

LAILA OLIVEIRA SANTANA

**OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DA GEOMETRIA DE
EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS ENERGETICAMENTE
EFICIENTES POR MEIO DE ALGORITMOS
GENÉTICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2016

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S232o
2016 Santana, Laila Oliveira, 1987-
Otimização multiobjetivo da geometria de edificações residenciais
energeticamente eficientes por meio de algoritmos genéticos / Laila
Oliveira Santana. - Viçosa, MG, 2016.
xii, 81f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Joyce Correna Carlo.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Modelos arquitetônicos - Geometria. 2. Otimização matemática.
3. Desempenho. 4. Algoritmos genéticos. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-
graduação em Arquitetura e Urbanismo. II. Título.

CDD 22 ed. 720.22

LAILA OLIVEIRA SANTANA

**OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DA GEOMETRIA DE
EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS ENERGETICAMENTE
EFICIENTES POR MEIO DE ALGORITMOS
GENÉTICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 26 de Outubro de 2016.

Denise Mônaco dos Santos

Luciana Bosco e Silva

Andressa Carmo Pena Martinez

Joyce Correna Carlo
(Orientadora)

À minha família.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe e aos meus avós, grandes incentivadores do conhecimento, por todo amor e apoio.

À minha orientadora Joyce, por me encorajar na área da eficiência energética e pelos inúmeros aprendizados.

Aos professores do PPGAU/UFV, pela base de conhecimento transmitida.

Ao professor Tibiriçá, pelas valiosas lições de ética e método científico.

À equipe administrativa do PPGAU pelo suporte, especialmente ao Déulio, pela disposição de ajudar.

Ao meu amigo Nayan, pelo carinho e amizade em todo o processo. E à Beyoncé, por fazer parte desta história.

Ao meu amigo Raphael, por gentilmente ceder seu tempo para me auxiliar.

Às professoras Luciana, Denise e Andressa, pela participação e contribuição nas etapas deste trabalho.

Ao CNPq e à CAPES, pelo estímulo ao desenvolvimento científico por meio do financiamento à pesquisa.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta pesquisa.

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	vii
Lista de Quadros.....	ix
Lista de Tabelas.....	ix
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	x
Resumo.....	xi
Abstract.....	xii
Capítulo 1.....	1
Introdução	
1. Objetivos.....	5
1.1. Geral.....	5
1.2. Específicos.....	5
2. Metodologia.....	6
A. Pré-processamento - Definição do problema.....	6
A. 1. Construção do modelo computacional.....	6
A. 2. Interoperabilidade.....	6
B. Execução da Otimização.....	6
C. Pós- processamento - Análise dos resultados.....	7
C.1. Interpretação dos resultados.....	7
C.2. Apresentação dos resultados.....	7
3. Estrutura do trabalho.....	7
4. Bibliografia.....	8
Capítulo 2.....	10
Impacto da geometria de edificações sobre o desempenho térmico de acordo com o método prescritivo do RTQ-R	
Resumo.....	10
Abstract.....	10
1. Introdução.....	11
2. Percepção do projetista sobre a geometria/espço.....	11
3. RTQ-R.....	13
4. Investigação do desempenho térmico da geometria de edificios residenciais de acordo com o RTQ-R.....	16

4.1. Objeto de estudo.....	16
4.2 Estabelecimento das variáveis e das constantes do modelo (UH).....	16
A. Constantes.....	16
A.1. Aberturas.....	16
A.2. Dimensões dos ambientes.....	17
A.3. Materiais e cores.....	18
B. Variáveis.....	18
B.1. Dimensões dos ambientes.....	18
5. Resultados e discussão.....	20
5.1. Análise por ambiente.....	20
5.2. Análise Geral da UH.....	24
6. Conclusões.....	27
7. Bibliografia.....	28
Capítulo 3.....	31
Processo de otimização termo energética de um modelo de uma zona térmica	
Resumo.....	31
Abstract.....	31
1. Introdução.....	32
2. O método OBS aplicado à eficiência energética.....	33
2.1. Ferramentas de pesquisa.....	33
2.2. Objeto de estudo.....	35
2.3. Etapas de Otimização.....	36
A. Pré-processamento.....	36
A.1. Construção do modelo da edificação e definição das variáveis.....	36
A.2. Formulação do problema.....	38
B. Execução da otimização.....	40
C. Resultados.....	41
3. Conclusões.....	42
4. Bibliografia.....	43
Capítulo 4.....	46
Otimização multiobjetivo da geometria de unidades habitacionais com integração do EnergyPlus a algoritmos genéticos	
Resumo.....	46

Abstract.....	46
1. Introdução.....	47
2. Objetivo.....	49
3. Princípios da Otimização Baseada em Simulação.....	49
4. Método.....	52
A. Pré-processamento - Criação do modelo para o estudo.....	52
A.1. Geometria.....	52
A.1.1. Restrições das áreas das janelas.....	53
A.1.2. Restrições e condicionais para a cobertura.....	55
A.2. Materiais e cores.....	55
A.3. Transcrição para a linguagem computacional.....	57
B. Execução da Otimização.....	58
B.1. Considerações acerca do desempenho computacional.....	60
B.2. Proposição de um <i>surrogate model</i>	61
C. Pós-processamento.....	62
C.1. Resultados: otimização da UH.....	62
C.2. Otimização - <i>surrogate model</i>	68
C.3. Convergência da otimização.....	70
C.4. Síntese das características geométricas.....	73
5. Conclusões.....	73
6. Bibliografia.....	75
Capítulo 5.....	79
Considerações finais	
Recomendações para trabalhos futuros.....	80

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1: O número de pesquisas em otimização apresentou grande crescimento a partir do ano de 2005, o que demonstra amplo interesse por parte das comunidades de pesquisa em arquitetura energeticamente eficiente. Fonte: Nguyen, Reiter e Rigo (2014).

4

Capítulo 2

Figura 1: Planta da UH.	19
Figura 2: UH com distribuição das variáveis x e y .	19
Figura 3: UH com distribuição das variáveis x , y e z .	19
Figura 4: GHR por F_{famb} para os ambientes de permanência prolongada individualmente.	20
Figura 5: Graus-hora de resfriamento por pé direito e fator de forma para cada APP (GHR x F_{famb} x PD).	22
Figura 6: Seleção de geometrias dos APP's (Sala).	23
Figura 7: Seleção de geometrias dos APP's (Dormitório 1).	23
Figura 8: Seleção de geometrias dos APP's (Dormitório 2).	23
Figura 9: Seleção de geometrias dos APP's (Escritório).	24
Figura 10: Variações geométricas da UH com seus respectivos GHR.	24
Figura 11: Impacto da geometria da UH sobre os GHR de acordo com o RTQ-R. Plantas distribuídas no gráfico através das variáveis x e y da UH (para os pés-direitos 2,5m e 4,5m).	25
Figura 12: Impacto da geometria sobre os GHR de acordo com o RTQ-R. Casos selecionados, com pés-direitos iguais a 2,5m e 4,0m.	25
Figura 13: Graus-hora por fator de forma da unidade habitacional.	26

Capítulo 3

Figura 1: Modelo da edificação com uma zona térmica.	36
Figura 2: Interface do ArchSim, referente às configurações das cargas internas.	37
Figura 3: Interface Rhino/Grasshopper.	37
Figura 4: Modelagem paramétrica da geometria.	38
Figura 5: Interface do Archsim.	38
Figura 6: Restrição da função, com eliminação das T_o superiores a 26°C, cálculo dos GHR e acoplamento ao motor de otimização Goat.	39

Figura 7: Configurações do Goat para a execução da otimização.	40
Figura 8: Desempenho energético de um modelo ao longo de um ano (8760 dados horários).	41
Figura 9: Desempenho energético final do modelo ao longo de um ano (8760 dados horários).	41

Capítulo 4

Figura 1: Processo de Otimização baseada em simulação. Fonte: adaptado de Shi et al. (2016).	51
Figura 2: Planta da UH com distribuição das variáveis para otimização.	52
Figura 3: UH base com distribuição das variáveis para otimização.	53
Figura 4: Offset em relação às arestas da parede, representado por uma distância d.	54
Figura 5: Offset da janela da sala, a partir de um retângulo definido (destacado em amarelo).	54
Figura 6: Utilização da função diversificação de parâmetros.	58
Figura 7: Interface do Octopus – primeiro teste de processo.	59
Figura 8: Interface do Octopus – otimização final.	59
Figura 9: Interface do Octopus - otimização do surrogate model. Em verde: melhores casos para GHa.	61
Figura 10: Resultados da otimização, com Pareto Front em destaque na área 1 (destaque em azul), e casos pouco eficientes na área 2.	62
Figura 11: Pareto Front com identificação de 3 casos selecionados fora desta curva.	62
Figura 12: Relação entre os 3 objetivos.	62
Figura 13: Relação entre as áreas das APP's e os GHa.	63
Figura 14: Relação entre as áreas das APP's e os GHr.	63
Figura 15: Relação entre áreas jan./área APP e os GHa.	64
Figura 16: Relação entre áreas jan./área APP e os GHr.	64
Figura 17: Casos selecionados do Pareto Front (vide área 1 em destaque no gráfico da Figura 10). Aberturas em laranja são referentes às Janelas tipo 2 e azul, Janelas tipo 3. *Os modelos circulosados em cinza, A, G e J não pertencem ao Pareto Front.	64
Figura 18: Casos selecionados das piores soluções para GHr e GHa simultaneamente (vide área 2 em destaque no gráfico da Figura 10). Aberturas em amarelo são referentes às janelas tipo 1, em laranja, à tipo 2, e em azul, a Janelas tipo 3.	66
Figura 19: Modelos selecionados: perspectivas e plantas.	67
Figura 20: Resultados da otimização - surrogate model.	69
Figura 21: Melhores e piores casos encontrados para GHa. Aberturas em amarelo são referentes às Janelas tipo 1, em laranja, à tipo 2, e em azul, a Janelas tipo 3.	70
Figura 22: Teste 3 (construído a partir da média do intervalo das variáveis das soluções B e Teste 1). GHr = 353°C/h e GHa = 1230°C/h.	71
Figura 23: Resultados da otimização e testes (Teste 1 e Teste 2)	72

Figura 24: Redefinição do Pareto Front, com acréscimo do Teste 1.	72
Figura 25: Ponto utopia hipotético (U, em verde) - $G_{Hr} \cong 100^\circ\text{Ch}$ e $G_{Ha} \cong 840^\circ\text{Ch}$.	72

LISTA DE QUADROS

Capítulo 4

Quadro 1: Principais etapas de um processo de OBS. Fonte: Nguyen, Reiter e Rigo (2014).	51
Quadro 2: Definição das variáveis.	53
Quadro 3: Materiais e cores do modelo. Fonte: INMETRO 2012 e ABNT, 2005.	56
Quadro 4: Síntese das características geométricas das soluções para a UH.	73

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2

Tabela 1: Classificação dos Graus-hora e dos CA de acordo com o RTQ-R para a ZB3. Fonte: RTQ-R (INMETRO, 2012).	14
---	----

Capítulo 3

Tabela 1: Classificação dos Graus-hora e dos CA de acordo com o RTQ-R para a ZB3. Fonte: RTQ-R (INMETRO, 2012).	39
---	----

Capítulo 4

Tabela 1: Médias mensais de temperaturas de bulbo seco ($^\circ\text{C}$) para o município de São Paulo. Fonte: Arquivo climático do município de São Paulo, indicado por Brasil (2013).	63
Tabela 2: Características físicas dos modelos selecionados. JS1, jD1 e jD2 e jE1 correspondem às áreas das aberturas da sala, dormitório 1, dormitório 2 e escritório, respectivamente.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Algoritmos genéticos
APP	Ambiente de permanência prolongada
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CT	Capacidade térmica
Ff	Fator de forma
Ffamb	Fator de forma do ambiente
GHa	Graus-hora de aquecimento
GHr	Graus-hora de resfriamento
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
OBS	Otimização baseada em simulação
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PD	Pé-direito do ambiente analisado
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
U	Transmitância Térmica
UH	Unidade habitacional autônoma
ZB	Zona biolimática
α	Absortância solar

RESUMO

SANTANA, Laila Oliveira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2016. **Otimização multiobjetivo da geometria de edificações residenciais energeticamente eficientes por meio de algoritmos genéticos.** Orientadora: Joyce Correna Carlo.

Há uma abordagem em ascensão nas comunidades científicas de tecnologia de edificações denominada *Otimização baseada em Simulação* (OBS). Esta tem como base o uso de algoritmos de otimização acoplados a programas de simulação. As técnicas de OBS têm demonstrado grande potencial para alcançar metas de projetos energeticamente eficientes, entretanto, estas são raramente utilizadas na prática de trabalho de engenheiros e arquitetos, sendo, em sua maioria, apenas estudadas em pesquisas acadêmicas. O presente estudo aborda um método de OBS utilizando ferramentas computacionais com interfaces amigáveis do ponto de vista dos arquitetos. São estudados problemas concernentes aos aspectos geométricos de edificações, dada a complexa relação destes com o desempenho termo energético do espaço construído. O estudo foi dividido em três etapas - a análise inicial por meio do RTQ-R indicou características geométricas de destaque; a otimização de uma zona térmica confirmou o potencial de interoperabilidade entre os programas e *plugins* relacionados ao processo e, por fim, a otimização da unidade habitacional destacou parâmetros geométricos de maior impacto para a cidade de São Paulo. Utilizou-se, para a otimização da unidade habitacional, os indicadores graus-hora de resfriamento (GHR) e de aquecimento (GHA) com temperaturas base de 26°C e 18°C, respectivamente. Identificou-se como parâmetros de maior impacto sobre o desempenho: área útil, inclinação da cobertura, áreas envidraçadas e áreas de vão de ventilação. Graus-hora mínimos próximos a 200°Ch de resfriamento e 800°Ch de aquecimento foram alcançados no *Pareto Front* e foi proposto um *surrogate model* para minimizar o dispêndio computacional no processo. Os resultados apontam que métodos de OBS aplicados a modelos com reduzido número de variáveis já são acessíveis para estudos preliminares e/ou gerais de projeto, do ponto de vista dos arquitetos. Modelos mais complexos podem confirmar os resultados através do *surrogate model* proposto e aplicado neste trabalho.

ABSTRACT

SANTANA, Laila Oliveira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October, 2016. **Multiobjective optimization of the shape of residential buildings using EnergyPlus and genetic algorithms.** Advisor: Joyce Correna Carlo.

A method called Simulation-based Optimization (SBO) is a rising approach in the scientific communities of building technology. It consists in the use of optimization algorithms coupled to simulation software. SBO techniques have shown great potential to achieve energy efficient design goals, however, they are seldom used by engineers and architects, and are mostly studied in academic research. The present research consists on a study of an SBO method using computational tools with friendly interfaces from the point of view of architects. Aspects related to the geometric aspects of buildings were studied, regarding their complex relationship with the thermal-energy performance. The study was divided into three stages - the initial analysis using the Brazilian Technical Quality Requirements for the Energy Efficiency of Residential Buildings (RTQ-R) indicated the prominent geometry characteristics; the optimization of a thermal zone confirmed the potential for interoperability between software and plugins related to the process and, finally, the optimization of the housing unit highlighted geometric parameters of higher impact for the city of São Paulo. The cooling and heating degree-hours (GHr and GHa) were used, with base temperatures of 26°C and 18°C, respectively, for the optimization of the housing unit, as the following parameters were identified as those with greater impact on the energy performance: area, roof inclination, glazed and ventilation area. A minimum of 200°C_h of cooling degree-hours and 800°C_h of heating degree-hours were achieved in the *Pareto Front* and a surrogate model was proposed to minimize the computational expenditure. The results indicate that SBO methods applied to models with a small number of variables are already accessible for preliminary and / or general design studies from the point of view of the architects. More complex models can confirm the results through the proposed surrogate model developed in this study.

Capítulo 1

Introdução

As edificações representaram 46,7% do total do consumo de energia elétrica no Brasil em 2011; o setor residencial chegou a 23,3% do total nacional, o setor comercial representou 15,4% do total e o setor público, 8,0% do total (EPE 2012 apud LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2013). Em relação às residências, responsáveis pela maior parcela, grande parte do consumo de energia elétrica destina-se a geladeiras, chuveiros, e lâmpadas; porém, mais recentemente, o ar-condicionado chegou a 20% na média nacional. Devido à não adequação das edificações ao clima local e com o aumento do poder aquisitivo da população, esse valor tende a crescer (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2013).

Neste sentido, foi instituído no Brasil, pela ELETROBRAS/PROCEL, o Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações, o PROCEL EDIFICA. Dentro deste programa, o PBE Edifica iniciou a etiquetagem voluntária de projetos e edifícios, com o objetivo de estimular construtoras e profissionais da área a adotarem os conceitos de eficiência energética em edificações (BRASIL, 2015). Atualmente, os regulamentos brasileiros para a etiquetagem de edificações são o RTQ-C (Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética em edificações comerciais) e o RTQ-R (Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética em edificações residenciais) (INMETRO, 2012).

As decisões de projeto têm grande influência no desempenho térmico e energético da edificação. Edifícios adequados ao clima e que fazem uso de estratégias naturais de iluminação, de aquecimento e resfriamento dos ambientes, apresentam grande potencial em reduzir a demanda de energia (LAMBERTS et al. 2014). Apesar do vasto avanço científico no campo da eficiência energética e de projetos bioclimáticos, a maioria dos arquitetos, até a última década, não integrava

esses conhecimentos à concepção do projeto (MACIEL, 2007). Em parte, isto deve-se à associação do trabalho do arquiteto apenas à elaboração do projeto arquitetônico, e a outros profissionais a responsabilidade sobre os projetos complementares. Trata-se de uma visão que compartimenta as resoluções projetuais. O ideal é que o processo possibilite que as respostas arquitetônicas aos múltiplos problemas produza, em vez de soluções superpostas, soluções integradas (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2013).

Em comparação com a abordagem tradicional de projeto arquitetônico, que foca no estudo da distribuição do espaço, o projeto voltado para o desempenho requer uma visão geral do desempenho dos edifícios, ao mesmo tempo em que assegura atendimento às funções estéticas e funcionais (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2013). Segundo Shi e Yang (2013) os métodos de projeto mais usuais são muitas vezes impotentes frente a estes critérios, por isso, é essencial a realização de pesquisas que visem a criação de métodos mais eficientes para o projeto de edifícios energeticamente eficientes.

Neste sentido, têm crescido o número de pesquisas e aplicações de métodos de projeto de edificações baseados em desempenho energético. Nas décadas recentes, programas de simulação computacional que lidam com sistemas complexos de engenharia surgiram como meios promissores. Na área da construção civil, são utilizados programas de simulação dinâmica para analisar os desempenhos térmico, energético e luminoso de um edifício em vista de metas específicas, como redução do consumo de energia, diminuição dos impactos ambientais e melhoria do conforto térmico (NGUYEN, REITER e RIGO, 2014).

Segundo Bucking, Zmeureanu e Athienitis (2013), os programas de simulação podem auxiliar no projeto de edifícios energeticamente eficientes, no entanto, o seu potencial é subutilizado se são praticados métodos de tentativa e erro para a resolução de problemas, pois, no caso das edificações, as questões envolvidas com a concepção são vastas, com muitas variáveis e restrições envolvidas. Embora o método clássico de tentativa e erro possa ser capaz de gerar soluções aceitáveis, é extremamente improvável que se chegue a soluções ideais de projeto (MAGNIER, 2008). Além disso, este método pode consumir enorme tempo e não há garantia de que se chegue a uma solução próxima do ideal. Isto porque as estratégias

bioclimáticas são, muitas vezes, conflitantes entre si (MAGNIER, 2008). A ventilação natural, por exemplo, pode ser um problema no inverno, enquanto é uma solução no verão. O mesmo ocorre com estratégias como o aquecimento solar por sombreamento, que têm suas necessidades invertidas conforme estes períodos do ano se alternam (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2013). Devido à complexidade neste processo, há um crescimento nas pesquisas de métodos mais eficientes para lidar com as diversas variáveis de projeto.

Uma abordagem conhecida como Método de Simulação Paramétrico pode ser utilizada para analisar e resolver problemas relacionados ao desempenho de um edifício nas etapas preliminares de projeto. Nela, o valor de uma variável de projeto é modificado continuamente enquanto todos os valores das outras variáveis são mantidos inalterados quando desejado. Devido às interações complexas e não-lineares entre as variáveis, muitas vezes o resultado é apenas uma melhoria parcial do desempenho (NGUYEN, REITER e RIGO, 2014). De acordo com Magnier (2008), embora esta abordagem possa gerar soluções aceitáveis, é improvável que se chegue a soluções ideais de projeto. Além disso, este procedimento pode consumir muito tempo sem que haja garantia de chegar a uma solução próxima do ideal.

Como alternativa a este método, há uma nova abordagem crescente nas comunidades de tecnologia da construção, que faz uso de algoritmos de otimização acoplados a programas de simulação. Segundo Bucking (2013), estes métodos têm demonstrado grande eficiência na resolução de problemas relacionados à eficiência energética de edificações. Para alcançar uma solução ótima para um problema (ou a solução perto da ideal), com menos tempo e trabalho, o modelo computacional passa por métodos iterativos, com progressivas melhoras até a aproximação de uma 'solução', ou seja, um ponto no espaço de busca que satisfaz uma condição de otimização. Por serem procedimentos com aspectos repetitivos, estes métodos geralmente são automatizados através de programação computacional. Tais métodos são denominados Programação Matemática ou Otimização Numérica. Quando acoplados a programas de simulação são conhecidos como Simulation-based Optimization ou Otimização Baseada em Simulação (OBS) (NGUYEN, REITER e RIGO, 2014).

Segundo Bucking, Zmeureanu e Athienitis (2013), há um crescente interesse

na aplicação de algoritmos de otimização nas pesquisas sobre o projeto de edifícios energeticamente eficientes. Mesmo que os fundamentos matemáticos de otimização sejam anteriores ao século XX, e as técnicas algorítmicas tenham sido desenvolvidas há mais de 50 anos, as pesquisas de otimização aplicadas ao projeto de edificações surgiram depois da criação de programas de simulação energética a partir da década de 1960. Na época, estes estudos foram limitados devido aos escassos recursos computacionais; só em meados dos anos 1980 e início dos anos 1990 pesquisas mais aprofundadas se tornaram viáveis.

Segundo Nguyen, Reiter e Rigo (2014), a partir da década de 2000, devido ao aumento no consumo de computadores portáteis, os estudos relacionados à otimização de edificações progrediram (Figura 1). Ainda assim, pesquisas recentes sugerem que métodos de otimização aplicados ao projeto de edifícios são, em sua maioria, utilizados em pesquisas acadêmicas, ainda não sendo amplamente utilizados na indústria da construção civil (Attia et al., 2013 apud Bucking, 2013). Apesar de se tratar de uma técnica ainda pouco difundida, Nguyen, Reiter e Rigo (2014) e outros profissionais da área (ATTIA, 2012) defendem que os métodos de Otimização Baseada em Simulação são, sem dúvida, abordagens promissoras para alcançar metas de projetos energeticamente eficientes, abrindo uma nova era de design para arquitetos e engenheiros.

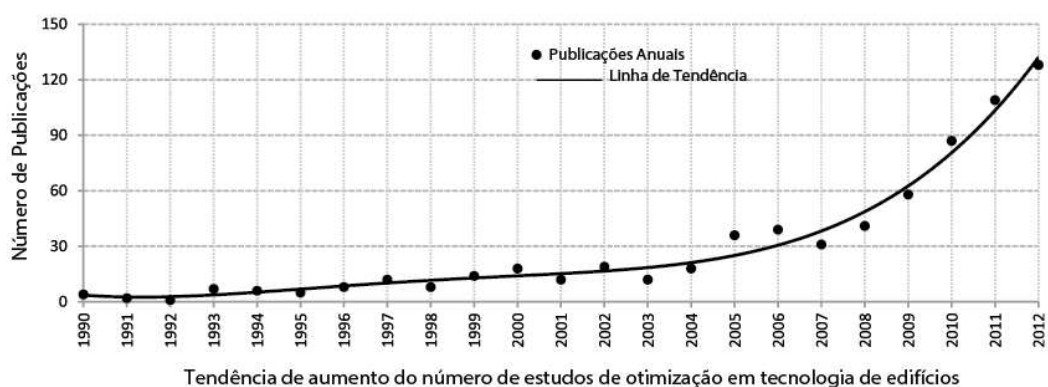


Figura 1: O número de pesquisas em otimização apresentou grande crescimento a partir do ano de 2005, o que demonstra amplo interesse por parte das comunidades de pesquisa em arquitetura energeticamente eficiente. Fonte: Nguyen, Reiter e Rigo (2014).

À medida que novas tendências emergem neste panorama, aumenta a necessidade dos profissionais da área se atualizarem e compreenderem as novas técnicas. Segundo Shi e Yang (2013), a maior parte dos arquitetos está desconectada destas novas abordagens e há atualmente uma grande distância entre estes e os engenheiros (civis, mecânicos, eletricitistas) em relação ao conhecimento de métodos de OBS. No levantamento bibliográfico realizado para esta pesquisa, foram encontrados raros casos de arquitetos com pesquisas sobre o tema. Um dos motivos para este fato é que são necessários conhecimentos especializados para formulação e interpretação dos problemas de otimização, os quais os arquitetos não têm conhecimento ou não estão habituados a lidar. Para que estes métodos possam suceder, é essencial que haja um diálogo entre todos os profissionais envolvidos no processo de projeto, e isso depende da disposição para estudar e aplicar estas novas técnicas.

1. Objetivos

1.1. Geral

Otimizar o desempenho energético da geometria de edificações residenciais, com base nos requisitos do PBE Edifica, por meio da integração de simulações termo energéticas a algoritmos genéticos.

1.2. Específicos

- Investigar o impacto da geometria de edificações sobre o desempenho termo energético de acordo com o método prescritivo do RTQ-R.
- Investigar a interoperabilidade dos recursos computacionais referentes à OBS com interfaces amigáveis a arquitetos, de acordo com o disposto por Shi e Yang (2013).
- Aplicar o processo de OBS em modelo de edificação residencial através das ferramentas computacionais estudadas.

2. Metodologia

As técnicas de otimização estão dentro de um ramo de pesquisa denominado Pesquisa Operacional (PO). Quanto ao método de otimização, a pesquisa abordará um problema multidimensional, dinâmico, e baseado em probabilidades (condições de contorno são definidas com base em probabilidades) com uso tanto de variáveis contínuas quanto discretas (*programação inteira mista*). O capítulo 2 realiza uma pré-análise à otimização, sem aplicação do processo computacional desta, para verificação da correlação entre parâmetros geométricos gerais a partir de uma equação de regressão. Os capítulos 3 e 4 seguem a mesma metodologia, dividida em três etapas, conforme definido por Nguyen, Reiter e Rigo (2014): Pré-processamento, Execução da Otimização e Pós-Processamento. Nos tópicos abaixo são apresentadas as tarefas realizadas em cada uma das etapas.

A. Pré-processamento - Definição do problema

A. 1. Construção do modelo computacional

- Transcrição geométrica dos protótipos para linguagem computacional, com definição das variáveis, dos intervalos das variáveis e das restrições;
- Definição da(s) função(ões) objetivo(s) tendo como parâmetro o valor em Graus-hora para resfriamento e Graus-hora para aquecimento;
- Definição da Zona Bioclimática, e seleção da carta bioclimática a ser utilizada para o processo de simulação energética.
- Determinação dos materiais construtivos de acordo com as recomendações do PBE Edifica/ RTQ-R.

A. 2. Interoperabilidade

- Realização da integração entre os programas de modelagem Rhino+Grasshopper e o EnergyPlus através do *plugin* Archsim.
- Seleção do motor de otimização.

B. Execução da Otimização

- Determinação do critério de término do processo;

- Monitoramento da convergência e identificação de possíveis mudanças nos critérios de término do processo;
- Detecção de erros ou falhas nas simulações energéticas.

C. Pós- processamento - Análise dos resultados

C.1. Interpretação dos resultados

- Análise da relação dos resultados da otimização para aquecimento e/ou para resfriamento;
- Análise dos modelos de residências resultantes do processo de otimização e análise geométrica/ formal destas.

C.2. Apresentação dos resultados

- Fornecimento de esquemas gráficos dos resultados da otimização;
- Após a conclusão, almeja-se fornecer ao Laboratório de Tecnologias em Conforto Ambiental e Eficiência Energética (Latecae - UFV) a plataforma de otimização, para possa ser utilizada por estudantes e professores, tanto como ferramenta didática, quanto como ferramenta de pesquisa. Desta forma, esta pode continuar a ser elaborada, com a criação de outras restrições e variáveis pelos usuários, tais como terreno, orientação do edifício, materiais, etc.

3. Estrutura do trabalho

Esta dissertação foi estruturada em cinco capítulos, sendo três (capítulos 2, 3 e 4) em formato de artigo. O primeiro capítulo consiste na introdução, o que inclui os objetivos, a justificativa e a relevância do trabalho.

O Capítulo 2 (Artigo 1) realiza pré-análise geométrica de modelos de residências, para verificar o impacto da forma sobre o desempenho termo-energético de acordo com o método prescritivo do RTQ-R, e pretende atender ao primeiro objetivo específico.

O Capítulo 3 (Artigo 2) mapeia a interoperabilidade dos recursos computacionais referentes à OBS com interfaces amigáveis do ponto de vista dos

arquitetos, de acordo com o disposto por Shi e Yang (2013). São determinadas as ferramentas a serem utilizadas no Capítulo 4, de maneira a atender o segundo objetivo específico.

O Capítulo 4 (Artigo 3) aplica o processo de OBS a uma edificação residencial unifamiliar cuja tipologia é comum no Brasil. Neste, são abarcados todos os processos descritos no método, do pré-processamento até a análise geométrica/formal dos modelos resultantes da otimização, a fim de atender o terceiro objetivo específico.

O Capítulo 5 é composto pelas conclusões gerais a partir da pesquisa, com identificação das limitações deste estudo e sugestão para trabalhos futuros.

4. Bibliografia

ATTIA, S. Computacional Optimisation for Zero Energy Building Design - Interviews with Twenty Eight International Experts. **International Energy Agency (IEA) Task 40: Towards Net Zero Energy Buildings Subtask B**; 2012.

BRASIL. ELETROBRÁS – PBE Edifica. **Programa Brasileiro de Etiquetagem**. Disponível em: <<http://pbeedifica.com.br/>>. Acesso em: 28 de set. 2015.

BRASIL. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanco Energético Nacional 2013 – Ano base 2012: Relatório Síntese**. Rio de Janeiro, 2013.

BUCKING, S. **Pathways to Net-Zero Energy Buildings: An Optimization Methodology**. PhD Thesis in Applied Science (Building Engineering) at Concordia University Montréal, Québec, Canada, 2013a.

BUCKING, S.; ZMEUREANU, R.; ATHIENITIS, A. An information driven hybrid evolutionary algorithm for optimal design of a Net Zero Energy House. **Solar Energy**, Elsevier, n. 96, jul. 2013b.

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Portaria nº18**, de 16 de janeiro de 2012. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais. Rio de Janeiro, 2012.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência Energética na Arquitetura**. Rio de Janeiro, PW, 2013. 3º Edição.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PEREIRA, C. D.; BATISTA, Juliana Oliveira. **Casa eficiente: Bioclimatologia e desempenho térmico**. Florianópolis: UFSC/LabEEE; 2010. v. 1. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/publicacoes/livros> > Acesso em: 28 de set. 2015.

MACIEL, A. A. **Bioclimatic Integration into the Architectural Design**. Ph. D. Thesis , University of NottinGHam. NottinGHam , England, 2007.

MAGNIER, L. **Multiobjective Optimization of Building Design Using Artificial Neural Network and Multiobjective Evolutionary Algorithms** . Ph.D Thesis in Applied Science (Building Engineering) at Concordia University Montréal, Québec, Canada, 2008.

NGUYEN, A.; REITER, S.; RIGO, P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, Elsevier, n.113, ago. 2014.

SHI, X.; YANG, W. Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects. **Automation in Construction**, Elsevier, n. 32, jan. 2013.

Capítulo 2

Impacto da geometria de edificações sobre o desempenho térmico de acordo com o método prescritivo do RTQ-R

Resumo

O objetivo do presente estudo é analisar o impacto da geometria de edificações sobre a eficiência termo-energética de acordo com o método prescritivo do Regulamento Técnico da Qualidade para a Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). Inicialmente, evidencia-se a importância de se estudar a ligação entre a forma geométrica do edifício e o conforto, o que passa pelo seu desempenho, visto que esta interfere sobre os fluxos de ar e também na incidência de luz e calor solar. Destaca-se que os métodos de projeto usuais baseiam-se no sentido da visão em detrimento dos outros meios de percepção. Por este ângulo, a utilização das ferramentas de desempenho termo-energético externalizam aspectos perceptivos não-visuais para a avaliação do projetista. Nesta linha, o método prescritivo do RTQ-R apresenta-se como ferramenta de rápida análise de desempenho. O estudo foi conduzido através de um modelo de unidade habitacional autônoma, por meio da qual verificou-se uma relação entre o pé-direito e fator de forma atrelada ao desempenho térmico. O uso de limitado número de variáveis discretas permitiu a visualização de grande parte dos modelos. No entanto, ressalta-se que as descontinuidades e incertezas relacionadas ao método prescritivo exigem que os dados obtidos sejam avaliados posteriormente, através de simulações em regime dinâmico.

Palavras-chave: Desempenho. RTQ-R. Geometria arquitetônica.

Abstract

The purpose of the present paper is to analyze the impact of the building shape on thermal performance according to the prescriptive method of the Technical Quality Requirements for the Energy Efficiency of Residential Buildings (RTQ-R) certification. Initially, this study highlights the link between the building shape and the thermal comfort, which includes the building performance, since that interferes with the air flow and also the incidence of sunlight and heat. It is noteworthy that usual design methods are based on the sense of sight and they lack the other means of perception. Regarding the perception, the use of energy performance tools externalizes important non-visual perceptual aspects for designers. Then, the prescriptive method of RTQ-R represents a quick tool for analyses. The model of study was a simple and autonomous housing unit, through which a relationship between the ceiling height and shape factor linked to thermal performance was observed. The use of limited number of discrete variables allowed the compared visualization of several models. However, it is noteworthy that the discontinuities and uncertainties related to the prescriptive method require evaluation of the results by dynamic simulations.

Keywords: Performance. RTQ-R. Building shape.

1. Introdução

Há, na comunidade científica, crescente número de estudos que abordam edifícios energeticamente eficientes, concebidos para racionalizar o uso da energia, o que evita comprometer o conforto dos usuários. Segundo Evins (2013), a resolução de problemas concernentes aos aspectos geométricos é um dos mais complexos na concepção destes edifícios, pois impactam espacial e funcionalmente, estrutural e esteticamente, além de energeticamente. Os aspectos geométricos/formais são mais complexos de serem associados a padrões como materiais construtivos, que apresentam características físicas mensuráveis ligadas a desempenho térmico (como capacidade térmica, transmitância térmica, etc). A disposição espacial de um edifício interfere diretamente sobre os fluxos de ar interior e exterior e também na incidência de luz e calor solar recebidos pelo edifício (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2013).

Em relação à arquitetura e à percepção humana, a associação entre texturas/cores e sensação térmica é conhecida e amplamente estudada (HELLER, 2012). Por outro lado, é complexo estabelecer a relação entre geometria espacial e sensação térmica. Além das múltiplas variáveis atreladas à geometria, a dificuldade se deve também às abordagens de projeto prevalecentes. A percepção geométrica/espacial está predominantemente ligada ao sentido da visão e sensações visuais há poucos séculos. De acordo com Schmid (2005), tal sentido não foi, o único cerne da compreensão do espaço arquitetônico na história da humanidade - a predominância do sentido da visão teve suas origens no Renascimento.

2. Percepção do projetista sobre a geometria/espço

Muitos dos conceitos atuais sobre o ato de projetar são provenientes de paradigmas estabelecidos no Renascimento. Para Alberti (1452, apud GÜRSOY et al., 2015), o projeto era um produto do pensamento, e era perfeitamente possível projetar formas inteiras na mente sem qualquer materialização, utilizando apenas o auxílio de desenhos. Com a invenção da projeção geométrica planar e da perspectiva, o desenho tornou-se essência da concepção de obras. A datar do Renascimento, houve a intensificação da abstração visual sobre o trabalho manual, e o desenho

substituiu os mestres construtores pelos projetistas. Até então, mestres eram artesãos, que trabalhavam diretamente com os objetos de abstração, enquanto os projetistas representavam as suas ideias com desenhos precisos o suficiente para serem executados posteriormente por operários (GÜRSOY et al., 2015).

Segundo Krznaric (2013), isto faz parte do início de uma 'tradição do olhar', onde a visão tornou-se o centro da percepção humana. Desde então, na cultura ocidental, a visão tem preponderância. Krznaric (2013) cita a evolução do planejamento dos jardins como exemplo da evolução da tradição do olhar. Segundo o autor, os primeiros jardins foram criados não apenas para efeitos estéticos, mas para transmitir significados por meio de alegorias. Na Europa medieval, por exemplo, as plantas eram frequentemente cultivadas por seu simbolismo devido à fragrância. Com o tempo, extinguiu-se o simbolismo do projeto em favor do prazer visual. No período clássico, houve início da ascensão da ênfase sobre a ordem visual e a simetria. Na sociedade contemporânea hipervisual, há a conformação a realidades de impressões superficiais (KRZNARIC, 2013).

Segundo Liebich (1994), se um projeto arquitetônico gera apenas pura linguagem visual, lhe faltará as interdependências entre os fatores que impactam o edifício como um todo. Assim, a arquitetura é mais que uma abstração visual - utilizar apenas o raciocínio visual geométrico pode limitar muitos aspectos relativos à percepção da edificação como um todo. Na formulação da solução, o projetista deve levar em consideração todos os sentidos. Por este ângulo, os programas de simulação do desempenho introduzem na análise outras dimensões da percepção não visual do espaço.

Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo estudar o impacto de parâmetros geométricos sobre o desempenho térmico de edificações. A ferramenta utilizada para o estudo foi o método prescritivo do RTQ-R - que foi concebido para a realização de análises simplificadas de eficiência energética de edificações residenciais -, por apresentar rapidez na modelagem e obtenção de resultados em relação aos métodos de simulação dinâmica. Após análise dos resultados a relevância da geometria foi avaliada a fim de criar diretrizes formais para a otimização de parâmetros geométricos baseada em simulações dinâmicas e algoritmos genéticos.

3. RTQ-R

O Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética Edificações Residenciais, RTQ-R foi utilizado para quantificar o desempenho termo energético neste estudo. O RTQ-R foi instituído em 2010 pela ELETROBRAS/PROCEL, por meio do Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações. Este regulamento tem como objetivo a determinação de uma Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) que designa o nível de eficiência energética de edificações (INMETRO, 2012).

O RTQ-R utiliza dois métodos de classificação do nível de eficiência: o método de simulação e o método prescritivo. O método de simulação baseia-se em um programa de simulação termo energética no processo de avaliação do edifício (INMETRO, 2012). Já o método prescritivo utiliza duas equações para análise da eficiência energética da envoltória, uma para condições de inverno e outra para condições de verão. As equações foram desenvolvidas a partir de uma regressão linear com base em simulações termo energéticas de dois modelos de residências, através do programa EnergyPlus (SORGATO, 2009). O método realiza análise por ambientes de permanência prolongada (APP's). Neste, são definidos padrões ocupação máxima de 2 pessoas por dormitório, com horários de uso tipicamente brasileiros.

Os indicadores da eficiência energética do método prescritivo do RTQ-R são o Consumo Relativo para Aquecimento (CA) – o consumo anual de energia pela área (kWh/m^2) necessária para aquecimento do ambiente durante o período de 21 h às 8h, todos os dias do ano, com manutenção da temperatura em 22°C – e Graus-hora para resfriamento (GHr) – somatório anual de graus-hora calculado para a temperatura operativa base de 26°C . Valores inferiores de CA e de GHr indicam maior eficiência, como mostrado no Quadro 1 para a Zona Bioclimática 3 (ZB3) (ABNT, 2005) : A denota o maior nível de eficiência e E o menor. O cálculo do valor dos GHr é feito a partir da equação 1, sendo que os CA são calculados com equação semelhante (INMETRO, 2012).

Eficiência	EqNum _{Resf}	Condição	Eficiência	EqNum _A	Condição
A	5	GhR ≤ 822	A	5	CA ≤ 6,429
B	4	822 < GhR ≤ 1.643	B	4	6,429 < CA ≤ 12,858
C	3	1.643 < GhR ≤ 2.465	C	3	12,858 < CA ≤ 19,287
D	2	2.465 < GhR ≤ 3.286	D	2	19,287 < CA ≤ 25,716
E	1	GhR > 3.286	E	1	CA > 25,716

Tabela 1: Classificação dos GhR e dos CA de acordo com o RTQ-R para a ZB3.
Fonte: RTQ-R (INMETRO, 2012).

$$\begin{aligned}
\text{GHr} = & (836,4188) + (1002,2853 \cdot \text{CTbaixa}) + (1248,7615 \cdot \text{acob}) + (-1042,8507 \cdot \text{somb}) + \\
& (-7,9675 \cdot \text{solo} \cdot \text{AUamb}) + (1007,6786 \cdot \text{apar}) + (2324,8467 \cdot \text{PD/AUamb}) + (-0,3032 \cdot \\
& \text{CTcob}) + (-77,7838 \cdot \text{AbS}) + (26,3363 \cdot \text{APambL} \cdot \text{Upar} \cdot \text{apar}) + (-0,0016 \cdot \text{AparInt} \cdot \\
& \text{CTpar}) + (-605,5557 \cdot \text{solo}) + (25,1879 \cdot \text{Ucob} \cdot \text{acob} \cdot \text{cob} \cdot \text{AUamb}) + (-830,6742 \cdot \\
& \text{Fvent}) + (34,1620 \cdot \text{AUamb}) + (-3,3292 \cdot \text{SomApar}) + (16,9856 \cdot \text{AAbo} \cdot (1 - \text{somb})) \\
& + (70,1758 \cdot \text{AAbL} \cdot \text{Fvent}) + (-0,0426 \cdot \text{CTpar}) + (-54,1796 \cdot \text{AAbS} \cdot (1 - \text{somb})) \\
& + (14,1195 \cdot \text{APambN} \cdot \text{Upar} \cdot \text{apar}) + (-114,4985 \cdot \text{pil}) + (399,0021 \cdot \text{Pambo}) + (2,4466 \cdot \\
& \text{AAbN} \cdot \text{somb}) + (-379,5777 \cdot \text{AbN}) + (738,1763 \cdot \text{PambN}) + (-4,2304 \cdot \text{APambN}) \\
& + (5,5988 \cdot (\text{Ucob} \cdot \text{acob}/\text{CTcob}) \cdot \text{AUamb}) + (-6,1829 \cdot \text{cob} \cdot \text{AUamb}) + (-200,9447 \cdot \\
& \text{CTalta}) + (-103,1092 \cdot \text{Ucob}) + (3,8400 \cdot \text{APambS} \cdot \text{Upar} \cdot \text{apar}) + (431,9407 \cdot \text{PambL}) \\
& + (16,2740 \cdot \text{AparInt}) + (-20,4181 \cdot \text{PD} \cdot \text{AUamb}) + (126,6339 \cdot \text{PambS}) + (51,1530 \cdot \\
& \text{AAbS} \cdot \text{Fvent}) + (55,4249 \cdot \text{AAbo} \cdot \text{Fvent}) + (79,2095 \cdot \text{AAbN} \cdot \text{Fvent}) + (15,3351 \cdot \\
& \text{APambo} \cdot \text{Upar} \cdot \text{apar}) + (26,0925 \cdot \text{APambS}) + (-34,7777 \cdot \text{AAbN} \cdot (1 - \text{somb}))
\end{aligned}$$

Equação 1

Sendo:

AbL, AbO, AbN e AbS: variáveis binárias que definem a existência de aberturas voltadas a Leste, Oeste, Norte e Sul, respectivamente;

AAbL, AAbO, AAbN e AAbS (m²): áreas de aberturas voltadas a Leste, Oeste, Norte e Sul, respectivamente;

APambL, APambo, APambN e APambS (m²): áreas de paredes externas do ambiente voltadas a Leste, Oeste, Norte e Sul, respectivamente;

AparInt (m²): área das paredes internas (excluindo as aberturas);

AUamb (m²): área útil do ambiente;

acob (adimensional): absortância da superfície externa da cobertura;

apar (adimensional): absortância externa das paredes externas.

Caltura: coeficiente de altura (razão entre o pé-direito e a área útil do ambiente);

cob: variável binária que define se o ambiente possui fechamento superior voltado para o exterior;

CTalta e CTbaixa [kJ/(m²K)]: variáveis binárias que definem se os fechamentos dos ambientes possuem capacidade térmica acima de 250kJ/m²K e abaixo de 50kJ/m²K, respectivamente.

CTcob [kJ/(m²K)]: capacidade térmica da cobertura.

CTpar [kJ/(m²K)]: média ponderada da capacidade térmica das paredes externas e internas do ambiente pelas respectivas áreas;

Fvent (adimensional): fator das aberturas para ventilação;

isol: variável binária que representa a existência de isolamento nas paredes externas e coberturas.

PambL, PambO, PambN e PambS (m²): variáveis binária que indica a existência de paredes externas do ambiente voltadas para o Leste, Oeste, Norte e Sul, respectivamente;

PD (m): pé-direito;

pil: variável binária que define o contato externo do piso do ambiente com o exterior através de pilotis;

solo: variável binária que define o contato do piso do ambiente com o solo ;

SomAparext: somatório das áreas de parede externa do ambiente;

somb: variável que define a presença de dispositivos de proteção solar externos às aberturas.

Ucob [W/(m²K)]: transmitância térmica da cobertura;

Upar [W/(m²K)]: transmitância térmica das paredes externas;

vid: variável binária que indica a existência de vidro duplo no ambiente;

volume (m³): volume do ambiente.

A eficiência energética é classificada a partir da relação dos GHr e CA com equivalentes numéricos, como mostrado no Quadro 1. Em seguida, os pesos regionais são estabelecidos para cada ZB. A Equação 2 apresenta os pesos da eficiência da envoltória para aquecimento e resfriamento.

$$\mathbf{EqNumEnv} = 0,64 \times \mathbf{EqNumEnvResfr} + 0,36 \times \mathbf{EqNumEnvA} \quad \text{Equação 2}$$

Sendo:

- **EqNumEnv:** equivalente numérico da envoltória;
- **EqNumEnvResfr:** equivalente numérico da envoltória para resfriamento;
- **EqNumEnvA:** equivalente numérico da envoltória para aquecimento.

4. Investigação do desempenho térmico da geometria de edifícios residenciais de acordo com o RTQ-R

4.1. Objeto de estudo

O objeto de estudo é a influência da forma geométrica sobre o desempenho térmico das edificações. Para a análise, foi criado um modelo de unidade habitacional autônoma de média renda, baseada nos padrões estabelecidos por Tavares (2006). A casa está localizada no município de Viçosa-MG, Zona Bioclimática 3, e, desta forma, utilizou-se restrições presentes no Código de Obras do Município.

A UH é formada por um único pavimento constituída pelos ambientes: 1 sala, 2 dormitórios, 1 escritório, 1 banheiro, 1 cozinha, 1 corredor. Considerou-se que no entorno da casa não há presença de obstáculos que causem sombreamento sobre os fechamentos e as aberturas. Algumas características da edificação permaneceram constantes para que aquelas ligadas à forma fossem avaliadas. Partiu-se da premissa de que a avaliação isolada de parâmetros da edificação só pode ser realizada quando os demais parâmetros (que não serão analisados) são considerados eficientes, a fim de evitar o mascaramento de resultados (CARLO, 2008). Por isso, as constantes deste modelo seguem o necessário para atingir o nível A de acordo com o RTQ-R. A seguir, são discutidas as constantes e variáveis estabelecidas para o modelo.

4.2 Estabelecimento das variáveis e das constantes do modelo (UH)

A. Constantes

A.1. Aberturas

De acordo com o RTQ-R, ambientes de permanência prolongada devem possuir percentual de áreas mínimas de aberturas para ventilação. O não atendimento

a este pré-requisito implica em no máximo nível C no equivalente numérico da envoltória do ambiente para resfriamento. A orientação das aberturas foi mantida fixa, e equivalente a 17% da área do piso do seu respectivo ambiente, a fim de atender, simultaneamente, o mínimo disposto no Código de Obras¹ de Viçosa e no RTQ-R.

Para a Zona Bioclimática 3, o RTQ-R dispõe que a UH deve possuir ventilação cruzada proporcionada por sistema de aberturas compreendido pelas aberturas externas e internas, sendo que portas de acesso principal e de serviço não são consideradas como aberturas para ventilação. “O projeto de ventilação natural deve promover condições de escoamento de ar entre as aberturas localizadas ao menos duas diferentes fachadas (opostas ou adjacentes) e orientações da edificação, permitindo o fluxo de ar necessário para atender condições de conforto e higiene”; “Caso não possua ventilação cruzada, a UH atingirá, no máximo, nível C no equivalente numérico da envoltória para resfriamento” (INMETRO, 2012). As aberturas do modelo cumprem o prescrito pelo regulamento, conforme Figura 1.

Ainda de acordo com o RTQ-R, o acesso à iluminação natural em ambientes de permanência prolongada deve ser garantido por uma ou mais aberturas para o exterior. “A soma das áreas de aberturas para iluminação natural de cada ambiente deve corresponder a no mínimo 12,5% da área útil do ambiente” e “o não atendimento a este pré-requisito implica em, no máximo, nível C nos equivalentes numéricos da envoltória do ambiente para resfriamento para aquecimento e para refrigeração” (INMETRO, 2012). Assim, todos os ambientes da UH utilizam como padrão janelas de abrir 90° (ou giro) com 1 ou duas folhas, abertura para iluminação natural de 90% e abertura de ara ventilação natural de 90%. O *somb* ($somb = 0,2$), indicador de sombreamento de aberturas que determina ângulos mínimos de beirais para Norte, Sul, Leste e Oeste, foi também mantido constante.

A.2. Dimensões dos ambientes

As áreas dos ambientes de ocupação transitória da unidade habitacional, permaneceram constantes, pois estes não são adicionados à média da classificação

1 O mínimo exigido pelo Código de Obras é 1/6 da área do piso (vão da abertura), arredondado para 17%, sem desconto das esquadrias ou consideração de potencial de iluminação ou ventilação.

geral do RTQ-R, mas afetam na etiqueta geral quanto à ventilação cruzada da UH. No regulamento, são considerados ambientes de ocupação transitória: cozinha, lavanderia ou área de serviço, banheiro, circulação, varanda aberta ou fechada com vidro, solarium, garagem, dentre outros. A cozinha e o banheiro permaneceram com dimensões de 3m x 3,5m e 3m x 1,5m, respectivamente. Todas as portas da UH possuem dimensões de 2,10m x 0,8m.

A.3. Materiais e cores

Os pré-requisitos de transmitância térmica, capacidade térmica e absorvância solar das paredes externas e coberturas de ambientes de permanência prolongada foram atendidos de acordo com a Zona Bioclimática em que a edificação se localiza conforme o disposto pelo RTQ-R, para atendimento ao nível A. Selecionou-se materiais construtivos entre os mais frequentemente utilizados em edificações residenciais no Brasil, de acordo com o Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes e Coberturas (INMETRO, 2012) e NBR 15220 (ABNT, 2005). As paredes apresentam transmitância térmica (U) de 1,85 W/m²K e capacidade térmica (CT) de 161 kJ/m²K; e a cobertura, transmitância térmica (U) de 1,79 W/m²K e capacidade térmica (CT) de 185 kJ/m²K. É considerado que a UH possui cor clara nas paredes externas, com $\alpha = 0,2$; assim como a cobertura com $\alpha = 0,4$. Considera-se que a casa possui laje do tipo radier, e que a variável binária *solo* tem valor 1. O método prescritivo do RTQ-R não considera nos cálculos a inclinação da cobertura, somente condiciona a APP a ter contato com o exterior.

B. Variáveis

B.1. Dimensões dos ambientes

Foram realizados testes de modificações geométricas apenas quanto aos ambientes de permanência prolongada (APP). De acordo com o RTQ-R, APP's são os ambientes que apresentam ocupação contínua por um ou mais indivíduos, incluindo sala de estar, sala de jantar, sala íntima, dormitórios, escritório, sala de TV ou ambientes de usos similares aos citados. O Código de Obras de Viçosa restringe as áreas mínimas dos compartimentos de edifícios residenciais segundo a destinação ou

atividade: 6,00 m² para a função de dormir ou repousar; 9,00 m² para a função de estar ou lazer; 4,00 m² para a função de preparo de alimentos.

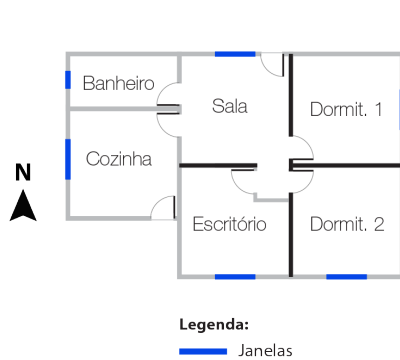


Figura 1: Planta da UH.

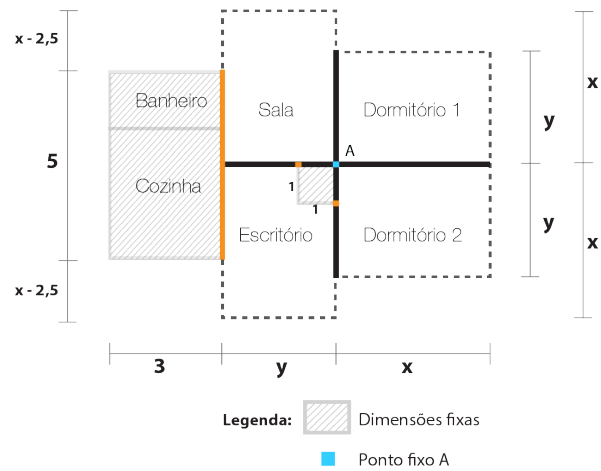


Figura 2: UH com distribuição das variáveis x e y.

O modelo foi definido a partir de um ponto âncora A no encontro entre os ambientes de permanência prolongada, conforme ilustrado nas Figuras 1 e 2. Foram definidas 3 variáveis, duas em planta e uma na altura do pé-direito (Figuras 2 e 3). Então, determinou-se os posicionamentos dessas variáveis, de modo que houvesse equilíbrio da exposição solar dos ambientes, de acordo com a orientação, com norte perpendicular à fachada principal.

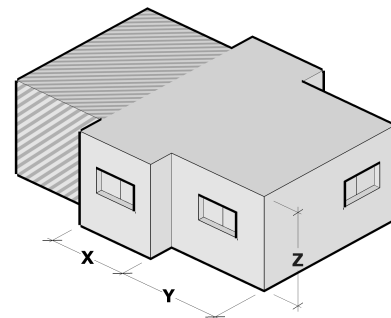


Figura 3: UH com distribuição das variáveis x, y e z.

Realizou-se todas as combinações geométricas possíveis com os modelos, totalizando 400 amostras de casas. Utilizou-se intervalos de variáveis discretas em módulos de 0,40 m para x e y; sendo $2,5 < x < 6,1$ e $2,5 < y < 6,1$; e módulos de 0,5 m para z, sendo $2,5 < z < 4,0$. O nível de eficiência dos modelos foi obtido através de uma planilha de equações do método prescritivo do RTQ-R.

5. Resultados e discussão

Foram analisados apenas os resultados dos GHR, dado que este será um dos indicadores a ser usado no capítulo 4 deste trabalho. As discussões estão divididas em duas partes: análise por ambiente e análise geral da UH, divididas nos tópicos 5.1 e 5.2.

5.1. Análise por ambiente

Foram analisados resultados referentes a cada ambiente de permanência prolongada (APP), relacionados ao fator de forma, Figuras 4 e 5. Neste trabalho, o fator de forma é calculado partir da razão entre área de paredes e de projeção da cobertura em contato externo do APP, sobre o volume total deste (Equação 2). Na Figura 4, os GHR são menores quando fator de forma é baixo, para todos os casos.

$$Ff = \frac{\text{Área superfícies}}{\text{Volume}} \quad \text{Equação 3}$$

Os coeficientes de determinação (R^2) da curva da sala, do dormitório 1, do dormitório 2 e do escritório são respectivamente: 0,5313; 0,5938; 0,6382 e 0,3193. Portanto, é baixa a correlação entre Fator de Forma e os GHR para as 400 disposições geométricas dos APP's.

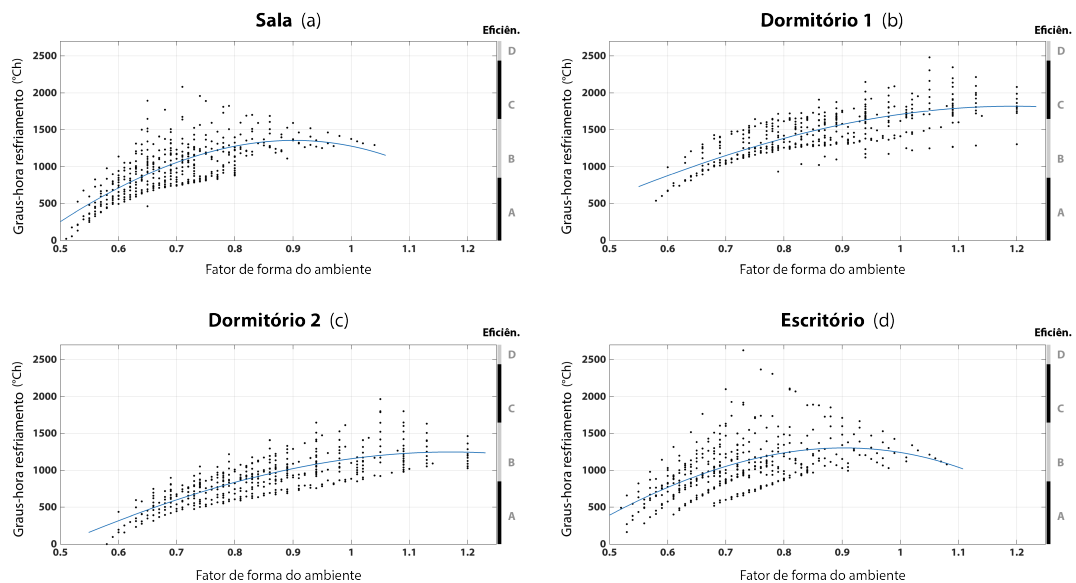


Figura 4: GHR por F_{famb} para os ambientes de permanência prolongada individualmente.

As fachadas que contém aberturas são: norte para sala [Figura 4(a)], leste para dormitório 1 [Figura 4(b)], e sul para dormitório 2 e escritório [Figura 4(c) e 4(d)]. Quando comparadas à relação do fator de forma com os GHr, a orientação tem baixo impacto na eficiência energética dos APP's, o que mostra a predominância da geometria dos ambientes e a relação com paredes externas e internas. As paredes externas do dormitório 1 e do dormitório 2 são expostas a leste em todos os casos e as da sala e escritório são eventualmente expostas a leste e a oeste. Quando há exposição externa destas paredes, a eficiência para os casos de verão decresce, pois, a existência de mais superfícies externas aumenta o contato com as condições ambientais de temperatura, radiação e ventos. Isso é registrado pela equação e ponderado com as propriedades térmicas desses fechamentos, mas é importante frisar que a eliminação de uma parede exposta causa impactos atípicos nos valores.²

Nota-se que a distribuição dos casos dos dormitórios [Figuras 4(b) e 4(c)] é semelhante, porém com um deslocamento dos GHr no eixo das ordenadas. Considerando que o dormitório 1 tem fachada opaca a norte e abertura a leste, e o dormitório 2 tem fachada opaca a leste e abertura a sul, acredita-se que este deslocamento da curva é causado pela orientação da abertura, enquanto a distribuição dos casos e, conseqüentemente o aspecto geral da curva e dispersão dos pontos, é determinado pela geometria do ambiente, que define a exposição das paredes externas. Esta conclusão também é válida para os casos da sala [Figura 4(a)] e do escritório [Figura 4(d)], que têm geometrias similares.

De acordo com a equação do RTQ-R, à medida que há aumento do pé-direito, há aumento da sensibilidade em relação aos Graus-hora para resfriamento (Figura 5). Em todos os casos, ambientes com pé-direito de 4,00m, apresentaram os maiores e os menores GHr gerais. Os pontos representam, em cada gráfico, cada uma das 400 disposições geométricas dos APP's. As superfícies foram geradas através de interpolação linear, com R^2 variando de 0,722 a 0,885. Os correspondentes valores de GHr compõem o eixo vertical, também representado em cores. Portanto, o coeficiente de determinação mais alto em relação à Figura 4 indica como o pé-direito

² A presença de paredes é representada por variáveis binárias (0 ou 1) na equação do método prescritivo do RTQ-R. Quando não existe uma parede em contato externo, a variável é reduzida a zero naquela orientação. Assim, diversos parâmetros dentro da equação são multiplicados por zero, o que provoca um salto nos valores do GHr. Esta descontinuidade nos valores é um aspecto limitante das análises.

impacta os GHr, e a sua relevância na análise, que não pode se limitar ao fator de forma do ambiente. Ao isolar o pé direito, os caminhos para a análise dos parâmetros que influenciam o desempenho térmico começam a ser delimitados.

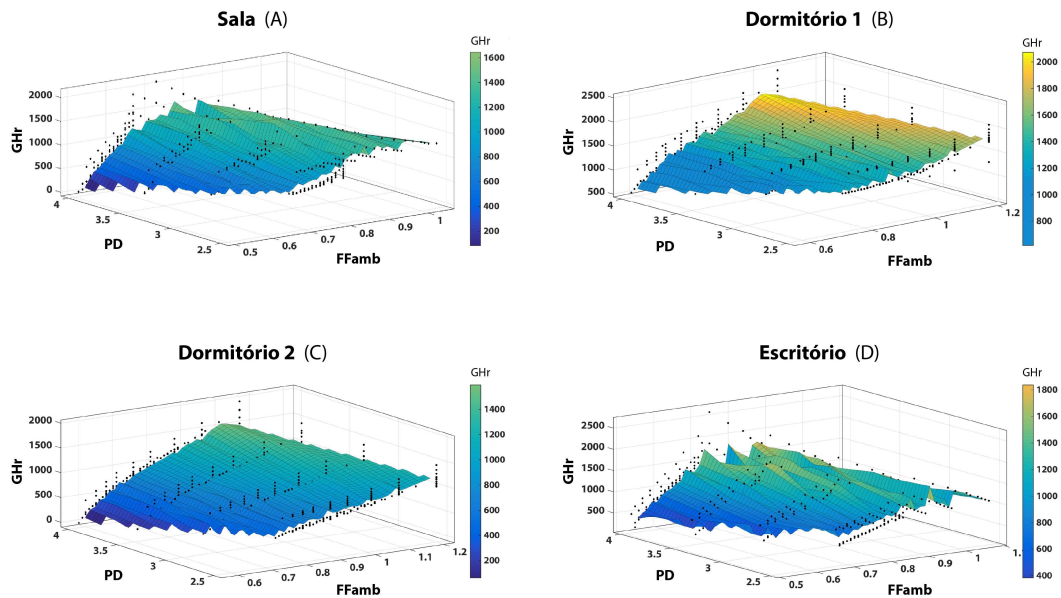


Figura 5: Graus-hora de resfriamento por pé direito e fator de forma para cada APP (GHr x Ffamb x PD).

Por fim, foram selecionados alguns casos de APP's, com diversos fatores de formas, para permitir a visualização das formas geométricas e sua relação com os GHr. As Figuras 6, 7, 8 e 9 relacionam a geometria em planta, o pé-direito no eixo das ordenadas, o fator de forma no eixo das abscissas, a área (em m², sobre as Figuras) e os GHr em uma escala de cores. As paredes em contato com o exterior são representadas por linhas grossas (em preto), e também é indicada a orientação dos ambientes no canto esquerdo inferior do gráfico.

Observou-se que os ambientes com menor fator de forma, e com maiores áreas, têm os maiores níveis de eficiência. Por outro lado, formas mais alongadas, que apresentam maior área de contato de paredes externas em relação ao volume, ou ambientes com menor área, apresentam os menores níveis de eficiência. Há ressalvas a serem feitas quanto aos resultados, que são expostas na conclusão do tópico subsequente.

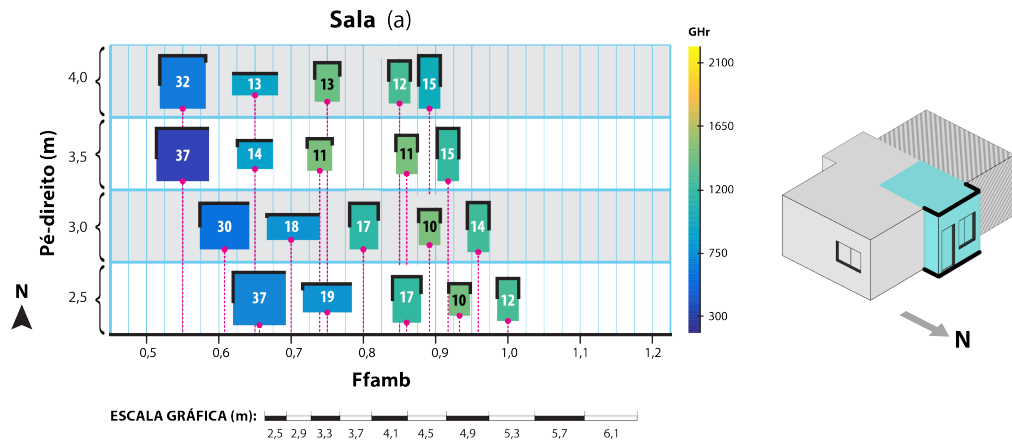


Figura 6: Seleção de geometrias dos APP's (Sala).

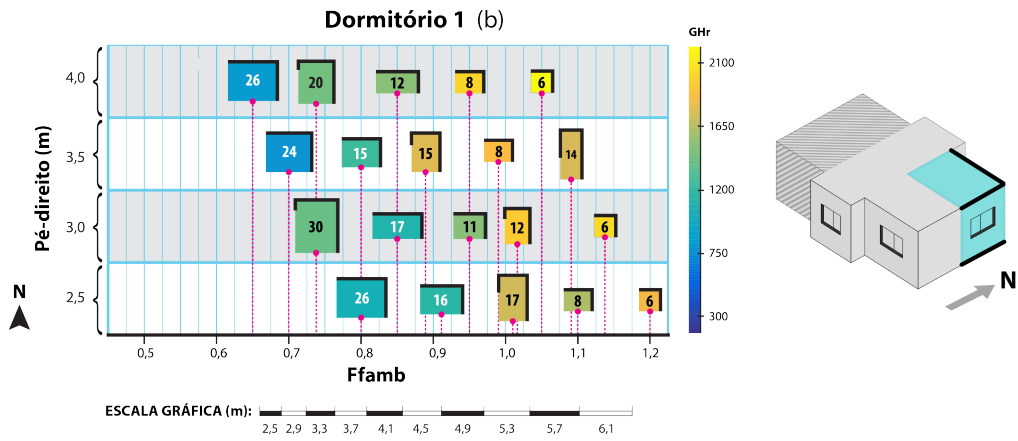


Figura 7: Seleção de geometrias dos APP's (Dormitório 1).

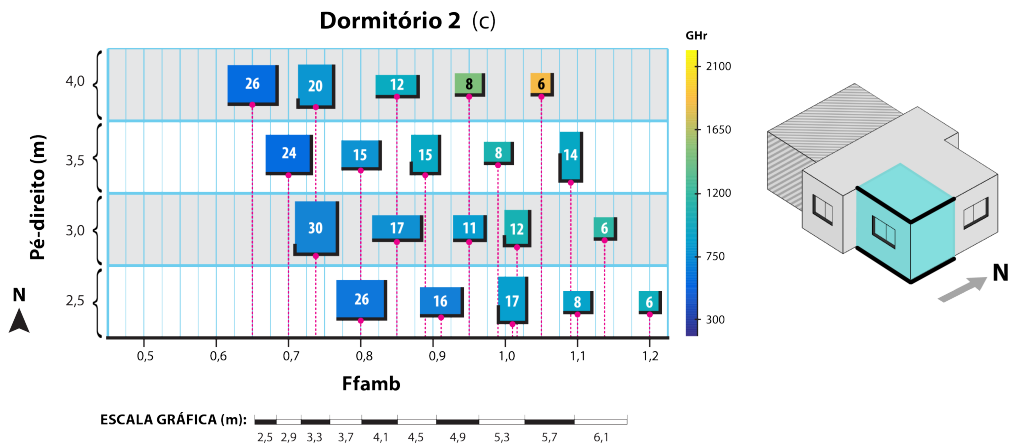


Figura 8: Seleção de geometrias dos APP's (Dormitório 2).

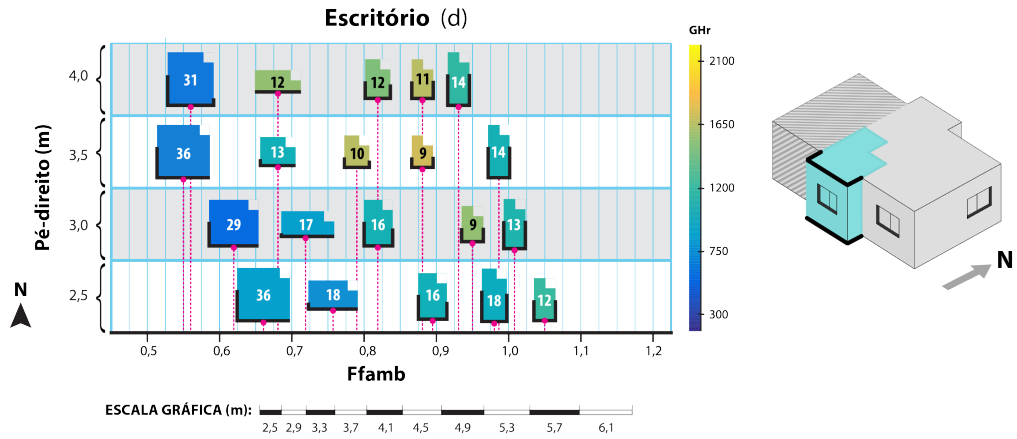


Figura 9: Seleção de geometrias dos APP's (Escritório).

5.2. Análise Geral da UH

Para chegar à eficiência da UH, o RTQ-R requer o cálculo da média dos equivalentes numéricos de cada ambiente ponderada pela sua área. Entretanto, foi mantida a escala de Ghr para que as análises pudessem ser detalhadas. Portanto, a eficiência da UH para condições de verão foi analisada a partir da média dos Ghr de cada ambiente ponderada pela sua área. A Figura 10 mostra algumas das variações geométricas analisadas, onde não se vê uma relação linear entre estratificação da geometria com os Ghr, tampouco volume da edificação.

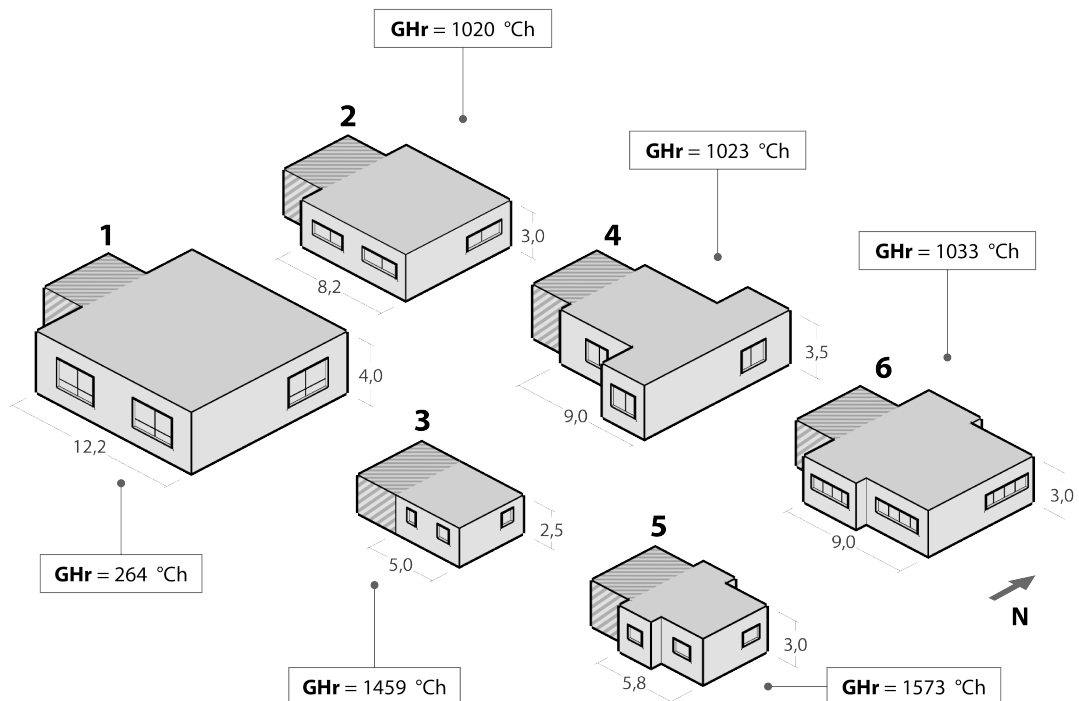


Figura 10: Variações geométricas da UH com seus respectivos Ghr.

Na Figura 11, são apresentadas as plantas dos ambientes de permanência prolongada (geometricamente proporcionais) de todos os casos possíveis para pés-direitos de 2,5m e para os pés-direitos de 4,0m, com a escala de GHr representada em cores. As abscissas e ordenadas dos gráficos são, respectivamente, as variáveis geométricas x e y da UH. A Figura 12 mostra as geometrias em três dimensões (com alguns casos selecionados na Figura 11).

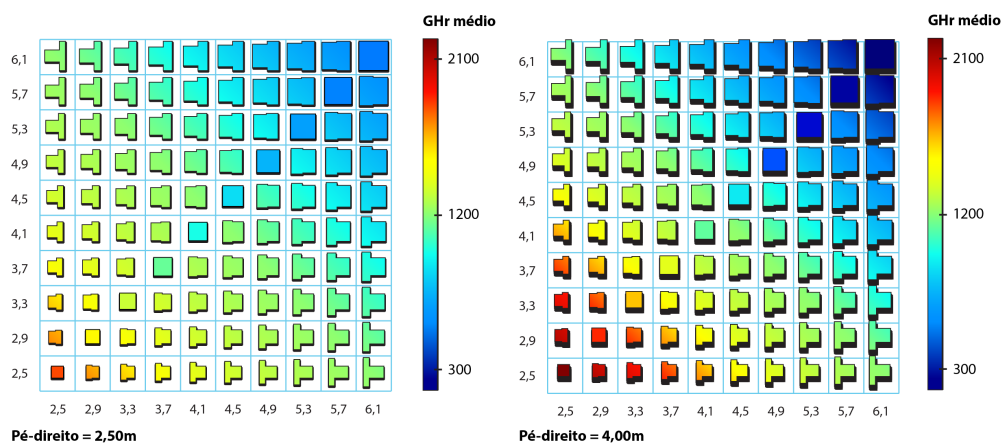


Figura 11: Impacto da geometria da UH sobre os GHr de acordo com o RTQ-R. Plantas distribuídas no gráfico através das variáveis x e y da UH (para os pés-direitos 2,5m e 4,5m).

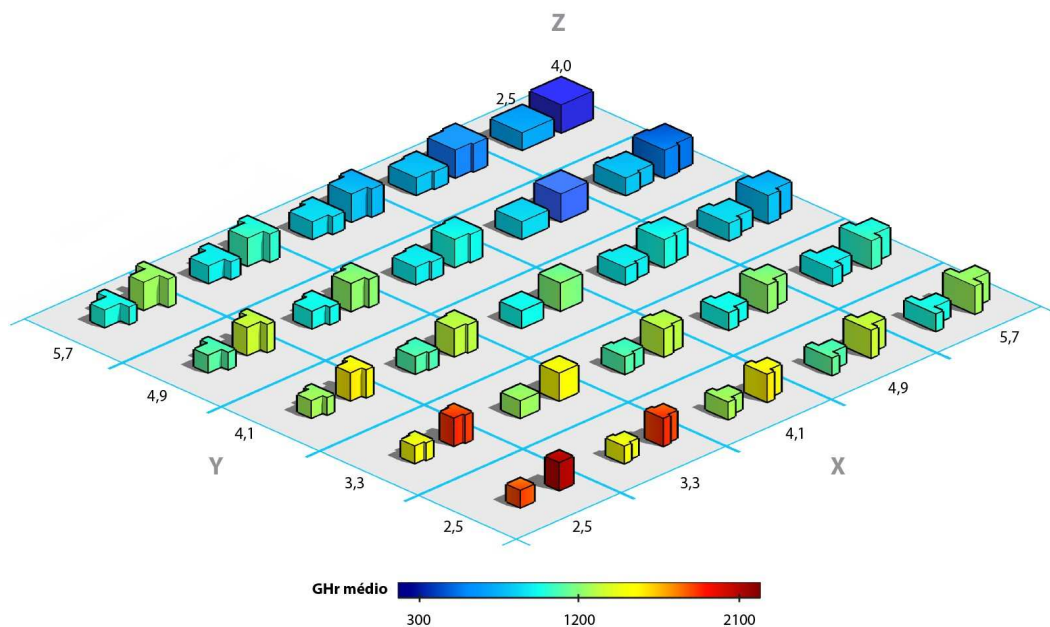


Figura 12: Impacto da geometria sobre os GHr de acordo com o RTQ-R. Casos selecionados, com pés-direitos iguais a 2,5m e 4,0m.

Foi analisada a relação entre o coeficiente *fator de forma*, o pé-direito e Graus-hora para resfriamento de toda a unidade habitacional. Os resultados são mostrados na Figura 13. Como visto na análise dos APP's, à medida que houve aumento do pé-direito, houve aumento da sensibilidade em relação aos Graus-hora para resfriamento. A Figura 13 separa as UH's de acordo com o seu pé direito em quatro curvas. Percebe-se que, o conjunto das UH's com PD = 4,0m contém a edificação com a maior e a edificação com a menor eficiência, em comparação com todas as amostras. As curvas da Figura 13 têm R² de 0,9124, 0,9474, 0,9477 e 0,953 para PD's iguais a 2,5m; 3,0m; 3,5m e 4,0m; respectivamente, 400 amostras.

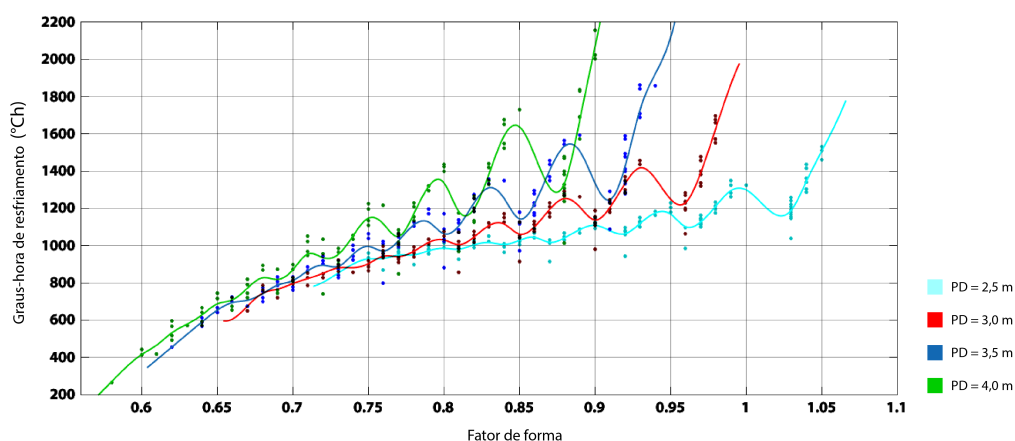


Figura 13: Graus-hora por fator de forma da unidade habitacional.

Apesar do fator de forma ter impacto na eficiência, apenas o valor desse não é o suficiente para a previsão do desempenho térmico de uma edificação, em especial quando o fator de forma é maior. Isto é verificado através dos baixos coeficientes de determinação encontrados na Figura 4 (0,32 a 0,64) e com os elevados coeficientes de determinação encontrados na Figura 13 (0,91 a 0,95), mesmo a primeira sendo referente ao ambiente e a segunda, à UH completa.

Em termos físicos, pode-se afirmar que maiores fatores de forma apresentam, proporcionalmente, menores volumes internos com maior área de parede externa exposta, o que aumenta o impacto das trocas da envoltória sobre o condicionamento natural interno. De fato, de acordo com os resultados do método prescritivo do RTQ-R, menores valores de fator de forma, apresentaram maior eficiência, independente

do pé-direito (Figura 13). No entanto, pesquisas já demonstram que o fator de forma é insuficiente para estimativa geral do desempenho termo energético de um edifício (GRANADEIRO et al. 2013).

É importante destacar o impacto que os ganhos de radiação pelas janelas e cobertura podem ocasionar sobre o desempenho térmico de um edifício (visto que as baixas latitudes brasileiras ocasionam maior incidência solar na cobertura do que nas paredes). Estes fatores não podem ser avaliados detalhadamente visto que o método prescritivo não mensura a dinâmica dos fenômenos. Além disso, nota-se descontinuidade nos resultados de GHr dos edifícios onde $x = y$ (onde há extinção de paredes a leste e a oeste das APP's). Todas estas são, claramente, limitações do método prescritivo do RTQ-R. Os resultados obtidos neste estudo refletem as condicionantes a partir de uma única equação, por isso devem ser verificados a partir de comparações com simulações em regime dinâmico em estudo posterior, tanto para condições de inverno quanto de verão. Estas também são importantes para determinar se a correlação demonstrada entre PD e Ff é verdadeira ou é decorrente do método prescritivo do RTQ-R.

6. Conclusões

Este estudo apresentou uma análise geométrica de edificações, através de indicativos numéricos e análises visuais comparativas das formas dos modelos associadas ao desempenho térmico gerado por um equação. No entanto, as descontinuidades observadas nos resultados e as incertezas relacionadas ao método prescritivo exigem que os dados obtidos sejam avaliados posteriormente, através de simulações em regime dinâmico.

Uma etapa posterior do estudo refere-se a uma otimização multiobjetivo baseada em simulações no EnergyPlus. Avaliou-se que os resultados do método prescritivo não foram suficientes para determinar restrições geométricas a serem inseridas na otimização OBS, dadas as limitações já mencionadas. Entretanto, o mesmo modelo de residência unifamiliar poderá ser utilizado, por apresentar relativa simplicidade, tendo em conta que a otimização baseada em simulação requer alto dispêndio computacional - como demonstrado por pesquisadores da área. Uma maior

variabilidade formal em relação ao presente estudo pode ser incluída:

- Intervalo contínuo nas dimensões dos ambientes;
- Variação das áreas de aberturas, visto que a pesquisa mostrou sua relevância;
- Dispensa de variação da orientação das aberturas pois, embora relevante, seu impacto é conhecido e pode ser previsto sem necessidade de simulação;
- Dispensa de análise do desempenho por ambiente, visto que este tende a manter um padrão comum para todos os cômodos;
- Variação na inclinação da cobertura, que será tratada com uma zona térmica com desempenho próprio; e
- Maior número de variáveis e linguagem geométrica/formal similar a casas de média-renda brasileiras, decorrentes dos critérios mencionados.

7. Bibliografia

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2005

CELANI, G.; CYPRIANO, D.; DE GODOI, G.; VAZ, C. A gramática da forma como metodologia de análise e síntese em arquitetura. **Conexão – Comunicação e Cultura, UCS**, Caxias do Sul, v. 5, n. 10, jul./dez. 2006.

GRANADEIRO, V.; CORREIA; J. R.; LEAL, V. M. S.; DUARTE, J. P.. Envelope-related energy demand: A design indicator of energy performance for residential buildings in early design stages. **Energy And Buildings**, v. 61, Elsevier, jun. 2013.

GÜRSOY, B.; ÖZKAR, M. Visualizing making: Shapes, materials, and actions. **Design Studies**, v. 41, p.29-50, nov. 2015.

HELLER, E. **A psicologia das cores, como as cores afetam a emoção e a razão**. Editora GG Brasil, 2012..

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Portaria nº18**, de 16 de janeiro de 2012. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais. Rio de Janeiro, 2012.

KNIGHT, T.; STINY, G. Making grammars: From computing with shapes to computing with things. **Design Studies**, v. 41, p.8-28, nov. 2015.

KRZNIAC, R. **Sobre a arte de viver, lições da história para uma vida melhor**. 1ª edição. Rio de Janeiro, Zahar. 2013.

LIEBICH, T. A design grammar for architectural languages. **Automation In Construction**, v. 2, n. 4, p.261-273, abr. 1994.

SCHMID, A. L. **A ideia de conforto: reflexões sobre o ambiente construído**. Curitiba: Pacto Ambiental, 2005.

SORGATO, M. J. **Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares Ventiladas Naturalmente**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2009.

STINY, G.; GIPS, J. Shape grammars and the generative specification of painting and sculpture. **Information Processing**. v. 71. p. 1460-1465. Amsterdam: C.V. Freiman, 1972.

STINY, G. Ice-ray: a note on the generation of Chinese lattice designs. **Environment and Planning B**. v. 4 (1) p. 1460-1465 . 1977.

STINY, G. Two exercises in formal composition. **Environment and Planning B**, v. 3, p. 187-210, 1976.

TAVARES, S. F. **Metodologia de Análise do Ciclo de Vida Energético de Edificações Residenciais Brasileiras**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. 2006.

Capítulo 3

Processo de otimização termo energética de um modelo de uma zona térmica

Resumo

O presente trabalho consiste em um estudo sobre método de resolução de problemas denominado Otimização Baseada em Simulação (OBS) aplicado a edificações. O método utiliza o critério de desempenho prescrito no Regulamento Técnico da Qualidade para a Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). O objetivo é investigar o processo de interoperabilidade de uma OBS aplicada a uma edificação de uma zona térmica. Este tipo de método abre a discussão sobre o processo de projeto de edificações cuja quantificação de parâmetros de desempenho deixa de ser um fator de avaliação e verificação e passa a ser critério projetual. A investigação dos processos foi realizada com uso de uma edificação de baixa complexidade geométrica e reduzido número de variáveis. Assim, foi possível verificar a eficiência do método aplicado, que obteve sucesso quanto à busca de soluções. Os programas Rhinoceros e Energy Plus foram integrados aos plugins Grasshopper e ArchSim e ao motor de otimização Goat. O indicador de eficiência adotado foi o graus-hora para temperaturas operativas base de 26°C. A solução encontrada a partir da otimização reduziu os graus-hora em cerca de 15% em relação à edificação inicial. Entretanto, o custo temporal da simulação mostrou-se elevado quando considerada a simplicidade do modelo. A adoção do processo em um projeto completo ainda requer maior conhecimento do custo operacional envolvido na otimização. No entanto, o processo já permite vislumbrar a integração da avaliação de desempenho na fase de estudo preliminar de projetos.

Palavras-chave: Otimização. Desempenho. Simulação termo-energética.

Abstract

The present paper consists on a study regarding a problem-solving method called Simulation Based Optimization (SBO) applied to building energy performance. This method uses the performance criteria prescribed by the Brazilian Technical Requirements of Quality for the Energy Efficiency of Residential Buildings (RTQ-R). The purpose is to investigate the interoperability process of SBO through one zone model. This method opens the discussion on the process of building design whose quantification of the performance parameters is no longer an issue of assessment and verification and becomes a design criteria. The investigation of the processes was held using a building of simple geometry with a reduced number of variables. It was possible to verify the effectiveness of the method used, which was successful in the solution search. The Rhinoceros and Energy Plus software have been integrated into the plugins and Grasshopper ArchSim and Goat optimization engine. The adopted efficiency indicator was the degree-hour for 26°C operating temperatures base. The solution from the optimization reduced the degree-hour by about 15% compared to the initial building. However, the temporal cost of simulation proved to be high when considered the simplicity of the model. The adoption of the process in a complete building still requires greater knowledge of the operating cost involved in optimization. However, the process provides a glimpse of the performance evaluation of integration in the preliminary stage of the project.

Keywords: Optimization. Performance. Energy simulation.

1. Introdução

O processo de projeto tem passado por alterações substanciais nas duas últimas décadas, desde que os recursos computacionais foram integrados aos escritórios de arquitetura (ARANTES, 2012). Se inicialmente o processo de desenhar foi transferido para o computador, novos recursos como de compatibilização de projeto (FERREIRA; SANTOS, 2007), de gestão por ferramentas virtuais (GUIMARÃES; AMORIM, 2006) e ferramentas auxiliares na tomada de decisões (ARAÚJO; PEDRINI, TINÔCO, 2008) foram paulatinamente incorporados em novos processos projetuais que levaram a uma mudança no modo de pensar a produção arquitetônica, com o BIM (SOUZA; AMORIM; LYRIO, 2009) e a modelagem digital (MULLER; SAFARO, 2011).

Em paralelo, o projeto baseado no desempenho se consolidou como um recurso para garantir a qualidade na edificação (SALGADO, 2010). A NBR 15575 (ABNT, 2013) surgiu para regular os critérios mínimos de desempenho, além de classificar critérios intermediários e superiores em diversos sistemas das edificações habitacionais. Outros regulamentos e normas também apresentam indicadores para atender a exigências quantitativas do projeto, tais como o PBE Edifica residencial (BRASIL, 2015) do Inmetro que apresenta os requisitos necessários para identificar o nível de eficiência energética da edificação, ou a NBR 15220 (ABNT, 2005), cuja parte 3 apresenta parâmetros construtivos que garantem a qualidade térmica de habitações de interesse social. Tais publicações incentivam a produção acadêmica brasileira voltada para a avaliação de desempenho, com uso de recursos de analíticos (MORAES, 2010) e de simulação (MENDES et al, 2005).

A abordagem conhecida como Método de Simulação Paramétrico pode ser utilizada para analisar e resolver problemas relacionados ao desempenho de um edifício nas etapas preliminares de seu projeto, visto que parte do princípio que uma variável de projeto pode ser modificada continuamente enquanto todos os valores das outras variáveis são mantidos. Devido às interações complexas e não-lineares entre as variáveis, muitas vezes o resultado é apenas uma melhoria parcial do desempenho (NGUYEN, REITER e RIGO, 2014). De acordo com Magnier (2008), embora esta abordagem possa gerar soluções aceitáveis, é improvável que se chegue a soluções ideais de projeto.

Segundo Bucking, Zmureanu e Athienitis (2013), neste contexto, os métodos de otimização emergem como abordagens eficazes na resolução de problemas relacionados à eficiência energética de edificações. Os métodos de otimização, quando associados a programas de simulação são conhecidos como Otimização Baseada em Simulação (OBS) (NGUYEN, REITER e RIGO, 2014).

Este trabalho tem como objetivo investigar o processo de interoperabilidade de Otimização Baseada em Simulação (OBS) aplicada a variáveis geométricas de uma edificação com uso de parâmetros de qualidade dos requisitos do PBE Edifica para edificações residenciais unifamiliares. Com este estudo, é possível identificar o potencial de uso de técnicas OBS na modelagem digital de projetos arquitetônicos, cujo foco leva ao projeto baseado em desempenho, um dos temas apontados pela Câmara Brasileira da Indústria da Construção e Associação Nacional do Ambiente Construído, CBIC e ANTAC respectivamente (CBIC, ANTAC, 2013). A avaliação do projeto com indicadores de desempenho é amplamente utilizada, tanto internacionalmente (ABRAHAM; WILLIAMS; IWARO, 2011) quanto no Brasil (CARLO; LAMBERTS, 2010), cujos métodos geralmente envolvem a simulação computacional. A questão levantada neste artigo é que, ao integrar a avaliação de desempenho à modelagem digital, o processo de análise, síntese e avaliação discutidos por Lawson (2005) é abandonado na sua forma tradicional; ele migra para um processo cujos indicadores participam da etapa de síntese gerada por ferramentas digitais paramétricas a fim de que o problema de projeto (desempenho) seja verificado concomitantemente à criação.

Para tanto, foi criado um modelo hipotético simplificado de edificação, com apenas uma zona térmica (equivalente a um ambiente) e uma abertura, a fim de obter um conhecimento global do processo, abarcando as principais etapas de um método de OBS: pré-processamento, execução da otimização e pós-processamento.

2. O método OBS aplicado à eficiência energética

2.1. Ferramentas de pesquisa

Para resolução de problemas relacionados à geometria de edificações, Shi et

al. (2013) indicam o software de programação visual Grasshopper³, que funciona como interface de modelagem paramétrica para o programa Rhino⁴ 3d. O Grasshopper funciona por meio de programação visual, realizando operações com blocos lógicos, denominados componentes. Ao Grasshopper foi acoplado, por meio do plugin Archsim⁵, o software de simulação energética EnergyPlus, recomendado pela NBR 15575 (ABNT, 2013). Para utilização deste *plugin*, os dados de entrada (*inputs*) da simulação – a geometria do modelo, a configuração da zona e os materiais construtivos – foram modelados como parâmetros no Grasshopper. O motor de otimização utilizado é denominado Goat⁶, e se baseia em algoritmos *gradient-free optimization*. O Goat é composto pelos algoritmos: a) *Local, linear approximations* (COBYLA); b) *Local, quadratic approximations* (BOBYQA); c) *Local, Subplex Nelder-Mead variant* (Sbplx). Há no programa, a opção de escolher um destes algoritmos para o processamento da otimização, e foi verificado que, para o problema proposto por este trabalho, seus desempenhos foram similares.

As etapas da OBS foram executadas conforme Nguyen et al. (2014), em que o processo pode ser dividido em Pré-processamento, Execução da otimização e Pós-processamento. Eles consistem de atividades como formulação do problema de otimização, controle dos critérios de término do processo e interpretação dos resultados da otimização, respectivamente.

A etapa de Pré-processamento desempenha um papel significativo no sucesso da otimização. Nesta fase, a tarefa mais importante é a formulação do problema de otimização. Situada entre a ciência do comportamento ambiental de edificações e da matemática, esta tarefa exige conhecimento de otimização matemática e dos programas de simulação energética, das variáveis de projeto e das interações entre estas, das medidas de desempenho do edifício (funções objetivo), etc. É importante ressaltar que o modelo computacional da edificação a ser otimizado deve ser simplificado, mas não de modo que ocorra modelagem imprecisa dos fenômenos da construção (MAGNIER, 2008, apud NGUYEN et al. 2014). Por outro lado, modelos

3 Grasshopper, Parametric Modeling for Rhino. Site: <http://www.grasshopper3d.com/>

4 Rhinoceros é um software proprietário de modelagem 3d desenvolvido pela Robert McNeel & Associates para o sistema operacional Windows. Site: <http://www.rhino3d.com>

5 Archsim, Energy Modeling for Grasshopper. Site: <http://www.archsim.com>

6 Goat, optimization solver component for Rhino's Grasshopper . Site: <http://www.rechenraum.com/en/goat/>

muito complicados (muitas zonas e sistemas térmicos) podem atrasar severamente o processo de otimização.

Na fase da Execução da Otimização a tarefa mais importante é monitorar a convergência da otimização e detectar erros que podem ocorrer durante o processo. Em otimização, o termo convergência é geralmente usado para indicar que a solução final foi alcançada pelo algoritmo. É importante notar que, num processo de otimização, o alcance da convergência não significa necessariamente que o mínimo global foi encontrado. Os comportamentos de convergência de diferentes algoritmos de otimização são uma área vasta da pesquisa em matemática computacional. Como a maioria dos algoritmos é heurístico, não é fácil calcular a velocidade teórica de convergência (NGUYEN et al., 2014).

Essa é a justificativa para existir vários critérios para o término de um processo de otimização, que são, na sua maioria, dependentes dos algoritmos de otimização correspondentes. Segundo Nguyen et al. (2014) os seguintes estão entre os mais utilizados em um processo de OBS: número máximo de gerações e iterações; tempo máximo de otimização; função objetivo aceitável (a função objetivo é igual ou menor do que um limite especificado pelo usuário); convergência da função objetivo (mudanças de funções objetivo são menores do que um limite especificado pelo usuário); número máximo de avaliações da função objetivo e convergência do algoritmo (em Algoritmos Genéticos).

Na última etapa, de Pós-processamento, é feita a interpretação dos dados da otimização em gráficos, diagramas ou tabelas das quais informações úteis das soluções ótimas podem ser derivadas.

2.2. Objeto de estudo

O objeto de estudo deste trabalho consiste no próprio método de Otimização Baseada em Simulação (OBS). Quanto à classificação do problema de otimização, este estudo abordou um problema multidimensional, dinâmico (variáveis interdependentes), e baseado em probabilidades (condições de contorno são definidas com base em probabilidades). Foram utilizadas variáveis contínuas. Quanto ao número de funções objetivo, se trata de um problema de um único objetivo, que teve como escopo minimizar o valor total de Graus-hora para resfriamento para as

condições de verão.

2.3. Etapas de Otimização

A. Pré-processamento

A.1. Construção do modelo da edificação e definição das variáveis

Foi criado um modelo hipotético simplificado de uma edificação (Figura 1), com uma única zona térmica⁷ e uma abertura na fachada Sul. Foram definidas quatro variáveis geométricas, X, Y, Z e W, utilizando-se os respectivos intervalos: $3\text{m} < x < 8\text{m}$; $3\text{m} < y < 8\text{m}$; $2,5\text{m} < z < 4\text{m}$; $0,1\text{m} < w < 1\text{m}$.

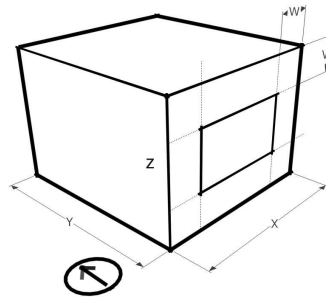


Figura 1: Modelo da edificação com uma zona térmica.

Quanto às características construtivas utilizou-se configurações padrão do programa EnergyPlus. Os materiais das paredes, do piso, e da laje, são inseridos no ArchSim: condutividade: $2,3 \text{ W/mK}$; densidade: 2400 kg/m^3 ; calor específico: 840 J/kgK ; emissividade térmica: $0,9$ e absorvância solar: $0,7$. A janela tem como características físicas: condutividade térmica do vidro: $0,9 \text{ W/m}$; densidade: 2500 kg/m^3 ; transmitância solar: $0,68$ e reflexão solar: $0,1$. Também foram mantidas as configurações do EnergyPlus relativas à ocupação e ganhos internos. A Figura 2 mostra a interface do Archsim utilizada para configurações do modelo. Para cálculo de ventilação natural foi utilizado o módulo *Airflow Network* do EnergyPlus.

⁷ ASHRAE Standard 140, método BESTEST.

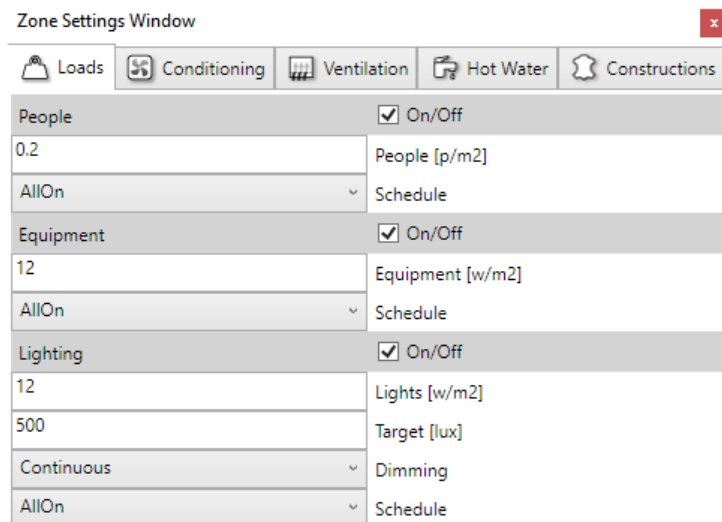


Figura 2: Interface do ArchSim, referente às configurações das cargas internas.

Foi definido o intervalo de simulações para um ano inteiro, tendo como dados de saída a temperatura operativa horária em °C. O arquivo climático utilizado é referente ao município de São Paulo (SP), localizado da Zona Bioclimática 3, de acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005). A edificação foi modelada parametricamente (Figura 3) usando o Rhino por meio do plugin Grasshopper. Na Figura 3 é apresentada a interface entre os dois programas; a janela à esquerda é o ambiente 3D do Rhino, e à direita é mostrada a interface do Grasshopper.

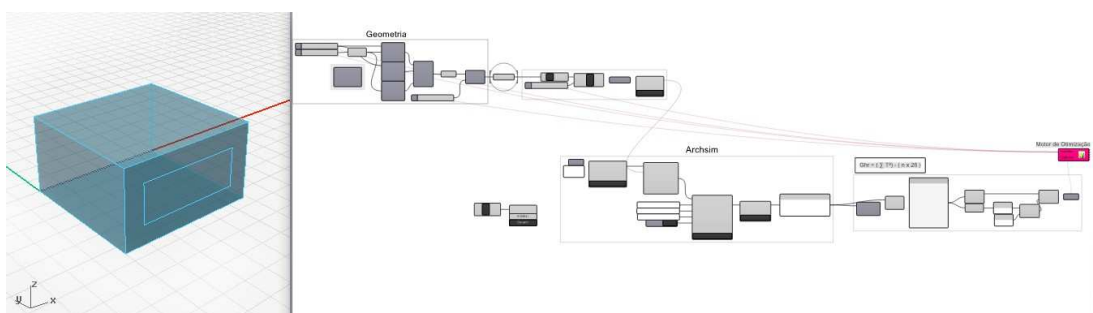


Figura 3: Interface Rhino/Grasshopper.

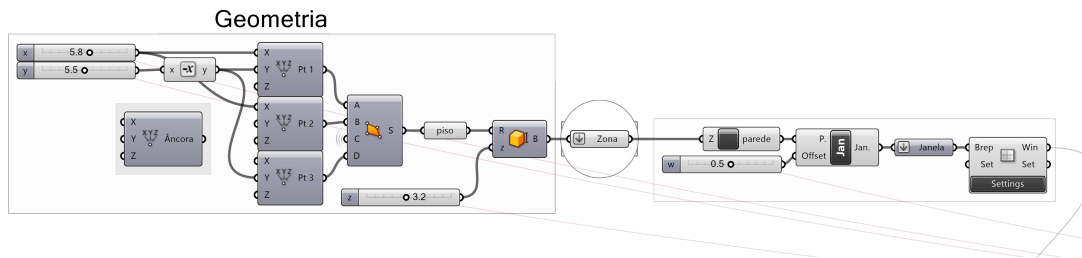


Figura 4: Modelagem paramétrica da geometria.

A partir da modelagem geométrica (Figura 4), foi feita a ligação com o plugin Archsim, que faz conexão com o software de simulação EnergyPlus (Figura 5). Como o objetivo era verificar a interoperabilidade com a otimização da forma, outras características da edificação permaneceram com os valores *default* do ArchSim, como materiais de paredes, pisos e coberturas.

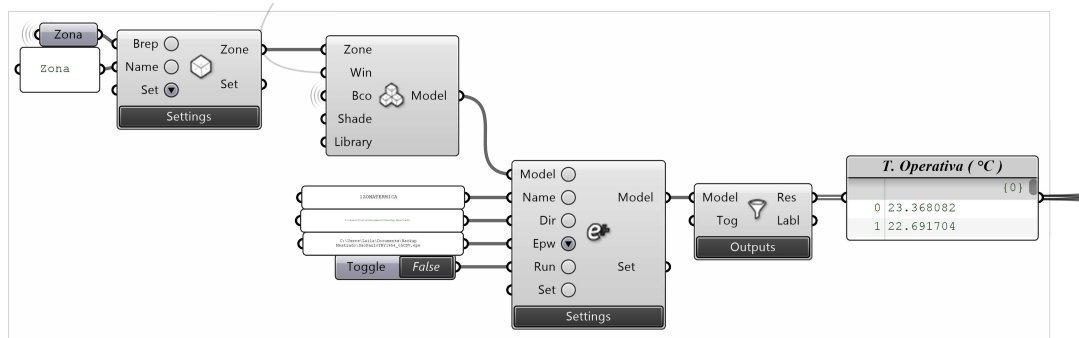


Figura 5: Interface do Archsim.

A.2. Formulação do problema

O objetivo da otimização é encontrar o menor valor possível do indicador de graus-hora para resfriamento (GHR), que é um parâmetro de qualidade do RTQ-R (INMETRO, 2012) para classificar o nível de eficiência energética de edificações (Tabela 1). As temperaturas operativas (T_o) horárias para o período de um ano foram obtidas e os GHR foram calculados para uma temperatura base de 26°C . A Equação 1 mostra que a função objetivo GHR é função de T_o .

Função: Minimizar $GHR = \sum (T_o - 26^\circ\text{C})$ Equação 1

Sujeito a: $T_o > 26$

Onde:

GHr: indicador de graus-hora para resfriamento;

To: temperatura operativa horária (°C)

O RTQ-R determina os limites de GHr de acordo com a Tabela 1 para a classificação do nível de eficiência energética para a cidade de São Paulo (SP).

Eficiência	Condições
A	$G_{Hr} \leq 822$
B	$822 < G_{Hr} \leq 1.643$
C	$1.643 < G_{Hr} \leq 2.465$
D	$2.465 < G_{Hr} \leq 3.286$
E	$G_{Hr} > 3.286$

Tabela 1: Requisitos para classificação do nível de eficiência energética. Fonte: RTQ-R (INMETRO, 2012).

Foi realizada a transcrição da função objetivo e restrição para o Grasshopper, apresentadas na Figura 6. As temperaturas operativas horárias são calculadas pelo EnergyPlus, e apenas os *outputs* que cumprem a restrição são quantificadas para cálculo da função objetivo. O valor de GHr é o objetivo que o Goat (em rosa) visa minimizar.

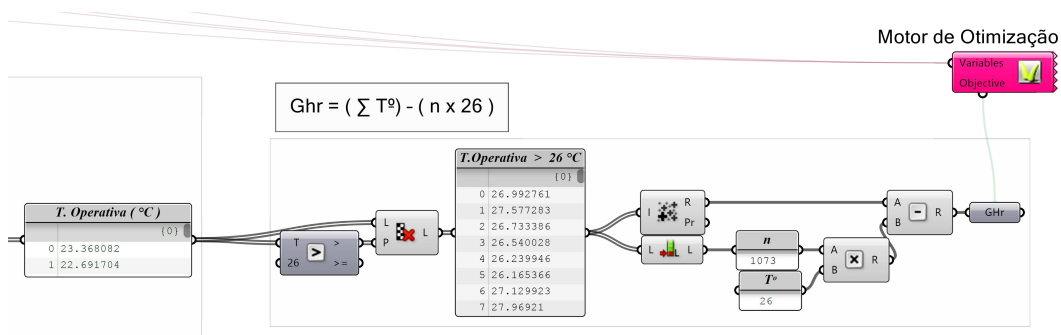


Figura 6: Restrição da função, com eliminação das T_o superiores a 26°C , cálculo dos GHr e acoplamento ao motor de otimização Goat.

B. Execução da otimização

O motor de otimização denominado Goat apresenta interface básica similar ao motor nativo do Grasshopper (Galapagos). Nas configurações do Goat (Figura 7), é possível que se escolha entre minimizar ou maximizar uma função; assim como escolher entre 3 algoritmos distintos, além da definição do critério de término do processo.

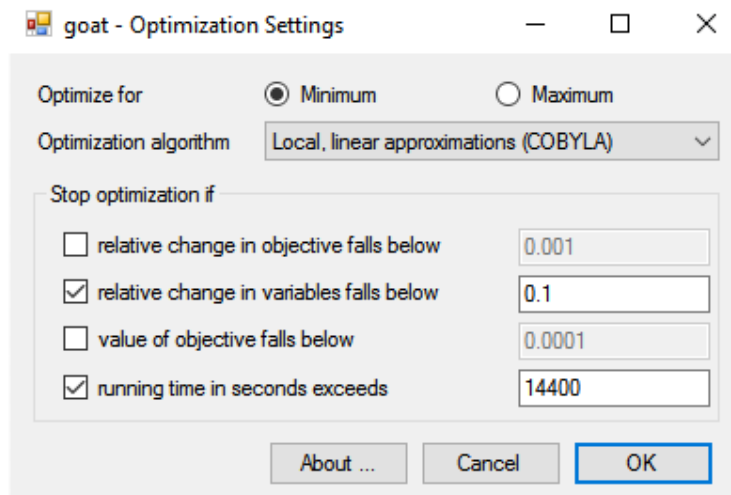


Figura 7: Configurações do Goat para a execução da otimização.

O motor de otimização realiza diferentes combinações entre as variáveis, e, a cada teste, o EnergyPlus processa uma nova simulação. Neste processo são realizadas progressivas melhoras até a aproximação de uma 'solução', ou seja, a combinação de variáveis que resulte no menor valor de GHr possível. Foram determinados dois critérios do término de processo. Se as mudanças relativas dos valores das variáveis fossem inferiores 10cm (a partir de um número de simulações definidas pelo Goat), ou se o processo ultrapassasse 4 horas, o processo seria finalizado.

Foram necessárias, em média, 2 horas de processamento computacional para se chegar ao resultado que atendeu ao primeiro critério. Foram testados todos os algoritmos do Goat, e, para este problema, como mencionado, eles apresentaram desempenho similar.

C. Resultados

A Figura 8 mostra as temperaturas operativas (T_o) do modelo inicial, cujas variáveis, se encontram em valores intermediários em todos os intervalos: $X = 5,5\text{m}$; $Y = 5,5\text{m}$ e $Z = 3,2\text{m}$ e $W = 0,5\text{m}$. De acordo com o RTQ-R esta edificação receberia a classificação C para o nível de eficiência energética. Já a Figura 9 mostra o desempenho obtido com a otimização, com valores de variáveis de: $X = 8\text{m}$; $Y = 3\text{m}$, $Z = 4\text{m}$ e $W = 1\text{m}$. De acordo com o RTQ-R (INMETRO, 2012), esta edificação também receberia a classificação C para o nível de eficiência energética. Como o objetivo do trabalho é mapear o processo projetual de OBS, o resultado foi considerado satisfatório mesmo que o nível da etiqueta de eficiência energética não tenha se alterado.

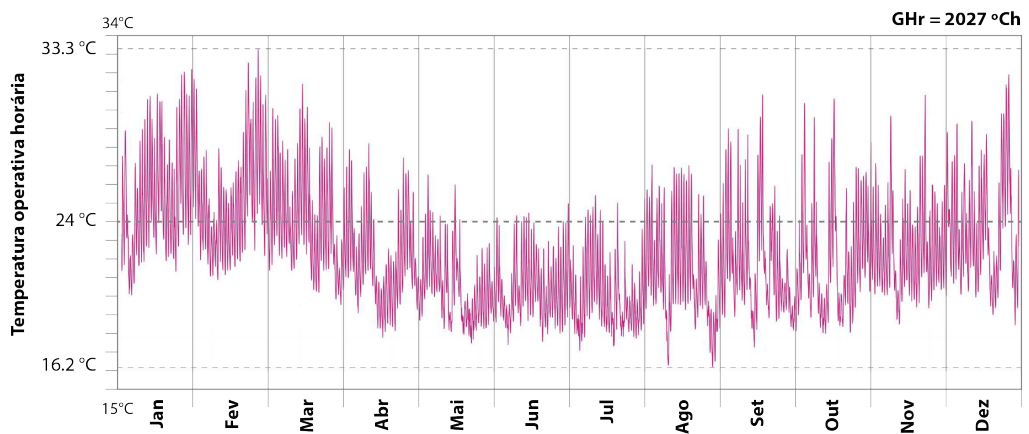


Figura 8: Desempenho energético de um modelo ao longo de um ano (8760 dados horários).

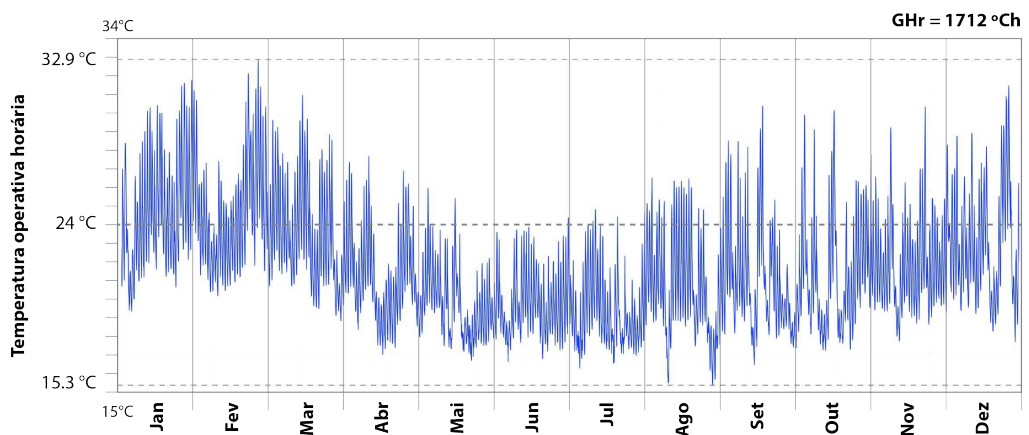


Figura 9: Desempenho energético final do modelo ao longo de um ano (8760 dados horários).

Apesar de ambas soluções apresentarem nível de eficiência C, houve uma diferença entre o indicador de GHr considerável, de cerca de 15%. O caso inicial (Figura 8) obteve $\text{GHr} = 2027 \text{ }^\circ\text{Ch}$, com temperaturas operativas horárias variando entre $16,2^\circ\text{C}$ e $33,3^\circ\text{C}$; e o caso otimizado teve $\text{GHr} = 1712^\circ\text{Ch}$, com temperaturas operativas horárias entre $15,3^\circ\text{C}$ e $32,9^\circ\text{C}$. Para que fossem alcançados melhores níveis de desempenho, seria necessária a escolha de materiais construtivos adequados às condições bioclimáticas da Zona Bioclimática 3, além de outras estratégias de condicionamento, como a abertura de janelas e portas para permitir a ventilação natural em uma edificação multizonas.

Devido ao alto custo temporal verificado para esse modelo, o processo deve ser estudado a fim de viabilizar os métodos OBS para o desenvolvimento de edifícios com geometrias e configurações mais complexas, que condizam com modelos reais de edifícios.

3. Conclusões

A investigação de métodos de OBS aplicado a edificações tornou-se viável devido ao aumento da capacidade de processamento computacional nas últimas décadas. Pela complexidade dos problemas relacionados a edifícios, o ideal é abarcar diversos objetivos. Nesse sentido, a NBR 15575 (ABNT, 2013), apresenta múltiplos critérios para desempenhos estruturais, acústicos, térmicos, luminosos, dentre outros que podem ser utilizados como base de cálculo. A inserção de novos critérios deve ser realizada através de motores de otimização multiobjetivo.

Este trabalho cobriu as etapas principais necessárias a um método de Otimização Baseada em Simulação, com a demonstração do processo através da interoperabilidade entre a modelagem digital paramétrica e a simulação de desempenho energético. Foi verificado que o tempo de processamento computacional foi relativamente extenso para um modelo de geometria simplificada, composta por apenas uma zona térmica. O custo temporal de otimizações mais complexas ainda deve ser quantificado para viabilização de processos robustos que atendam às reais demandas de projetos arquitetônicos.

No entanto, foi demonstrado que o método é viável em ferramentas com

interfaces gráficas amigáveis a arquitetos, que não estão familiarizados com programação computacional, de acordo com as atuais grades curriculares dos cursos de Arquitetura brasileiros. A inserção dessas novas ferramentas e métodos tende a alterar os paradigmas dos processos de projeto atuais.

4. Bibliografia

ABRAHAM, M., WILLIAMS, R. G., IWARO, J. Modeling the performance of residential building envelope: The role of sustainable energy performance indicators. **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2011. p. 2008 – 2117

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575**: Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ARANTES, P. F. **Arquitetura na era digital-financeira: Desenho, canteiro e renda da forma**. São Paulo: Editora 34, 2012. 368 p

ARAÚJO, C. V. A., PEDRINI, A., TINÔCO M. V. M. Influência de condicionantes ambientais no projeto de um edifício de ensino de arquitetura e urbanismo localizado em clima quente e úmido. In: **XII Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído**. Fortaleza: ANTAC, 2008.

BRASIL. ELETROBRÁS – PBE Edifica. **Programa Brasileiro de Etiquetagem**. Disponível em: <<http://pbeedifica.com.br/>>. Acesso em: 28 de nov. 2015.

BUCKING, S.; ZMEUREANU, R.; ATHIENITIS, A. An information driven hybrid evolutionary algorithm for optimal design of a Net Zero Energy House. **Solar Energy**, Elsevier, n. 96, jul. 2013.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, CBIC,

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, ANTAC. **Estratégias para a formulação de Política de Ciência, Tecnologia e Inovação para a indústria da Construção Civil**. 52 p. Disponível em: <<http://www.cbic.org.br/sites/default/files/CBIC%20Proposta%20de%20Poli%CC%81tica%20CTI%20-Construcao.pdf>> Acesso em: 18 de ago. 2015.

DOGAN, T. **Archsim, Energy modeling for Grasshopper**. Disponível em: <<http://archsim.com/>> Acesso em: 28 de nov. 2015.

FERREIRA, R. C., SANTOS, E. T. Características da representação 2D e suas limitações na etapa de compatibilização espacial do projeto. **Gestão e Tecnologia de Projetos**. São Paulo: USP, 2007. V. 2, p. 36-52

GUIMARÃES, I. B. , AMORIM, S. R. L. GESTÃO DA INFORMAÇÃO E COMPETÊNCIA EM PROCESSO DE PROJETO. **Gestão e Tecnologia de Projetos**. São Paulo: USP, 2006. V. 1, p. 48-58.

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Portaria nº18**, de 16 de janeiro de 2012. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais. Rio de Janeiro, 2012.

MAGNIER, L. **Multi-objective Optimization of Building Design Using Artificial Neural Network and Multiobjective Evolutionary Algorithms** . Ph.D Thesis in Applied Science (Building Engineering) at Concordia University Montréal, Québec, Canada, 2008.

MENDES, N., WESTPHAL, F. S., LAMBERTS,, R., CUNHA NETO, J. A. B. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Revista Ambiente Construído**. Porto Alegre: ANTAC, 2005. v. 05 p. 47-68

MORAES, O. B. Lógica Fuzzy e suas aplicações na avaliação do ambiente construído. Fabricio, M. M., Ornstein, S. (Org.) **Qualidade no projeto de edifícios**. São Carlos: RiMa, 2010. P. 274

MÜLLER, A. F., SAFFARO, F. A. A prototipagem virtual para o detalhamento de projetos na construção civil. **Revista Ambiente Construído**. Porto Alegre: ANTAC, 2011. v. 11 p. 105-121

NGUYEN, A.; REITER, S.; RIGO, P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, Elsevier, n.113, ago. 2014.

ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES. **Rhinoceros, 3D modeling software. Rhino 5 Getting Started & User's Guide**. Disponível em: <<http://www.rhino3d.com> > Acesso em: 28 de nov. 2015.

SALGADO, M. Arquitetura centrada no usuário ou no cliente? Uma reflexão sobre a qualidade do projeto. Fabricio, M. M., Ornstein, S. (Org.) **Qualidade no projeto de edifícios**. São Carlos: RiMa, 2010. P. 274

SCHMIEDHOFER, H.; REIS, M.. **Goat, optimization solver component for Rhino's Grasshopper**. Disponível em: <<http://www.rechenraum.com/en/goat/overview.html>> Acesso em: 28 de nov. 2015.

SHI, X.; YANG, W.. Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects. **Automation in Construction**, Elsevier, n. 32, jan. 2013.

SOUZA, L. L. A., AMORIM, S. R. L., LYRIO, A. M. IMPACTOS DO USO DO BIM EM ESCRITÓRIOS DE ARQUITETURA: OPORTUNIDADES NO MERCADO IMOBILIÁRIO. **Gestão e Tecnologia de Projetos**. São Paulo: USP, 2009. V. 4, p. 26-53

TEDESCHI, A.. **Grasshopper, Parametric Modeling for Rhinoceros. Grasshopper Primer Manual for version 0.6.0007**, Second Edition. Disponível em:<<http://www.liftarchitects.com/journal/2009/3/25/the-grasshopperprimer-secondedition.html> >. Acesso em: 28 de nov. 2015.

Capítulo 4

Otimização multiobjetivo da geometria de unidades habitacionais com integração do EnergyPlus a algoritmos genéticos

Resumo

O método denominado Otimização Baseada em Simulação (OBS) emergiu na comunidade científica como abordagem promissora para a concepção de edifícios energeticamente eficientes. O presente trabalho consiste em um estudo de método de OBS aplicado a uma unidade habitacional autônoma. O objetivo é otimizar parâmetros geométricos do modelo habitacional a partir de critérios de desempenho termo-energético. Os programas Rhinoceros e EnergyPlus foram integrados aos plugins Grasshopper e ArchSim e ao motor de otimização Octopus, baseado em algoritmos genéticos (AG). Os indicadores de eficiência adotados foram os graus-hora de resfriamento e aquecimento para temperaturas operativas base de 26°C e 18°C, respectivamente. O método utilizou algumas determinações do Regulamento Técnico da Qualidade para a Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R), assim como regulamentos locais para a cidade de São Paulo. A partir dos resultados da otimização, cujo Pareto Front alcançou mínimos próximos a 200°Ch para resfriamento e 800°Ch para aquecimento, foram realizadas análises geométrico/formais dos modelos, com identificação das características predominantes das melhores e piores soluções para as condições de inverno e verão. Verificou-se elevado dispêndio computacional no processo, o que obsteu a convergência da otimização. Assim, foi proposto um modelo simplificado de duas zonas térmicas para estimar a solução ótima para as condições de inverno.

Palavras-chave: Otimização. Desempenho. Simulação termo-energética.

Abstract

Simulation Based Optimization (SBO) methods emerged in the scientific community as a promising approach for the design of energy efficient buildings. This work consists of an SBO method applied to a housing unit model. The purpose is to optimize geometrical parameters through thermal energy performance criteria. Rhinoceros and EnergyPlus software were integrated into Grasshopper and ArchSim plugins and the optimization engine Octopus, based on genetic algorithms (GA). The adopted efficiency indicators were hours-degree for cooling and heating with base temperatures of 26°C and 18 ° C, respectively). The method employed definitions from the Technical Requirements of Quality for the Energy Efficiency of Residential Buildings (RTQ-R), as well as the local building code of the city of São Paulo. Geometric/shape analyses were made from optimization results, which Pareto Front reached minimum values of 200°Ch for cooling and 800°Ch for heating, in order to identify the main aspects of the best and worst solutions for Winter and Summer conditions. High computational expenditure was observed in the process, which has hindered the convergence of the optimization. Thus, a surrogate model was proposed based on a metamodel containing two thermal zones.

Keywords: Optimization. Performance. Energy simulation.

1. Introdução

A demanda internacional por edifícios energeticamente eficientes levou a grande progresso nos métodos de projeto baseados em desempenho. Neste panorama emergiu um método denominado Otimização Baseada em Simulação (OBS), que teve suas origens nas engenharias de produção, mecânica e aeronáutica. A partir da década de 2000 cresceu o número de pesquisas de métodos que combinam *software* de simulação com motores de otimização (NGUYEN, REITER e RIGO, 2014). Utilizado em edifícios, os processos de OBS têm vasta aplicação, variando desde sistemas prediais automatizados e sistemas de geração de energia, até a resolução de problemas de condicionamento energético passivo.

Em 2001, Caldas desenvolveu um sistema composto por algoritmos genéticos acoplados ao *software* de desempenho energético DOE2.1. Este propiciava análises a partir do *Pareto Front* como base de decisões para o projetista. Posteriormente, o sistema evoluiu para o denominado GENE_ARCH, com ampliação do número de funções objetivo incorporadas, além da inclusão de avaliações de iluminação natural (CALDAS, 2008). Em 2004, Wetter e Wright utilizaram a ferramenta GenOpt em uma plataforma expansível e de código aberto. Esta plataforma foi disponibilizada livremente para que outros profissionais pudessem utilizá-la. Os autores tinham como escopo a redução do consumo anual de energia e a climatização e utilização de iluminação natural. Magnier (2008), propôs um método de otimização multiobjetivo do desempenho energético e de conforto de uma edificação residencial, utilizando simulações com o TRNSYS integradas a algoritmos genéticos⁸ e redes neurais. Trubiano, Roudsari e Ozkan (2013), realizaram a geração de geometrias construtivas de um edifício comercial, em uma otimização que visava a melhoria do desempenho energético. A pesquisa utilizou diferentes programas de modelagem e simulação para avaliar as cargas térmicas e os níveis de iluminação em um edifício de escritórios tipo. As geometrias foram modeladas no Grasshopper e simuladas no EnergyPlus e Radiance. O processo foi implantado de maneira coordenada, de forma a automatizar o *output* de dimensões geométricas do edifício, utilizando o *script*, um

8 Algoritmos genéticos (AG) trabalham com a resolução de problemas de otimização restritos e irrestritos, e se baseiam nos conceitos de seleção natural biológica. Fonte: Mathworks Documentation - <https://www.mathworks.com/help/gads/what-is-the-genetic-algorithm.html>

algoritmo genético e uma única função objetivo.

Há muitos estudos de OBS que abordam o envoltório dos edifícios sobretudo em relação à seleção de materiais. Geralmente, os problemas são representados através de parâmetros simples com base em um banco de dados de materiais (EVINS, 2013). Já a resolução de problemas concernentes aos aspectos geométricos do edifício é um dos mais complexos, pois tem implicações espaciais, estéticas, estruturais e de desempenho energético (EVINS, 2013). A forma geométrica de um edifício pode ter grande influência no conforto ambiental e no seu consumo de energia visto que interfere diretamente sobre os fluxos de ar interior e exterior e também na incidência de luz e calor solar recebidos pelo edifício (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA et al. 2013). Neste sentido, esta pesquisa desenvolveu um método para otimização do desempenho energético utilizando como variáveis os aspectos geométricos de edificações.

Limitar as investigações a modelos residenciais oferece a oportunidade de realizar otimizações holísticas que cobrem uma maior proporção de parâmetros significativos (EVINS, 2013). Neste sentido, esta pesquisa aplicará o método proposto a *residências autônomas unifamiliares*, conforme definição do RTQ-R (INMETRO, 2012), cuja tipologia de casa representa 89,3% das habitações brasileiras na última década (IBGE, 2010). Estes edifícios têm grande potencial de uso de sistemas passivos de condicionamento térmico e de iluminação para proporcionar conforto aos usuários (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA et al. 2013).

Para resolução de problemas relacionados à forma da edificação, do ponto de vista dos arquitetos, Shi e Yang (2013) indicam o *software* de programação visual Grasshopper⁹, que funciona como interface de modelagem paramétrica para o programa Rhino¹⁰ 3d. O Grasshopper é capaz de realizar diversas operações geométricas, ao mesmo tempo que requer pouco conhecimento de programação. Este contém um motor de otimização nativo baseado em algoritmos genéticos (AG). Em duas revisões recentes sobre os métodos de OBS aplicados ao desempenho ambiental de edifícios (EVINS, 2013; NGUYEN, REITER e RIGO, 2014), foi observado

9 Grasshopper, Parametric Modeling for Rhino. Site: <http://www.grasshopper3d.com/>

10 Rhinoceros é um software proprietário de modelagem 3d desenvolvido pela Robert McNeel & Associates para o sistema operacional Windows. Site: <http://www.rhino3d.com>

grande uso de algoritmos genéticos entre os pesquisadores da área de otimização, com uma elevada taxa de sucesso nos resultados obtidos, o que fortalece a escolha pelo software. Ao Grasshopper é acoplado, por meio do plugin Archsim¹¹ o software de simulação energética EnergyPlus. Com este plugin, os *inputs* da simulação, tais como geometria do modelo, os materiais construtivos, e as configurações das zonas são transformados em parâmetros. O motor de otimização multiobjetivo utilizado é denominado Octopus, baseado nos algoritmos SPEA-2¹² e HypE¹³.

Pesquisas que utilizem estas ferramentas, desde programas de simulação até motores de otimização, promovem a correção de *bugs* e erros nos códigos contribuem para novas ideias para os programas. Quando se trata de *software* de código aberto, o próprio pesquisador tem a flexibilidade de realizar modificações no programa. Além disso, as pesquisas podem promover a criação de métodos mais eficientes e robustos e também possibilitar melhoria na integração com outras abordagens de projeto. Por fim, a escassez de referências brasileiras utilizando métodos de otimização aplicados à arquitetura sustentável e energeticamente eficiente precisa ser sanada, dada a relevância do condicionamento natural no parque edificado nacional, que pouco é discutido no cenário internacional.

2. Objetivo

O objetivo deste estudo é realizar otimização multiobjetivo do desempenho energético da geometria de edificações residenciais, com integração do EnergyPlus a algoritmos genéticos.

3. Princípios da Otimização Baseada em Simulação

O termo *Otimização* muitas vezes se refere ao procedimento (ou procedimentos) de realização de um projeto, sistema, ou decisão, da forma mais

11 Archsim, *Energy Modeling for Grasshopper*. Site: <http://www.archsim.com>

12 SPEA-2 é um algoritmo genético multiobjetivo elitista com desempenho comparado ao algoritmo NSGA-II (ZITZLER et al., 2001).

13 HypE é um algoritmo de estimativa de hipervolume baseado na amostragem de Monte Carlo (BADER e ZITZLER, 2008).

eficaz ou funcional possível. Em matemática, estatística e ciências da computação, *Otimização* ou *Programação Matemática* é o processo de encontrar a melhor solução para um problema a partir de um conjunto de alternativas disponíveis (NGUYEN, REITER e RIGO, 2014); e/ou é o estudo de problemas em que se visa minimizar ou maximizar uma função através da escolha sistemática dos valores de variáveis reais ou inteiros dentro de um conjunto viável. A formulação geral de um problema de *otimização* é representada por:

Min $f(x)$

$$\begin{aligned} \text{Suj. a: } & g_i(x) \leq 0 \quad \forall i= 1, 2, \dots, m \\ & h_j(x) = 0 \quad \forall j= 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

Em que: $f(x)$ – *Função Objetivo (Função Fitness, Função de Custo)*
 $g_i(x)$, para $i=1, 2, \dots, m$ – *Restrição de desigualdade*
 $h_j(x)$, para $j=1, 2, \dots, n$ – *Restrição de igualdade*

Nos projetos de *edificações baseadas em desempenho*, o termo *otimização* não significa necessariamente encontrar a melhor solução global para um problema, uma vez que pode ser inviável devido à natureza do problema ou devido ao próprio programa de simulação. É geralmente aceito entre a comunidade de pesquisas em OBS que este termo indica um processo automatizado que é inteiramente baseado em *programação matemática* (NGUYEN, REITER e RIGO, 2014). Este processo geralmente é automatizado através do acoplamento entre um programa de simulação e um motor de otimização que pode consistir em um ou vários algoritmos ou estratégias de otimização. A estratégia mais comum de OBS é resumida e apresentada na Figura 1.

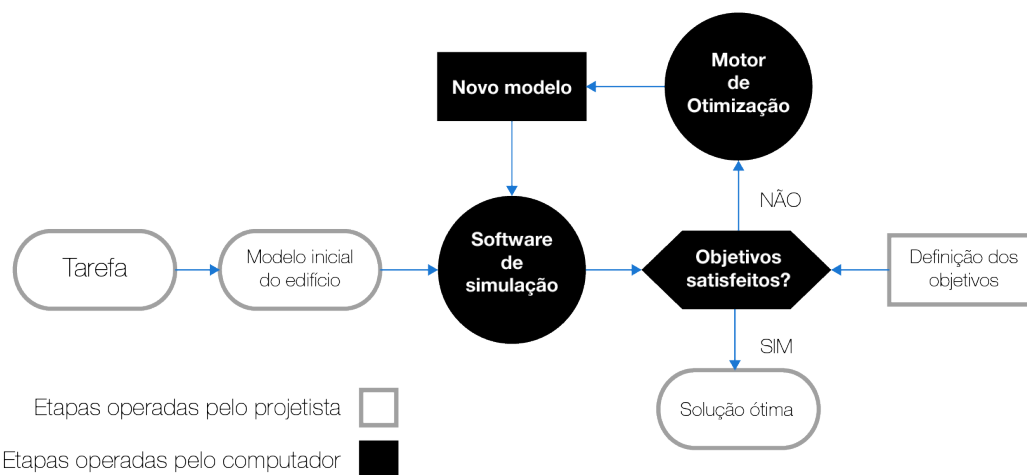


Figura 1: Processo de Otimização baseada em simulação. Fonte: adaptado de Shi et al. (2016).

De acordo com Nguyen, Reiter e Rigo (2014), um processo de OBS podem ser dividido em três etapas básicas: *Pré-processamento*, *Execução da otimização* e *Pós-processamento*, como mostrado no Quadro 1.

Quadro 1: Principais etapas de um processo de OBS. Fonte: Nguyen, Reiter e Rigo (2014).

Etapas	Principais Tarefas
Pré-processamento	<p>Formulação do problema de otimização:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Construção do modelo computacional; • Definição das variáveis; • Definição das <i>funções objetivo</i> e <i>funções restritivas</i>; • Seleção de um algoritmo de otimização apropriado ao problema e configuração deste de acordo com o problema; • Acoplamento entre o algoritmo de otimização e o software de simulação; • (Opcional) Rastreamento das variáveis irrelevantes por meio de análise de sensibilidade, a fim de reduzir o espaço de busca e aumentar a eficiência da otimização; • (Opcional) Criação de um <i>surrogate model</i> (modelo simplificado) para reduzir o dispêndio de processamento computacional.
Execução da Otimização	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoramento da convergência; • Controle dos critérios de término do processo; • Detecção de erros ou de falhas na simulação;

Pós-processamento

- Interpretação dos resultados da otimização;
- (Opcional) Verificação e comparação entre os resultados de otimização dos *surrogate models* e dos modelos "reais";
- (Opcional) Aplicação de análise de sensibilidade nos resultados da otimização;
- Apresentação dos resultados.

4. Método

A. Pré-processamento - Criação do modelo para o estudo

A.1. Geometria

A primeira tarefa é a criação de um modelo de *residência autônoma unifamiliar* de média renda que seja comum no Brasil, de acordo com Tavares (2006). O modelo criado para o presente estudo é composto por total de 18 variáveis, sendo: 13 variáveis geométricas independentes e 2 dependentes e 1 variável construtiva independente e 2 dependentes (Figuras 2 e 3). A relação das variáveis é apresentada no Quadro 2.

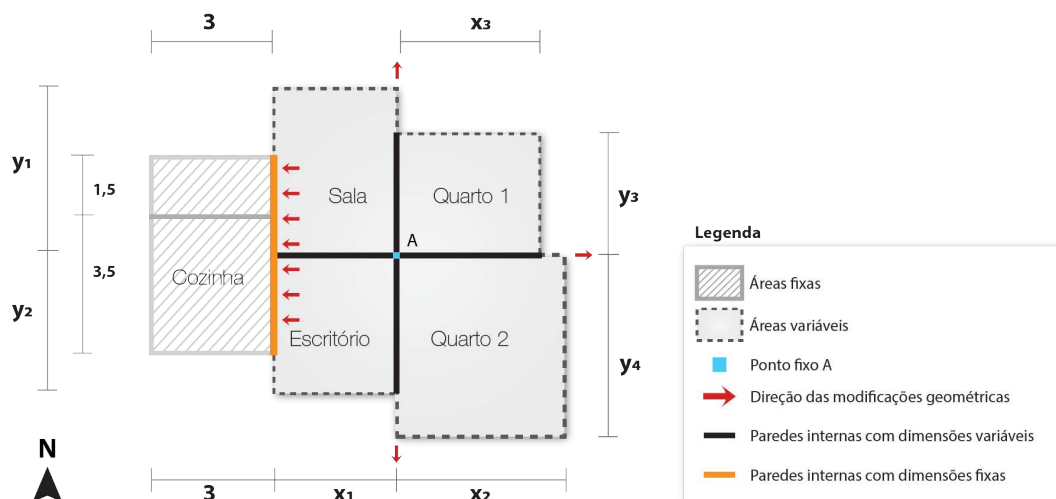


Figura 2: Planta da UH com distribuição das variáveis para otimização.

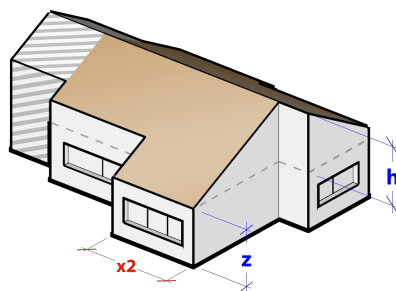


Figura 3: UH base com distribuição das variáveis para otimização.

Quadro 2: Definição das variáveis.

Variáveis	Descrição	Min.	Máx.	Tipo	Natureza	Uni.
x1	Dimensão dos ambientes	2,6	6,0	Contínua	Independente	m
y1	Dimensão dos ambientes	2,5	5,0	Contínua	Independente	m
x2, x3, y2, y3, y4	Dimensão dos ambientes	2,5	6,0	Contínuas	Independentes	m
z	Pé-direito	2,5	4,0	Discreta	Independente	m
h	Altura da cumeeira	0,35	3,6	Contínua	Independente	m
fs1	Offset da janela da Sala	0,15	1,3	Contínua	Independente	m
fe1	Offset da janela do Escritório	0,2	1,5	Contínua	Independente	m
fd1, fd2	Offset jan: Dorm. 1 e Dorm. 2	0,2	1,6	Contínuas	Independentes	m
i1	Inclinação do telhado	10%	60%	Contínuas	Dependente	----
i2	Inclinação do telhado	10%	145%	Contínuas	Dependente	----
jTipo	Tipo de janela	----	----	Discreta	Independente	----
t1, t2	Tipo de telha	----	----	Discretas	Dependentes	----

As variáveis *altura da cumeeira* (h) e *Offset das janelas* ($fs1$, $fd1$, $fd2$ e $fe1$) estão sujeitas a restrições relativas às características de inclinação das telhas e devido à legislação municipal, respectivamente. Estas são descritas nos dois tópicos subsequentes.

A.1.1. Restrições das áreas das janelas

Para atribuir apenas uma variável geométrica a cada abertura, as janelas foram modeladas no através de *Offset*¹⁴ (Figuras 4 e 5). É importante ressaltar que o

14 *Offset* é um termo inglês usado em sistemas CAD que denomina o deslocamento paralelo das arestas de uma geometria - uma cópia da geometria a uma determinada distância das arestas originais.

modelo numérico de distribuição solar do EnergyPlus adotado pelo ArchSim não quantifica nos cálculos a posição relativa das aberturas em relação à parede, apenas a área dessas.

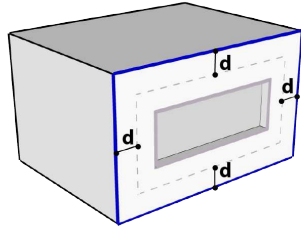


Figura 4: Offset em relação às arestas da parede, representado por uma distância d .

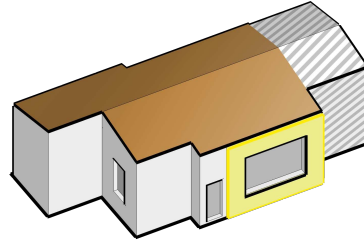


Figura 5: Offset da janela da sala, a partir de um retângulo definido (destacado em amarelo).

As primeiras restrições em relação à construção de aberturas, levando em consideração apenas os aspectos geométricos do *Offset*, são: o valor deste não pode ser negativo (senão ultrapassa as arestas da parede), e o valor deste deve ser inferior à metade do valor da menor aresta (do contrário, a superfície da abertura é inexistente). Aplicado a casos reais, entram restrições de materiais de construção e legislação locais. Foi escolhida como localização, para a otimização, o município de São Paulo (23°S, 46°O), pelo qual foi seguido o código de obras local, que estabelece que as aberturas devem apresentar, no mínimo, área equivalente a 15% da área do piso do ambiente (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2016). Assim, isolou-se a variável *offset*, de maneira que esta acarretasse em uma área de abertura maior ou igual que 15% da área do piso. Também foi determinado que a área da janela não ultrapassasse 80% da área da parede. Todos os *offset* seguem as arestas da superfície total da parede, com exceção da sala (Figura 5), no qual foi definido um retângulo distante em 20cm da porta. Assim as restrições para $fS1$, $fD1$, $fD2$, $fE1$ são:

$$f \leq \frac{1}{20} \left(-\sqrt{5} \sqrt{3a + 5(b - z)^2} + 5b + 5z \right) \quad \text{Equação 1}$$

- Onde:**
- f : valor do offset
 - a : área do piso do ambiente
 - b : aresta base
 - z : pé-direito

$$f \geq \frac{1}{20} \left(-\sqrt{5} \sqrt{14p + 5(b-z)^2} + 5b + 5z \right) \quad \text{Equação 2}$$

- Onde:**
- f: valor do offset
 - p: área da parede
 - b: aresta base
 - z: pé-direito

A.1.2. Restrições e condicionais para a cobertura

Foi determinado o uso de dois tipos de telhas. Considerou-se que a telha de fibrocimento suporta altas inclinações (145%) para que houvesse maior variabilidade geométrica, e que a cerâmica suporta de 30% a 40%. A variável inclinação i é interdependente das variáveis y_1 , y_4 e h . O telhado é composto por duas águas, com respectivas inclinações i_1 e i_2 . Foi definido então:

Se $30\% \leq i \leq 40$, então, "telha cerâmica", senão, "telha de fibrocimento"

Sendo:

Se $y_1 > y_3$, então, " $i_1 = 100(h/y_1)$ ", senão, " $i_1 = 100(h/y_3)$ "

Se $y_2 > y_4$, então, " $i_2 = 100(h/y_2)$ ", senão, " $i_2 = 100(h/y_4)$ "

Restrição da altura do telhado:

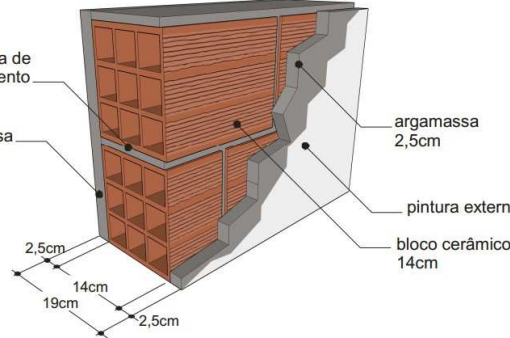
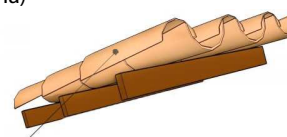
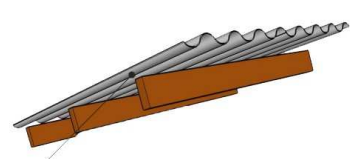
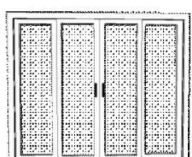
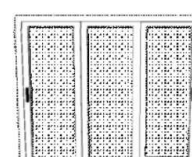
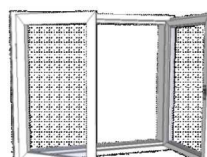
Se $y_2 > y_4$, então, " $h \leq 6y_2 / 10$ ", senão, " $h \leq 6y_4 / 10$ "

A.2. Materiais e cores

Os pré-requisitos de transmitância térmica, capacidade térmica e absorvância solar das paredes externas e coberturas de ambientes de permanência prolongada foram atendidos de acordo com a Zona Bioclimática em que a edificação se localiza conforme o disposto pelo RTQ-R, para atendimento ao nível A. Selecionou-se os materiais construtivos entre os mais frequentemente utilizados em unidades habitacionais no Brasil, a partir do Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes e Coberturas (INMETRO, 2012) e da NBR 15220 (ABNT, 2005), presentes no Quadro 3. Considerou-se que as telhas de cerâmica e fibrocimento apresentam a mesma absorvância solar, para aproximar as características dos dois materiais. Para isso, foi

usada telha cerâmica cor palha, e telha de fibrocimento pintada em cor clara.

Quadro 3: Materiais e cores do modelo. Fonte: INMETRO, 2012 e ABNT, 2005.

<p>Parede</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;">  <p>argamassa de assentamento 1,5cm argamassa 2,5cm 2,5cm 14cm 19cm 2,5cm</p> <p>argamassa 2,5cm pintura externa bloco cerâmico 14cm</p> <p>U = 1,85 W/(m²K) ; CT = 161 kJ/m²K</p> </div> <div style="width: 50%;"> <p>Bloco cerâmico* : λ = 0,90 W/(m.K) ρ = 909 kg/m³ c = 920 J/kg.K</p> <p>Argamassa: λ = 1,15 W/(m.K) ρ = 2000 kg/m³ c = 1000 J/kg.K</p> <p>Pintura externa e interna cor branco: α = 0,2</p> </div> </div>		
<p>Piso</p>	<p>Radier concreto: λ = 1,75 W/(m.K) ρ = 2400 kg/m³ c = 1000 J/kg.K Espessura = 10 cm</p>	<p>Argamassa reboco: λ = 1,15 W/(m.K) ρ = 2000 kg/m³ c = 1000 J/kg.K Espessura = 2,6 cm</p>	<p>Piso cerâmico: λ = 0,9 W/(m.K) ρ = 1600 kg/m³ c = 920 J/kg.K Espessura = 0,1 cm</p>
<p>Laje</p>	<p>Laje de concreto: λ = 1,75 W/(m.K); ρ = 2200 kg/m³; c = 1000 J/(kg.K) Espessura = 10 cm, U = 3,73 W/(m²K) ; Ct = 220 kJ/m²K</p>		
<p>Cobertura</p>	<p>Telha cerâmica: (cor palha)</p>  <p>telha cerâmica</p> <p>λ = 1,05 W/(m.K) ρ = 2000 kg/m³ c = 920 J/kg.K α = 0,5 Espessura = 1 cm</p>	<p>Telha de fibrocimento:</p>  <p>telha fibrocimento</p> <p>λ = 0,95 W/(m.K) ρ = 1900 kg/m³ c = 840 J/kg.K α = 0,5 Espessura = 0,8 cm</p>	
<p>Janelas</p>	<p>Janela tipo 1</p> 	<p>Janela tipo 2</p> 	<p>Janela tipo 3</p> 
<p>% ventilação</p>	<p>40%</p>	<p>60%</p>	<p>90%</p>

A.3. Transcrição para a linguagem computacional

O modelo foi transcrito para o Grasshopper de acordo com o definido nos tópicos anteriores. Determinou-se duas funções objetivo, uma apresentando como critério os Graus-hora para resfriamento (GHR) e outra os Graus-hora para aquecimento (GHa). O objetivo da otimização é encontrar o menor valor possível para ambos. As temperaturas base definidas foram 26°C para GHR, e 18° para GHa, de acordo com o limite do RTQ-R para o primeiro, e a Standard 55¹⁵ (ASHRAE, 2010) e temperatura mínima de conforto de Givoni (1992) para o segundo. Os *outputs* da simulação são dados em *temperatura operativa horária*, para o período de um ano, sendo:

Objetivo 1: Min. GHR = $\sum (T_0 - 26 \text{ }^\circ\text{C})$, sujeito a: $T_0 > 26$

Objetivo 2: Min. GHa = $\sum (18 \text{ }^\circ\text{C} - T_0)$, sujeito a: $T_0 < 18$

Onde:

- **GHR:** indicador de graus-hora de resfriamento (°Ch);;
- **GHa:** indicador de graus-hora de aquecimento (°Ch);
- **T₀:** temperatura operativa horária (°C)

Quanto às configurações do EnergyPlus/Archsim, o modelo foi dividido em oito zonas térmicas, quatro referentes aos ambientes de ocupação prolongada, duas à cozinha e ao banheiro e duas relativas às águas da cobertura. A localização determinada para o modelo é o município de São Paulo (SP), localizada na Zona Bioclimática 3, de acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005).

Foi seguido o disposto pelo RTQ-R (INMETRO, 2012) em relação aos padrões de uso, de equipamentos e de iluminação. Nas configurações do Archsim, o padrão de ocupação só pode ser definido em função da área do piso, o que limita o atendimento ao padrão de uso do RTQ-R (FONSECA, SANTANA e CARLO, 2016). Foi definido então, ocupação de 0,15 pessoas/m². O modelo é naturalmente

¹⁵ A Standard 55 (ASHRAE, 2010) indica 18,5°C como temperatura mínima de conforto para ambiente interno naturalmente ventilado para 90% de aceitabilidade e 17°C para 80%.

condicionado, com uso do módulo de ventilação *Airflow Network* do EnergyPlus – de acordo com a predominância de condicionamento natural nas residências brasileiras. As portas foram consideradas permanentemente abertas, com área efetiva de ventilação de 90%. O coeficiente de descarga das janelas foi 0,6, com temperatura de *setpoint* de 20°C para controle de abertura destas.

B. Execução da Otimização

Foram configurados os objetivos e as variáveis do modelo no motor Octopus. Para a otimização, foi definida uma população de 100 indivíduos, pois, números inferiores a esse podem diminuir a eficiência da otimização, devido à complexidade de problemas relacionados a edificações (MAGNIER, 2008). O Octopus possui uma função denominada *diversify parameters*, (diversificar parâmetros), que adiciona um objetivo adicional ao problema, tratado internamente no motor. Esta função visa maximizar a distância de cada solução a todas as outras soluções no espaço genético, evitando, desta forma, que o algoritmo se fixe, ou trave, em soluções locais (FOOD4RHINO, 2016). A Figura 6 apresenta um exemplo da diversificação de parâmetros da primeira geração, que foi utilizada como terceiro objetivo.

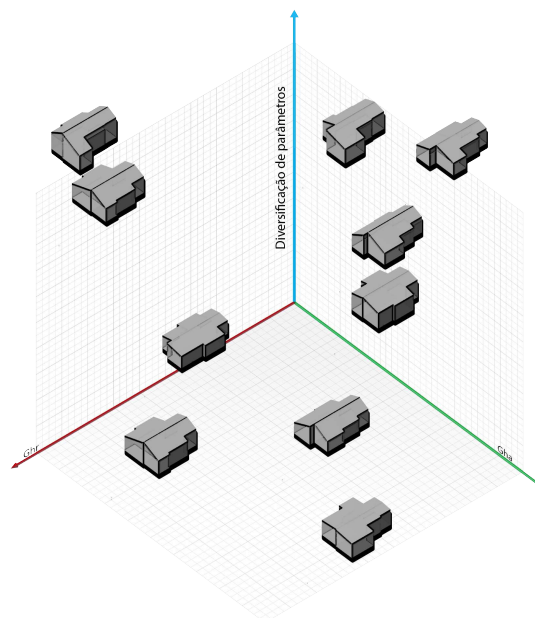


Figura 6: Utilização da função diversificação de parâmetros.

Através de configurações realizadas no Grasshopper, o Octopus permite a visualização das geometrias dos indivíduos da otimização, como mostrado na Figura

7. Esta ferramenta de visualização é útil a processos de otimização com baixo dispêndio computacional, pois permite a comparação de diversas disposições geométricas (FOOD4RHINO, 2016). No entanto, o uso desta ferramenta pode atrasar o processo de otimização, tendo sido utilizada apenas nos testes de processo.

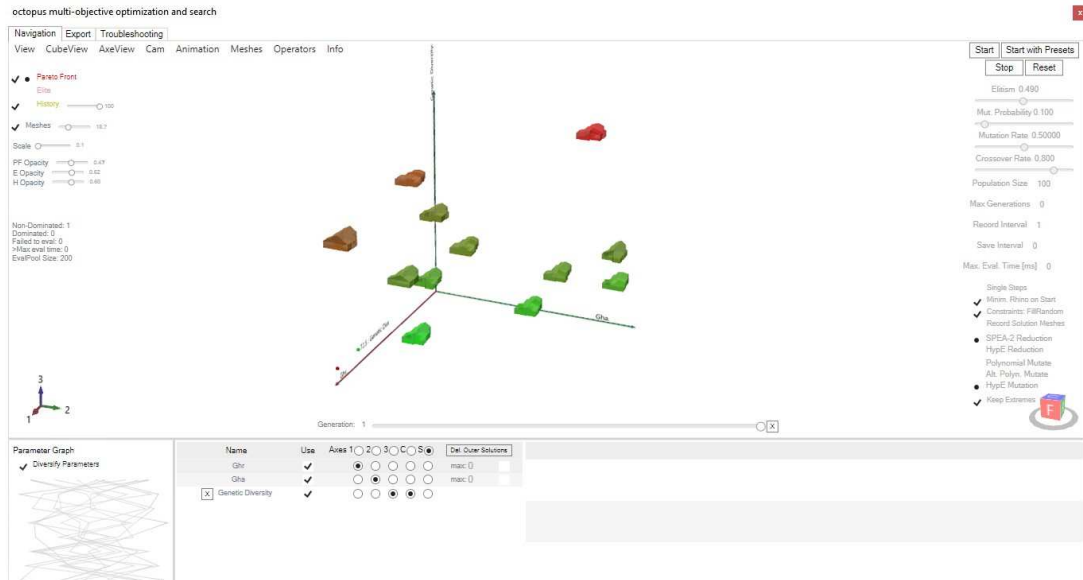


Figura 7: Interface do Octopus – primeiro teste de processo.

As configurações iniciais foram mantidas na otimização final (Figura 8), que apresenta os indivíduos das últimas gerações. Os gráficos em cinza, na porção inferior da Figura 8, permitem o controle do processo de convergência da otimização.

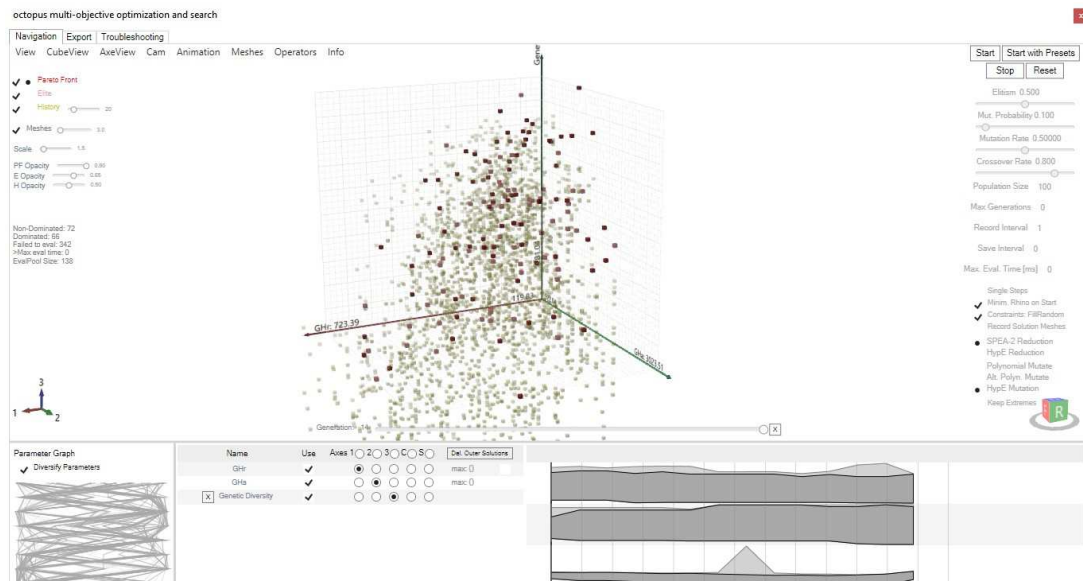


Figura 8: Interface do Octopus - otimização final.

B.1. Considerações acerca do desempenho computacional

Houve monitoramento da convergência da otimização e da detecção de falhas ao longo de todo o processo. Para isso, executou-se 4 processos de otimização antes do processo final, em dois computadores distintos. Em relação ao tempo de processamento, o software EnergyPlus apresenta baixo desempenho dentro do sistema Grasshopper/ArchSim. Isso se deve à falta de adaptação do Energyplus 8.5.0 aos processadores *multicore*¹⁶. A cada simulação, o EnergyPlus limita o processamento a apenas um núcleo do processador, e só utiliza mais de um núcleo caso sejam executadas simulações paralelas. No entanto, o processo de otimização descrito neste estudo é linear, e consiste em uma simulação por vez. Um computador continha um processador de 8 núcleos e outro de 2 núcleos, e os processamentos limitaram-se a 12% a 33% de suas capacidades, respectivamente. Caso fosse possível usar toda a capacidade de processamento de tais computadores, poderiam ser executadas até quatro mil simulações a mais, a cada 24h.

Foi verificado, no monitoramento das primeiras quatro otimizações-teste realizadas, que o Rhinoceros usou a memória RAM até aproximadamente 8 GB para o modelo utilizado neste estudo, após 24h. Esse tempo corresponde a cerca de 1000 a 1200 simulações do modelo apresentado. O uso da memória é elevado considerando-se a necessidade de milhares de simulações para resultados satisfatórios na otimização. Quando o processamento alcançava de 90% a 100% do uso da memória RAM, o Rhino caía e o Octopus interrompia a coleta de dados das funções objetivo.

Para contornar este problema, o Octopus foi configurado para *autosave*, o que permite que se pause o processo e retome quando desejado, a fim de evitar o acúmulo de memória ocasionado pelo Rhino. Na otimização final, o processo foi retomado 3 vezes, no entanto, o sistema caiu a partir da simulação 1495. Tendo em vista tais limitações do *workflow* entre os programas, o processo de otimização foi finalizado. Analisou-se os resultados da otimização, e a partir dos dados, selecionou-se as características geométricas de maior impacto sobre o desempenho energético. A partir destas foi criado um modelo simplificado (*surrogate model*) para estimar a solução ótima para a unidade habitacional.

¹⁶ Fonte: <http://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-4/tips-and-tricks-using-energyplus/run-energyplus-in-parallel.html>.

B.2. Proposição de um *surrogate model*

Este método visa estimar a solução ótima (ou próxima à ótima) a que chegaria a otimização completa da UH. Foi executada uma otimização com um modelo de 2 zonas térmicas, que pudesse chegar à convergência (Figura 9) com baixo dispêndio de tempo e de capacidade de processamento. As UHs otimizadas na etapa anterior foram analisadas por meio da correlação dos GHr e GHr, com as seguintes características: fator de forma da UH com e sem a cobertura, área de piso das UHs, pé direito da UH, área de janelas de cada ambiente, modelo de esquadrias (que contém diferentes percentuais de área de ventilação natural), inclinação da cobertura, orientação solar dos ambientes, além da relação entre as variáveis supracitadas. Um modelo com duas zonas térmicas foi criado com as variáveis mais impactantes indicadas na análise, e otimizado segundo o processo previamente descrito.

A partir dos resultados da otimização de 2 zonas, extraiu-se as características geométricas predominantes. Essas características foram reproduzidas no modelo completo da UH, a fim de estimar os limites da otimização, tanto para o pior quanto o melhor caso.

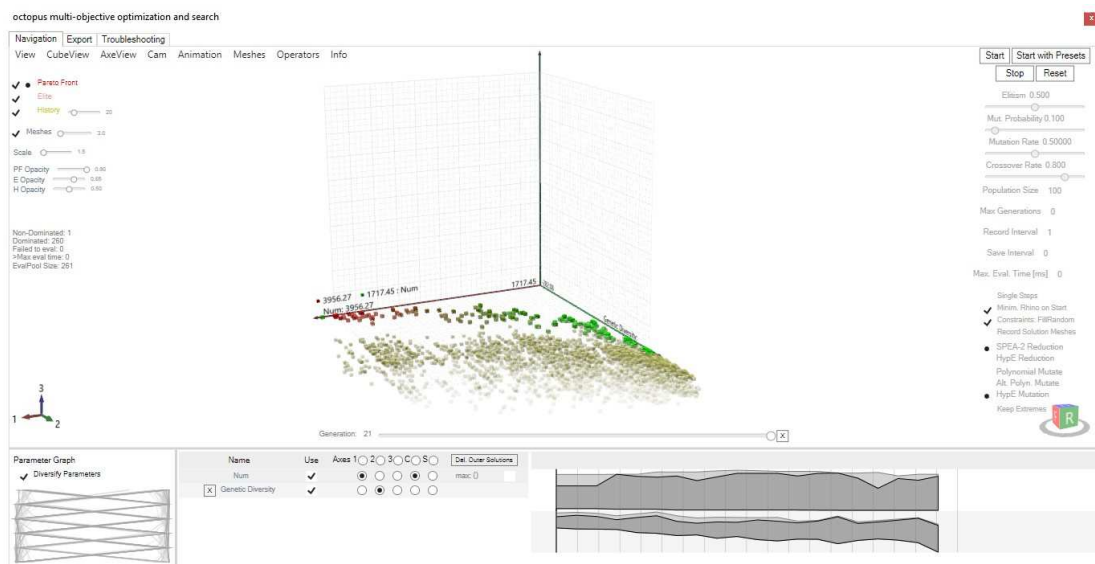


Figura 9: Interface do Octopus - otimização do surrogate model. Em verde: melhores casos para GHa.

C. Pós-processamento

C.1. Resultados: otimização da UH

Os resultados obtidos pela otimização são mostrados nas Figuras 10, 11 e 12. Verificou-se que 99% dos resultados apresentaram nível de eficiência ‘A’ para verão (G_{Hr}) de acordo com o RTQ-R. Isso indica, para este modelo, que a escolha de materiais construtivos com base no prescrito pelo RTQ-R foi o suficiente para garantir a eficiência para as condições de verão. Não há escala comparativa para o desempenho da edificação para G_{Ha} de acordo com o RTQ-R – há outro indicador para aquecimento –, no entanto verifica-se valores elevados para este, quando comparados aos G_{Hr}. Deve-se levar em consideração o clima do município de São Paulo, que é caracterizado por períodos maiores de desconforto para inverno do que para verão. Na Tabela 1 são mostradas, mínimas, médias e máximas mensais de temperaturas de bulbo seco (°C), de acordo com o arquivo climático utilizado nas simulações. Em metade do ano, as médias estão abaixo da zona de conforto de Givoni, e em outros 3 meses, abril, setembro e novembro, estão próximas do limite inferior. Além disso, a absorvância solar de telhas cerâmicas mais utilizadas nas residências brasileiras é cerca de 0,7 (MUNIZ; PEZZUTO, 2014), e, neste estudo, foi considerada uma telha cerâmica clara, com $\alpha = 0,5$.

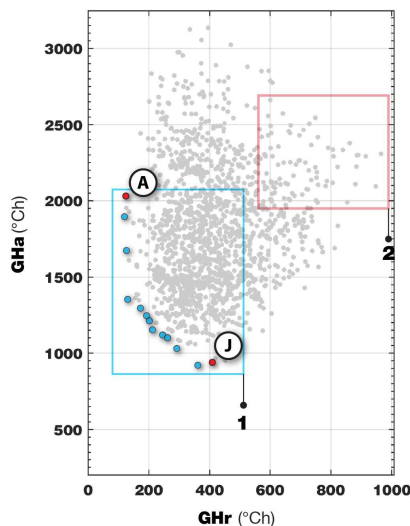


Figura 10: Resultados da otimização, com Pareto Front em destaque na área 1 (destaque em azul), e casos pouco eficientes na área 2.

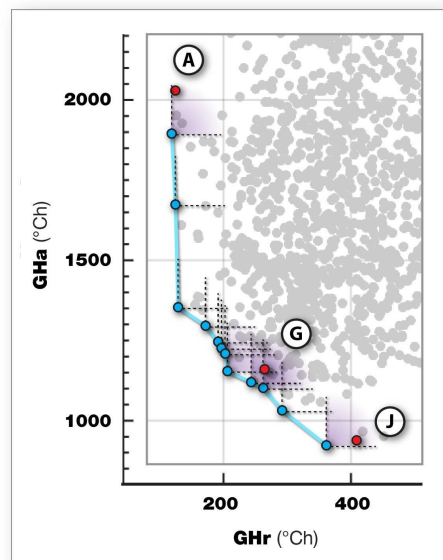


Figura 11: Pareto Front com identificação de 3 casos selecionados fora desta curva.

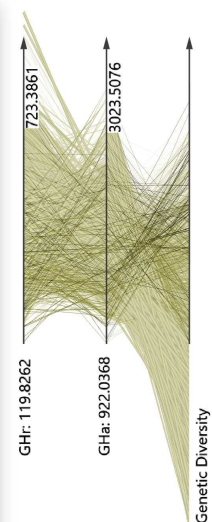


Figura 12: Relação entre os 3 objetivos.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Máx.	32.5	32.8	31.0	28.8	27.0	25.0	27.1	27.9	32.0	31.0	32.6	31.4
Média	22.5	22.1	21.2	18.5	16.7	16.8	16.0	17.2	18.1	17.9	18.9	20.0
Mín.	15.5	16.5	15.0	11.5	9.2	8.7	9.1	7.5	9.4	10.0	12.5	12.4

Tabela 1: Médias mensais de temperaturas de bulbo seco (°C) para o município de São Paulo. Fonte: Arquivo climático do município de São Paulo, indicado por Brasil (2013).

A partir dos dados obtidos, foram realizadas correlações gerais entre os parâmetros geométricos dos modelos. Foi verificado que o parâmetro com maior impacto sobre os valores de GHa é a área útil das UH's (Figura 13). O impacto da área útil da UH está relacionada a área de exposição solar da cobertura. Como se sabe, as baixas latitudes brasileiras geram maiores incidências solar na cobertura do que nas paredes. No entanto, é verificada alta dispersão entre as áreas das UH's e os GHr, o que demonstra que outros fatores impactam esta relação para condições de verão (Figura 14). Os ganhos solares através de janelas podem ser a maior e a mais variável fonte de calor de um edifício (LOMANOWSKI, WRIGHT, 2012). A porcentagem da área total das janelas sobre a área do piso mostrou ser um fator relevante para as condições de verão (Figura 15). O mesmo fator mostrou alta dispersão para as situações de inverno (Figura 16).

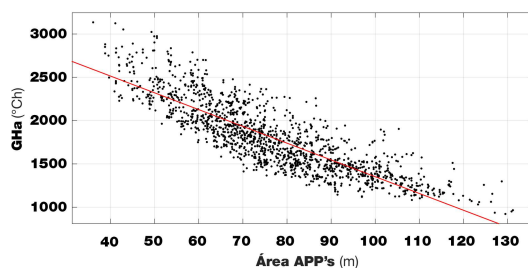


Figura 13: Relação entre as áreas das APP's e os GHa.

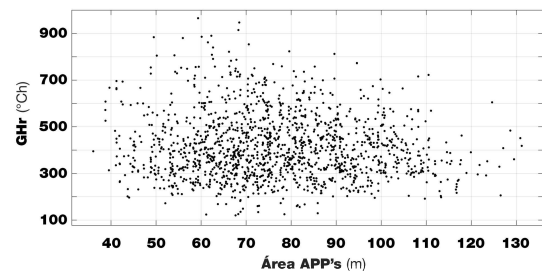


Figura 14: Relação entre as áreas das APP's e os GHr.

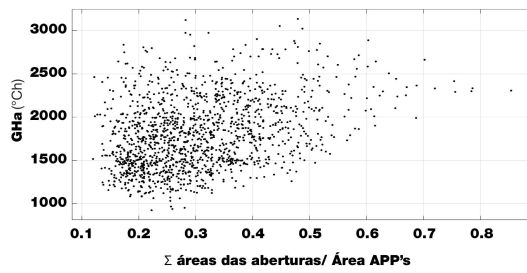


Figura 15: Relação entre áreas jan./área APP e os GHa.

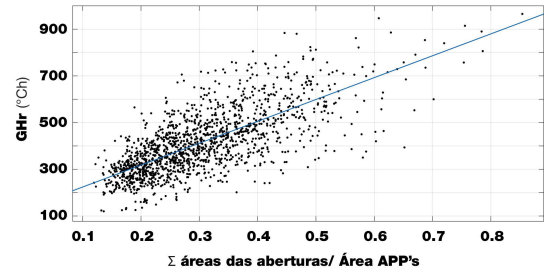


Figura 16: Relação entre áreas jan./área APP e os GHR.

A partir de tais relações, foi realizada a análise geométrica/formal dos modelos. Para isso foram selecionados modelos entre as melhores soluções, obtidas através do *Pareto Front* (Figura 10, área 1, em destaque), e selecionados casos das piores soluções para GHR e GHa, simultaneamente (Figura 10, área 2). Os casos selecionados são apresentados nas Figuras 17 e 18 – as geometrias são proporcionais uma em relação à outra, sendo utilizada perspectiva paralela para a representação.

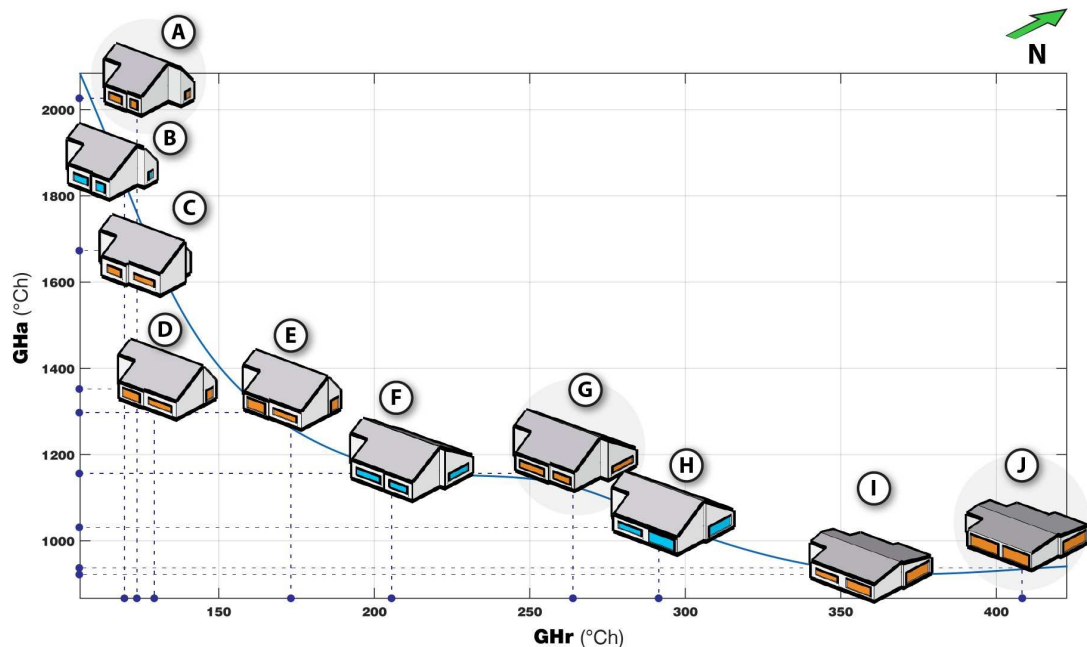


Figura 17: Casos selecionados do Pareto Front (vide área 1 em destaque no gráfico da Figura 10). Aberturas em laranja são referentes às Janelas tipo 2 e azul, Janelas tipo 3. *Os modelos circulados em cinza, A, G e J não pertencem ao Pareto Front.

Foram selecionadas sete soluções do *Pareto Front*, e três próximas a este (marcados em cinza), para auxiliar a visualização da gradação geométrica (Figura 17). Pode-se observar similaridades geométricas entre os modelos, com modificações graduais em relação ao pé-direito, área de aberturas, área da UH e inclinação da cobertura.

Os melhores casos selecionados para GHr (Figura 17) apresentaram como características dominantes: menores áreas úteis, menores janelas, e grande inclinação das coberturas. Embora tenha sido determinada a possibilidade de janelas com diferentes percentuais de abertura, a área envidraçada sobrepujou o impacto da ventilação. É provável que uma proteção solar ou beiral priorizasse o potencial de ventilação da janela, no entanto, este aspecto não foi incluído na otimização. Quanto maior a área de contato com o solo, maior a contribuição deste para o resfriamento dos ambientes internos. No entanto, o impacto do calor recebido pela cobertura ultrapassa o impacto do calor absorvido pelo solo. Assim, os impactos das menores áreas úteis deve-se às menores áreas expostas da cobertura, e as altas inclinações são mais eficientes devido à baixa latitude de São Paulo (sol alto).

Já os melhores casos para GHa, em acordo com o que foi exposto, são os modelos com as maiores áreas de piso (Figura 17). Foi encontrado para os melhores casos para GHa, também: menores inclinações das coberturas e pés-direitos mais baixos, visto que a altura do pé-direito pode apresentar grande impacto no comportamento térmico de uma edificação (GUIMARÃES et al., 2013). As telhas de menor inclinação são referentes às de fibrocimento. Vale ressaltar que, em casos reais, as telhas cerâmicas apresentam melhor desempenho para verão do que as de fibrocimento, devido à capacidade de absorção de água pela cerâmica e à infiltração do ar pelos espaços entre as telhas, mas estes fatores não são contabilizados pelo EnergyPlus.

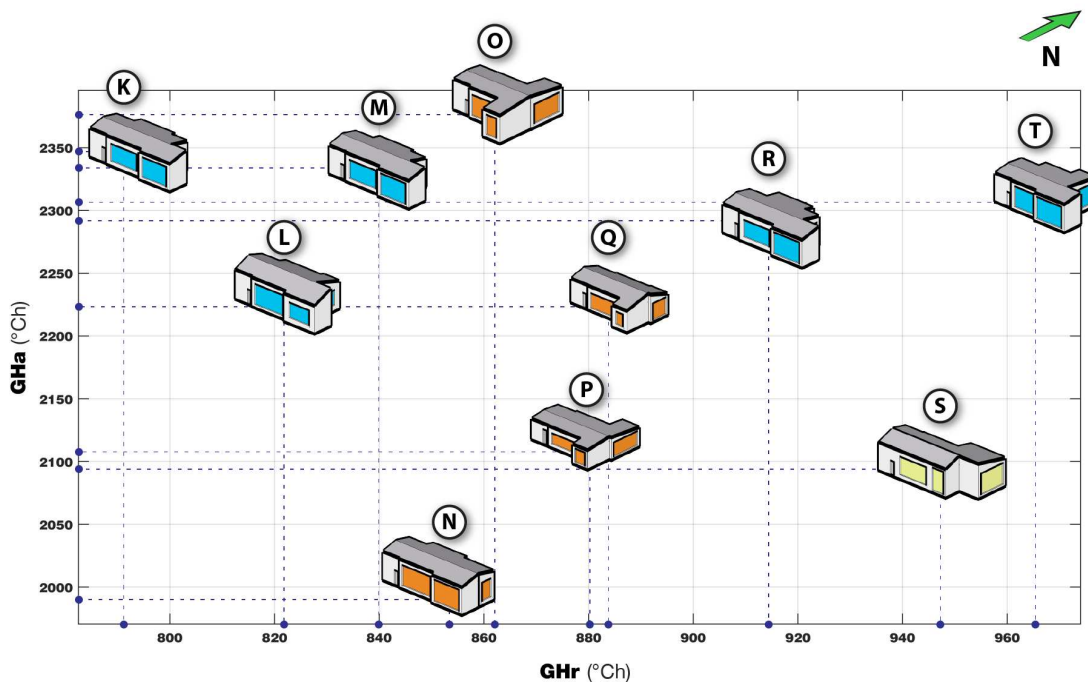


Figura 18: Casos selecionados das piores soluções para GHr e GHa simultaneamente (vide área 2 em destaque no gráfico da Figura 10). Aberturas em amarelo são referentes às janelas tipo 1, em laranja, à tipo 2, e em azul, a Janelas tipo 3.

Os casos com as piores soluções para GHr e GHa, simultaneamente, são representados na Figura 18. Observou-se predominância de pés-direitos acima de 3,5 metros, com grandes áreas de aberturas. Pés-direitos mais altos são eficientes para as condições de verão apenas quando há criteriosa relação com a área das aberturas. Neste caso, são vistos modelos com paredes com grandes áreas envidraçadas, pelas quais, é recebida muita radiação solar para os ambientes. Foi notado também, nestes modelos, áreas de paredes predominantes a norte e a sul, com formas mais alongadas no eixo leste/oeste. Isso pode ter a ver com os ganhos de calor nas paredes sul no verão e com perdas no inverno. Ficam mais claras as relações quando são apresentados os casos em planta. Na Figura 19 são apresentadas as plantas e perspectivas dos modelos selecionados, de A a T. Utilizou-se perspectiva paralela e todos os modelos são proporcionais entre si.

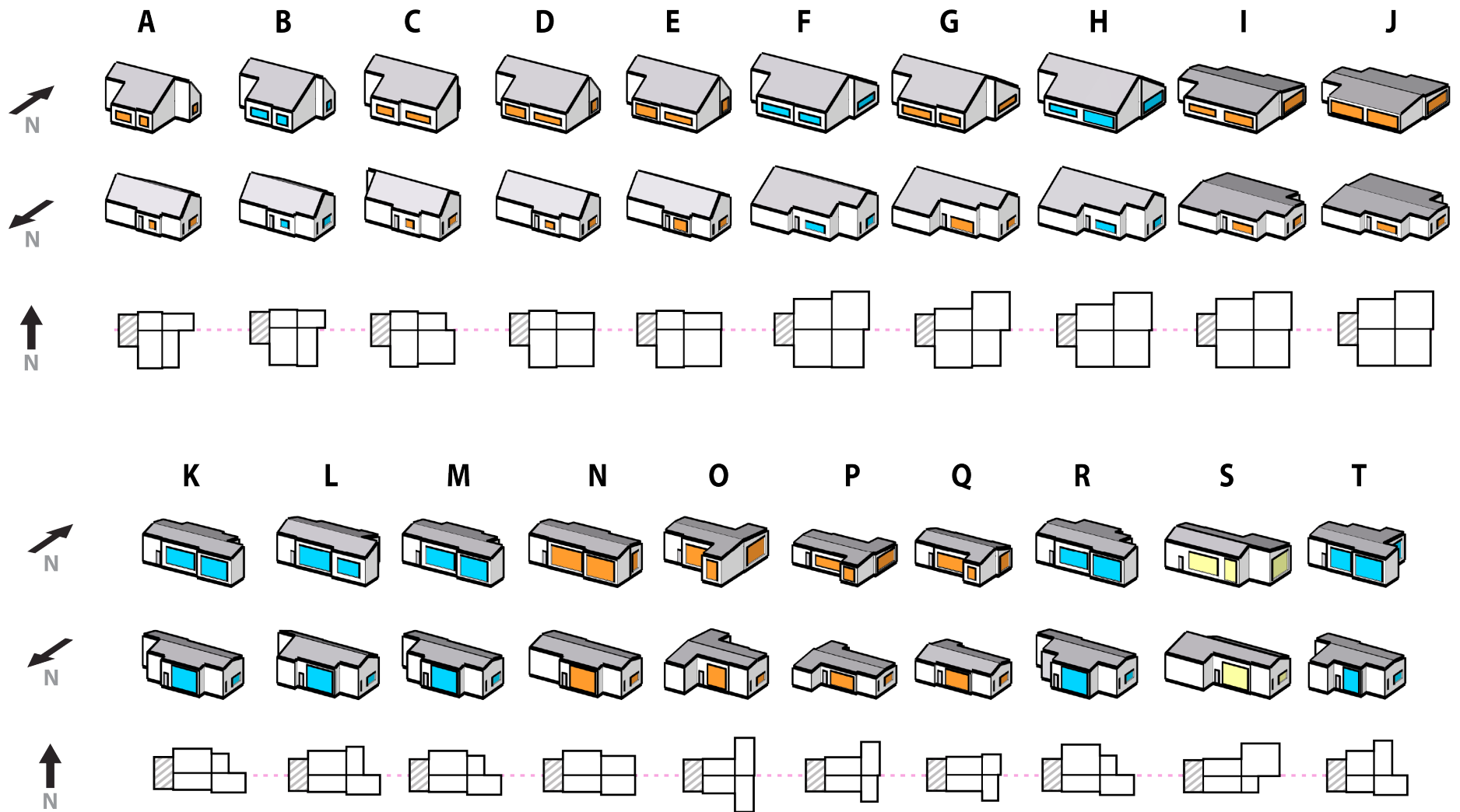


Figura 19: Modelos seleccionados.: perspectivas e plantas.

	GHr (°Ch)	GHa (°Ch)	x1 (m)	x2 (m)	x3 (m)	y1 (m)	y2 (m)	y3 (m)	y4 (m)	PD (m)	h (m)	i1 %	i2 %	Área (m ²)	jS1 (m ²)	jD1 (m ²)	jD2 (m ²)	jE1 (m ²)
A	124	2029	3,8	2,6	4,9	2,9	5,9	2,6	5,8	2,6	3,1	109,1	53,3	76,1	1,6	2,0	2,2	2,2
B	120	1894	4,3	3,1	4,4	2,8	5,8	2,7	6,0	2,8	3,2	111,6	52,9	82,7	1,8	1,8	2,8	2,8
C	125	1674	4,3	5,7	4,4	2,9	5,7	2,6	5,2	2,9	3,3	111,8	57,4	93,5	1,9	2,3	4,5	4,5
D	129	1353	4,3	5,8	5,9	2,9	5,9	2,6	5,8	2,5	3,4	115,5	56,9	100,9	1,9	3,1	5,0	5,0
E	173	1297	4,3	5,8	5,9	2,9	5,9	2,6	5,8	2,5	3,3	114,2	56,3	100,9	4,1	3,7	5,0	5,0
F	206	1155	5,9	5,0	5,8	4,8	5,8	5,9	5,9	2,7	3,2	54,6	54,5	141,5	4,2	5,5	4,4	4,4
G	264	1158	5,8	4,5	5,9	3,4	5,8	6,0	5,5	2,5	3,5	58,6	60,0	128,2	6,8	5,3	4,3	4,3
H	291	1032	5,8	5,6	6,0	4,0	5,7	5,9	5,7	2,5	3,4	58,3	60,0	138,3	4,6	8,8	9,0	9,0
I	361	922	5,8	5,6	5,9	4,9	5,8	5,9	5,8	2,5	1,2	20,1	20,2	144,5	4,6	9,7	7,2	7,2
J	408	937	5,8	5,6	6,0	4,7	5,7	5,9	5,7	2,5	0,6	10,8	11,1	142,1	4,1	9,4	9,7	9,7
K	791	2346	6,0	5,3	2,7	3,8	2,6	3,0	3,0	3,9	0,8	19,9	24,8	77,7	14,4	2,1	12,8	12,8
L	822	2221	6,0	5,3	2,7	3,8	2,6	4,4	3,0	3,9	1,3	29,9	43,4	81,2	15,0	6,3	8,3	8,3
M	840	2332	6,0	5,3	2,7	3,8	2,6	3,0	3,0	3,9	0,7	19,5	24,3	77,7	15,0	1,9	14,1	14,1
N	853	1990	6,0	5,3	5,3	3,8	2,6	3,0	3,1	3,9	0,8	20,3	25,1	85,6	14,5	5,1	14,4	14,4
O	862	2376	5,0	2,9	3,0	2,6	2,8	5,9	5,7	3,9	0,7	11,4	11,8	76,5	10,0	13,8	5,6	5,6
P	880	2108	5,6	2,6	2,9	2,8	2,5	5,2	4,1	2,7	0,4	8,4	10,8	70,9	8,6	9,9	3,8	3,8
Q	884	2222	5,6	2,5	2,9	2,8	2,5	3,2	4,0	3,0	1,0	31,1	24,7	64,5	10,1	6,7	2,6	2,6
R	914	2292	6,0	5,3	2,6	4,7	2,6	3,0	3,1	3,9	0,8	15,8	23,9	83,3	15,2	7,4	14,5	14,5
S	947	2093	6,0	2,7	6,0	2,7	2,5	5,1	2,6	3,9	1,0	19,6	39,4	83,5	14,4	13,5	6,9	6,9
T	965	2307	4,3	5,2	2,8	3,8	2,6	5,4	3,1	3,9	0,5	8,9	15,8	74,4	9,3	12,9	14,2	14,2

Tabela 2: Características físicas dos modelos selecionados. JS1, jD1 e jD2 e jE1 correspondem às áreas das aberturas da sala, dormitório 1, dormitório 2 e escritório, respectivamente.

C.2. Otimização - *surrogate model*

A estimativa da solução ‘ótima’ (sub-ótima) foi necessária apenas para GHa, visto que o RTQ-R indica que GHr abaixo de 800°Ch correspondem a nível A. Como os GHr chegaram próximas a 100°Ch, não foi necessária verificação. O *surrogate model* criado foi composto por duas zonas térmicas com 6 variáveis geométricas, duas no eixo y, uma em x, uma z (pé-direito) e dois *offset* (relativos às aberturas) (Figura 20). Não foi modelada uma cobertura, apenas a laje de concreto, visando diminuição do dispêndio computacional. Foi escolhida a janela intermediária, de 60% de abertura efetiva para ventilação. A partir de seis horas de processamento, a otimização entrou em convergência e foi possível detectar o melhor caso.

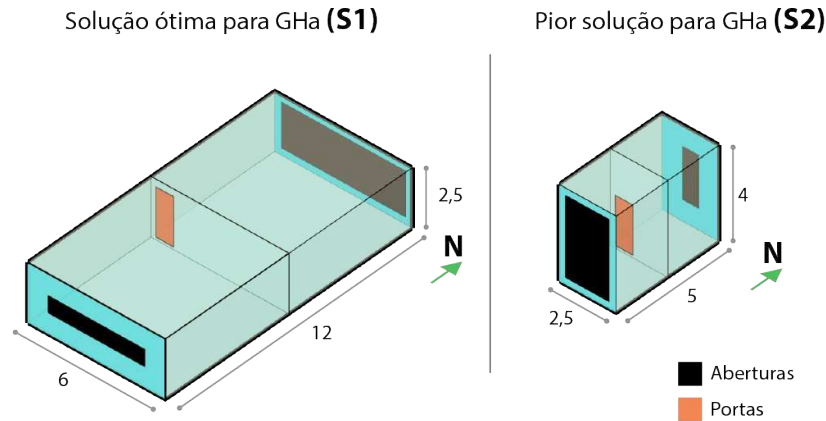


Figura 20: Resultados da otimização - surrogate model.

O melhor resultado para os GHa é representado pela solução S1 (à esquerda, Figura 20), com a maior área, o menor pé-direito, a maior janela para norte e a menor janela para sul. Para verificação, foram invertidos, manualmente, os limites das variáveis de S1 (resultando em S2, à direita). Verificou-se, que comparado aos dados desta otimização, S2 apresentou a pior eficiência para GHa. De fato, de acordo com o levantado nas análises geométricas anteriores, os piores resultados para GHa apresentavam geometrias mais próximas à S2.

A partir dos dados destas duas soluções extremas (S1 e S2), foram realizados testes nos modelos da UH. Inicialmente, dispôs-se uma UH com características geométricas similares a S1: dimensões dos ambientes nos valores máximos, pé-direito mínimo (e, também mínima altura do telhado), máxima área de abertura para o norte, e as menores aberturas para sul. Como a análise da otimização da UH dos tópicos anteriores mostrava modelos com grandes janelas para sul (Figura 18), foram realizados, também, testes manuais com os tamanhos das janelas; foi alcançado o melhor resultado para GHa quando todas as janelas apresentavam o máximo de aberturas para todas as fachadas (844°Ch). Este foi o menor GHa encontrado dentre todos os obtidos pela otimização da UH (Teste 1, Figura 21). Vale ressaltar, também, que foram utilizadas janelas do tipo 1.

Realizou-se um segundo teste com o modelo da UH, com os limites das variáveis invertidos em relação ao primeiro teste manual descrito no parágrafo anterior. Dessa forma, obteve-se os mais altos GHa, de 3579 °Ch (Teste 2, Figura 21) em comparação a todos os casos obtidos pela otimização. No Teste 2, foram

determinadas janelas do tipo 3.

Assim, confirma-se que as soluções nos extremos do *Pareto Front* (I e B) estavam próximas aos mínimos (ou 'soluções ótimas') para GHr e GHa, quando a otimização foi interrompida. A Figura 21 apresenta comparação quantitativa entre os melhores casos alcançados na otimização geral (I e A, respectivamente) e os dois testes manuais realizados a partir dos resultados do *surrogate model* (Teste 1 e Teste 2), e, a Figura 23, apresenta o gráfico com todas as soluções obtidas.

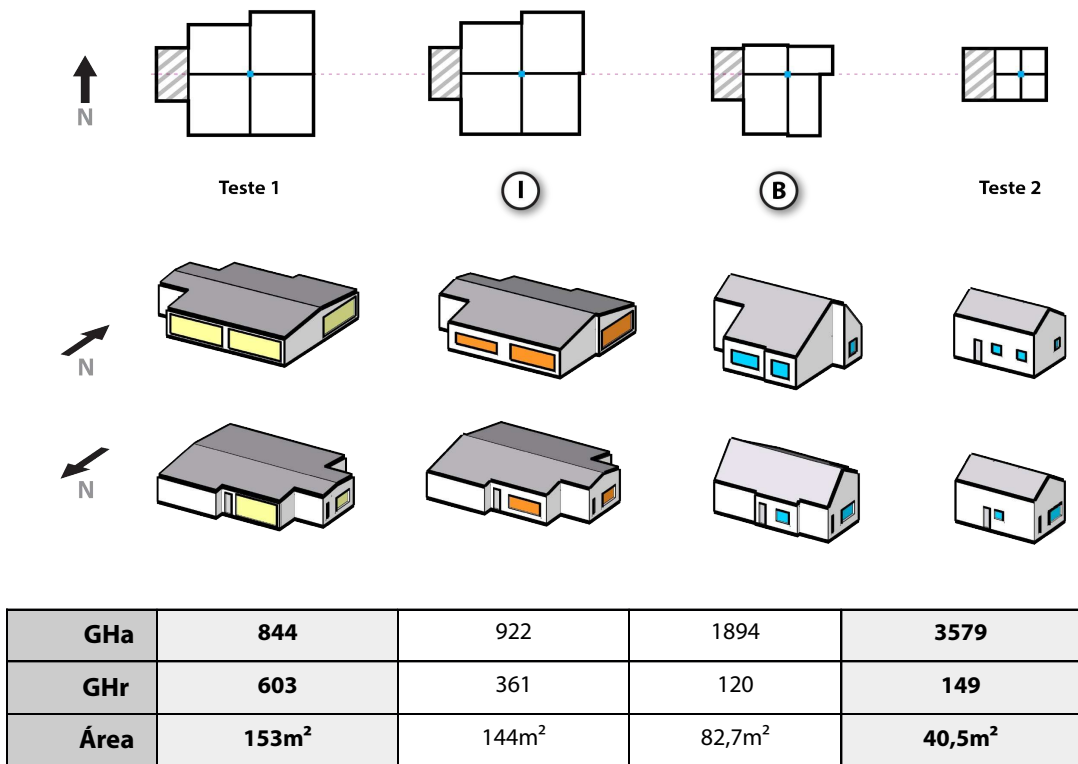


Figura 21: Melhores e piores casos encontrados para GHa.
Aberturas em amarelo são referentes às Janelas tipo 1, em laranja, à tipo 2, e em azul, a Janelas tipo 3.

C.3. Convergência da otimização

A partir dos resultados anteriores, foi criado o modelo Teste 3 (Figura 22), construído a partir da média do intervalo das variáveis das soluções com GHr e GHa mais baixos encontrados no *Pareto Front* (Teste 1 e B). Almejava-se verificar a

possibilidade de previsão de solução intermediária para as duas funções, dispendo-se apenas dos extremos. Este apresentou como eficiência 353°Ch de GHr e 1230°Ch de GHa. O modelo mais próximo ao Teste 3, dentre os escolhidos no intermédio do *Pareto Front*, é o H, com 291°Ch de GHr e 1032°Ch de GHa. É mantida a mesma classificação para GHr, nível A, com apenas 50°Ch de diferença, no entanto, para GHa, a diferença alcança 200°Ch. Apesar do modelo Teste 3 ser dominado por diversas soluções, este está relativamente próximo ao modelo H, quando considera-se o universo da otimização. Os resultados da otimização e dos Teste 1, 2 e 3 são apresentados na Figura 23, e, na Figura 24 é redefinido o *Pareto Front*, com acréscimo do Teste 1 (solução não-dominada pelas demais).

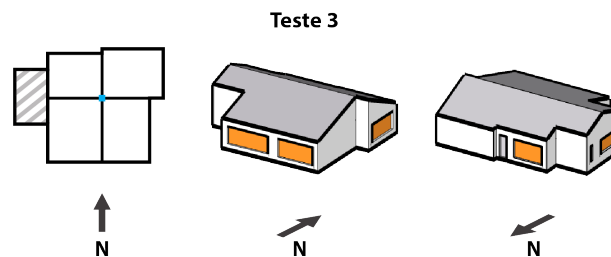


Figura 22: Teste 3 (construído a partir da média do intervalo das variáveis das soluções B e Teste 1).

$$GHr = 353^{\circ}Ch \text{ e } GHa = 1230^{\circ}Ch.$$

Se os mínimos reais para GHr e GHa apresentarem valores próximos ao I e Teste 1 (Figura 21), o ponto utopia (solução não atingível) corresponde a aproximadamente 100°Ch de GHr e 840°Ch de GHa (Figura 25). Assim, o *Pareto Front real* estaria contido na área hachurada (em azul, Figura 25), localizada entre os limites do 'ponto utopia' e ao obtido. Neste sentido, a existência de uma solução com valores próximos a 100°Ch de GHr e 840°Ch de GHa é improvável, tendo em vista, também, as características geométricas conflitantes para a eficiência termo energética para verão e inverno. Assim, há maior probabilidade que o intermédio do *Pareto Front real* esteja mais próximo à solução H do que ao ponto utopia. Portanto, aceita-se que a otimização se encontrava próxima à convergência quando interrompida.

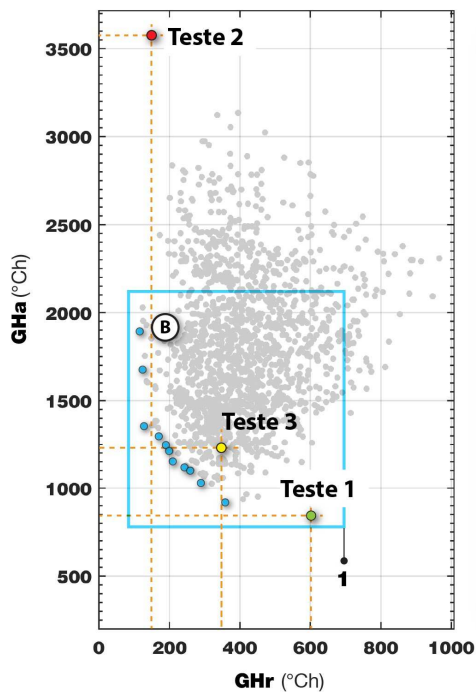


Figura 23: Resultados da otimização e testes (Teste 1 e Teste 2).

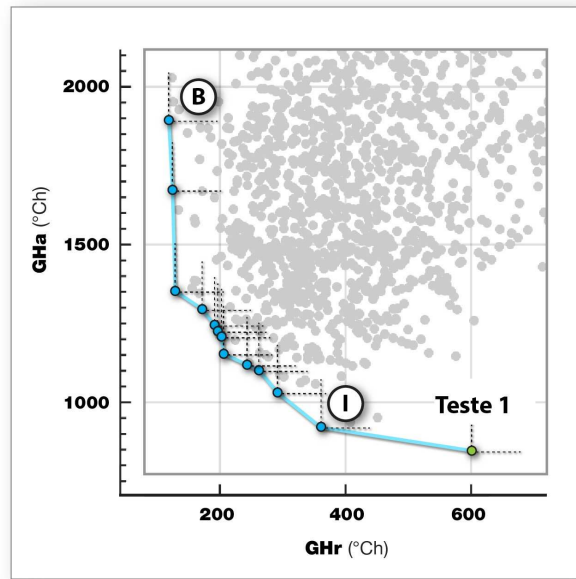


Figura 24: Redefinição do Pareto Front, com acréscimo do Teste 1.

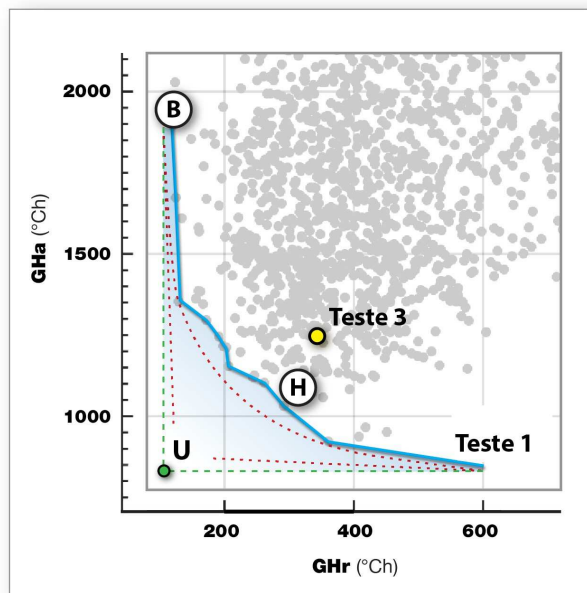


Figura 25: Ponto utopia hipotético (U, em verde) - $GHR \cong 100^{\circ}Ch$ e $GHa \cong 840^{\circ}Ch$.

C.4. Síntese das características geométricas

Por fim, é apresentada, no Quadro 4, uma síntese das características geométricas verificadas, com maior impacto sobre o desempenho energético da unidade habitacional estudada.

Quadro 4: Síntese das características geométricas das soluções para a UH.

Características geométricas predominantes nas melhores soluções	
GHR	GHa
<ul style="list-style-type: none">• Menor razão entre área das aberturas e área útil• Menores áreas de aberturas (em todas as orientações)• Maior altura da cumeeira (maior inclinação das telhas)	<ul style="list-style-type: none">• Maior área útil (menor área de cobertura)• Maiores áreas de abertura (em todas as orientações)• Menor pé-direito• Telhas com baixa inclinação
Características geométricas predominantes nas piores soluções (Para GHR e GHa, simultaneamente)	
<ul style="list-style-type: none">• Formas alongadas no eixo Leste-Oeste• Maior pé-direito• Maiores áreas de aberturas (em todas as orientações)	

5. Conclusões

Neste estudo foram abarcados os processos essenciais à otimização de uma unidade habitacional, isolando-se parâmetros geométricos e considerando materiais, cores e horas de uso da edificação constantes. A complexa relação entre a geometria do edifício e a eficiência termo energética, verifica-se, por exemplo, nos desempenhos distintos das aberturas a norte e sul entre o modelo da UH e o modelo de duas zonas térmicas (*surrogate model*). No modelo da UH, alcançava-se o melhor desempenho para GHa com aberturas máximas em todas as orientações; no entanto, no *surrogate model*, obteve-se a melhor solução com a maior abertura ao norte e a menor ao sul. Neste sentido, também nota-se, entre o modelo B e o Teste 2, que, apesar de apresentarem conformações espaciais distintas - o primeiro possui o dobro de área que o segundo, e também acentuada diferença na altura e inclinação do

telhado - estes têm eficiência muito similar para GHr, com 120°Ch e 149°Ch de resfriamento, respectivamente.

O universo das soluções apresentou valores máximos próximos a 1000°Ch para resfriamento (GHr) e 3050°Ch para aquecimento (GHa), e mínimos próximos a 120°Ch para resfriamento (GHr) e 900°Ch para aquecimento (GHa). Vale destacar alguns casos, como a H (291°Ch para resfriamento e 1032°Ch para aquecimento), no intermédio do *Pareto Front*, que apresenta características similares ao Teste 3 (355°Ch para resfriamento e 1230°Ch para aquecimento), como área e pé-direito; mas, diferenças na altura da cobertura e dimensão das aberturas garantiram maior eficiência ao modelo H. Também evidencia-se o modelo teste 1, cujos 603°Ch de resfriamento e 844°Ch de aquecimento o colocam como solução de interesse, mesmo estando no limite máximo de GHr para etiqueta a A, de acordo com o RTQ-R. As características geométricas de destaque deste modelo são valores baixos de inclinação da cobertura, baixo pé-direito e grandes áreas de aberturas.

Confirma-se, a partir do modelo da UH, que os parâmetros geométricos para garantir eficiência para GHr e GHa são, em sua maioria conflitantes. O híbrido das soluções extremas B e Teste 1 (modelo Teste 3, construído a partir da média do intervalo das variáveis destas soluções), apresentou, relativamente, valores próximos aos melhores simultâneos para as duas funções, quando comparado ao universo da otimização. No entanto, os piores casos (K a T), apresentam características geométricas não inferíveis apenas com a análise dos melhores casos. Estes fatos devem-se à natureza não-linear do problema. Em aspectos globais, em relação aos parâmetros geométricos de maior peso sobre o edifício, o desempenho termo energético pode ser parcialmente previsto com base na literatura, como é o caso, por exemplo, do impacto da área da cobertura e das grandes áreas de aberturas envidraçadas; entretanto, de acordo com os resultados deste estudo e de argumentos de outros autores da área, é improvável alcançar-se soluções próximas às ideais a partir de análises qualitativas gerais. Com isso destaca-se a importância da inserção dos programas de análise termo energética para a concepção de edifícios energeticamente eficientes, desde a fase de concepção.

Almejava-se utilizar ferramentas amigáveis do ponto de vista dos arquitetos. Neste sentido, as ferramentas utilizadas não dispõem conhecimentos aprofundados

de programação, mas ainda é baixa a acessibilidade em relação ao processo habitual de projeto arquitetônico, considerando-se todo o processo de modelagem de uma UH. Por outro lado, *surrogate model's* são de rápida modelagem geométrica e baixo dispêndio computacional. Estes são geralmente usados na etapa de pré-processamento, a fim de agilizar processos complexos. Nesta pesquisa utilizou-se o *surrogate model* no pós-processamento, após verificação das variáveis de maior impacto. Esta inversão de abordagem mostrou-se viável para confirmar uma otimização interrompida sem que se perca a qualidade no processo.

Quanto ao processamento computacional, para que o método possa suceder, há a necessidade de estudos para melhorias das ferramentas e dos processos, entre estas a adaptação do EnergyPlus aos processadores *multicore*. O mesmo é válido em relação a estudos sobre o próprio método de otimização, sobre os critérios de término do processo, e a estimativa de convergência da otimização.

6. Bibliografia

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho térmico. Rio de Janeiro, 2005.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE; AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE 55-2010**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2010.

ATTIA, S. Computacional Optimisation for Zero Energy Building Design - Interviews with Twenty Eight International Experts. **International Energy Agency (IEA) Task 40: Towards Net Zero Energy Buildings Subtask B**; 2012.

BADER, J.; ZITZLER, E. HypE: An Algorithm for Fast Hypervolume-Based Many-Objective Optimization. Computer Engineering and Networks Laboratory. Zurich: ETH, 26 nov. 2008. 25 p. **Relatório 286**.

BRASIL. ELETROBRÁS – PBE Edifica. **Programa Brasileiro de Etiquetagem**. Disponível em: <<http://pbeedifica.com.br/>>. Acesso em: 28 de set. 2015.

BRASIL. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balço Energético Nacional 2013 – Ano base 2012: Relatório Síntese**. Rio de Janeiro, 2013.

BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR – MDIC. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA – INMETRO. **Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações**. Rio de Janeiro, 2013.

CALDAS, L. G. **An evolution-based generative design system: using adaptation to shape architectural form**. Massachusetts: MIT , 2001.

CALDAS, L. Generation of energy-efficient architecture solutions applying GENE_ARCH: An evolution-based generative design system. **Advanced Engineering Informatics**, 22(1), 59-70, 2008.

DOGAN, Timur. **Archsim, Energy modeling for Grasshopper**. Disponível em: <<http://archsim.com/>> Acesso em: 28 de set. 2015.

EVINS, R. A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, n. 22, nov. 2013.

FONSECA, L.; SANTANA, L; CARLO, J. Limitações do Archsim para otimização baseada em simulação para etiquetagem residencial. Anais, **XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. São Paulo, 2016.

FOOD4RHINO.**Octopus**. Food4Rhino: Apps for Rhino and Grasshopper. Disponível em: <<http://www.food4rhino.com/project/octopus?ufh>>. Acesso em: 28 de set. 2015.

GIVONI, B. Comfort, Climate Analysis and Building Design Guidelines. **Energy and Buildings**, v.18, n.1, p. 11-23, 1992.

GUIMARAES, R.P.; CARVALHO, M.C.R.; RODRIGUES, C.S.; SANTOS, F.A. The Influence of Ceiling Height in Thermal Comfort of Buildings: A Case Study in

Belo Horizonte, Brazil. **International Journal for Housing Science and its Applications**, 2013.

IBGE. Censo demográfico - 1960, 1970, 1980, 1991 e 2000. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Rio de Janeiro, 2010.

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Portaria nº18**, de 16 de janeiro de 2012. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais. Rio de Janeiro, 2012.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência Energética na Arquitetura**. Rio de Janeiro, PW, 2013. 3º Edição.

LOMANOWSKI, B. A.; WRIGHT, J. L. The complex fenestration construction: a practical approach for modeling windows with shading devices in ESP-r. **Journal of Building Performance Simulation**, London, UK, v.5, n.3, p. 185-198. 2012.

MAGNIER, L. **Multiobjective Optimization of Building Design Using Artificial Neural Network and Multiobjective Evolutionary Algorithms** . Ph.D Thesis in Applied Science (Building Engineering) at Concordia University Montréal, Québec, Canada, 2008.

MUNIZ, L. P.; PEZZUTO, C. C. **Medições de Refletância Através do Espectrômetro Portátil Alta II**. Anais do IV Encontro de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação. 2014.

NGUYEN, A.; REITER, S.; RIGO, P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, Elsevier, n.113, ago. 2014.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Código de Obras e Edificações do Município de São Paulo**. Disponível em: <<http://www.prefeitura.sp.gov.br/>>. Acesso em: 07 mai. 2016.

ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES. Rhinoceros, 3D modeling software. **Rhino 5 Getting Started & User's Guide**. Disponível em: <<http://www.rhino3d.com> > Acesso em: 16 de out. 2015.

SHI, X.; YANG, W. Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects. **Automation in Construction**, Elsevier, n. 32, jan. 2013.

SHI, X.; TIAN, Z.; CHEN, W.; SI, B.; JIN, X. A review on building energy efficient design optimization from the perspective of architects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, n. 65, nov. 2016.

TAVARES, Sérgio Fernando. **Metodologia de Análise do Ciclo de Vida Energético de Edificações Residenciais Brasileiras**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. 2006.

TEDESCHI, A. Grasshopper, Parametric Modeling for Rhinoceros. **Grasshopper Primer Manual for version 0.6.0007**, Second Edition. Disponível em: <<http://www.liftarchitects.com/journal/2009/3/25/the-grasshopperprimer-second-edition.html>>. Acesso em: 28 de set. 2015.

TRUBIANO F.; ROUDSARI, M. S.; OZKAN, A. **Building simulation and evolutionary optimization in the conceptual design of a high-performance office building**. 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, França, 2013.

WETTER, M.; WRIGHT, J. A comparison of deterministic and probabilistic optimization algorithms for non-smooth simulation-based optimization. **Building and Environment**, Elsevier, n. 39, 2004.

Capítulo 5

Considerações finais

A pesquisa de métodos de *Otimização Baseada em Simulação* termo energética aplicados a edificações tornou-se possível devido à grande evolução dos computadores nas últimas décadas. Este trabalho cobriu as etapas principais necessárias a um método de OBS. Para isso, foram escolhidas ferramentas que trabalham com técnicas de programação visual, que foi processo mapeado no Capítulo 3, com a interoperabilidade entre a modelagem digital paramétrica e a simulação de desempenho energético.

Ressalta-se, em relação ao método de OBS apresentado neste trabalho, no capítulo 4, que ainda é baixa a acessibilidade aos arquitetos em comparação às abordagens predominantes de projeto arquitetônico. Para isso, considera-se todo o processo de modelagem de uma UH, desde a formulação do problema, modelagem, execução, e pós-processamento. No entanto, é importante destacar que modelos mais simples, de uma e duas zonas térmicas, apresentaram rápida modelagem e menor dispêndio computacional. Isto mostra que o método já é acessível a estudos preliminares de projeto, para problemas com poucas variáveis e baixa complexidade geométrica.

A partir do Capítulo 2, que contém uma análise geométrica prévia de edifícios relacionada ao desempenho termo energético, verificou-se que o método prescritivo não é indicado para avaliações geométricas, visto que os resultados do Capítulo 4 entraram em conflito com muitos dados obtidos através das equações de regressão do RTQ-R, relativos aos GHr. Um exemplo é o Fator de Forma e pé direito com os GHr segundo o RTQ-R, que apresentou correlação significativa pela equação, porém o mesmo não se confirmou nas simulações dinâmicas. Portanto, o método simplificado do RTQ-R não substitui avaliações de geometria em simulações de regime dinâmico.

Quanto aos resultados da otimização multiobjetivo de uma unidade habitacional (Capítulo 4), o universo de desempenho encontrado para São Paulo variou de 150°Ch a 1000°Ch para resfriamento e 844°Ch a 3579°Ch para aquecimento, com destaque para dois modelos: 291°Ch de resfriamento e 1032°Ch de aquecimento e 603°Ch de resfriamento e 844°Ch de aquecimento, identificados como modelo H e modelo Teste, respectivamente. As características geométricas que se destacaram para alcançar estes modelos foram, para H: valores médios de inclinação da cobertura, baixo pé-direito e percentual mediano de áreas de aberturas; e, para Teste 1: baixa inclinação da cobertura, grande área útil, percentual alto de áreas de aberturas.

Ressalta-se a importância dos estudos da relação entre a geometria arquitetônica o desempenho termo energético de edifícios, tendo em vista as complexas inter-relações de fatores associados à geometria, como observadas neste estudo. O ideal é abarcar mais de um objetivo, dada a natureza não-linear e complexa dos problemas relacionados a edificações. Nesse sentido, os regulamentos e normas brasileiras, apresentam múltiplos critérios para desempenhos estruturais, acústicos, térmicos, luminosos, dentre outros que podem ser utilizados como base de cálculo. A inserção dessas novas ferramentas e métodos tende a alterar os paradigmas dos processos de projeto atuais.

Por fim, as principais limitações deste trabalho referem-se ao uso de apenas um modelo residencial, cujo arranjo espacial não é variado na otimização, ao estudo aplicado apenas ao clima de São Paulo, representante da zona bioclimática 3, à limitação de modelagem da ocupação para o setor residencial e à simplificação das orientações solares na análise desde o primeiro capítulo.

Recomendações para trabalhos futuros

- Investigação dos reflexos da otimização no aspecto formal de edificações residenciais, o que inclui sua composição e gramática;
- Investigação da relação das cargas internas com as variáveis da geometria identificadas neste trabalho; estudos relacionando o desempenho térmico e

iluminação natural simultâneas em um método de OBS, com dispositivos de proteção solar, aplicados a localidades brasileiras;

- Verificação dos efeitos específicos do sombreamento no desempenho das edificações cujo uso é residencial;
- Estudos sobre o método de otimização, como os critérios de término do processo e a convergência da otimização.