OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE HABITAÇÕES AUTOCONSTRUÍDAS COM O USO DA GRAMÁTICA DA FORMA

Íris Maria Costa F. W. Loche (1); Thiago Toledo Viana Rodrigues (2); Joyce Correna Carlo (3)
(1) doutoranda, arquiteta e urbanista, iris.loche@gmail.com, Universidade Estadual de Campinas, R. Saturnino de Brito, 224 - Cidade Universitária, Campinas - SP, 13083-889
(2) doutorando, arquiteto e urbanista, thiago.t.rodrigues@ufv.br, Universidade Federal de Viçosa, Av. P. H. Rolfs, s/nº, Centro, Viçosa, Minas Gerais, Brasil, CEP 36570-900
(3) doutora, arquiteta e urbanista, joycecarlo@ufv.br, Universidade Federal de Viçosa, Av. P. H. Rolfs, s/nº, Centro, Viçosa, Minas Gerais, Brasil, CEP 36570-900

RESUMO
As ocupações irregulares e habitações autoconstruídas são algumas das respostas espontâneas ao déficit habitacional brasileiro e à ineficiência das políticas públicas voltadas para a construção de habitações de interesse social. A gramática da forma tem demonstrado potencial como abordagem projetual de habitações, permitindo a customização em massa e a preservação da identidade local, social e espacial em comunidades já consolidadas. Esse estudo propõe uma abordagem projetual para a customização em massa de habitações a partir do uso de uma gramática da forma de edificações autoconstruídas localizadas em um assentamento irregular em Fortaleza, predefinida por Mororó (2012). As regras da gramática da forma foram modificadas para a inserção de estratégias bioclimáticas - sombreamento e ventilação natural -, para melhorar o desempenho térmico das edificações. As regras modificadas da gramática foram convertidas em um sistema de parâmetros para geração em massa de habitações, e submetidas à otimização baseada em simulação para atendimento de duas funções-objetivo: redução dos graus-hora de resfriamento e aumento na taxa de renovação do ar. Esse método mostrou-se eficaz em garantir a replicação das unidades habitacionais de forma customizada, mantendo sua tipologia e atingindo níveis satisfatórios de desempenho térmico. Além disso, essa metodologia de processo projetual mostrou-se eficiente para ser replicado em outras comunidades, já que considera a tipologia, o clima e as especificidades do local.
Palavras-chave: Gramática da forma, conforto térmico, customização em massa, estratégias bioclimáticas

ABSTRACT
Self-built and informal houses emerged in Brazilian urban areas as a result of a Brazilian scenario of housing deficit and failed social politics created for providing housings in a quantitative way. The shape grammar is a feasible method for designing houses, allowing mass customization and preservation of the local identity in consolidated communities. This research proposes a method for mass customization using the rules of an informal settlement shape grammar in Fortaleza, Brazil, predefined by Mororó (2012). The shape grammar rules were modified to insert bioclimatic strategies, such as shading and natural ventilation, aiming to improve the houses' thermal comfort. The modified rules were converted in a parametric system to allow mass customization and evaluated by simulation-based optimization aiming to reach two objectives: minimize the cooling-degree hours and improve the air change rate. A potential for generation and refurbishment of new houses, preserving its typology and providing improved thermal performance was confirmed. Furthermore, this design process method showed potentiality to be replicated to other communities with the adoption of different shape grammars and strategies, as the context and local climate are considered.

Keywords: Shape grammar, thermal comfort, mass customization, bioclimatic strategies

1. INTRODUÇÃO

As políticas habitacionais brasileiras têm se mostrado incapazes de atender às demandas sociais do déficit habitacional no país em termos quantitativos e qualitativos, priorizando o baixo custo ao reproduzir um modelo estático de habitação para construção em massa. Estima-se que, em 2015, o déficit habitacional no

Brasil correspondia a 6,355 milhões de domicílios, sendo 87,7% localizados nas áreas urbanas (FJP, 2018). Um outro tópico que reflete o déficit habitacional do país e a negligência do poder público na construção de habitações sociais de qualidade, é o crescimento do número de moradores de ocupações irregulares em habitações autoconstruídas. Em 1991, 4,48 milhões de pessoas (3,1% da população) viviam em assentamentos irregulares, aumentando para 6,53 milhões (3,9%) em 2000 (IBGE, 2000) atingindo o número de 11,42 milhões em 2010, correspondendo a 6% da população do país (IBGE, 2010). Em algumas cidades brasileiras, o número de pessoas vivendo nesse tipo de habitação é ainda maior que a média nacional, como na cidade de Fortaleza, CE, onde 16% da população vive em assentamentos subnormais (IBGE, 2010).

É de interesse social e público a promoção de intervenções arquitetônicas nas habitações irregulares e autoconstruídas desde que sejam compatíveis ao modo de viver de determinada sociedade com programas arquitetônicos adequados ao perfil heterogêneo de formação familiar dos usuários desse tipo de habitação (TILLMAN, 2008). Interpretar essas estruturas por meio de uma gramática da forma possibilita a intervenção a partir da inserção de critérios pré-estabelecidos de qualidade, ao mesmo tempo em que a linguagem original das habitações é preservada.

A Gramática da Forma foi desenvolvida no início da década de 1970 por Stiny e Gips (1972) como um sistema de geração de formas baseado em regras para a geração de geometrias na pintura e na escultura (CELANI et al., 2006). Ao decorrer dos anos, essa técnica mostrou-se útil para traduzir uma linguagem arquitetônica já existente, capaz de descrever uma tipologia de habitação por meio de regras (VAZ et al., 2012). São diversos os estudos que utilizam a gramática da forma. Duarte (2005) aplicou a gramática da forma à arquitetura de Álvaro Siza em Malagueira, Portugal. Ao analisar o modo de produção de Siza, foi possível replicar sua arquitetura e projetar casas personalizadas, utilizando a mesma linguagem do arquiteto e incluindo a flexibilidade como um dos critérios de qualidade na habitação. Granadeiro et al. (2013) criou uma gramática para as Casas de Pradaria de Frank Lloyd Wright, convertendo a gramática em um sistema de parâmetros para desenvolvimento de projeto, de modo a reproduzir o mesmo estilo do arquiteto, porém com soluções energeticamente eficientes com o auxílio de simulações computacionais. Duarte et al. (2010) desenvolveram uma gramática da forma para as medinas de Marrakesh, criando um modelo computacional parametrizado a fim de gerar uma vizinhança similar às já existentes, porém otimizadas em termos de desempenho térmico. Mororó (2012), desenvolveu uma gramática da forma para analisar os processos de autoconstrução e ampliação de habitações de baixa renda de uma comunidade em Fortaleza, Ceará, caracterizando morfologicamente a tipologia da habitação desse grupo social.

Assim, acredita-se que o uso da gramática da forma possa ser utilizada como uma abordagem de projeto eficaz para habitações de interesse social e customização em massa, além de um mecanismo orientador da autoconstrução. A gramática da forma pode servir como instrumento de preservação da identidade local, social e espacial das comunidades já consolidadas, introduzindo às regras já existentes preceitos que garantam a qualidade da construção a partir de critérios de desempenho pré-estabelecidos. Essa abordagem também possibilita que os moradores customizem sua moradia de acordo com sua composição familiar e programa de necessidades próprios, sem alterar a tipologia local.

Com o desenvolvimento da tecnologia computacional e do crescimento da demanda por edifícios energeticamente eficientes, houve um grande progresso nos processos de concepção de projeto. A partir desse cenário, emergiu um método denominado Otimização Baseada em Simulação (OBS), que se difere da metodologia convencional de projeto, tendo seu principal foco no desempenho ambiental de edificações, porém sem deixar de considerar os demais aspectos tradicionais do projeto, como composição e espacialidade (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014). Esse tipo de concepção de projeto arquitetônico apresenta-se como uma abordagem eficaz para a elaboração de projetos mais eficientes e, quando associados à parametrização, podem ser explorados em função de criar soluções adequadas aos critérios formais e de desempenho pré-determinados.

A partir da combinação dos parâmetros, a modelagem paramétrica proporciona diversas soluções projetuais. Tais soluções geradas são posteriormente selecionadas e avaliadas conforme os critérios de julgamento pré-definidos para o atendimento de um ou mais objetivos (FLORIO, 2011). Assim, o projeto baseado em simulação se tornou um método eficaz para auxiliar a concepção de edifícios energeticamente eficientes, ele permite que a parametrização da forma atrelada à simulação, intervenha na concepção projetual desde o primeiro estágio de seu desenvolvimento (ATTIA et al., 2012). Segundo Ostergard, Jensen e Maagard (2016), as decisões tomadas logo nas etapas iniciais do projeto são as que mais geram impactos nos custos finais e no desempenho energético da edificação.

Segundo Gossard et al. (2013), a melhoria do desempenho térmico de uma edificação pode ser alcançada de duas maneiras: tentativa e erro, o que significa uma melhoria alcançada através de falhas; ou uma abordagem baseada em algoritmos de otimização, método mais eficiente. O método de tentativa e erro pode gerar soluções aceitáveis, porém o segundo, por se basear em uma busca global, tem maiores chances de indicar as melhores

soluções para um projeto (MAGNIER; HAGHIGHAT, 2008). No algoritmo de Otimização a análise de desempenho está conectada à forma, modificando-a simultaneamente em busca de um resultado mais eficiente.

Uma das maneiras de se trabalhar com otimização é através de algoritmos genéticos, que é um método baseado no processo de seleção natural que imita a natureza biológica. O algoritmo modifica as soluções individuais a partir do cruzamento dos melhores casos de uma geração para criar a geração seguinte repetidamente até o término da simulação, que tem como critério de parada a convergência do gráfico ou um número de gerações pré-definidos (DOE; AITCHISON, 2015). Desse modo, a parametrização da gramática da forma associada a otimização para atingir melhores soluções de conforto térmico, permite gerar soluções de habitações customizadas para o perfil familiar dos moradores, preservando a tipologia já existente e visando a qualidade do ambiente construído das habitações.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é otimizar o desempenho térmico de edificações autoconstruídas a partir da inserção de estratégias bioclimáticas em uma gramática da forma pré-definida por Mororó (2012), para uma comunidade em Fortaleza, Ceará.

3. MÉTODO

Essa é uma pesquisa de procedimento experimental, fundamentada por otimização de desempenho térmico baseada em simulações. O presente trabalho foi dividido em quatro etapas principais: 1. Análise de Implantação e da Gramática da Forma; 2. Inserção de estratégias bioclimáticas; 3. Parametrização do modelo; 4. Otimização Baseada em Simulação. As etapas estão detalhadas a seguir.

3.1. Análise de Implantação e da Gramática da Forma

O local de estudo e de aplicação da gramática da forma de Mororó (2012) é o bairro Planalto Pici, identificado em amarelo, cujo recorte em verde indica a localização de uma ocupação irregular definida como Zona Especial de Interesse Social (ZEIS) (Figura 1).

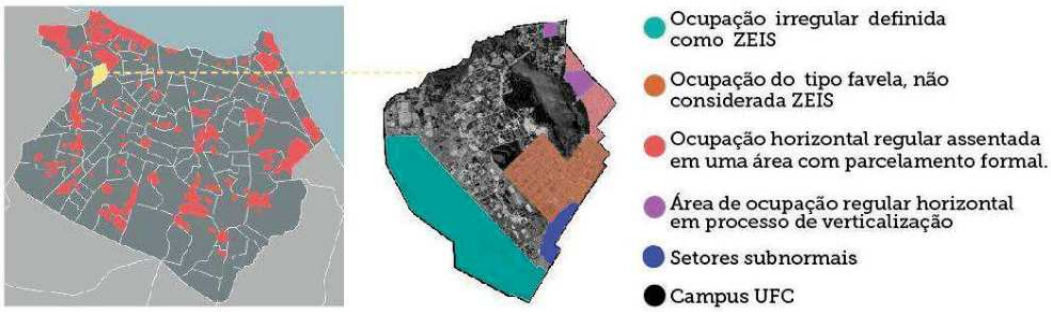


Figura 1 - Local de aplicação da gramática da forma: Planalto Pici.

O processo de ocupação informal dessa área deu origem a quadras de diversos tamanhos e formas, predominantemente constituídas de lotes estreitos, gerando alta densidade e falta de afastamento entre as habitações. Foi selecionada uma quadra representativa para analisar a relação das habitações com o entorno (Figura 2).

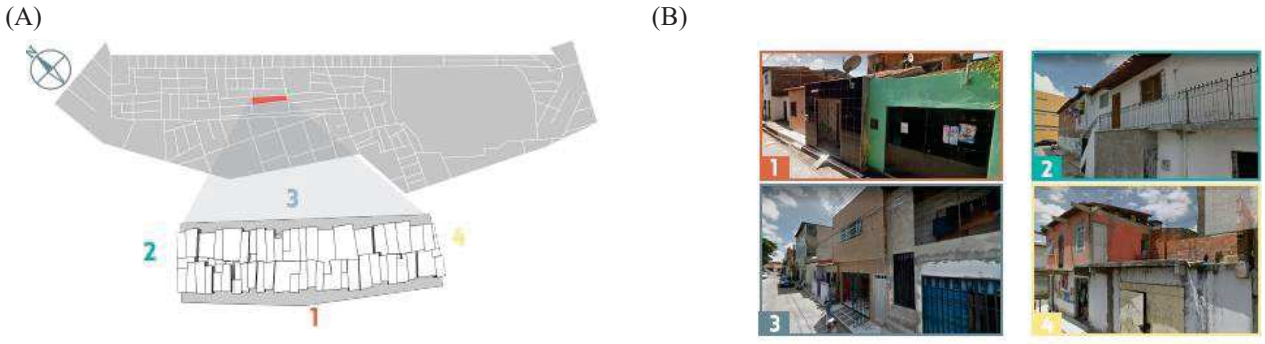


Figura 2: Identificação da quadra representativa no Planalto Pici: (A) quadra representativa; (B) imagens das habitações
Fonte: Elaborado pelos autores com base no Google Maps



Legenda: (s) sala de estar (q) quarto (r) área de refeição (c) circulação (l) lavanderia (b) banheiro (Lv) Área livre (t) espaço de transição

Figura 3: Exemplos de planta baixa de habitações do Planalto Pici.
Fonte: Mororó (2012)

As habitações são, em sua maioria, construídas em todo o lote, sem afastamentos. Na maior parte das casas há apenas a possibilidade de uma fachada com abertura, impossibilitando que todos os cômodos possuam ventilação e iluminação natural. Segundo Mororó (2012) as áreas do fundo do lote que ainda estão vazias correspondem a construções de apenas um pavimento, que ainda não se expandiram ou iniciaram processo de verticalização (Figuras 2 e 3). A cidade de Fortaleza, Ceará, pertence à Zona Bioclimática 8, com 98% do ano em desconforto por calor (PROJETEE, 2018). Com ventos predominantes a sudoeste, a falta de afastamentos é prejudicial para a circulação do vento nas habitações e quadras em um local cuja radiação é intensa e as edificações não dispõem de dispositivos de sombreamento. Assim, foram adotadas duas estratégias bioclimáticas visando a melhoria do desempenho térmico das habitações: sombreamento e ventilação.

1.1 Inserção das estratégias bioclimáticas

Para inserção das estratégias bioclimáticas (ventilação natural e sombreamento) nas regras da gramática da forma de Mororó (2012), Loche, Fonseca e Carlo (2018) modificaram, implementaram e excluíram regras. Como a gramática da forma de Mororó (2012) é uma gramática formal e não abrange as aberturas de janelas e portas, também foram criadas regras de aberturas como parte da inserção das estratégias bioclimáticas nessa tipologia (LOCHE; FONSECA; CARLO, 2018). As estratégias bioclimáticas adotadas e requisitos de desempenho térmico foram baseados nos critérios do Programa Brasileiro de Etiquetagem do Inmetro para edificações Residenciais (RTQ-R) (INMETRO, 2012), visando o mais elevado nível de eficiência. Para promover ventilação cruzada e aumentar a iluminação natural, foram criados pátios internos e aberturas, além do uso de cobogós. Para garantir o sombreamento, foram utilizadas proteções solares e marquises.

1.2 Parametrização do modelo

Para permitir a customização em massa da tipologia das unidades habitacionais do Planalto Pici, a geometria da gramática da forma modificada com a inserção das estratégias bioclimáticas foi parametrizada neste trabalho, utilizando o Grasshopper, um plug-in para o software Rhinoceros. Os parâmetros foram divididos em quatro grupos: (1) parâmetros de contorno; (2) parâmetros de demanda; (3) parâmetros resultantes; e (4) parâmetros otimizáveis.

1.2.1 Parâmetros de contorno

Os parâmetros de contorno condicionam a construção da habitação a partir do espaço físico e da sua localização na quadra, como as dimensões do terreno e a orientação da fachada principal.

a) Dimensões do terreno

Ao indicar a área do lote e a Frente do Lote (FT), obtém-se o tamanho da Lateral do Lote (LT). A Lateral do lote é dividida em doze módulos, que são distribuídos entre os cômodos da unidade habitacional. Cada módulo corresponde a um valor x, onde x é definido pela dimensão LT/12. Os intervalos das medidas recorrentes foram encontrado nos terrenos do Planalto Pici, de acordo com a gramática da forma de Mororó (2012) (Tabela 1).

Tabela 1: Medidas recorrentes nos lotes do Planalto Pici.

Variáveis geométricas	mínimo	máximo	natureza
Frente do lote (FT)	3,5m	4,5m	independente
Área do lote (A)	50m²	70m²	independente
Lateral do lote (LT)	LT = A/FT		dependente
Modulação (x)	x=LT/12		dependente

Fonte: autores baseados em Mororó (2012).

b) Orientação do terreno

A orientação do terreno é identificada para avaliar a necessidade de aplicação das estratégias nas fachadas, como avanço do pavimento superior para formação de marquise e uso de brises.

1.2.2 Parâmetros de demanda

Os parâmetros de demanda são aqueles que podem ser escolhidos pelo morador da unidade habitacional, levando em consideração seu perfil familiar e preferências, de acordo com as possibilidades oferecidas pelos parâmetros de contorno.

a) Tipologias

A partir da compreensão da importância da customização das habitações, fica a critério do morador escolher a tipologia de sua residência. Com a aplicação das regras da gramática da forma de Mororó (2012), notou-se a possibilidade de duas tipologias possíveis para as habitações, cada uma com duas variações de acordo com o número de dormitórios. O morador pode escolher o número de quartos e o número de pavimentos na sua habitação. As unidades térreas podem ter 1 dormitório (variação 1A), adquirindo o segundo com a inserção do pavimento superior (variação 1B), ou podem ter dois dormitórios (variação 2A), adquirindo o terceiro com a construção do pavimento superior (variação 2B) (Tabela 3).

Tabela 2: Tipologias das habitações e suas variações.

	Variações	Número de dormitórios	Número de pavimentos
Tipologia 1	1A	1	1
	1B	2	2
Tipologia 2	2A	2	1
	2B	3	2

b) Funcionalidade do primeiro cômodo

O primeiro cômodo de entrada na habitação é definido pelo usuário e, consequentemente, impacta no tamanho dos cômodos seguintes. A função que este cômodo exerce foi definida a partir das ocorrências da gramática da forma de Mororó (2012) e são dependentes do seu tamanho (Tabela 4).

Tabela 3: Tamanho e função do primeiro cômodo.

Tamanho do primeiro cômodo	Função do primeiro cômodo	
	Tipologia 1	Tipologia 2
1x	Espaço de transição	Espaço de transição
2x	Espaço de transição	Sala
3x	Garagem ou comércio	Sala ou garagem

1.2.3 Parâmetros resultantes

Os parâmetros resultantes são condicionados aos parâmetros de demanda. As escolhas do morador, como o tamanho do primeiro cômodo e a quantidade de quartos irão definir a dimensão dos demais cômodos.

a) Dimensões dos ambientes - variáveis geométricas

A habitação foi dividida pela gramática da forma de Mororó (2012) em três zonas: zona de estar; zona de dormir; e zona de servir, nessa ordem (Figura 4). As medidas mínimas e máximas de cada zona e cômodos são baseadas nos intervalos definidos pela gramática da forma, podendo variar de acordo com os demais parâmetros e as escolhas dos moradores (Tabela 5).

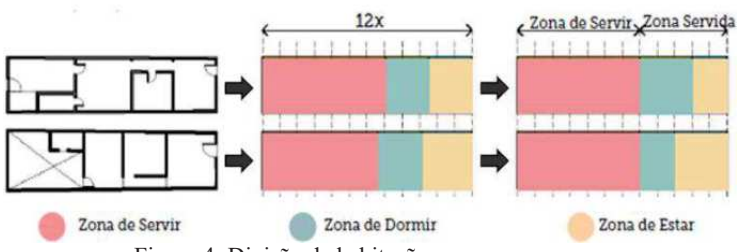


Figura 4: Divisão da habitação em zonas.
Fonte: Mororó (2012), adaptado pelos autores

Tabela 4: Tipologias e suas variações geométricas.

Variáveis geométricas	Tipologia 1		Tipologia 2		natureza
	mínimo	máximo	mínimo	máximo	
Zona servida (Zsd)	5x	8x	6x	9x	independente
Zona de servir (Zsr)	Zsr=12x - Zsd				dependente
Zona de dormir (Zd)	2x	3x	4x	5x	independente
Zona de estar (Ze)	Ze=Zsd - Zd				dependente
Fundo do lote (Fl)	x	2x	x	2x	independente

Fonte: autores baseados em Mororó (2012).

b) Dimensões dos ambientes - constantes geométricas

De acordo com Mororó (2012), não há considerável variação de tamanho do banheiro nas unidades habitacionais da área em estudo. Desse modo, foi definido que o banheiro possui largura constante de 1x, enquanto seu comprimento acompanha os cômodos ao lado. O mesmo ocorre para o pátio interno, que possui largura mínima e constante de 1x para não impedir a existência de outros cômodos já previstos na gramática da forma. Inicialmente, todos os cômodos possuem a menor quantidade de módulos dos parâmetros resultantes. Com as escolhas dos parâmetros de demanda, é possível redistribuir os módulos que sobrarem para completar os 12x que compõe o terreno. Esses módulos são distribuídos preferencialmente na zona de dormir, visto que nesse tipo de habitação, supõe-se que essa zona necessita abrigar o maior número de pessoas. A partir de uma programação em Python, os tamanhos dos cômodos são estabelecidos pela definição dos parâmetros de demanda, sendo o cômodo "a" o primeiro cômodo contado a partir da fachada, "b" o segundo cômodo e assim em diante (Figura 5).

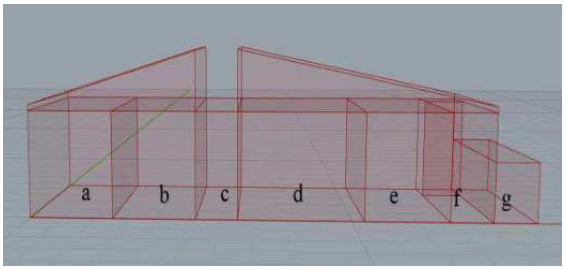


Figura 5: Modelo paramétrico no Rhinoceros.
Fonte: os autores

1.2.4 Parâmetros otimizáveis

Os parâmetros otimizáveis são aqueles que terão suas áreas submetidas a mudanças para atingir os melhores resultados de conforto térmico no ambiente, de acordo com as funções-objetivo estabelecidas.

a) Janelas dos cômodos

Para as janelas dos cômodos, a altura foi fixada no valor de 1,5 m, o peitoril em 1 m e sua largura variando em um intervalo de mínimo e máximo estabelecidos de acordo com as possibilidades em cada habitação. O valor de largura mínima é o necessário para atingir uma área de abertura de 10% da área do piso do ambiente (recomendado pelo RTQ-R) e da largura máxima é o limite que o ambiente permitir ser alcançado.

b) Aberturas dos telhados ventilados

As aberturas dos telhados ventilados, tem sua área modificada em função da porcentagem da parede que ocupam, com um mínimo de 10% e máximo de 90% da área da parede.

1.3 Otimização baseada em simulação

A partir da combinação de todos os parâmetros é possível obter mais de 4 mil variações. As simulações de desempenho térmico foram feitas para testar duas tipologias possíveis, a partir da definição de perfis familiares e diferentes tamanhos de terreno. Após a definição dos parâmetros de contorno, de demanda e dos parâmetros resultantes, o valor dos parâmetros otimizáveis foi obtido a partir de otimização baseada em simulação. As simulações de desempenho térmico foram realizadas no *plug-in* Honeybee, que conecta a parametrização da geometria ao *software* EnergyPlus. A otimização foi realizada pelo plug-in Octopus, de forma a permitir a combinação dos parâmetros variáveis por algoritmos genéticos, com base nos resultados das simulações. Foram estabelecidas duas funções objetivo (*fitness function*) para otimizar o desempenho térmico das unidades

habitacionais: minimizar os graus-hora de resfriamento; e maximizar a taxa de renovação de ar dentro da habitação. Os graus-horas de resfriamento foram avaliados de acordo com o manual do RTQ-R, correspondendo à somatória da diferença entre a temperatura operativa horária e a temperatura de base (26ºC) dos ambientes de permanência prolongada. A taxa de renovação do ar foi calculada a partir da somatória diária das trocas de ar dos ambientes de permanência prolongada da habitação.

1.3.1 Especificações dos componentes construtivos da envoltória dos modelos simulados

Optou-se por permanecer com o mesmo sistema construtivo atualmente utilizado nas habitações do planalto Pici, a alvenaria estrutural, que condiciona o pavimento superior ao pavimento térreo. Ao escolher os materiais construtivos, optou-se por adotar os materiais já utilizados, já que estes cumpriam os pré-requisitos de transmitância térmica (U), conforme o disposto pelo RTQ-R para atendimento ao nível A de eficiência, de acordo com a Zona Bioclimática 8 em que a edificação se localiza (Cobertura U ≤ 2,30 e Paredes U ≤ 3,70) (Tabela 6). Analisando as habitações, observou-se a predominância do uso de esquadrias de duas folhas de abrir, permitindo 90% da área de abertura para iluminação e ventilação natural. O padrão de ocupação foi considerado de acordo com o estabelecido pelo RTQ-R (INMETRO, 2012) para dias de semana e finais de semana, aplicado nos ambientes de permanência prolongada. A cobertura foi simulada como uma zona térmica naturalmente ventilada (com fechamento superior de telha cerâmica e fechamento inferior de PVC) e não como um componente de fechamento no modelo.

Tabela 5: Especificação dos materiais construtivos utilizados.

Componentes	Materiais	Espessura (cm)	Transmitância [W/(m²K)]	Capacidade térmica [kJ/m²K]	Absortância Solar	Fonte
Paredes	Argamassa	2,50	1,85	161,00	0,2	INMETRO (2013)
	Bloco cerâmico	14,00				
	Argamassa branca	2,50				
Piso	Radier Concreto	10,00	3,00	268,40	-	ABNT (2005a)
	Argamassa	2,60				
	Cerâmica	0,1				
Cobertura	Forro de PVC	1,00	2,08	30,88	0,50	ABNT (2005a)
	Câmara de ar ventilada	>5				
	Telha cerâmica	1,00				

4. RESULTADOS

A partir da combinação dos parâmetros é possível obter diferentes geometrias de unidades habitacionais. Ao combinar os parâmetros de contorno - área, frente do lote e orientação da fachada frontal (sudoeste e nordeste) com os parâmetros de demanda - tipologias e tamanho do primeiro cômodo, é possível obter 4000 possibilidades distintas de habitações. Os parâmetros otimizáveis também propõem variações, obtidas através de simulação que indicam as melhores áreas de abertura para cada habitação. Uma habitação foi gerada como exemplo (Caso 1), representando a tipologia 2B, resultando em uma curva de Pareto, onde foi escolhido um dos melhores casos da curva.

Para a simulação do caso 1, criou-se um perfil para a família que habitaria a residência, estabelecendo valores para todos os parâmetros (Tabelas 7 e 8).

Tabela 6: Parâmetros de contorno e demanda

Parâmetros de contorno					Parâmetros de demanda	
Área do pavimento	Frente do lote	Lateral do lote	Valor do módulo x	Orientação fachada frontal	Tipologia	Primeiro cômodo
70 m²	3,5 m	20 m	1,7 m	sudoeste	2B	3x= comércio

Tabela 7: Parâmetros resultantes

Parâmetros resultantes						
	Sala	Quartos	Pátio	Área de refeição	Banheiro	Fundo do lote
Módulo (x)	2	2	1	2	1	1
Dimensão (m)	3,4	3,4	1,7	3,4	1,7	1,7

O caso 1, representa a tipologia 2B e possui dois pavimentos. As simulações computacionais originaram 38 gerações, totalizando 4769 indivíduos. Todos os indivíduos gerados atingiram valores superiores a 10.146 e inferiores a 14.697, valor limite estabelecido pelo RTQ-R para nível B na cidade de Fortaleza. Entretanto, ao verificar o desempenho do pavimento térreo da habitação, nota-se que os ambientes de permanência prolongada atingiram valores de GHr equivalentes ao nível A, mas a habitação foi classificada como nível B devido ao valor anual de GHr mais elevado no pavimento superior.

São apresentados os indivíduos gerados na simulação e seus respectivos valores para cada uma das função-objetivo estabelecidas e o indivíduo pertencente à curva de Pareto selecionado (Figura 6).

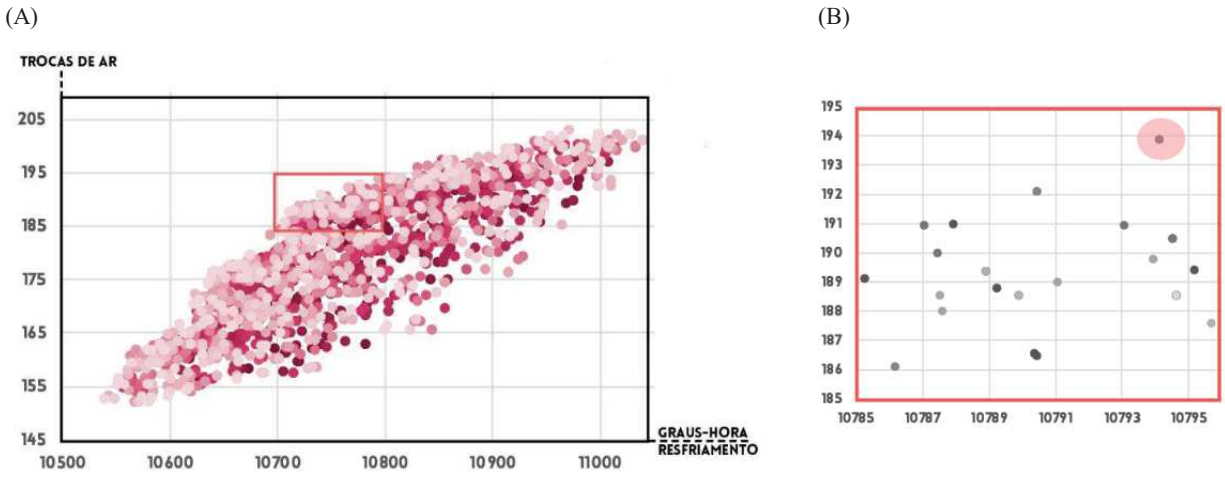


Figura 6: Otimização do Caso B: (A) Indivíduos gerados na otimização; (B) Individuo selecionado na curva de Pareto

Foram listados os parâmetros otimizáveis encontrados para o indivíduo selecionado na curva de Pareto, indicando as áreas de abertura definidas através da otimização para os valores encontrados para GHr e Trocas de ar (Tabela 9) (Figuras 7 a 9).

Tabela 8: Parâmetros otimizáveis

Parâmetros Otimizáveis												
Parâmetro	**O1**	**O2**	**O3**	**O4**	**O5**	**O6**	**O7**	**O8**	**O9a**	**O9b**	**O10a**	**O10b**
Tamanho (m²)	1,00	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	0,30	4,00	0,15	1,70

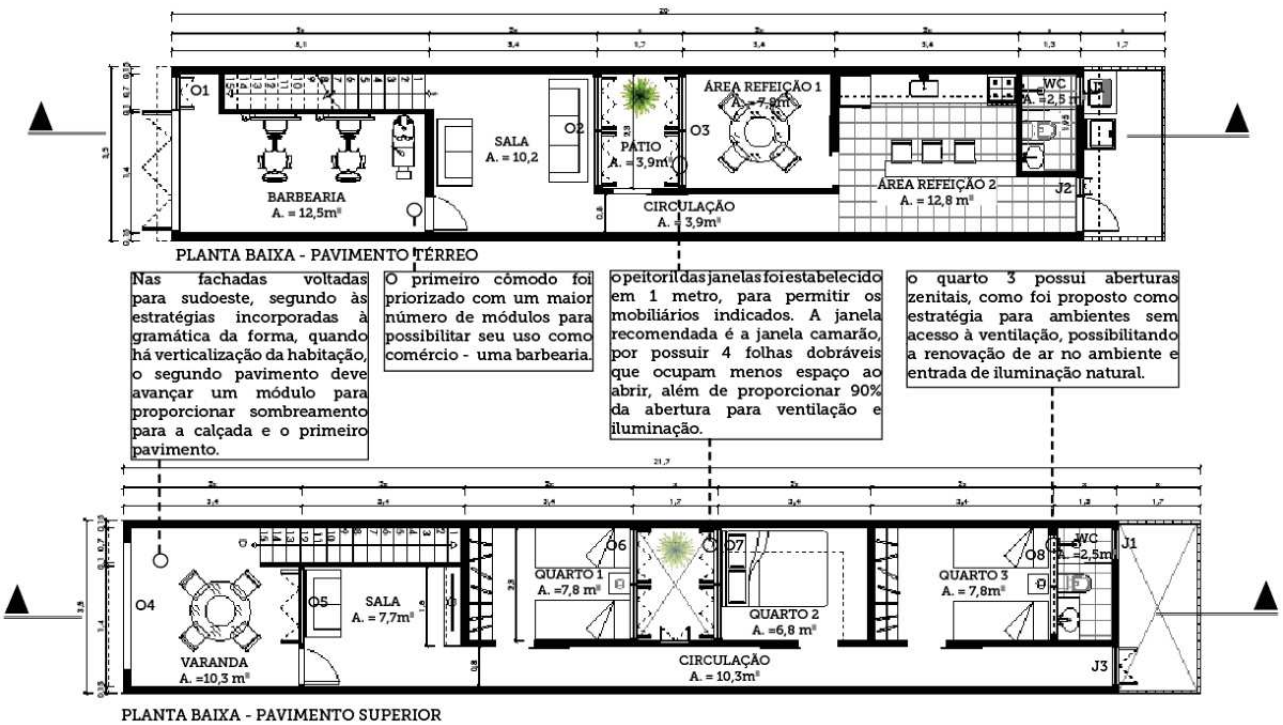


Figura 7: Planta baixa do Caso B.

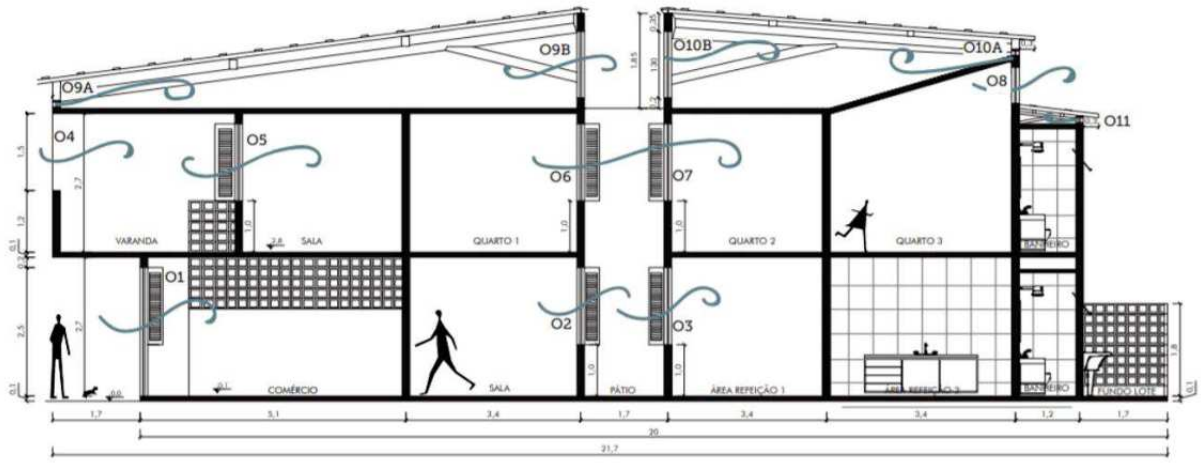


Figura 8: Corte do Caso B.



Figura 9: Perspectiva do Caso B.

5. CONCLUSÕES

A inserção das estratégias bioclimáticas na gramática da forma de Mororó mostraram-se satisfatórias para melhorar a qualidade das habitações do Planalto Pici. Ao comparar as plantas baixas das habitações originais do Planalto Pici com as novas plantas geradas, há notável melhoria na quantidade de aberturas para o exterior promovida pela modificação da gramática da forma. As novas regras inseridas possibilitaram que todos os cômodos possuíssem aberturas externas. Por sua vez, a otimização baseada em simulação (OBS), indicou que, para atingir os melhores resultados de conforto térmico, grandes aberturas são necessárias. Nota-se que, as janelas dos cômodos de todos os casos apresentaram grandes áreas de abertura e a maioria das janelas ocuparam o máximo possível de área na fachada. Isso indica a importância da ventilação natural para o bom desempenho das habitações.

As estratégias de ventilação, de sombreamento e os materiais indicados, foram suficientes para garantir que as habitações atingissem bons níveis de eficiência no pavimento térreo da habitação. O pavimento térreo das habitações atingiu nível A, de acordo com a classificação do RTQ-R, devido ao seu contato com o solo, enquanto o pavimento superior atingiu nível B, pela ausência de contato com o solo combinada à exposição solar da cobertura.

A utilização da gramática da forma modificada a partir da inserção de critérios pré-estabelecidos de qualidade, mostrou-se eficaz para orientar a construção de novas moradias dentro de uma comunidade já consolidada, guiar o processo de ampliação das unidades e colaborar no processo de expansão dessas comunidades. É importante ressaltar que, em unidades habitacionais já consolidadas, a aplicação da gramática modificada pode significar uma expressiva e custosa modificação em sua configuração atual, no entanto sua utilização pode ser eficaz em orientar expansões e reformas pontuais, como aumento das aberturas, incorporação dos telhados ventilados e inserção de proteções solares.

A aplicação da pesquisa por meio da parametrização da gramática modificada, traz também contribuição sobre a questão de customização em massa de habitações de baixa renda. A parametrização da gramática da forma modificada respeitou as questões tipológicas das habitações, como as características de disposição da habitação no terreno, dimensões mínimas e máximas dos ambientes e a relação entre os cômodos. A flexibilidade, fator importante na questão das habitações sociais, foi garantida por meio da progressividade característica da tipologia das habitações autoconstruídas do Planalto Pici, presente na gramática da forma. Notou-se que, a partir das estratégias e da parametrização, é possível replicar um modo de morar que proporcione flexibilidade, customização e melhores condições de desempenho térmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2: Desempenho Térmico de Edificações** – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3: Desempenho Térmico de Edificações.** Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e 111 diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005b.

ATTIA, S.; HENSEN, J. L. M.; BELTRÁN, L.; DE HERDE, A. Selection criteria for building performance simulation tools: contrasting architects' and engineers' needs. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 5, n. 3, p. 155-169, 2012. DOI: https://doi.org/10.1080/19401493.2010.549573.

CELANI, G.; CYPRIANO, D.; DE GODOI, G.; VAZ, C. E. V. A gramática da forma como metodologia de análise e síntese em arquitetura. **Comunicação e Cultura**, Caxias do Sul, v. 5, n. 10, jul./dez. 2006, p. 180-197. ISSN: 1677-0943.

DOE, R.; AITCHISON, M. Multi-criteria optimisation in the design of modular homes - from theory to practice. The University of Sydnei, 2015.

DUARTE, J. P. Towards the mass customization of housing: the grammar of Siza's houses at Malagueira**. Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 32, pages 347 -380, 2005. DOI: https://doi.org/10.1068/b31124.

DUARTE, J., ROCHA, J., DUCLASOARES, G., CALDAS, L. An urban gramar for the medina of Marrakech: Towars a tool for Urban Design in Islamic Contexts. 2010. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5131-9_25.

FJP, FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. Déficit Habitacional no Brasil. Belo Horizonte: Fundação João Pinheiro, Centro de Estatística e Informações, 2018.

FLORIO, W. Modelagem paramétrica, criatividade e projeto: duas experiências com estudantes de arquitetura. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, v. 6, n.2, p. 43-66, dez. 2011. DOI: https://doi.org/10.4237/gtp.v6i2.211.

GOSSARD, D.; LARTIGUE, B.; THELLIER, F. Multi-objective optimization of a building envelope for thermal performance using genetic algorithms and artificial neural network. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 67, p. 253-260, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.026.

GRANADEIRO, V., DUARTE, J.P., CORREIA, J.R., LEAL, V.M.S. Building envelope shape design in early stages of the design process: Integrating architectural design systems and energy simulation. **Automation in Construction**. v. 32, p. 196–209, July 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.12.003.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA, **Ministério das Cidades. Pesquisa de satisfação dos beneficiários do Programa Minha Casa Minha Vida**. Relatório Técnico. Brasília, 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA - 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.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA - INMETRO. **Anexo Geral V – Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros**. Anexo da Portaria: nº 50/2013.

LOCHE, I., FONSECA, L., CARLO, J. Proposta de inserção de estratégias bioclimáticas em habitações auto construídas, com o uso da gramática da forma. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2018, Foz do Iguaçu. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2018.

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

MORORÓ, M. **Habitação Progressiva Autoconstruída: caracterização morfológica com uso da gramática da forma**. 2012. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

NGUYEN, A. T.; REITER, S.; RIGO, P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, Oxford, v. 113, p. 1043-1058, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061.

OSTERGARD, T; JENSEN, R e MAAGAARD, E. Building simulations supporting decision making in early design – A review. **Renew Sustain**. Energy Rev., vol. 61, pp. 187–201, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.045.

PROJETEEE. **Dados Climáticos de Fortaleza, CE**. Disponível em: <http://projeteee.mma.gov.br> Acesso em 30 set. 2018.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ pelo financiamento da pesquisa.