maior incidência de iluminação natural dentro de faixa de iluminância (300 lux a 3000 lux). Porém ao analisar os mapas de calor de

cada modelo é possível notar que a otimização multiobjetivo buscou melhorar a iluminação em todo o ambiente, não somente próximo a região da abertura como o modelo com brise original.

Se falarmos de números de consumo de energia a otimização multiobjetivo obteve performance mediana para as características configuradas neste estudo, não apresentando uma diferença significativa no desempenho térmico do edifício ao usar a otimização. Contudo, há outras vantagens como proporcionar iluminação natural para todo o ambiente. Um benefício obtido, o qual não é o foco deste estudo, foi a economia de material do brise. Houve redução significativa em sua área, para valores de consumo de energia próximos ao modelo com brise original.

No decorrer do estudo existiram dificuldades, a principal foi a curva de aprendizagem, pois foi necessário conhecimentos das áreas específicas como estatística, física e programação, estas que podem fugir do escopo de conhecimento do profissional, principalmente do arquiteto. Outro ponto foi o fato dos dados brasileiros necessários para configurar a rotina estão difundidos em normas, portarias, anexos e estudos, retardando a evolução do processo. Além disso houve limitações, tais como:

- O plugin Ladybug Tools estar em construção, os criadores atualizam constantemente a ferramenta à medida que esta recebe feedback dos usuários, e por causa disso a maior parte das informações de como utilizar está no site do fórum do plugin;
- Confirmar se a configuração no Ladybug Tools® estava correta, foi necessário extrair o arquivo idf e abri-lo no programa EnergyPlus® para verificação;
- Apesar do plugin Wallacei ter um manual, faltam informações mais detalhadas a respeito das configurações, sendo necessário buscar em artigos, especialmente da área de estatística para compreender melhor do que se tratava;
- Em relação a rotina, como não houve partes interessadas (*stakeholders*), não foi possível determinar quais soluções são as melhores para prosseguir com o desenvolvimento do projeto, por exemplo não há fatores externos para estabelecer se é interessante ter um pequeno aumento no consumo de resfriamento em detrimento de ter iluminação natural em todo ambiente e reduzir a quantidade de material para produção do brise.

Porém a otimização multiobjetivo permitiu ter mais escolhas de soluções de acordo com os objetivos pré-determinados, além de permitir ao profissional ter mais consciência sobre as consequências das escolhas feitas. Para pesquisas futuras, recomenda-se:

- Levar em consideração o entorno;
- Explorar mais as funcionalidades dos plugins Ladybug Tools® e Wallacei®;
- Simular e otimizar em diferentes locais geográficos e orientações;
- Estudar outros perfis de brises, como na vertical e demais angulações.

A verificação de rotina de otimização multiobjetivo nos estágios iniciais de projeto das edificações possui vantagens e pode-se ser aplicado para outros problemas enfrentados pelo profissional da área de construção civil. Entretanto, é necessário mais estudo a respeito, principalmente para a área de arquitetura. É uma abordagem que auxilia o profissional tomar decisões, porém há limitações de conhecimentos, tanto dos conceitos teóricos quanto aos softwares, pois é interessante que se tenha conhecimento prévio de programação e estatística, tendo uma curva de aprendizagem alta. Se o profissional vencer a barreira inicial de conhecimento, poderá utilizar a otimização multiobjetivo para ajudá-lo nos estágios iniciais de projeto e contribuir para o desenvolvimento sustentável.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT Online – O que são Gases de Efeito Estufa? – Disponível em <
- ALVARES, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Gonçalves, J. L. M.; Sparovek, G. **Köppen's climate classification map for Brazil**, Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ANDRADE, M.; RUSCHEL, R. C., **Projeto performativo na prática arquitetônica recente**. Categorias e características. Arqtextos. São Paulo, ano 13, n. 150.07, Vitruvius, nov. 2012 Disponível em <<https://vitruvius.com.br/revistas/read/arqtextos/13.150/4587>>. Acessado em: 27 jun. 2022.
- ASSEMBLY, General, **Resolution adopted by the General Assembly on 11 September 2015**, A/RES/69/315 15 September 2015, New York: United Nations, 2015, Disponível em <[https://www.un.org/ga/search/view\\_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&LanL=E](https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&LanL=E)> Acessado em: 16 jun. 22.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro. 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-1: Edificações habitacionais – Requisitos Gerais. Rio de Janeiro. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-3: Edificações habitacionais, Rio de Janeiro. 2021.
- BROWN, N. C.; MUELLER, C. T. **Design variable analysis and generation for performance-based parametric modeling in architecture**. International Journal of Architectural Computing, v. 17, n. 1, p. 36-52, 2019.
- BYUN, J; YOON, Y; KIM, S. **Recommended control options of a daylight dimming system for daylight perimeter zones of open-planned office with curtain walls**. Energy Reports, v. 11, p. 128-144, 2024.
- CALDAS, L. G.; NORFORD, Leslie K. **A design optimization tool based on a genetic algorithm**, Automation in construction, v. 11, n. 2, p. 173-184, 2002.

- COELLO, C. A. C. **Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field**, IEEE computational intelligence magazine, v. 1, n. 1, p. 28-36, 2006.
- COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO (CMMAD), **Nosso futuro comum**, 2a ed., Tradução de Our common future, 1a ed., 1988, Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1991, Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4245128/mod\\_resource/content/3/Nosso%20Fut%20Comum.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4245128/mod_resource/content/3/Nosso%20Fut%20Comum.pdf)>. Acessado em: 23 nov. 2023.
- COSTA, L. M. da; ALVAREZ, C. E. de; MARTINO, J. A. de. **Proposta de método de projeto baseado no desempenho para edifícios energeticamente eficientes**, Ambiente Construído, v. 21, p. 409-433, 2021.
- DAVIDSON, S. Grasshopper. Algorithmic Modeling for rhino. c2023. Home. Disponível em: <<https://www.grasshopper3d.com/>>. Acessado em: 09 de out, de 2023,
- DU PLESSIS, C. et al. **Agenda 21 for sustainable construction in developing countries**, CSIR Report BOU E, v. 204, p. 2-5, 2002.
- ENERGYPLUS, EnergyPlus Copyright (c) 1996-2021. **Quick Start – What is EnergyPlus**. Disponível em: <<https://energyplus.net/quick-start>>. Acessado em: 23 de nov. de 2023.
- EPE, Anuário estatístico de energia elétrica, 2023. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/>>. Acessado em: 20 set. 23.
- FONSECA, R. W., et al. **Avaliação do desempenho termoenergético de modelos de referência de escritórios elaborados com base em levantamento de características construtivas nacionais**. Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído, v. 16, 2016.
- FOOD4RHINO, Colibri por COREstudio, 2024, Disponível em <<https://www.food4rhino.com/en/app/colibri>>. Acessado em: 05 de fev. de 2024.
- FOSE AND PARTNERS, Foster and Partners, c2023, 30 St Mary Axe, Disponível em: <<https://www.fosterandpartners.com/projects/30-st-mary-axe>>. Acessado em: 14 out 2023.
- FRIESE, T.; ULBIG, P.; SCHULZ, S. **Use of evolutionary algorithms for the calculation of group contribution parameters in order to predict thermodynamic properties**. Part 1: Genetic algorithms, Computers & chemical engineering, v. 22, n. 11, p. 1559-1572, 1998.

- GERCEK, M.; ARSAN, Z. D. **Energy and environmental performance based decision support process for early design stages of residential buildings under climate change**. Sustainable Cities and Society, v.48, p.101580, 2019.
- HAKIMAZARI, M. et al. **Multi-objective optimization of daylight illuminance indicators and energy usage intensity for office space in Tehran by genetic algorithm**. Energy Reports, v. 11, p. 3283-3306, 2024.
- HERRERA, J. I.; ATTUX, R. R. de F.; COELHO, G. P., **Otimização Evolutiva Multiobjetivo: Implementação do Algoritmo NSGA-II**. XXIX CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNICAMP. 2021. Campinas. Anais eletrônicos. Campinas. Galoá. 2021. Disponível em: <<https://proceedings.science/unicamp-pibic/pibic-2021/trabalhos/otimizacao-evolutiva-multiobjetivo-implementacao-do-algoritmo-nsga-ii?lang=pt-br>>. Acessado em: 11 out. 2023.
- IBGE, Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. 2022. Disponível em: <<https://odsbrasil.gov.br/>>. Acessado em: 16 jun. 22.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Portaria nº 42, de 24 de fevereiro de 2021, que aprova a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C).
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Portaria nº 50/2013, de 08 de junho de 2015, Anexo geral V – Catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros.
- IPCC, Climate Change 2023 – Synthesis Report, Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_LongerReport.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf)> Acessado: 15 set. 2023.
- IVASKO JÚNIOR, S; MASTELLA, A, D, F; TRES, A; TETTO, A, F; WENDLING, W, T; SOARES, R, V. Classificação do Estado de Mato Grosso do Sul segundo sistema de zonas de vida de Holdridge. Revista Brasileira de Climatologia, [S, l,], v. 26, 2021, DOI: 10.5380/abclima.v26i0.61843, Disponível em: <<https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/14234>>. Acesso em: 10 fev. 2024.
- JANSSEN, P. **An evolutionary system for design exploration**. Proceedings of the International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures, Montréal, Canada 17th-19th June, 2009, p. 260-272.

- JIANG, Y. et al. **Short-term effects of natural view and daylight from windows on thermal perception, health, and energy-saving potential.** Building and Environment, v. 208, p. 108575, 2022.
- KHEIRI, F. **A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 92, p. 897-920, 2018.
- KLEPEIS, N. E. et al. **The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants.** Journal of exposure science & environmental epidemiology, v. 11, n. 3, p. 231-252, 2001.
- KYROPOULOU, M. **Shading Design for Outdoor Learning in Warm and Hot Climates Using Evolutionary Computation: A Case Study in Houston TX.** 2022 Annual Modeling and Simulation Conference (ANNSIM). IEEE, 2022, p. 682-693.
- LADYBUG TOOLS LLC, Ladybug Tools. c2017-2022. Tools, Ladybug. Disponível em: <<https://www.ladybug.tools/ladybug.html>>. Acessado em: 10 out. 2023.
- LADYBUG TOOLS. Honeybee energy's documentation. 2023. Baseline. Disponível em: <<https://www.ladybug.tools/honeybee-energy/docs/cli/baseline.html>>. Acessado em: 25 nov. de 2023.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência energética na arquitetura.** 3ª edição. São Paulo: PW. 2013.
- LEE, J.; BOUBEKRI, M. **Impact of daylight exposure on health, well-being and sleep of office workers based on actigraphy, surveys, and computer simulation.** Journal of Green Building, v. 15, n. 4, p. 19-42, 2020.
- LI, H. et al. **Optimizing of architectural geometry and tubular daylight guidance system based on genetic algorithm to enhance daylighting and energy performance in underground office buildings.** Journal of Building Engineering, v. 86, p. 108895, 2024.
- LIN, Shih-Hsin E.; GERBER, D. J. **Designing-in performance: A framework for evolutionary energy performance feedback in early stage design.** Automation in Construction, v. 38, p. 59-73, 2014.
- MCNEEL, R. Rhinoceros design, model presente, analyze, realize. c1993-2023. Features. Disponível em: <<https://www.rhino3d.com/features/>>. Acesso em: 10 out. 2023.

- MO, H.; ZHOU, Y.; SONG, Y. **Parametric Design and Spatial Optimization of East–West-Oriented Teaching Spaces in Shanghai**. *Buildings*, v. 12, n. 9, p. 1333, 2022.
- MOSSIN, N.; STILLING, S.; BOJSTRUP, T. C.; LARSEN, V. G.; LOTZ, M.; BLEGVAD, A. Na *Architecture Guide, to the UM 17 Sustainable Development Goals*. 1ª edição. Copenhagen. 2018.
- NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. **Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings**. *Lighting Research & Technology*, v. 37, n. 1, p. 41-57, 2005.
- NASROLLAHZADEH, N. **Comprehensive building envelope optimization: Improving energy, daylight, and thermal comfort performance of the dwelling unit**. *Journal of Building Engineering*, v. 44, p. 103418, 2021.
- NEUFERT, E. *Arte de projetar em arquitetura*. Tradução: Benelia Franco. São Paulo. Gustavo Gili. 2013.
- OPENSTUDIO. OpenStudio. Copyright 2008. 2023 Alliance for Sustainable Energy. LLC. Disponível em: <<https://openstudio.net/>>. Acessado em: 23 nov. 2023.
- OTIMIZAR. In: OxfordLanguages. Oxford University Press. 2023. Disponível em: <[https://www.google.com/search?q=otimizar&oq=otimizar&gs\\_lcrp=EgZjaHJvbWUyDAgAEEUYORixAxiABDIGCAEQRRhAMgclAhAAGIAEMgYIAxBFGDsYBwgEEAAYgAQyBwgFEAAYgAQyBggGEEUYPDIGCAcQRRg80gEIMjAxNGowajSoAgCwAgA&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.com/search?q=otimizar&oq=otimizar&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyDAgAEEUYORixAxiABDIGCAEQRRhAMgclAhAAGIAEMgYIAxBFGDsYBwgEEAAYgAQyBwgFEAAYgAQyBggGEEUYPDIGCAcQRRg80gEIMjAxNGowajSoAgCwAgA&sourceid=chrome&ie=UTF-8)>. Acessado em: 22 nov. 2023.
- OXMAN, R. **Performance-based design: current practices and research issues**. *International journal of architectural computing*. V. 6, n. 1, p. 1-17, 2008.
- QUEIROZ, N.; PEREIRA, F. O. R. **Projeto baseado em desempenho: modelo de otimização multicritério para soluções controle solar em fachadas**. Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. 2020. Anais. Porto Alegre: ANTAC, 2020, p. 1–8. Disponível em: <<https://eventos.antac.org.br/inde.php/entac/article/view/882>>. Acesso em: 19 jun. 2022.
- QUEIROZ, N.; PEREIRA, F. OR. **Projeto baseado em desempenho: modelo de otimização multicritério para soluções controle solar em fachadas**. Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. v. 18, n. 1, p. 1-8, 2020.
- QUEIROZ, N.; WESTPHAL, F. S.; PEREIRA, F. O. R. **A performance-based design validation study on EnergyPlus for daylighting analysis**. *Building and Environment*, v. 183, p. 107088, 2020.

- RADIANCE. About Radiance. 2019. Disponível em: <<https://www.radiance-online.org/about>>. Acessado em: 23 nov. 2023.
- SANTANA, L. O.; GUIMARAES, I. B. B.; CARLO, J. C. **Parametrização Aplicada ao Desempenho Energético de Edificações**. V! RUS, v. 11, 2015.
- SHOWKATBAKHS, M.; MAKKI, M. **Multi-objective optimisation of Urban Form: a framework for selecting the optimal solution**. Buildings, v. 12, n. 9, p. 1473, 2022.
- SILVA, M. da A.; BOSCO, L. S.; CARLO, J. C. E. **Modelagem paramétrica e desempenho da edificação: otimização baseada em simulação luminosa e energética através de algoritmos genéticos**. Cadernos do PROARQ. v. 30, p. 150-176, 2018.
- STEWART, R. H.; PALMER, T. S.; DUPONT, B. **A survey of multi-objective optimization methods and their applications for nuclear scientists and engineers**. Progress in Nuclear Energy, v. 138, p. 103830, 2021.
- ST-JEAN, P.; CLARK, O. G.; JEMTRUD, M. **A review of the effects of architectural stimuli on human psychology and physiology**. Building and Environment, v. 219, p. 109182, 2022.
- TELLO, R.; RIBEIRO, F. B. Guia CBIC de boas práticas em sustentabilidade na indústria da construção, Brasília: Câmara Brasileira da Indústria da Construção. Nova Lima: Fundação Dom Cabral. 2012.
- THE R FOUNDATION. The R project for statistical computing, 2024. What is R?. Disponível em: <<https://www.r-project.org/about.html>>. Acessado em: 03 set. 2024.
- TIAN, Z. et al. **Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: A survey and a review**. Energy and Buildings, v. 158, p. 1306-1316, 2018.
- TURAN, Irmak et al. The value of daylight in office spaces. Building and Environment, v. 168, p. 106503, 2020.
- VERMA, S.; PANT, M.; SNASEL, V. **A comprehensive review on NSGA-II for multi-objective combinatorial optimization problems**. IEEE Access, v. 9, p. 57757-57791, 2021.
- WALACEI. Wallacei na evolutionary and analytic engine for Grasshopper 3D – Primer 2.0, 2019.
- WANG, Z. Z.; SOBEY, A. **A comparative review between Genetic Algorithm use in composite optimisation and the state-of-the-art in evolutionary computation**. Composite Structures, v. 233, p. 111739, 2020.

WEBER, F. da S.; MELO, A. P.; MARINOSKI, D. L.; GUTHS, S.; LAMBERTS, R., Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPuls. LabEEE. 2017.

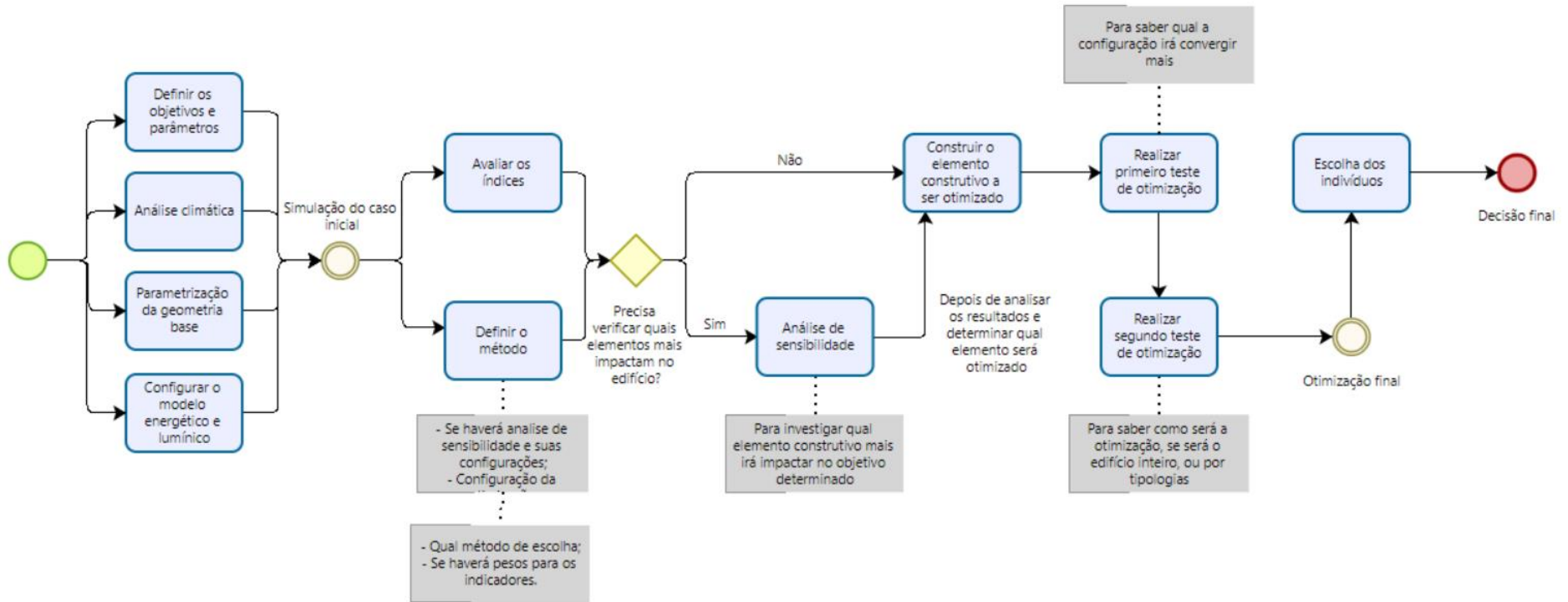
WIKIPÉDIA. Watt-hora. 2022. Disponível em < <https://pt.wikipedia.org/wiki/Watt-hora>>. Acessado: 20 set. 2023.

WOO, M. et al. **Access to daylight and views improves physical and emotional wellbeing of office workers: A crossover study**. Frontiers in Sustainable Cities, v. 3, p. 690055, 2021.

WORLD HEALTH ORGANIZATION et al. Declaration on occupational health for all: Approved at the second meeting of the who collaborating centres in occupational health. Beijing, China. 11-14 Outubro 1994.

APÊNDICE A – Fluxograma da verificação de projeto

Figura 38 - Fluxograma da verificação de projeto



Fonte: Autora (2024)



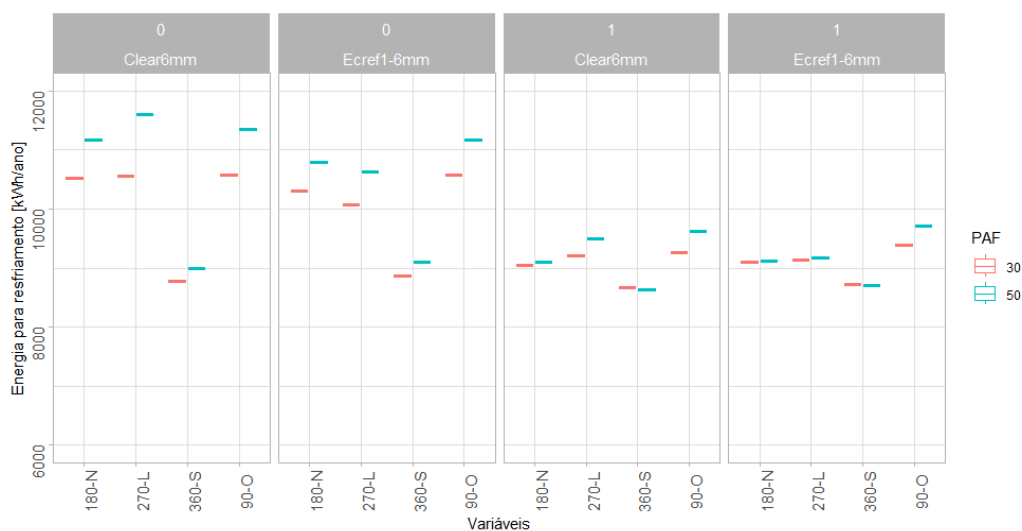
## APÊNDICE B – Resultados da Análise de Sensibilidade

### Análise de sensibilidade sem dimerização

Ao analisar o comportamento do CgTT (kWh/ano) (Figura 39) é possível notar a importância da presença do brise (1), pois apresentou os menores valores quando comparado aos valores que não tem brise (0). Caso a abertura não tenha brise, quanto menor o valor do PAF menor o consumo de refrigeração. Entre as orientações, a orientação Sul tende a necessitar de menos carga térmica para resfriamento que as demais, independente do brise e do tipo de vidro. O tipo de vidro influenciou pouco a necessidade de refrigeração, sendo mais eficaz quando combinado com outra estratégia.

A ANOVA da análise de sensibilidade sem dimerização é mostrada na Tabela 35, sendo que o brise indica maior significância para o CgTT (kWh/ano), seguido da orientação e depois pelo PAF. Apesar do tipo de vidro ter significância para o CgTT (kWh/ano), é o que menor apresenta influência quando comparado aos demais. Se analisar as interações entre as variáveis, a combinação entre brise e orientação é que mais indica interferência nos valores do CgTT (kWh/ano). A combinação brise e PAF, brise e vidro e PAF e orientação tem influência menor nos resultados, já a combinação PAF e vidro não há evidências suficiente para indicar uma interação significativa, visto que o  $Pr > 0,05$ . Desta forma os principais fatores que mais indicam influência sobre o consumo de refrigeração é o brise, depois PAF e por último a combinação entre brise e orientação.

Figura 39 - Boxplot CgTT (kWh/ano) – Análise de sensibilidade sem dimerização<sup>13</sup>



<sup>13</sup> O número 0 representa sem brise, e o 1 com brise.

Fonte: Autora (2024)

Tabela 35 - Anova CgTT (kWh/ano) – Análise de sensibilidade sem dimerização

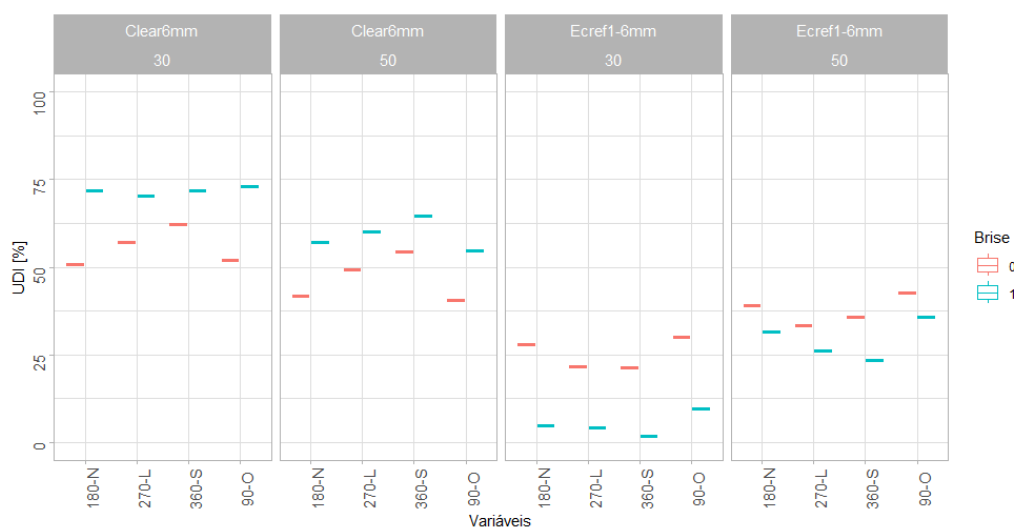
Variáveis	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Estatística F	Pr (>F)
Brise	1	11221171	11221171	787,533	5,11e-13 ***
PAF	1	995263	995263	69,850	1,38e-06 ***
Orientação	3	9340229	3113410	218,508	2,27e-11 ***
Vidro	1	122788	122788	8,618	0,011589 *
Brise:PAF	1	383559	383559	26,919	0,000175 ***
Brise:Orientação	3	2350631	783544	54,991	1,21e-07 ***
Brise:Vidro	1	133416	133416	9,363	0,009123 **
PAF:Orientação	3	220671	73557	5,162	0,014403 *
PAF:Vidro	1	39923	39923	2,802	0,118028
Orientação:Vidro	3	350571	116857	8,201	0,002552 **
Residuais	13	185231	14249		
-----					
Significado dos códigos	0 '***' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 '' 1				

Fonte: Autora (2024)

O UDI (%) apresenta comportamento diferente (Figura 40) pelo motivo de que quanto maiores os valores, melhor e porque são contabilizados valores dentro do espectro de luminância determinado (300 lux e 3000 lux). A presença de brise proporciona valores menores de iluminância, enquanto maior o PAF maior a incidência de iluminação natural no ambiente, beneficiando os usuários. Por possuir transmitância visível menor, o vidro ECREF-1 colored 6mm obteve menores valores para UDI (%) comparado ao Generic Clear Glass e sendo menor quando aliado ao brise. O vidro Generic Clear Glass apresentou valores menores na ausência do brise, indicando a possibilidade de ter ofuscamento. A orientação foi a que mais diversificou seus valores conforme combinado com as outras variáveis.

Conforme a Tabela 36, o vidro indicou ser a maior influência sobre o UDI (%), maior F value e  $P < 0,05$ . A segunda variável que apresentou ser significativa foi o PAF, em contrapartida o brise e a orientação não indicaram significância nos valores do UDI (%), à medida que ambos apresentaram valores baixos de F value e  $Pr > 0,05$ . Entre as interações, a combinação de brise com vidro e PAF com vidro indicaram maior relevância para os resultados. Portanto o vidro, e as combinações de brise e vidro e PAF e vidro, foram os que obtiveram maiores valores de F value e os únicos com  $Pr < 0,05$ , apontando serem significativos para o UDI (%).

Figura 40 - Boxplot UDI (%) – Análise de sensibilidade sem dimerização



Fonte: Autora (2024)

Tabela 36 - Anova UDI (%) - Análise de sensibilidade sem dimerização

Variáveis	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Estatística F	Pr (>F)							
Brise	1	0	0	0,004	0,94782							
PAF	1	108	108	7,319	0,01801 *							
Orientação	3	23	8	0,518	0,67721							
Vidro	1	9150	9150	617,344	2,42e-12 ***							
Brise:PAF	1	34	34	2,262	0,15648							
Brise:Orientação	3	30	10	0,671	0,58497							
Brise:Vidro	1	1652	1652	111,489	9,54e-08 ***							
PAF:Orientação	3	9	3	0,198	0,89605							
PAF:Vidro	1	1690	1690	114,025	8,36e-08 ***							
Orientação:Vidro	3	362	121	8,130	0,00264 **							
Residuais	13	193	15									
-----												
Significado dos códigos		0	***	0,001	***	0,01	**	0,05	'	0,1	'	1

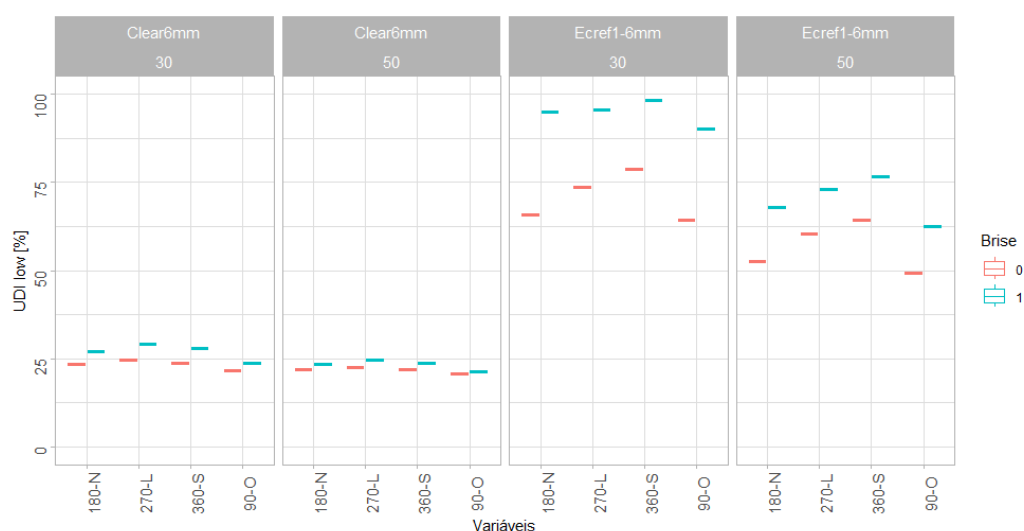
Fonte: Autora (2024)

Para compreender melhor o comportamento da iluminação natural, foi analisado o  $UDI_{low}$  (%) e  $UDI_{up}$  (%). O  $UDI_{low}$  (%) (Figura 41) apresenta resultados dos valores de iluminância abaixo de 300 lux, e quanto maior a quantidade de valores abaixo de 300 lux, haverá menos iluminação natural e maior desconforto visual visto que a iluminação artificial não dimeriza, assim não irá complementar o valor de iluminação do ambiente. O vidro Generic Clear Glass teve valores menores que o ECREF-1 colored 6mm, tanto com presença quanto ausência de brise, indicando que houve maior incidência de iluminação acima de 300 lux, além disso as demais variáveis diferenciaram pouco. O ECREF-1 colored 6mm sem brise apresentou valores menores do que aliado com brise, apontando que houve maior luminância no ambiente. O PAF de 30 (junto ao ECREF-1 colored 6mm)

mostrou que obteve mais iluminância abaixo de 300 lux do que o PAF de 50. A abertura voltada para sul alcançou a maior quantidade de luminância de 300 lux, e a orientação que atingiu menor foi a oeste.

Entre as variáveis (Tabela 37), o vidro apresenta alta significância sobre o  $UDI_{low}$  (%), apresentando o maior F value (3763,351), seguido pelo brise e PAF. A orientação possui influência, mas não tanto quanto os demais. Quanto as combinações de variáveis, o brise com vidro e PAF com vidro possuem relevância para o  $UDI_{low}$  (%), os demais não impactam nos resultados, pois o  $Pr > 0,05$ . Assim sendo, os fatores que mais influenciam o  $UDI_{low}$  (%) são o vidro, PAF e o brise.

Figura 41 - Boxplot  $UDI_{low}$  (%) – Análise de sensibilidade sem dimerização



Fonte: Autora (2024)

Tabela 37 - Anova  $UDI_{low}$  (%) - Análise de sensibilidade sem dimerização

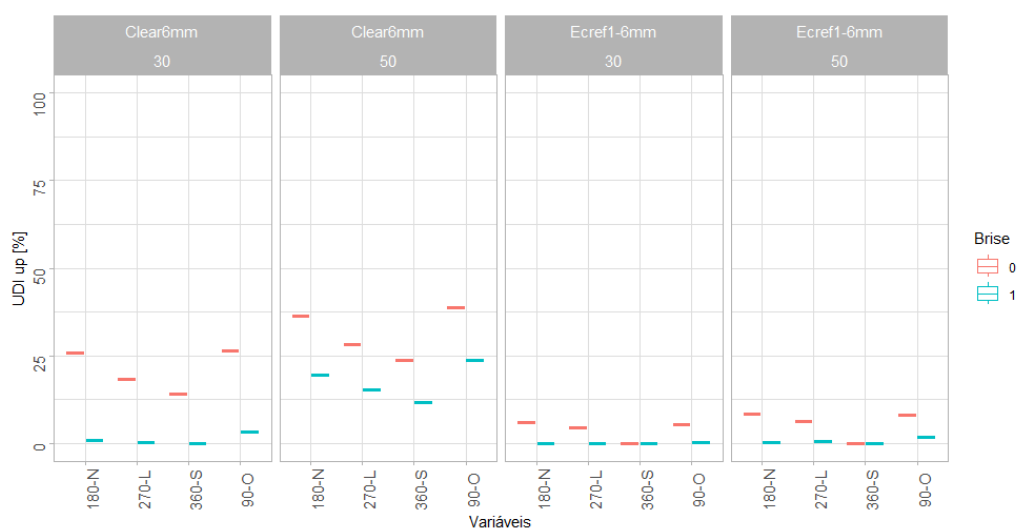
Variáveis	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Estatística F	Pr (>F)							
Brise	1	914	914	178,295	5,75e-09 ***							
PAF	1	964	964	187,936	4,17e-19 ***							
Orientação	3	282	94	18,327	5,94e-05 ***							
Vidro	1	19299	19299	3763,351	< 2e-16 ***							
Brise:PAF	1	84	84	16,311	0,00141 **							
Brise:Orientação	3	9	3	0,611	0,61965							
Brise:Vidro	1	519	519	101,264	1,67e-07 ***							
PAF:Orientação	3	2	1	0,099	0,95920							
PAF:Vidro	1	562	562	109,584	1,06e-07							
Orientação:Vidro	3	130	43	8,472	0,00223 **							
Residuais	13	67	5									
-----												
Significado dos códigos		0	***	0,001	***	0,01	**	0,05	'	0,1	'	1

Fonte Autora (2024)

Os resultados do  $UDI_{up}$  (%) levam em consideração a iluminância acima de 3000 lux, sendo assim o vidro Generic Clear Glass permite que mais iluminação acima deste valor incida no ambiente do que o vidro ECREF-1 colored 6mm (Figura 42). Por isso as demais variáveis apresentam maior diferenciação no vidro Generic Clear Glass. Um exemplo é a presença do brise e o PAF de 50%, estes permitem que o excesso de luz passe pela abertura. E as orientações oeste e norte foram as que mais influenciaram o  $UDI_{up}$  (%).

Segundo a Tabela 38, todas as variáveis intervêm nos resultados do  $UDI_{up}$  (%) possuindo  $Pr < 0,05$ , porém as mais significativas são brise, PAF e vidro, que apresentou maior F value (612,645). Entre as interações, somente brise com vidro e PAF com vidro possuem evidências que impactam os resultados, as demais apresentam  $Pr > 0,05$ . Deste modo, os fatores que mais influenciam o ambiente a ter iluminância acima de 3000 lux são o vidro, brise e PAF. Como dito anteriormente o  $C_{ilum}$  (kWh/ano) permaneceu constante por não ter tido dimerização, assim não sofreu impacto das variáveis (Figura 43).

Figura 42 - Boxplot  $UDI_{up}$  (%) – Análise de sensibilidade sem dimerização



Fonte: Autora (2024)

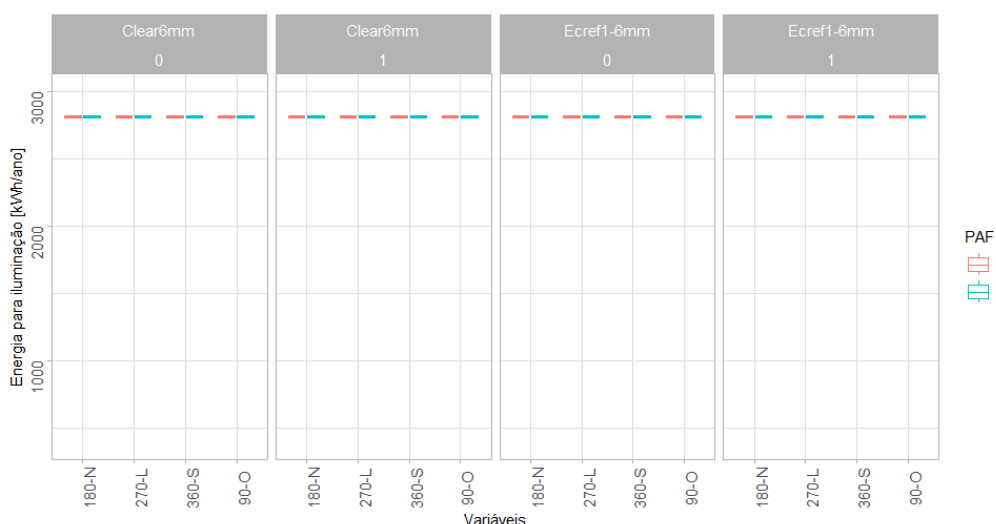
Tabela 38 - Anova UDI<sub>up</sub> (%) – Análise de sensibilidade sem dimerização

Variáveis	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Estatística F	Pr (>F)
Brise	1	930,0	930,0	304,338	2,11e-10 ***
PAF	1	425,6	425,6	139,277	2,55e-08 ***
Orientação	3	250,2	83,4	27,290	6,99e-06 ***
Vidro	1	1872,0	1872,0	612,645	2,54e-12 ***
Brise:PAF	1	11,3	11,3	3,688	0,07701 .
Brise:Orientação	3	62,8	20,9	6,849	0,00522 **
Brise:Vidro	1	319,0	319,0	104,403	1,40e-07 ***
PAF:Orientação	3	17,0	5,7	1,854	0,18728
PAF:Vidro	1	302,9	302,9	99,121	1,89e-07 ***
Orientação:Vidro	3	63,8	21,3	6,964	0,00490 **
Residuais	13	39,7	3,1		

-----

Significado dos códigos	0	***	0,001	***	0,01	**	0,05	'	0,1	'	1
-------------------------	---	-----	-------	-----	------	----	------	---	-----	---	---

Fonte: Autora (2024)

Figura 43 - Boxplot C<sub>itum</sub> (kWh/ano) – Análise de sensibilidade sem dimerização

Fonte: Autora (2024)

### Análise de sensibilidade com dimerização

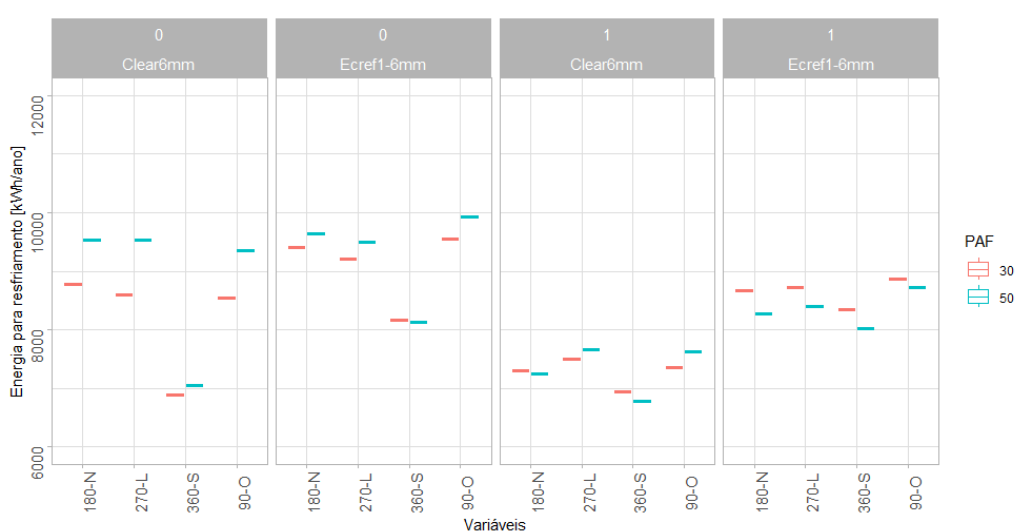
Ao analisar o comportamento dos valores do C<sub>gTT</sub> (kWh/ano) (Figura 44), quando há dimerização da iluminação artificial, é possível notar que os menores valores foram obtidos quando houve a presença do brise, mostrando a importância deste para a redução do consumo de resfriamento. Outro elemento que impacta no comportamento do C<sub>gTT</sub> (kWh/ano) é o tipo de vidro, especialmente quando há brise, visto que a combinação do brise com vidro Generic Clear Glass apresentou os menores valores comparado com a combinação de brise com ECREF-1 colored 6mm. O Generic Clear Glass possui transmitância solar e transmitância visível maior que o ECREF1 – 6mm,

indicando que a transmitância visível também impacta no consumo de refrigeração, possivelmente por necessitar menos de iluminação artificial.

Quanto a orientação solar, a Sul apresentou os menores resultados, como o esperado, pois como foi visto no gráfico de radiação de Campo Grande (item 3.2.1), esta orientação recebe os menores valores de radiação. Em relação ao PAF, foi a variável que mais alternou, pois dependendo se há ou não brise, do tipo do vidro e para qual orientação a fachada está, o tamanho da abertura alternou bastante entre as combinações de variáveis feitas. Entretanto o PAF 30 obteve os menores valores em mais combinações de parâmetros.

Entre as variáveis que mais impactam no resultado do CgTT (kWh/ano) (Tabela 39), estão o brise, com maior F value, seguido do vidro e orientação. O PAF possui a menor significância sobre os valores. Entre as combinações de variáveis, todas possuem relevância, com destaque para o brise com orientação com maior F value entre as interações. Porém os fatores que mais impactam são as variáveis brise, vidro e orientação.

Figura 44 – Boxplot CgTT (kWh/ano) – Análise de sensibilidade com dimerização



Fonte: Autora (2024)

Tabela 39 - Anova CgTT (kWh/ano) - Análise de sensibilidade com dimerização

Variáveis	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Estatística F	Pr (>F)
Brise	1	7439412	7439412	432,780	2,31e-11 ***
PAF	1	199106	199106	11,583	0,004712 **
Orientação	3	7642246	2547415	148,193	2,66e-10 ***
Vidro	1	6903993	6903993	401,632	3,70e-11 ***
Brise:PAF	1	636093	636093	37,004	3,89e-05 ***
Brise:Orientação	3	2420824	806941	46,943	3,10e-07 ***
Brise:Vidro	1	587347	587347	34,168	5,73e-05 ***
PAF:Orientação	3	212160	70720	4,114	0,029520 *
PAF:Vidro	1	320328	320328	18,635	0,000837 ***
Orientação:Vidro	3	449941	149980	8,725	0,001973 **
Residuais	13	223468	17190		
-----					
Significado dos códigos	0 '***' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 '' 1				

Fonte: Autora (2024)

Assim como na Análise de Sensibilidade sem dimerização, os valores do UDI (%) representam o percentual do tempo em que a iluminação natural se encontra entre 300 lux e 3000 lux. Em relação ao PAF, o de 30% aliado ao vidro simples, com ou sem brise, permitiu que a zona fosse iluminada naturalmente por mais tempo. Ao verificar o gráfico boxplot deste indicador (Figura 45) o vidro Generic Clear Glass, o qual possui transmitância maior, possui melhores resultados se comparado com ECREF 1 – 6mm, assim a zona possui mais tempo de iluminação natural entre 300 lux e 3000 lux na presença do vidro Generic Clear Glass, mesmo com a presença do brise. A combinação do brise mais o vidro ECREF 1 – 6 mm, foi o que apresentou os piores resultados.

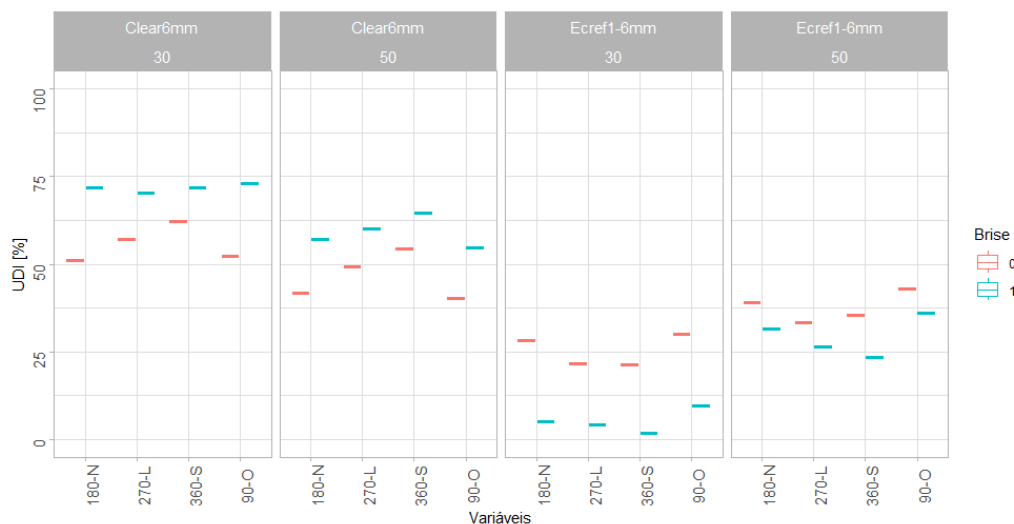
Quanto a orientação solar, a sul obteve mais tempo de iluminação quando associado ao vidro Generic Clear Glass dentro da faixa de valores estipulados. Ao analisar o desempenho do vidro ECREF 1 – 6 mm, a orientação oeste associada a menor transmitância visível apresentou os melhores resultados, permitindo que a zona obtenha iluminação natural entre 300 lux e 3000 lux por mais tempo, desta forma quanto menor transmitância visível maior deverá ser a radiação para obter resultados significativos de UDI (%).

Para o UDI (%) a variável mais significativa para seus valores é o tipo de vidro, este possui F value alto e  $Pr < 0,05$ . O PAF e a orientação possuem menor significância, e o brise não possui impacto significativo, visto que apresente  $Pr > 0,05$  (Tabela 40). Entre as interações, as que são mais significativas são PAF com vidro e Brise com vidro, com os maiores F value. A terceira combinação que possui relevância é a orientação com vidro, as demais possuem  $Pr > 0,05$  indicando não serem



relevantes para o UDI (%). Desta forma os fatores que mais influenciam o UDI (%) são o tipo de vidro, e as combinações de brise e vidro e PAF e vidro.

Figura 45 – Boxplot UDI (%) – Análise de sensibilidade com dimerização



Fonte: Autora (2024)

Tabela 40 - Anova UDI (%) - Análise de sensibilidade com dimerização

Variáveis	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Estatística F	Pr (>F)							
Brise	1	0	0	0,004	0,95344							
PAF	1	109	109	7,461	0,01713 *							
Orientação	3	23	8	0,518	0,67738							
Vidro	1	9136	9136	<b>627,978</b>	<b>2,17e-12 ***</b>							
Brise:PAF	1	33	33	2,264	0,15632							
Brise:Orientação	3	10	10	0,677	0,58148							
Brise:Vidro	1	1637	1637	<b>112,548</b>	<b>9,02e-08 ***</b>							
PAF:Orientação	3	8	3	0,191	0,90090							
PAF:Vidro	1	1690	1690	<b>116,168</b>	<b>7,49e-08 ***</b>							
Orientação:Vidro	3	365	122	8,366	<b>0,00235 **</b>							
Residuais	13	189	15									
-----												
Significado dos códigos		0	***	0,001	***	0,01	**	0,05	'	0,1	'	1

Fonte: Autora (2024)

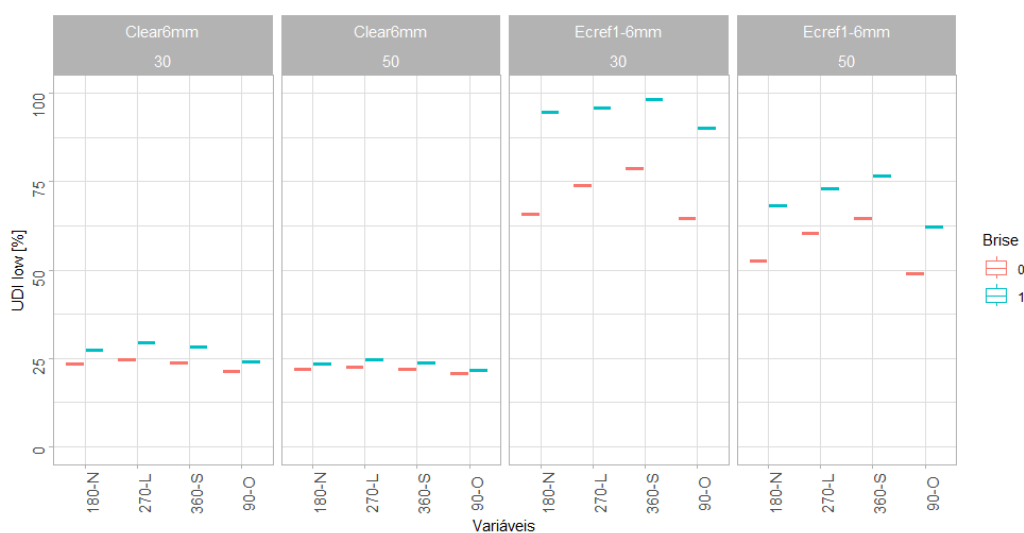
De acordo com o gráfico Boxplot (Figura 46) pode-se concluir que o ECREF-1 colored 6mm possui os maiores percentuais de tempo para valores abaixo de 300 lux, a baixa transmitância visível deste tipo de vidro favorece que o ambiente fique com pouca iluminação natural comparado ao outro tipo de vidro. Esse valor aumenta mais se a abertura tiver brise e possuir PAF de 30%. No que diz respeito a orientação, a sul possui os maiores valores de percentual de tempo, possivelmente por ter menos incidência de raios solares, ao contrário da orientação oeste, que apresentou os menores valores. Quanto ao vidro Generic Clear Glass, há diferenças de valores entre os percentuais

do PAF e entre as orientações são pequenas. Quando se avalia o uso do brise essa discrepância tem um leve aumento com a presença do elemento arquitetônico.

Quanto as influências, a Tabela 41 mostra como o vidro é extremamente significativo para o  $UDI_{low}$  (%), apresentando F value de 3887,381, as demais variáveis possuem significância, mas em menor relevância. Ao observar as interações, devido ao Pr ser menor que 0,05, as combinações entre brise com orientação e PAF com orientação não tem impacto significativo sobre os resultados. Portanto as variáveis mais significativas para o  $UDI_{low}$  (%) são o tipo de vidro, o PAF e brise.

O  $UDI_{up}$  (%) foi configurado para contabilizar resultados acima de 3000 lux, dessa maneira o ideal é que não apresente valores altos para que não ocorra ofuscamento. Conforme a Figura 47, o vidro ECREF-1 colored 6mm apresentou os menores percentuais de tempo quando a iluminação natural estava acima de 3000 lux. Se analisar a variável brise e PAF nesse tipo de vidro, é possível notar que a diferença de valores entre eles é pequena, indicando que essas duas variáveis pouco impactam nos valores. Quanto a orientação, a sul é a que obtém os menores valores em todas as combinações com o ECREF-1 colored 6mm. Isso indica que o vidro impede o excesso de iluminação natural, evitando o ofuscamento.

Figura 46 - Boxplot  $UDI_{low}$  (%) – Análise com dimerização



Fonte: Autora (2024)

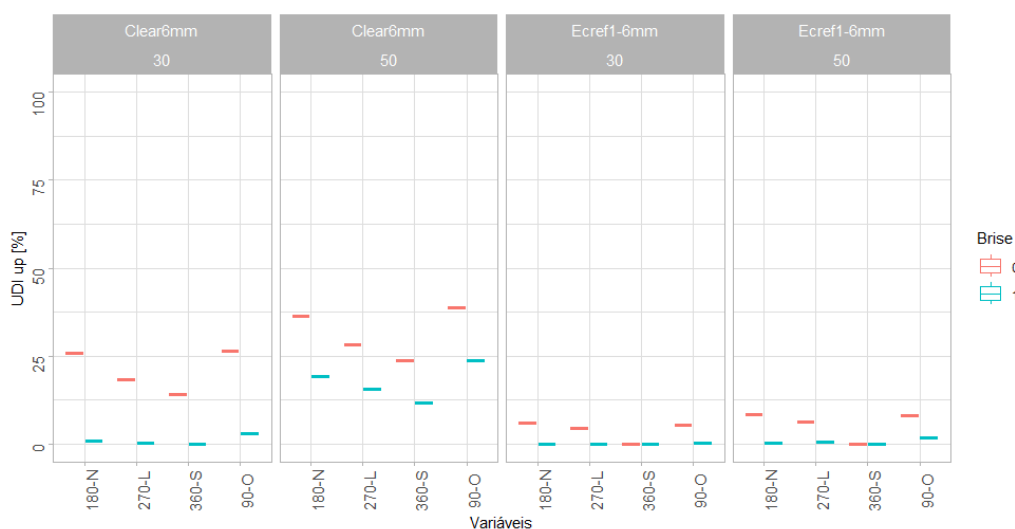
Tabela 41 - Anova  $UDI_{low}$  (%) - Análise de sensibilidade com dimerização

Variáveis	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Estatística F	Pr (>F)
Brise	1	916	916	184,836	4,61e-09 ***
PAF	1	972	972	196,148	3,21e-09 ***
Orientação	3	290	97	19,481	4,32e-05 ***
Vidro	1	19266	19266	3887,381	< 2e-16 ***
Brise:PAF	1	83	83	16,672	0,00129 **
Brise:Orientação	3	10	3	0,640	0,60278
Brise:Vidro	1	512	512	103,350	1,49e-07 ***
PAF:Orientação	3	2	1	0,112	0,95174
PAF:Vidro	1	556	556	112,193	9,19e-08 ***
Orientação:Vidro	3	133	44	8,953	0,00177 **
Residuais	13	64	5		
-----					
Significado dos códigos	0 '***' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 '' 1				

Fonte: Autora (2024)

O vidro Generic Clear Glass sem o brise, nas duas opções de PAF, foi a variável que obteve maior quantidade de tempo com iluminação acima do 3000 lux. Em relação ao PAF, tanto com a presença quanto com a ausência do brise, o de 50% possui os maiores valores. Para este vidro o oeste apresentou os maiores valores para as combinações das variáveis. Entretanto a combinação deste vidro com brise e PAF de 30 apresentaram valores semelhantes ao do ECREF-1 colored 6mm, mostrando que é possível ter menor ofuscamento com um vidro que possua maior transmitância visível, desde que esteja aliado com o brise.

De acordo com a Tabela 42, todas as variáveis possuem impacto significativo no  $UDI_{up}$  (%), entretanto as que possuem maior F value são tipo de vidro, brise e PAF. Entre as combinações somente duas apresentam  $Pr > 0,05$ , o brise com PAF e PAF com orientação, isso indica que essas combinações não têm um impacto significativo em  $UDI_{up}$  (%). Portanto entre os fatores que são relevantes, as variáveis vidro, brise e PAF mais influenciam sobre a iluminância acima de 3000 lux.

Figura 47 - Boxplot UDI<sub>up</sub> (%) – Análise de sensibilidade com dimerização

Fonte: Autora (2024)

Tabela 42 - Anova UDI<sub>up</sub> (%) - Análise com dimerização

Variáveis	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Estatística F	Pr (>F)							
Brise	1	929,9	929,9	302,270	2,21e-10 ***							
PAF	1	431,0	431,0	140,100	2,46e-08 ***							
Orientação	3	249,5	83,2	27,030	7,37e-06 ***							
Vidro	1	1867,8	1867,8	607,162	2,69e-12 ***							
Brise:PAF	1	11,2	11,2	3,652	0,07829 .							
Brise:Orientação	3	62,6	20,9	6,787	0,00540 **							
Brise:Vidro	1	318,0	318,0	103,379	1,48e-07							
PAF:Orientação	3	17,2	5,7	1,868	0,18482 ***							
PAF:Vidro	1	307,3	307,3	99,905	0,81e-07 ***							
Orientação:Vidro	3	63,7	21,2	6,900	0,00507 **							
Residuais	13	40,0	3,1									
-----												
Significado dos códigos		0	***	0,001	**	0,01	*	0,05	'	0,1	''	1

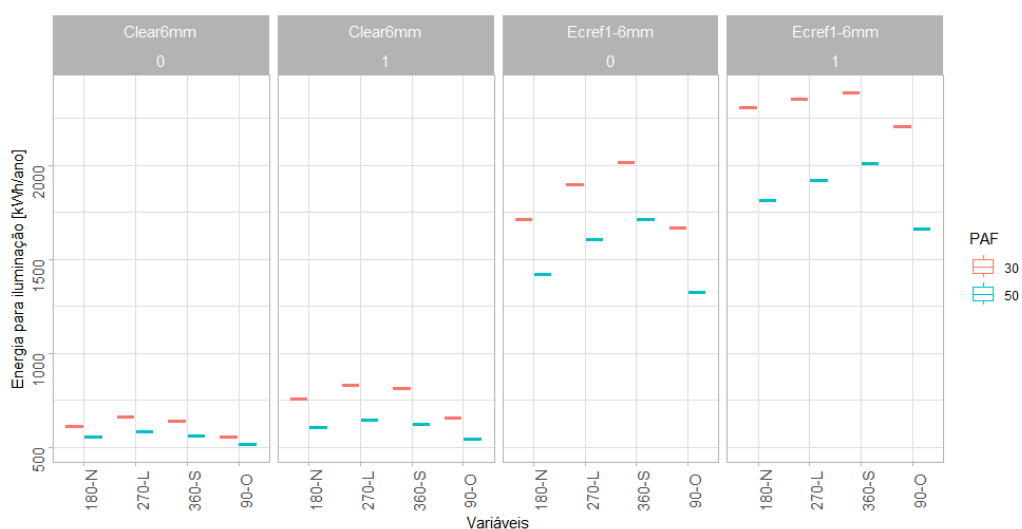
Fonte: Autora (2024)

O indicador  $C_{ilum}$  (kWh/ano) aliado a dimerização obteve maior influência do tipo de vidro (Figura 48). Seu consumo foi menor quando foi configurado o Generic Clear Glass, o qual possui maior transmitância visível, indicando que mais iluminação natural incidiu no ambiente, dispensando o uso de iluminação artificial. Quanto a presença do brise fez com que o consumo subisse em ambos os vidros, provavelmente devido ao sombreamento que o elemento arquitetônico gera na abertura. Entretanto se analisar a combinação dos vidros com o brise é possível notar que a diferença entre os valores de consumo para o vidro ECREF-1 colored 6mm com e sem brise são maiores do que para o Generic Clear Glass.

A orientação solar oeste possuir menor consumo de iluminação elétrica, provavelmente é a orientação que mais recebe iluminação natural por mais tempo, diminuindo a necessidade de iluminação elétrica. Em relação ao PAF, o de 50% foi o que menos consumiu, indicando que quanto maior a abertura mais iluminação natural o ambiente interno terá.

Os fatores brise, PAF, orientação e vidro têm impacto significativo sobre o  $C_{ilum}$  (kWh/ano), entretanto o vidro apresenta maior relevância por possuir F value igual a 6978,350 (Tabela 43). As interações entre brise e PAF, brise e vidro, PAF e vidro e orientação e vidro também são relevantes, indicando que as combinações impactam significativamente no  $C_{ilum}$  (kWh/ano). Entretanto as combinações brise e orientação e PAF e orientação não são significativas, apresentando  $Pr < 0,05$ . Os fatores que mais influenciam o consumo de iluminação artificial são o tipo de vidro, o brise e a combinação entre brise e vidro.

Figura 48 - Boxplot  $C_{ilum}$  (kWh/ano) – Análise de sensibilidade com dimerização



Fonte: Autora (2024)

Tabela 43 - Anova  $C_{ilum}$  (kWh/ano) – Análise de sensibilidade com dimerização

Variáveis	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Estatística F	Pr (>F)
Brise	1	528710	528710	299,125	2,36e-10 ***
PAF	1	492900	492900	278,865	3,65e-10 ***
Orientação	3	202949	67650	38,274	1,02e-06 ***
Vidro	1	12334390	12334390	6978,350	< 2e-16 ***
Brise:PAF	1	30990	30990	17,533	0,001065 **
Brise:Orientação	3	5193	1731	0,979	0,432480
Brise:Vidro	1	197752	197752	111,881	9,35e-08 ***
PAF:Orientação	3	478	159	0,090	0,964166
PAF:Vidro	1	150098	150098	84,920	4,60e-07
Orientação:Vidro	3	59774	19925	11,273	0,000639 ***
Residuais	13	22978	1768		
-----					
Significado dos códigos	0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 '' 1				

Fonte: Autora (2024)

## APÊNDICE C – ANÁLISE DOS RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO PRELIMINAR

Foram realizados quatro testes de otimização:

- Teste 01: 10 gerações com 100 indivíduos, o objetivo foi minimizar o CgTT (kWh/ano) e maximizar o UDI (%);
- Teste 02: 10 gerações com 100 indivíduos, o objetivo foi minimizar CgTT (kWh/ano) e Área (m<sup>2</sup>) e maximizar UDI (%);
- Teste 03: 100 gerações com 10 indivíduos, o objetivo foi minimizar o CgTT (kWh/ano) e maximizar o UDI (%);
- Teste 04: 100 gerações com 10 indivíduos, o objetivo foi minimizar CgTT (kWh/ano) e Área (m<sup>2</sup>) e maximizar UDI (%).

### Teste 01

Neste teste foram configurados 2 objetivos: minimizar o indicador CgTT (kWh/ano) e maximizar o UDI (%) (para a otimização foi realizado a conta 100-UDI para obter valores maximizados do UDI (%), entretanto os gráficos já apresentam o valor inverso, o valor do UDI (%)). Além disso foram extraídas as seguintes informações de cada indivíduo: Área (m<sup>2</sup>), C<sub>ilum</sub> (kWh/ano), UDI<sub>low</sub> (%) e UDI<sub>up</sub> (%). Foram definidas 10 gerações com 100 indivíduos cada resultando em uma população com 1000 indivíduos. Como resultado, os indivíduos da Fronteira de Pareto correspondem aos indivíduos 0, 1 e 2 da Geração 9.

Os valores de cada geração do indicador CgTT (kWh/ano) (Figura 49) não são uniformes, alguns indivíduos possuem maior amplitude de valores se comparado aos demais da mesma geração. Entretanto é possível notar decaimento dos valores no decorrer das gerações. A média dos valores da primeira geração (G00) é 9.817,37 kWh, enquanto a média da última geração é de 7.951,04 kWh, isso significa uma redução de 19,01% no consumo de resfriamento.

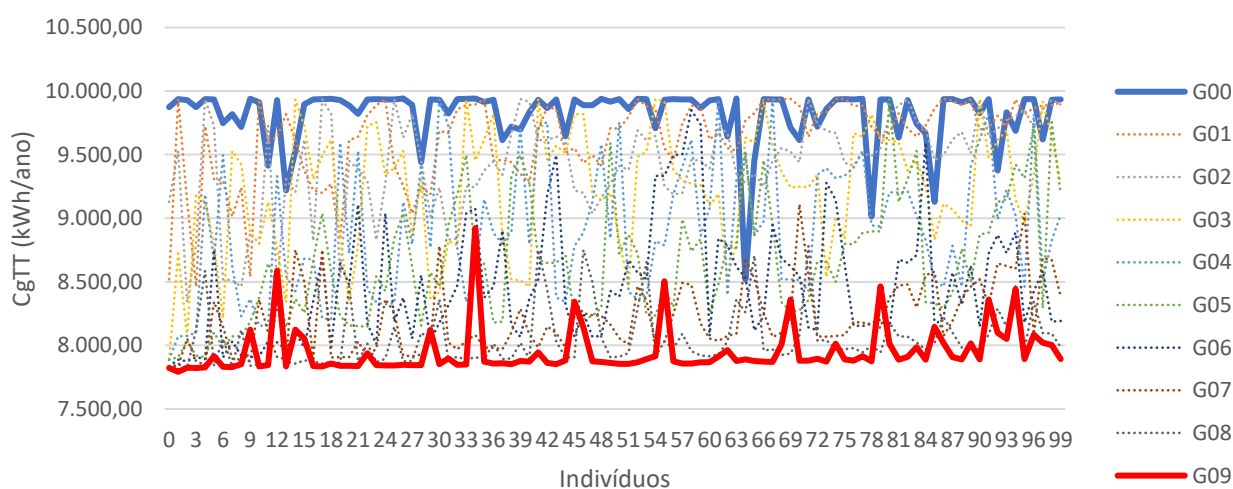
O comportamento do indicador UDI (%) se difere do CgTT (kWh/ano) (Figura 50), sendo que as primeiras gerações possuem amplitudes maiores (entre 49,57% e 55,58%) entre os indivíduos, porém à medida que aproximam da geração final, indicando possivelmente que a otimização

estabilizou na procura de novos valores. A partir da média dos valores dos indivíduos do G00 (52,65%) e G09 (56,80%), pode-se concluir que houve aumento de 7,88%<sup>14</sup> na Zona 03.

Os valores da Área (m<sup>2</sup>) (Figura 51) seguiram o mesmo comportamento do indicador UDI (%) quanto a amplitude de valores entre os indivíduos de uma mesma geração (a faixa de valores do G00 ficou entre 7,98 m<sup>2</sup> e 20,11 m<sup>2</sup>, enquanto G09 entre 22,48 m<sup>2</sup> e 24,49). A média de valores da G00 foi de 13,54 m<sup>2</sup>, enquanto a da G09 foi de 23,24m<sup>2</sup>, isso representa aumento da área de 71,64%.

Para o C<sub>ilum</sub> (kWh/ano) (Figura 52), os valores da primeira geração também estão dentro de uma ampla faixa (entre 592,63 kWh e 628,96 kWh) se comparado com a última (632,21 kWh e 638,28 kWh). Ao observar a evolução das gerações é possível notar aumento dos valores, visto que a média da primeira geração é de 611,12 kWh e da última é 634,66 kWh, isso significa aumento de 3,85% entre as gerações.

Figura 49 - Gráfico da evolução do indicador CgTT (kWh/ano) do Teste 01

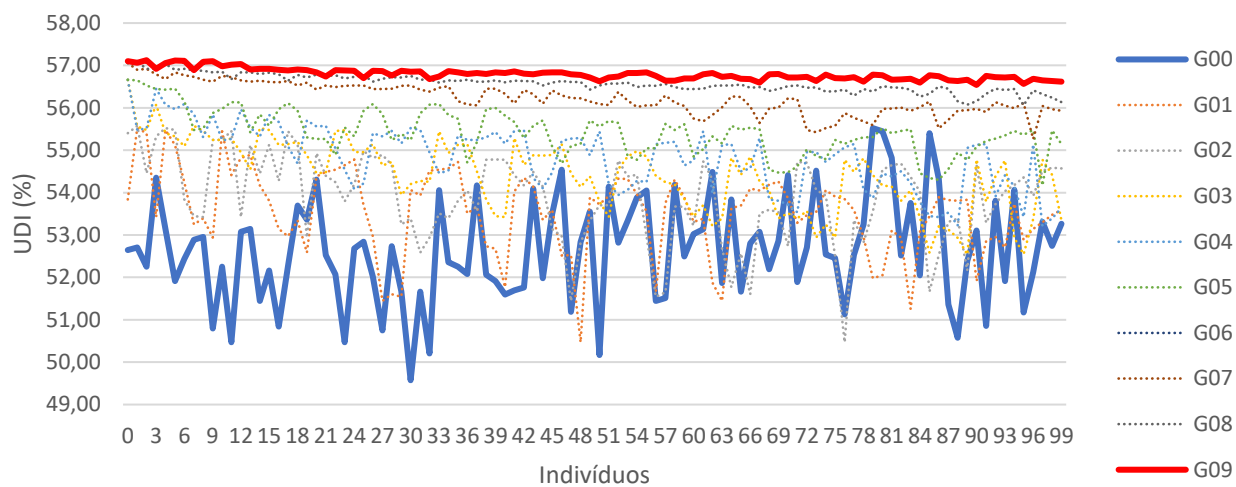


Fonte: Autora (2024)

<sup>14</sup> O valor 7,88% é relativo, o valor absoluto é 4,15%.

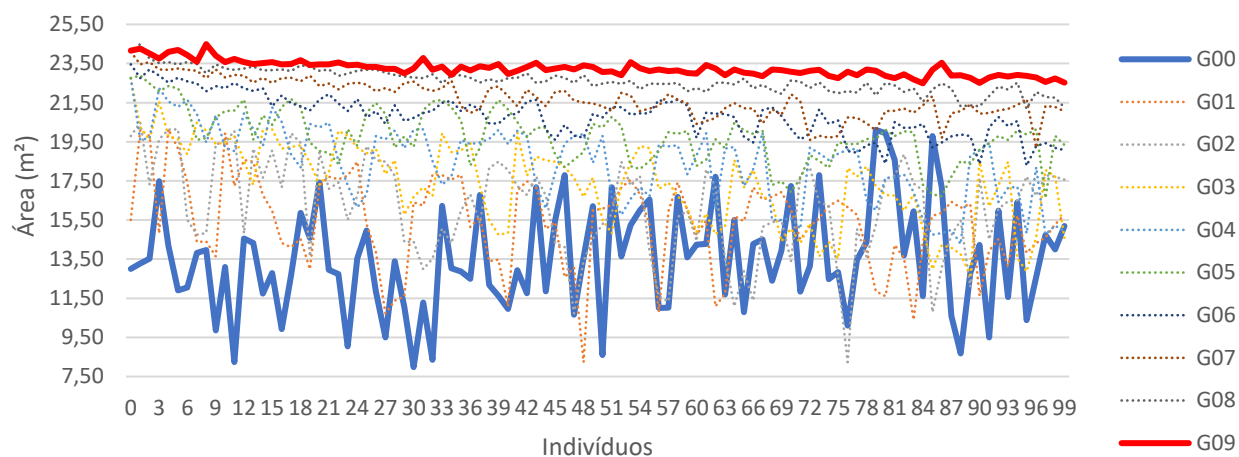


Figura 50 - Gráfico da evolução do indicador UDI (%) do Teste 01

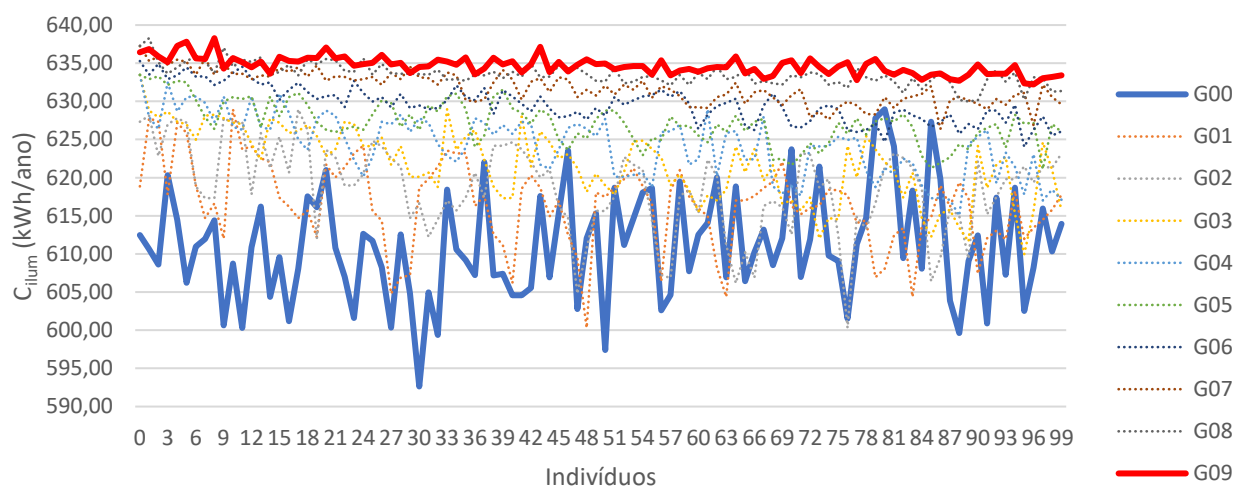


Fonte: Autora (2024)

Figura 51 - Gráfico da evolução do parâmetro Área (m²) do Teste 01



Fonte: Autora (2024)

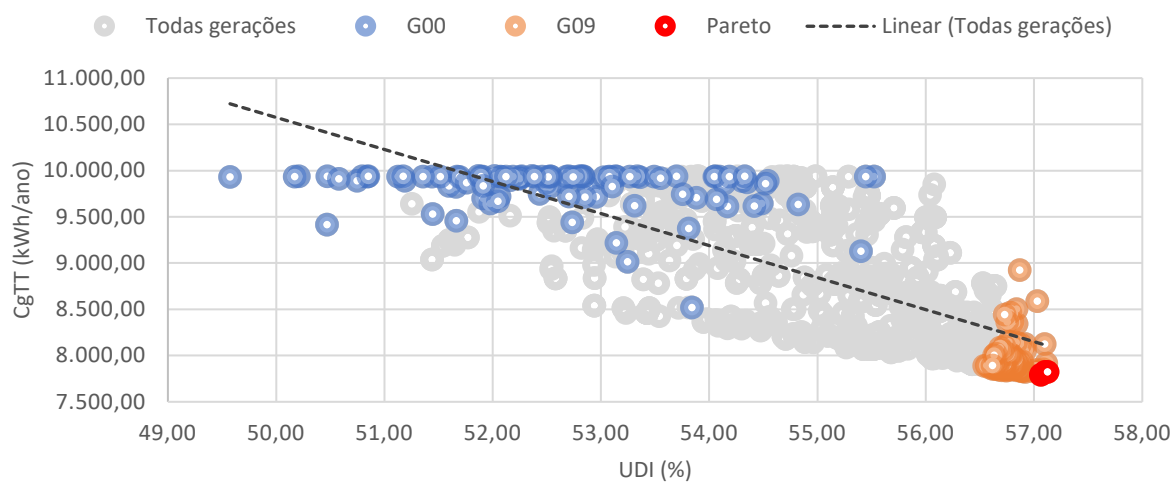
Figura 52 - Gráfico da evolução do parâmetro  $C_{illum}$  (kWh/ano) do Teste 01

Fonte: Autora (2024)

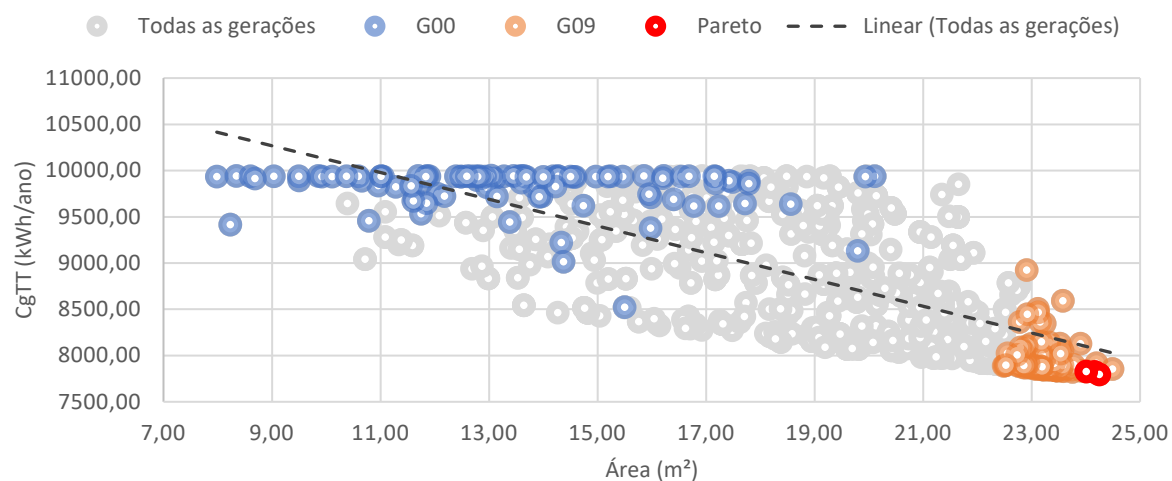
Ao analisar a relação entre os indicadores, é possível notar uma tendência de correlação negativa tanto para  $C_{gTT}$  (kWh/ano) x UDI (%) (Figura 53), indicando que conforme o  $C_{gTT}$  (kWh/ano) diminui, o UDI (%) aumenta, assim o consumo de energia para o resfriamento diminui. Isso aponta que quanto mais iluminação natural, haverá menos iluminação artificial, impactando no resfriamento. Quanto para  $C_{gTT}$  (kWh/ano) x Área ( $m^2$ ) (Figura 54) a linha tracejada mostra a tendência linear decrescente, desta forma quanto maior a área do brise, maior a proteção da abertura, menor o consumo de resfriamento. E ambas são fracas por apresentar dispersão dos valores ao entorno da Linha de tendência, indicando que há outro parâmetro com maior influência sobre o indicador  $C_{gTT}$  (kWh/ano).

Na relação UDI (%) x Área ( $m^2$ ) (Figura 55), os indivíduos tendem a ter uma correlação positiva forte, visto que os indivíduos se encontram próximos a linha de tendência, apontando que têm alta influência entre eles. Quanto maior a área do brise, mais iluminação entre 300 lux e 3000 lux incidirá no ambiente. Para compreender melhor a otimização do UDI (%), também foram analisados os valores complementares do indicador, o  $UDI_{low}$  (%) e  $UDI_{up}$  (%) (são percentuais de tempo que a luz natural incide na zona abaixo de 300 lux e acima de 3000 lux respectivamente). Os valores da primeira geração possuem alta variabilidade nos três parâmetros, entretanto ao final da otimização indica que os valores convergiram, pois há maior estabilidade nos mesmos, conforme a Tabela 44. No teste 01 (Figura 56) houve aumento do  $UDI_{up}$  (%) e UDI (%), além da redução do  $UDI_{low}$  (%), desta forma reduziu o tempo da iluminação superior a 3000 lux.

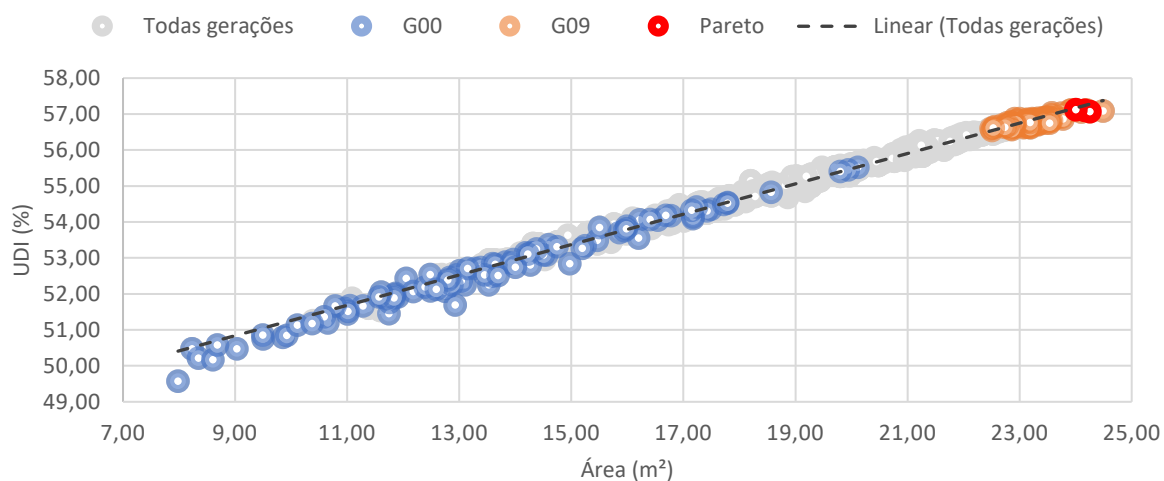
Figura 53 - Gráfico de dispersão CgTT (kWh/ano) x UDI (%) do Teste 01



Fonte: Autora (2024)

Figura 54 - Gráfico de dispersão CgTT (kWh/ano) x Área (m<sup>2</sup>) do Teste 01

Fonte: Autora (2024)

Figura 55 - Gráfico de dispersão UDI (%) x Área (m<sup>2</sup>) do Teste 01

Fonte: Autora (2024)

Tabela 44 - Estatística descritiva UDI (%) do Teste 01

Estatística descritiva						
	G00			G09		
	UDI <sub>low</sub> (%)	UDI (%)	UDI <sub>up</sub> (%)	UDI <sub>low</sub> (%)	UDI (%)	UDI <sub>up</sub> (%)
Valor mínimo	22,97	50,17	20,41	24,21	56,54	18,56
Primeiro quartil	23,69	53,39	24,7	24,30	56,87	19,03
Mediana	23,53	52,59	23,85	24,29	56,79	18,93
Média	23,54	52,65	23,81	24,29	56,80	18,92
Terceiro Quartil	23,4	51,91	22,91	24,26	56,70	18,84
Valor Máximo	24,10	55,52	26,72	24,39	57,12	19,22
Outliers	-	49,57	27,45	24,39	-	18,55
	-	-	-	-	-	18,53
	-	-	-	-	-	18,50

Fonte: Autora (2024)

Figura 56 – Boxplot do UDI<sub>low</sub> (%) e UDI<sub>up</sub> (%) do Teste 01

Fonte: Autora (2024)

## Teste 02

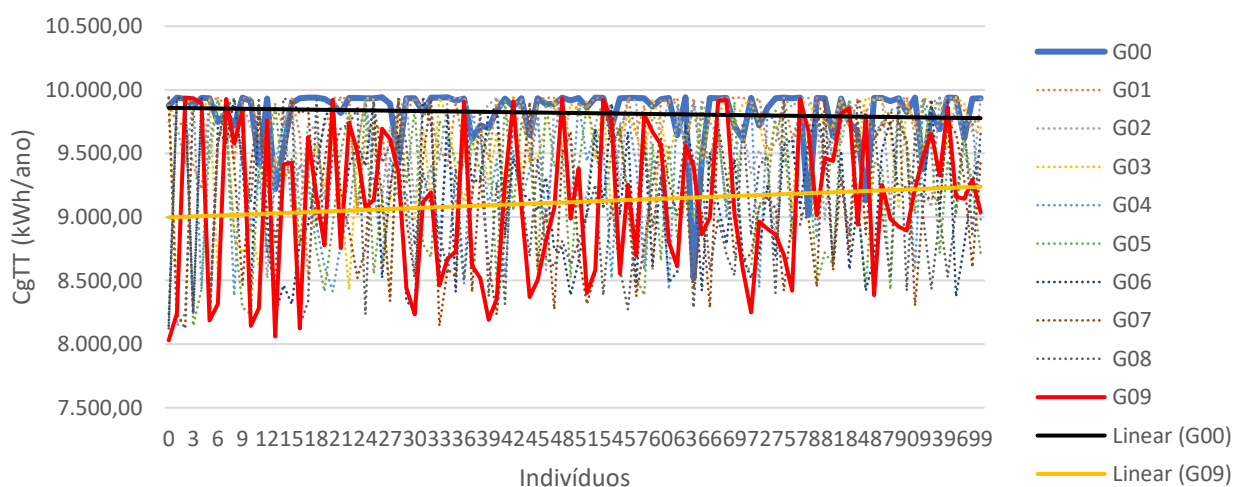
O Teste 02 foi otimizado com três indicadores: CgTT (kWh/ano), UDI (%) e Área (m<sup>2</sup>) e foi configurado para que tivesse 10 gerações com 100 indivíduos, totalizando uma população com 1000 indivíduos. Todos os indivíduos da geração 09 (última) pertencem a Fronteira de Pareto.

Ao analisar a evolução do indicador CgTT (kWh/ano) (Figura 57), é possível notar o alto grau de variabilidade entre os indivíduos. A primeira geração possui tendência de diminuição enquanto a última tendência de aumento. Os indivíduos da primeira geração encontram-se entre os valores 8.089,61kWh e 9.941,40kWh à medida que os da última geração estão entre 8.029,61kWh e 9.941,40kWh, a média da G00 é 9.817,35kWh e da G09 é 9.117,29kWh, indicando redução de 7,13% entre as gerações.

O indicador UDI (%) (Figura 58) também apresenta alta variabilidade em suas gerações, sendo que na primeira há tendência negativa e a última positiva. Os valores da G00 estão entre os valores 49,45% e 55,46%, os da G09 entre 47,72% e 56,59%, ao comparar a média de valores entre essas duas gerações (52,65% e 52,76%, respectivamente) houve aumento de 0,21% (valor relativo)<sup>15</sup>.

Os valores do indicador Área (m<sup>2</sup>) (Figura 59) possuem alto grau de variabilidade, sua primeira geração possui tendência positiva e a última negativa. A G00 apresenta faixa de valores entre 7,98 m<sup>2</sup> e 20,11 m<sup>2</sup>, enquanto a G09 os valores encontram-se entre 3,92m<sup>2</sup> e 22,72m<sup>2</sup>. Ao analisar a média de valores da G00 (13,54m<sup>2</sup>) com a G09 (13,48m<sup>2</sup>) houve redução de 0,46%.

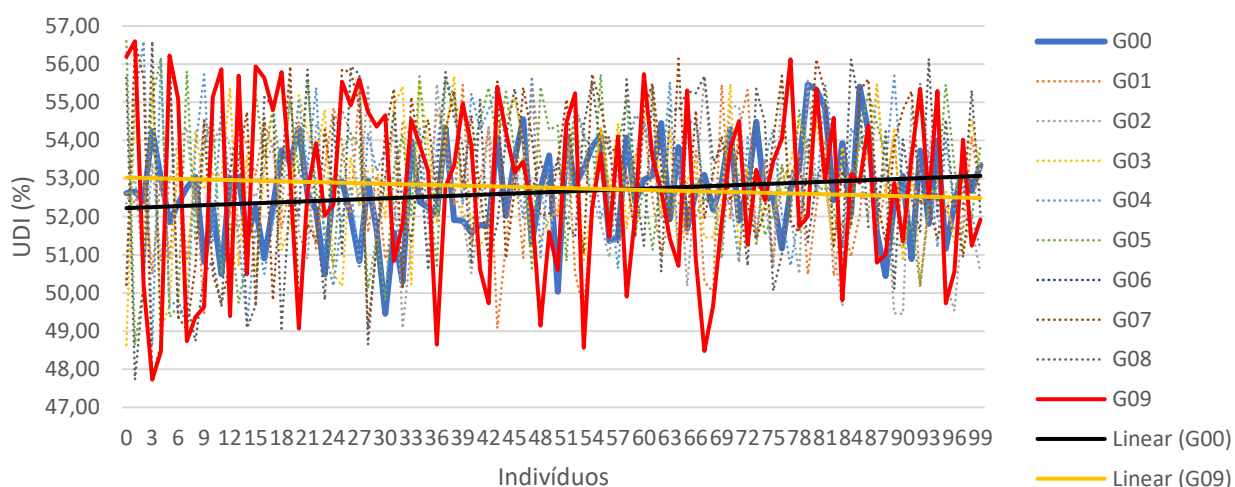
Figura 57 - Gráfico da evolução do indicador CgTT (kWh/ano) do Teste 02



<sup>15</sup> Valor absoluto: 0,11%.

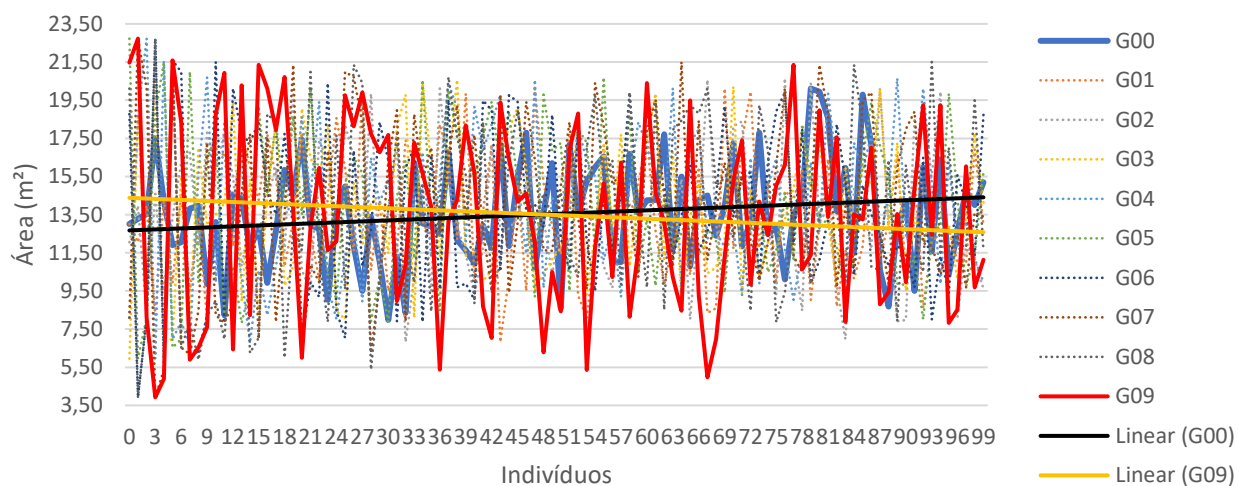
Fonte: Autora (2024)

Figura 58 - Gráfico da evolução do indicador UDI (%) do Teste 02

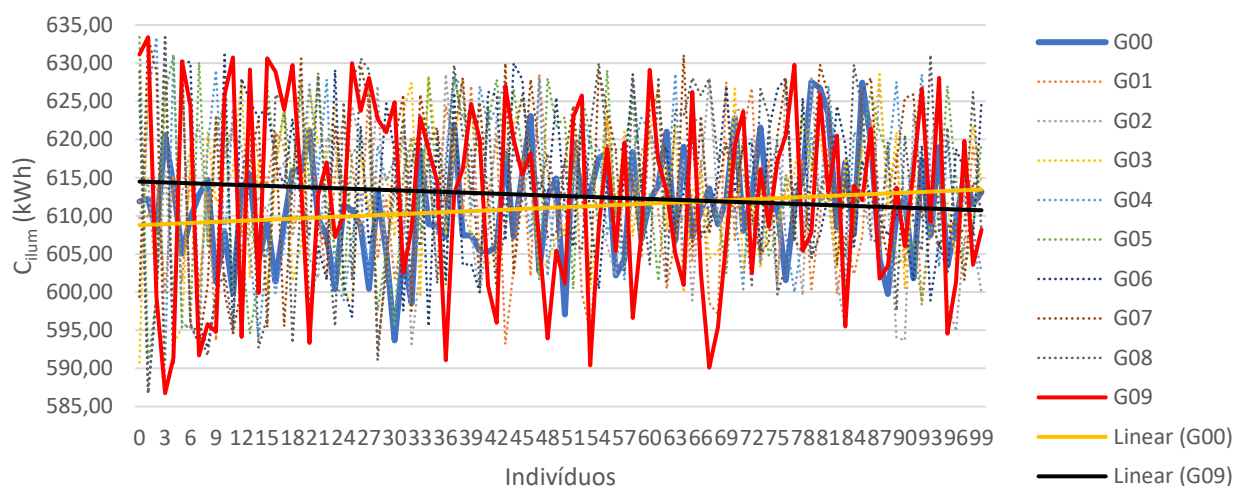


Fonte: Autora (2024)

Figura 59 - Gráfico da evolução do indicador Área (m²) do Teste 02



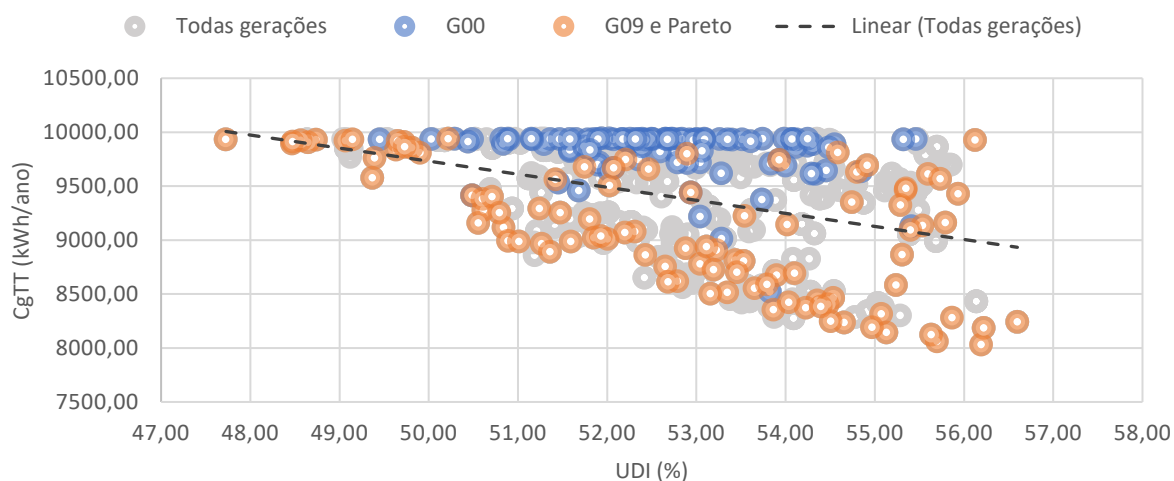
Fonte: Autora (2024)

Figura 60 - Gráfico da evolução do indicador  $C_{ilum}$  (kWh/ano) do Teste 02

Fonte: Autora (2024)

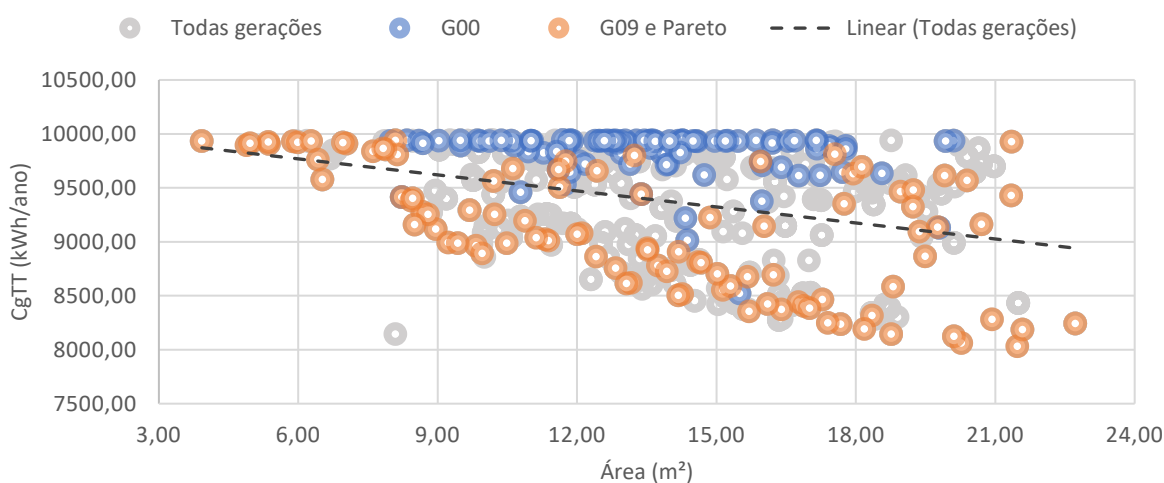
O comportamento do  $C_{ilum}$  (kWh/ano) (Figura 60) seguiu o mesmo padrão dos anteriores, os valores tiveram alta variabilidade no decorrer da otimização. Houve tendência positiva para a G00 e negativa para a G09. A faixa de valores para a G00 foi entre 593,67 kWh e 627,53 kWh, enquanto a da G09 foi entre 586,75 kWh e 633,40 kWh. Houve aumento de 0,24% da média de valores entre a G00 (611,11kWh) e G09 (612,61kWh).

Pela análise entre os indicadores é possível notar a semelhança de comportamento entre  $C_{gTT}$  (kWh/ano) x UDI (%) (Figura 61) e  $C_{gTT}$  (kWh/ano) x Área (m<sup>2</sup>) (Figura 62), ambos tendem a ter uma correlação negativa e fraca, pois os valores são inversamente proporcionais e estão dispersos em relação a linha de tendência das gerações. Indicando que o  $C_{gTT}$  (kWh/ano) diminuiu enquanto o UDI (%) e a Área (m<sup>2</sup>) aumentaram.

Figura 61 - Gráfico de dispersão  $C_{gTT}$  (kWh/ano) x UDI (%) do Teste 02

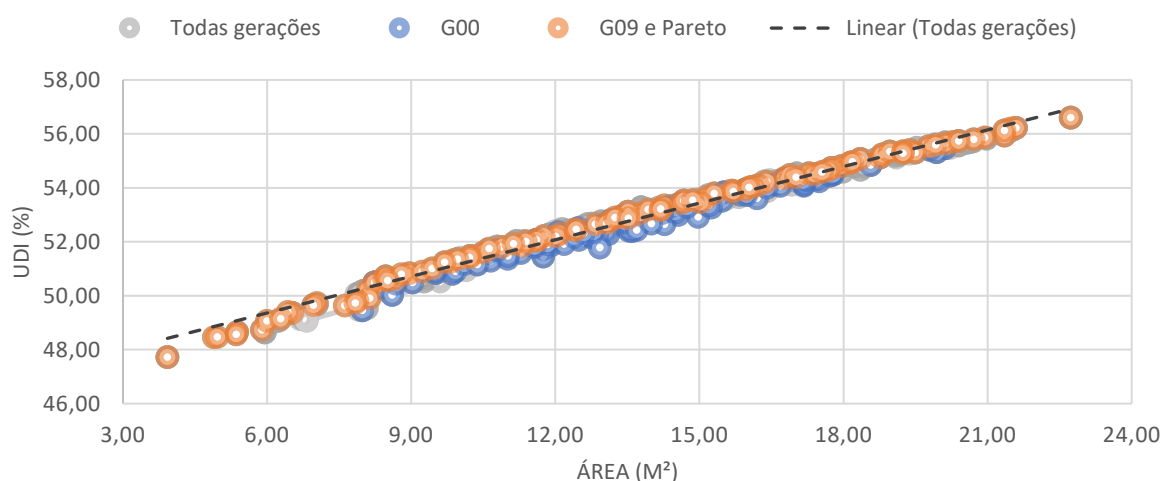
Fonte: Autora (2024)

Figura 62 - Gráfico de dispersão CgTT (kWh/ano) x Área (m<sup>2</sup>) do Teste 02



Fonte: Autora (2024)

Figura 63 - Gráfico de dispersão UDI (%) x Área (m<sup>2</sup>) do Teste 02



Fonte: Autora (2024)

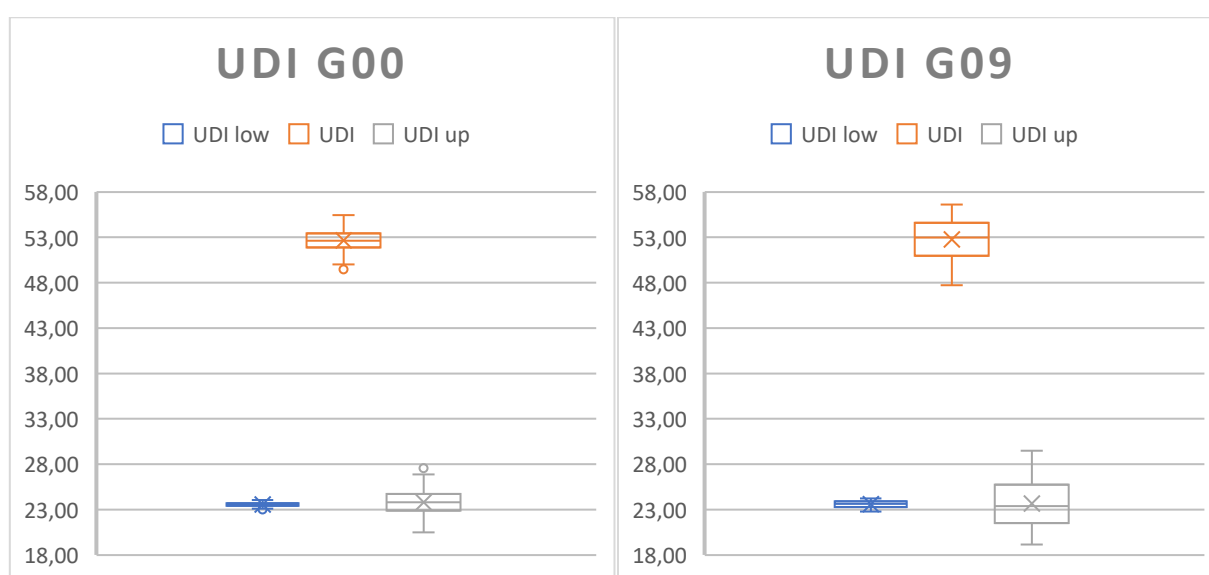
Porém ao verificar o comportamento entre UDI (%) e Área (m<sup>2</sup>) (Figura 63) indica que a correlação é positiva e forte, visto que os valores dos indivíduos estão próximos a linha de tendência das gerações. Mostrando que a alta influência entre eles. Em relação todos os valores do UDI (%) (Tabela 45 e Figura 64), é possível notar que houve maior dispersão dos valores da última geração, se comparada a primeira. Houve aumento do UDI (%) e UDI<sub>up</sub> (%), visto que na primeira geração 75% dos valores estão abaixo de 53,43% e 24,71% respectivamente, enquanto na última os valores estão abaixo de 54,60% e 25,73%.



Tabela 45 - Estatística descritiva UDI (%) do Teste 02

Estatística descritiva						
	G00			G09		
	UDI <sub>low</sub> (%)	UDI (%)	UDI <sub>up</sub> (%)	UDI <sub>low</sub> (%)	UDI (%)	UDI <sub>up</sub> (%)
Valor mínimo	23,11	50,03	20,48	22,78	47,73	19,16
Primeiro quartil	23,41	51,88	22,87	23,27	50,98	21,50
Mediana	23,53	52,63	23,82	23,64	52,99	23,38
Média	23,54	52,65	23,81	23,59	52,76	23,65
Terceiro Quartil	23,92	53,43	24,71	23,92	54,60	25,73
Valor Máximo	24,06	55,46	26,86	24,24	56,60	29,49
Outliers	23,00	49,45	27,55	-	-	-

Fonte: Autora (2024)

Figura 64 - Boxplot do UDI<sub>low</sub> (%) e UDI<sub>up</sub> (%) do Teste 02

Fonte: Autora (2024)

### Teste 03

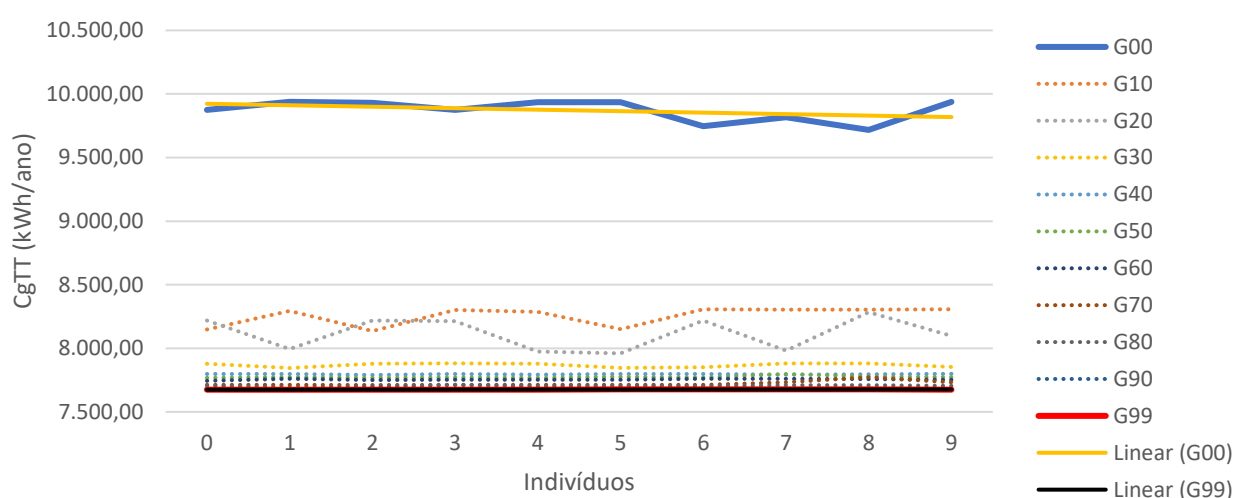
O Teste 03 otimizou dois indicadores, o CgTT (kWh/ano) e o UDI (%), porém ajustou a população. Mantendo o tamanho da população, 1000 indivíduos, este teste foi configurado para ter 100 gerações com 10 indivíduos cada. E os indivíduos 00, 01 e 02 da geração 99 (última) pertencem a Fronteira de Pareto. Para possibilitar melhor visualização dos gráficos, optou-se por selecionar a primeira e a última geração e uma geração a cada dez gerações para mostrar a evolução de cada indicador.

É possível observar que a evolução do indicador CgTT (kWh/ano) é por gerações (Figura 65), visto que cada geração possui sua própria faixa de valores (não se sobressaem) e os indivíduos possuem baixa variabilidade. Os indivíduos da G00 possuem taxa alta, ao contrário dos indivíduos da G99, porém ambos são estáveis. Os indivíduos da primeira geração encontram-se entre

9.717,40kWh e 9.938,28kWh, enquanto os da última geração entre 7.674,21kWh e 7.677,23kWh. Ao comparar a média de valores entre G00 (9.870,69kWh) e G09 (7.675,55kWh) houve redução de 22,24%.

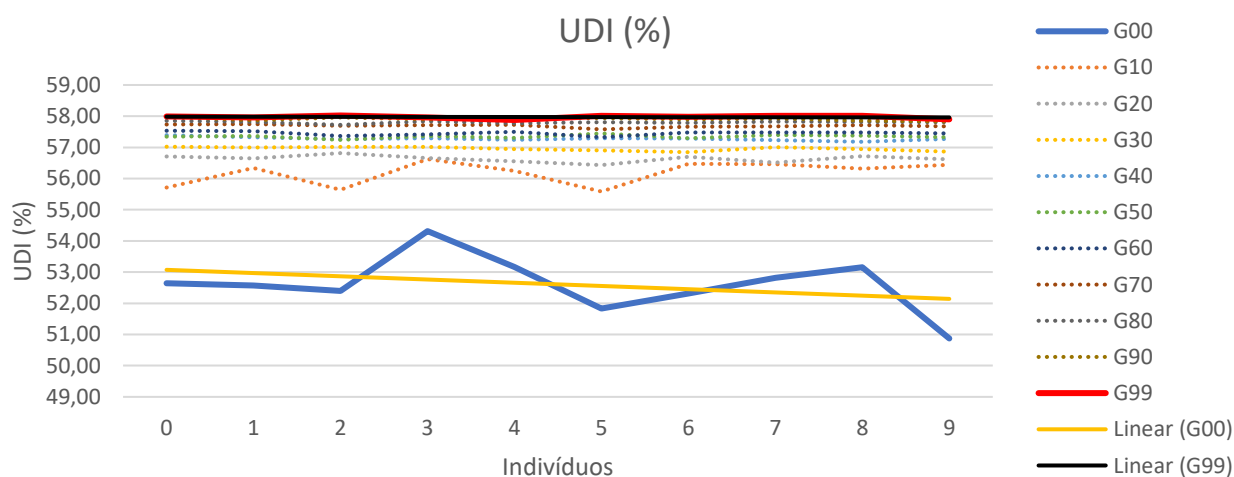
O indicador UDI (%) (Figura 66) segue o padrão de evolução do teste 03, por gerações. A G00 tem tendência a ser negativa com alta variabilidade, enquanto isso a G09 apresentou tendência estável com baixa variabilidade. A média de valores do G99 (57,97%) apresentou aumento de 10,18% (valor relativo)<sup>16</sup> comparado com a média da G00 (52,61%).

Figura 65 - Gráfico da evolução do indicador CgTT (kWh/ano) do Teste 03



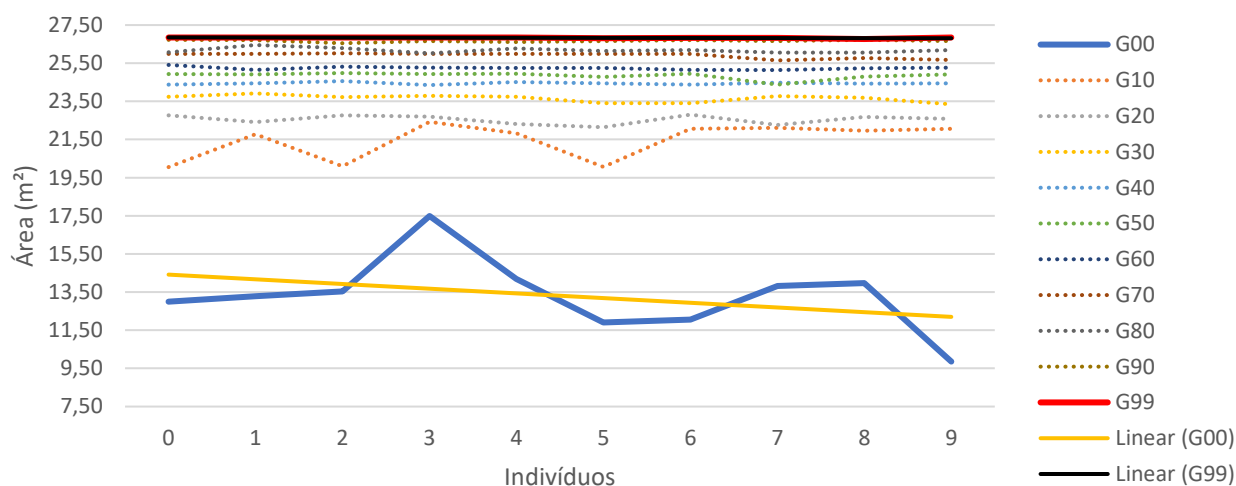
Fonte: Autora (2024)

Figura 66 - Gráfico da evolução do indicador UDI (%) do Teste 03

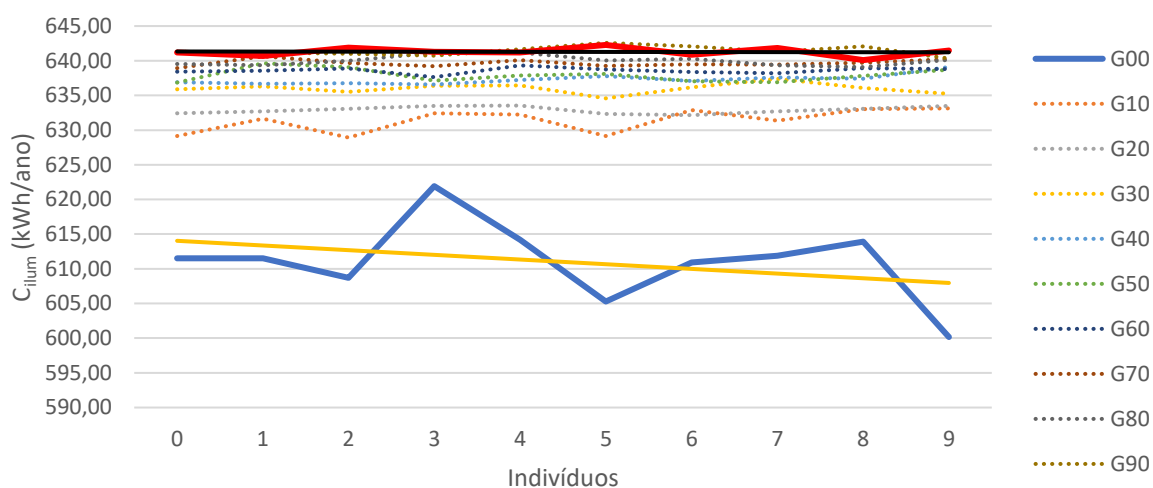


Fonte: Autora (2024)

<sup>16</sup> Valor absoluto: 4,77%.

Figura 67 - Gráfico da evolução do indicador Área (m<sup>2</sup>) do Teste 03

Fonte: Autora (2024)

Figura 68 - Gráfico da evolução do parâmetro  $C_{ilum}$  (kWh/ano) do Teste 03

Fonte: Autora (2024)

A Figura 67 apresenta a evolução do indicador Área (m<sup>2</sup>), a primeira geração (G00) indica tendência negativa com alta variabilidade e a última geração (G99) apresenta tendência estável com baixa variabilidade. A faixa de valores da G00 está entre 13,43m<sup>2</sup> e 17,49m<sup>2</sup>, apresentando média de 13,52m<sup>2</sup>, e os valores da G09 estão entre 26,76m<sup>2</sup> e 26,84m<sup>2</sup>, e sua média é 26,83m<sup>2</sup>, isso apresenta aumento de 101,61%.

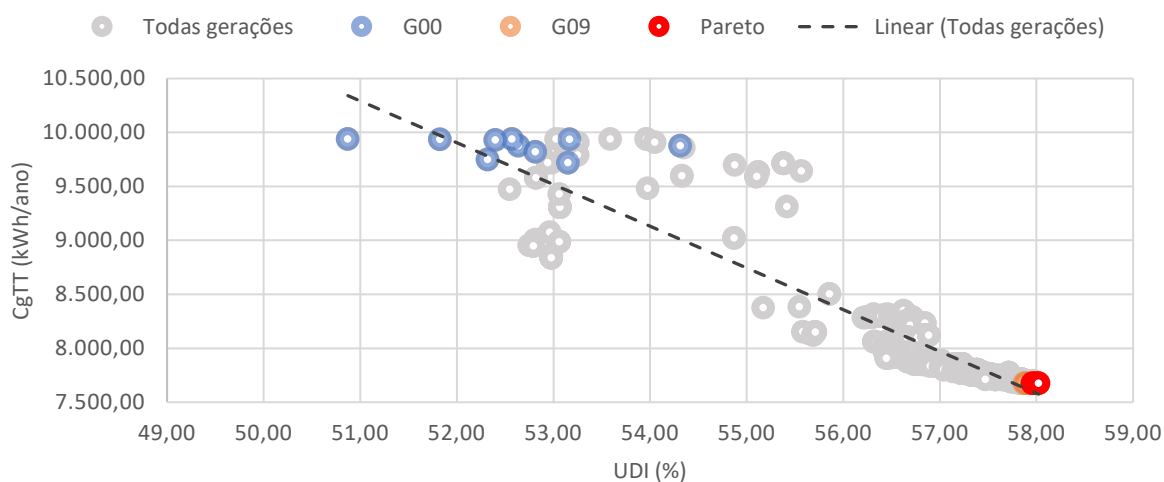
O gráfico do parâmetro  $C_{ilum}$  (kWh/ano) (Figura 68) mostra que a primeira geração (G00) possui tendência negativa com alta variabilidade, enquanto a última geração (G09) possui uma tendência estável com baixa variabilidade de valores. A G00 possui valor mínimo de 621,92 kWh e

máximo de 600,16 kWh, e a G09 valor mínimo de 640,09kWh e máximo de 642,27kWh. A média de valores para G00 é de 611,00kWh e para G09 é de 641,27, isso representa aumento de 4,95%.

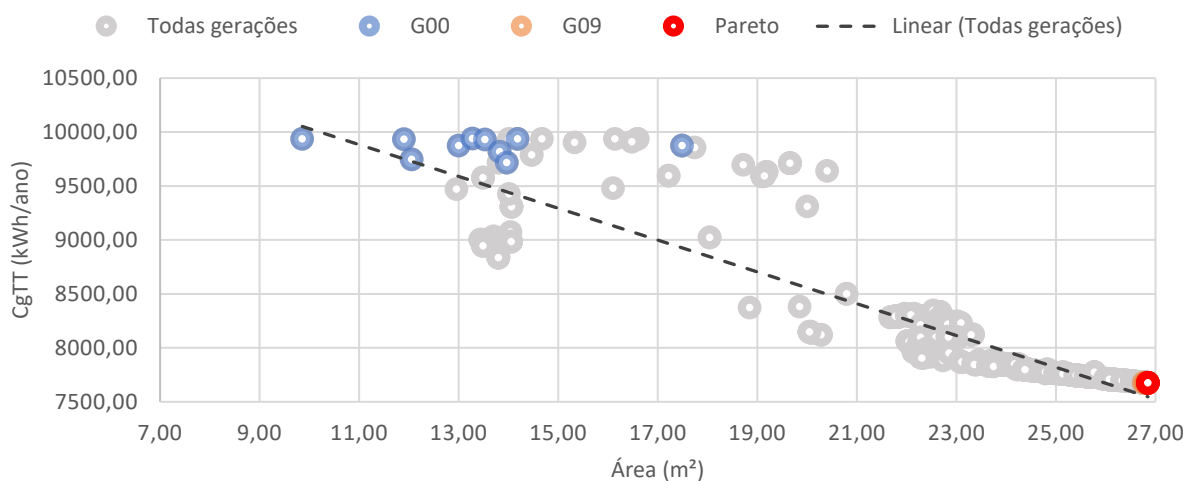
A relação entre os indicadores CgTT (kWh/ano) x UDI (%) e CgTT (kWh/ano) x Área (m<sup>2</sup>) são semelhantes (Figura 69 e Figura 70) possuem correlação forte. Quanto a dispersão dos pontos é irregular ao longo da linha de tendência, sendo mais dispersos nas primeiras gerações e convergindo para menor dispersão nas últimas gerações.

Já o gráfico da Figura 71 possui correlação positiva, porque à medida que aumenta o tempo de incidência do UDI (%) na zona, aumenta a área do brise. Além disso, possui intensidade forte visto que os indivíduos possuem menor dispersão. Pela Tabela 46 e Figura 72 é possível compreender melhor o comportamento da iluminação natural. A otimização deste teste permitiu que aumentasse o tempo de incidência do UDI<sub>low</sub> (iluminação abaixo do 300 lux) e UDI (iluminação entre 300 lux e 3000 lux) e diminuísse o tempo do UDI<sub>up</sub> (iluminação acima do 3000 lux).

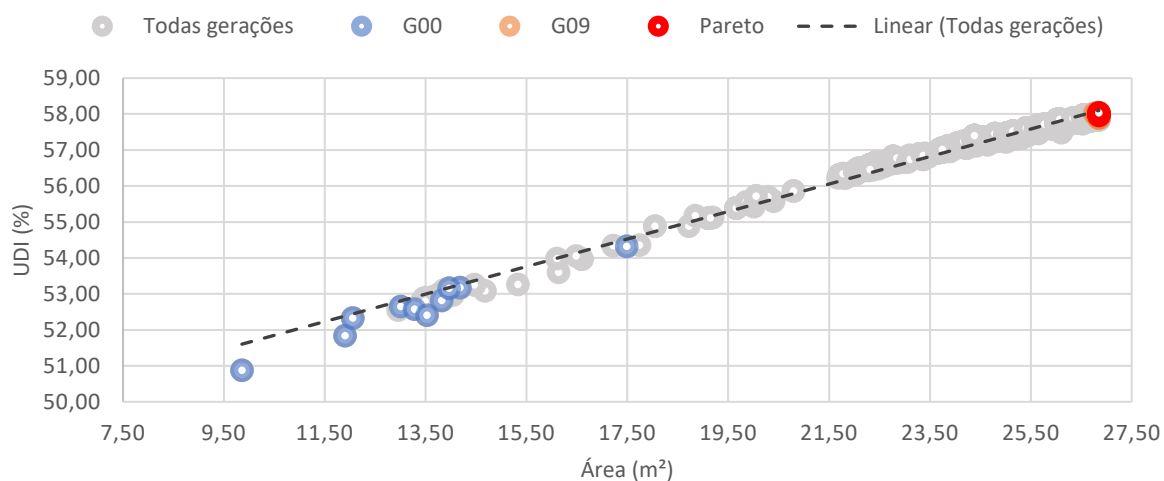
Figura 69 - Gráfico de dispersão CgTT (kWh/ano) x UDI (%) do Teste 03



Fonte: Autora (2024)

Figura 70 - Gráfico de dispersão CgTT (kWh/ano) x Área (m<sup>2</sup>) do Teste 03

Fonte: Autora (2024)

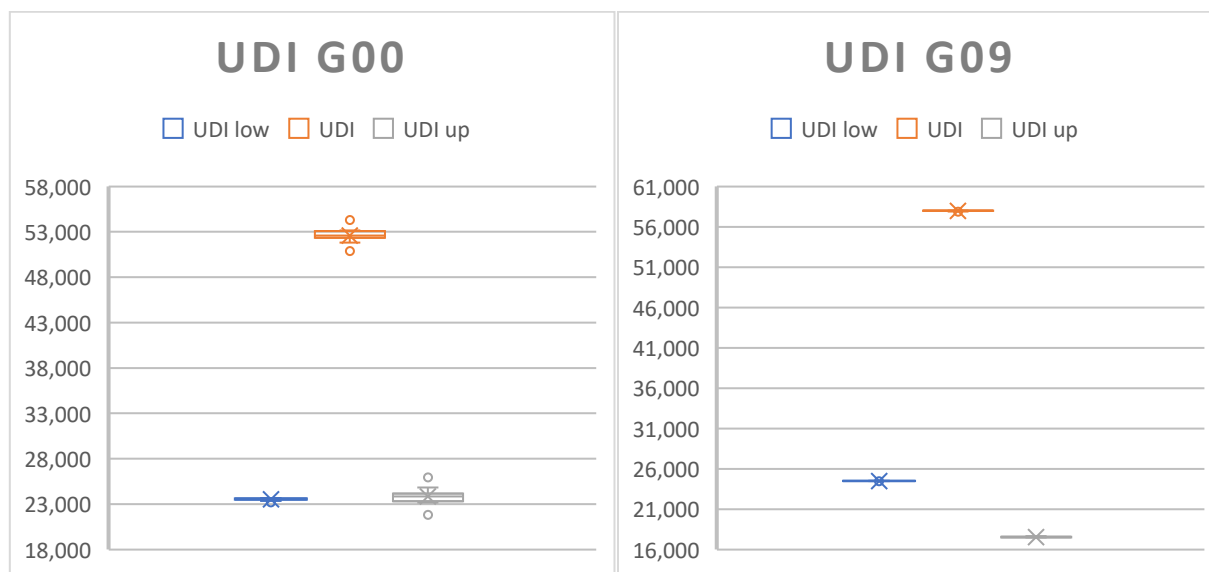
Figura 71 - Gráfico de dispersão UDI (%) x Área (m<sup>2</sup>) do Teste 03

Fonte: Autora (2024)

Tabela 46 - Estatística descritiva UDI (%) do Teste 03

Estatística descritiva						
	G00			G09		
	UDI <sub>low</sub> (%)	UDI (%)	UDI <sub>up</sub> (%)	UDI <sub>low</sub> (%)	UDI (%)	UDI <sub>up</sub> (%)
<b>Valor mínimo</b>	23,35	51,83	23,19	24,46	57,90	17,47
<b>Primeiro quartil</b>	23,48	52,34	23,31	24,48	57,96	17,50
<b>Mediana</b>	23,56	52,60	23,84	24,48	57,99	17,55
<b>Média</b>	23,54	52,61	23,85	24,48	57,97	17,55
<b>Terceiro Quartil</b>	23,62	53,07	24,14	24,50	58,01	17,58
<b>Valor Máximo</b>	23,65	53,17	24,82	24,51	58,02	17,65
<b>Outliers</b>	23,20	50,87	21,80	24,44	57,88	-
	23,88	54,31	25,93	-	-	-

Fonte: Autora (2024)

Figura 72 - Boxplot do  $UDI_{low}$  (%) e  $UDI_{up}$  (%) do Teste 03

Fonte: Autora (2024)

#### Teste 04

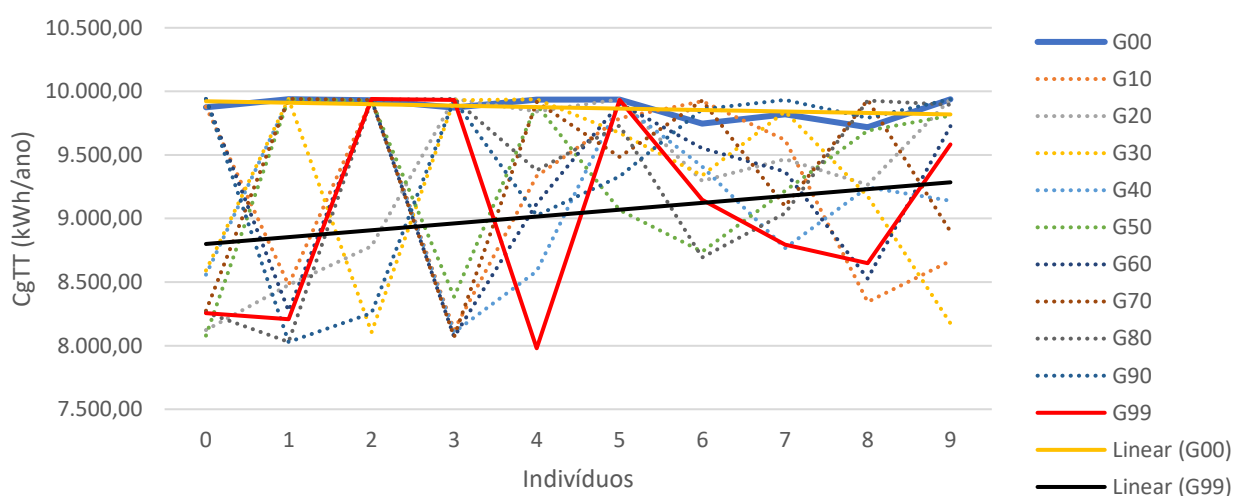
O Teste 04 tem como objetivo minimizar os três indicadores,  $CgTT$  (kWh/ano),  $UDI$  (%) e Área ( $m^2$ ) (igual ao Teste 02), por meio de 100 gerações com 10 indivíduos cada (igual ao Teste 03, mais gerações do que indivíduos), totalizando 1000 indivíduos na população. Em seu resultado os indivíduos 00, 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08 e 09 da geração 99 (última) compõem a Fronteira de Pareto. Da mesma forma que o Teste 03, os gráficos de evolução não contêm todas as gerações para melhorar a visualização, apenas a primeira, a última e uma geração a cada dez.

O gráfico de evolução do indicador  $CgTT$  (kWh/ano) (Figura 73) apresenta o mesmo comportamento do Teste 02, as gerações se sobrepõem. A primeira geração possui nível mais alto que a última geração, possui tendência a ser mais estável com baixa variabilidade. A última geração possui tendência positiva e alta variabilidade, seus valores são mais dispersos. Enquanto a primeira geração fica entre a faixa de 9.718,07kWh e 9.938,36kWh e última fica entre 7.979,63kWh e 9.940,28kWh. A média da G00 é de 9.870,40kWh e da G00 é de 9.042,39kWh, o que representa redução de 8,39%.

A Figura 74 mostra a evolução do indicador  $UDI$  (%), é possível notar tendência negativa com alta variabilidade tanto para G00 quanto para G09. A primeira geração possui o valor mínimo de 50,80% e máximo de 54,22%, e a última geração o valor mínimo de 48,39% e o máximo de 56,19%.

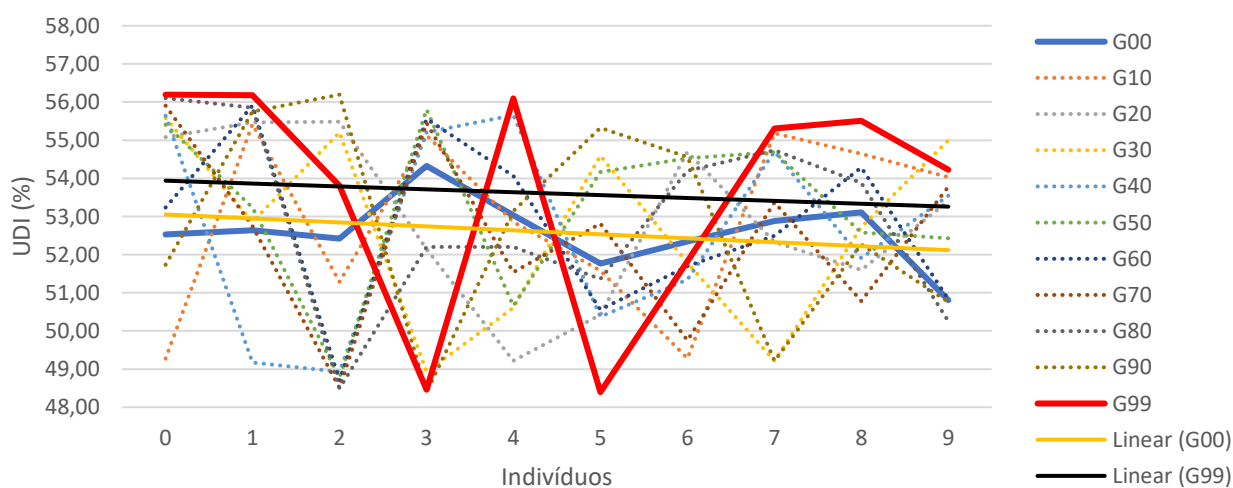
A média de valores entre G00 (52,60%) e G99 (54,22%) aumentou 1,89% (valor relativo)<sup>17</sup>. Pelo gráfico da Área (m<sup>2</sup>) (Figura 75), pode-se notar que a primeira geração e a última possuem tendência negativa com alta variabilidade. Seus valores mínimos são 9,85m<sup>2</sup> e 5,00m<sup>2</sup> e seus valores máximos são 17,49m<sup>2</sup> e 21,65 respectivamente. Houve aumento de 18,94% ao comparar as médias da G00 (13,31m<sup>2</sup>) e G99 (15,83m<sup>2</sup>).

Figura 73 - Gráfico da evolução do indicador CgTT (kWh/ano) do Teste 04



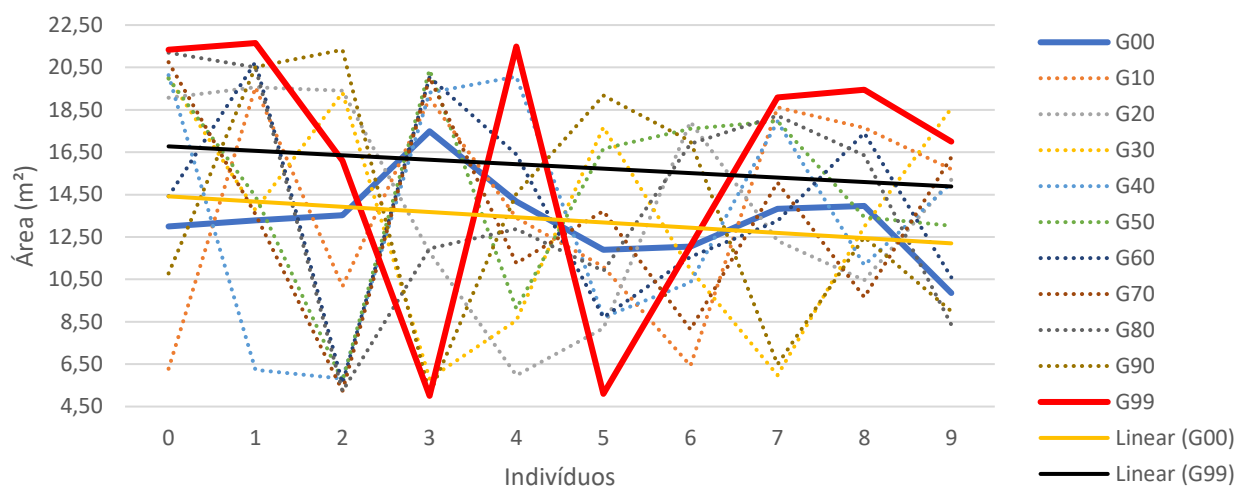
Fonte: Autora (2024)

Figura 74 - Gráfico da evolução do indicador UDI (%) do Teste 04

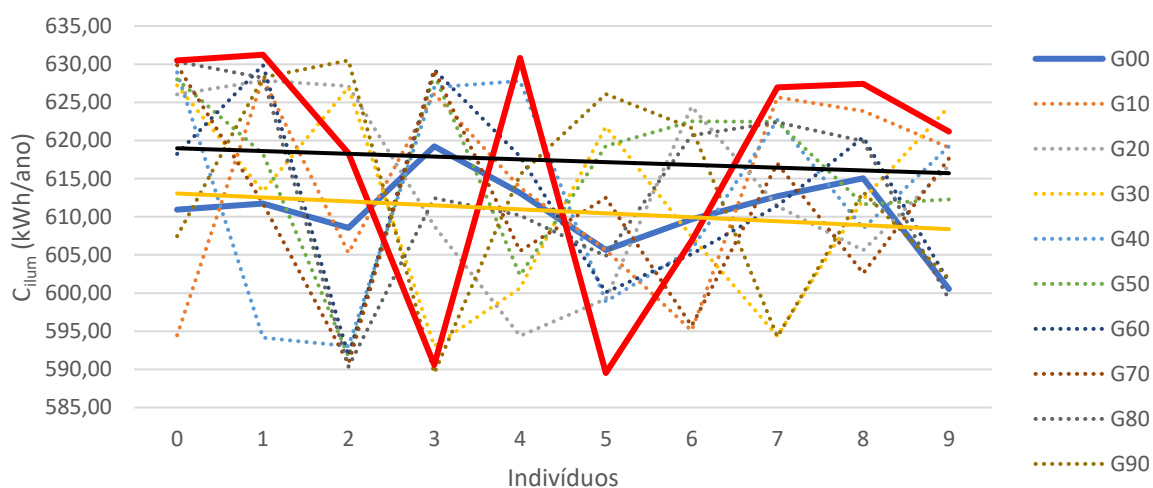


Fonte: Autora (2024)

<sup>17</sup> Valor absoluto: 1,62%.

Figura 75 - Gráfico da evolução do indicador Área (m<sup>2</sup>) do Teste 04

Fonte: Autora (2024)

Figura 76 - Gráfico da evolução do parâmetro C<sub>ilum</sub> (kWh/ano) do Teste 04

Fonte: Autora (2024)

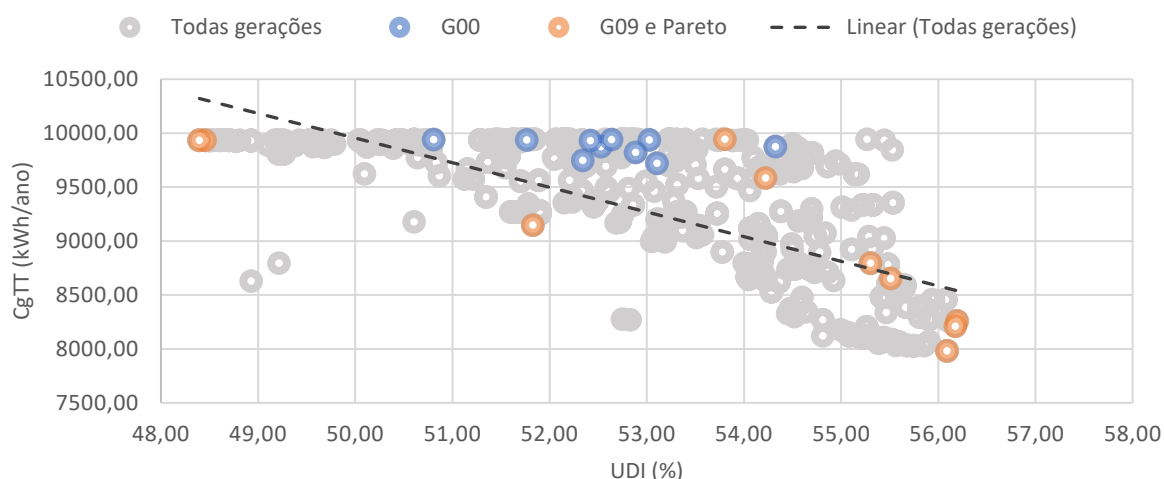
O gráfico do C<sub>ilum</sub> (kWh/ano) (Figura 76) também mostra a tendência da G00 e G99 é negativa com alta variabilidade. Os valores da primeira geração encontram-se entre 594,79kWh e 625,79kWh e os da última geração entre 589,52kWh e 631,24kWh. A média de valores da G00 é 610,72kWh e a da G99 é de 617,35kWh, isso representa aumento de 1,09%. Ao analisar a relação entre os indicadores C<sub>gTT</sub> (kWh/ano) x UDI (%) (Figura 77) e C<sub>gTT</sub> (kWh/ano) x Área (m<sup>2</sup>) (Figura 78) é possível notar comportamento semelhante, são correlações negativas e fracas, pois há muitos valores dispersos. Entretanto tendem a convergir nas últimas gerações.

O comportamento da relação UDI (%) x Área (m<sup>2</sup>) (Figura 79) é diferente, além de indicar uma correlação positiva, a relação tende a ser forte, apesar de alguns valores estarem dispersos, os



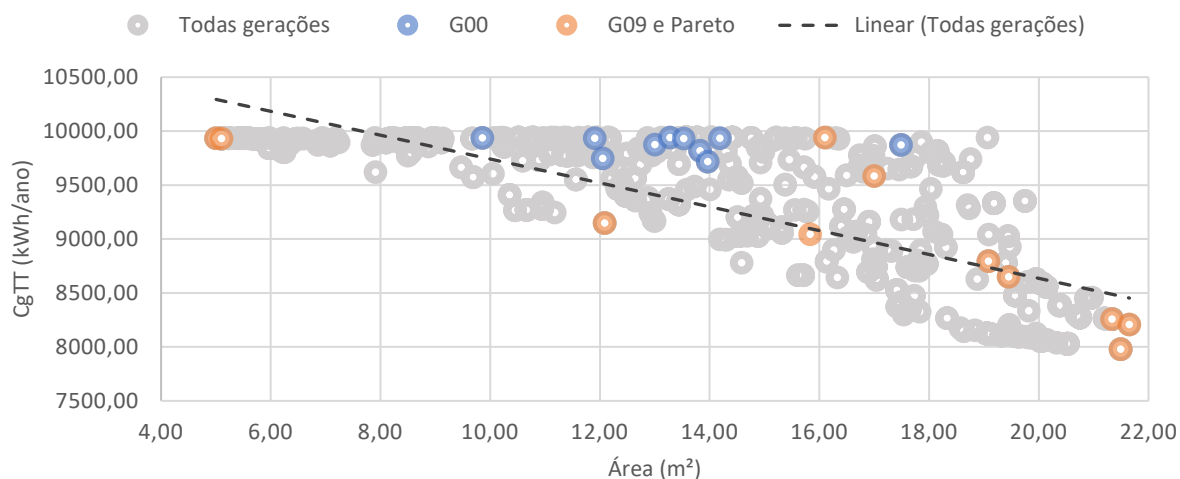
demais estão próximos a linha de tendência, apontando a influência que os indicadores têm na relação. Ao analisar o comportamento do UDI (%),  $UDI_{low}$  (%) e  $UDI_{up}$  (%) (Tabela 47 e Figura 80) entre a G00 e a G99 é possível ver a tendência de aumento de tempo do UDI (%) e  $UDI_{low}$  (%). Além disso houve diminuição da iluminação natural acima de 3000 lux, sendo que na última geração os valores do  $UDI_{up}$  (%) ficaram abaixo do  $UDI_{low}$  (%).

Figura 77 - Gráfico de dispersão CgTT (kWh/ano) x UDI (%) do Teste 04



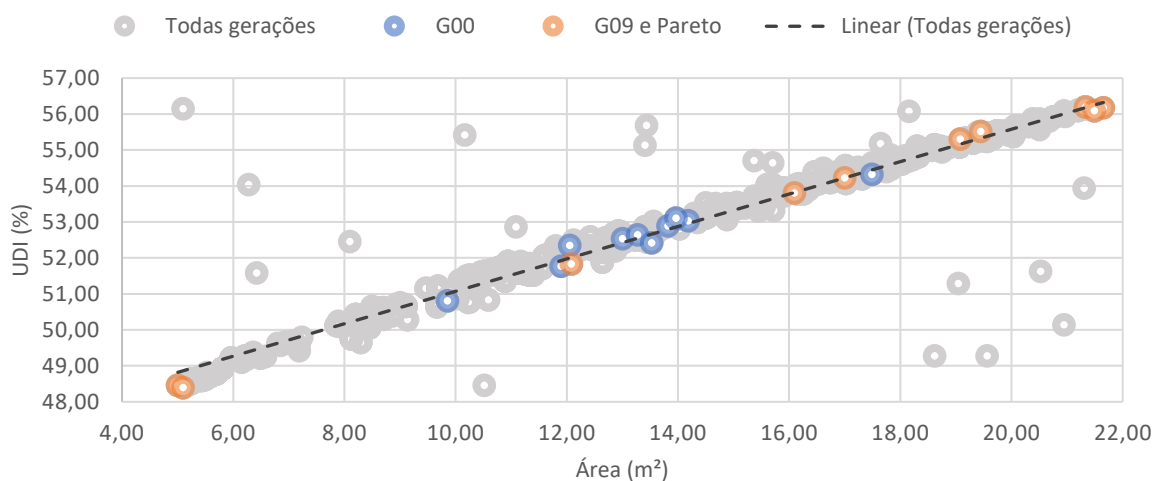
Fonte: Autora (2024)

Figura 78 - Gráfico de dispersão CgTT (kWh/ano) x Área (m<sup>2</sup>) do Teste 04



Fonte: Autora (2024)

Figura 79 - Gráfico de dispersão UDI (%) x Área (m<sup>2</sup>) do Teste 04



Fonte: Autora (2024)

Tabela 47 - Estatística descritiva UDI (%) do Teste 04

Estatística descritiva						
	G00			G09		
	UDI <sub>low</sub> (%)	UDI (%)	UDI <sub>up</sub> (%)	UDI <sub>low</sub> (%)	UDI (%)	UDI <sub>up</sub> (%)
Valor mínimo	23,35	51,77	23,22	22,87	48,40	19,63
Primeiro quartil	23,47	52,36	23,40	23,50	52,32	19,91
Mediana	23,56	52,59	23,86	23,95	54,76	21,29
Média	23,53	52,59	23,88	23,74	53,60	22,66
Terceiro Quartil	23,61	52,99	24,16	24,13	55,95	24,18
Valor Máximo	23,81	53,11	24,88	24,20	56,19	28,73
Outliers	23,20	50,81	21,87	-	-	-
	-	54,33	25,99	-	-	-

Fonte: Autora (2024)

Figura 80 - Boxplot do UDI<sub>low</sub> (%) e UDI<sub>up</sub> (%) do Teste 04



Fonte: Autora (2024)