



Estudo e desenho de forma urbana com gramáticas da forma

Design and study of urban form using shape grammars

Sara Eloy^[a]

^[a] Instituto Universitário de Lisboa (ISCTE-IUL), Centro de Investigação em Ciências da Informação, Tecnologia e Arquitetura (ISTAR), Lisboa, Portugal

Resumo

O objetivo principal deste artigo é o de apresentar as gramáticas da forma enquanto ferramentas de análise urbana e de geração de soluções para intervenções em projeto urbano nas cidades. As gramáticas da forma, que surgiram nos anos de 1970 com o artigo seminal de Stiny & Gips, são utilizadas para analisar estilos ou linguagens de desenho (gramáticas analíticas) e para criar novas linguagens de desenho (gramáticas originais). No artigo, introduz-se o formalismo das gramáticas da forma e discute-se a pertinência do seu uso em diferentes contextos. Para isso, aponta-se em que medida as gramáticas da forma podem ser utilizadas como parte de uma metodologia para um projeto flexível do espaço urbano, o qual responda aos requisitos e às necessidades do contexto urbano e edificado. O artigo faz ainda uma revisão da matéria apresentando diversos casos de investigação e de uso das gramáticas da forma em estudos analíticos do espaço urbano e em propostas para novo planeamento urbano. Apresentam-se ainda as ferramentas digitais atualmente disponíveis e em investigação para desenho urbano utilizando gramáticas da forma.

Palavras-chave: Gramáticas da forma. Desenho urbano. Padrões. Gramáticas originais. Gramáticas analíticas.

Abstract

The main goal of this paper is to present shape grammars as an analytical tool to study urban morphology and as a design tool for urban planning. Shape grammars emerged in the 70s through the seminal article by Stiny & Gips, and are used to analyse past design styles (analytical grammars) as well as to create new and original design languages (original grammars). In this paper, the formalization of shape grammar is introduced and the relevance of its use in different contexts is discussed. With this in mind, the paper highlights the extent to which shape grammars can be used as part of a methodology for a flexible urban design that responds to the requirements and needs existing in urban and built environments. The paper also presents a state of the art of shape grammars for urban design and several case studies both concerning analytical studies of urban space and proposals for new urban planning. Currently available and under development digital tools that use shape grammars for urban design are presented at the end of the paper.

Keywords: Shape grammar. Urban planning. Patterns. Original grammars. Analytical grammars.

SE é Professor Auxiliar, Instituto Universitário de Lisboa (ISCTE-IUL), Centro de Investigação em Ciências da Informação, Tecnologia e Arquitetura (ISTAR), e-mail: sara.eloy@iscte-iul.pt

Introdução

O uso das gramáticas da forma para a análise da ocupação urbana e para a proposta de novas soluções de desenho urbano é uma área de atuação que vem tendo uma expressão muito significativa nos últimos 15 anos. Inicialmente, a investigação realizada teve como foco essencial a análise de padrões de desenho urbano em tecidos urbanos existentes.

A abordagem do desenho urbano por meio da gramática da forma permite o estudo da evolução das áreas urbanas e a pesquisa dos princípios e das causas do seu crescimento. Essa análise permite desenvolver uma abstração em regras de geração com duas naturezas diferentes, mas complementares: as regras espaciais, que observam princípios físicos, e as não espaciais, que observam, por exemplo, questões sociais, políticas, econômicas e históricas.

A aplicação de regras de forma para geração de desenho urbano implica a utilização igualmente de processos de avaliação dos resultados e, preferencialmente, de técnicas de otimização que garantam que as soluções geradas cumpram os critérios mais relevantes para cada caso.

Os estudos analíticos sobre a evolução das cidades estenderam-se à proposta de novas visões para o futuro do planejamento urbano, com recurso a algoritmos gerativos que permitem gerar soluções urbanas mais adaptadas às constantes dinâmicas dos contextos físico e social. Com esse objetivo, são usadas diversas metodologias combinadas, como a análise sintática, o desenho paramétrico e as gramáticas da forma, no sentido de criar planos urbanos e cenários de uso que possam gerar soluções e permitam avaliá-las segundo diversos critérios de desempenho. As metodologias utilizadas para a geração de alternativas de desenho levam em conta diversos parâmetros urbanos, como, entre outros, a distribuição de usos, a densidade populacional e os critérios ambientais.

Neste artigo são abordadas as gramáticas da forma, o desenho paramétrico e as potencialidades que o uso dessas ferramentas traz para o desenho urbano. A geração rápida e eficiente de diversas alternativas de desenho, que cumpram os requisitos de projeto e que permitam sucessivas iterações para otimização do desenho final, constitui o grande mote de incentivo ao uso desses sistemas em planejamento urbano. Para Steinø et al. (2013), as ferramentas de desenho paramétrico permitem ultrapassar a barreira

da linguagem existente entre os participantes no processo de projeto — projetistas e não projetistas —, visto que auxiliam na visualização imediata das consequências espaciais das suas decisões.

O artigo encontra-se estruturado em seis tópicos, além deste. No segundo tópico, faz-se um enquadramento da investigação em gramáticas da forma, considerando as suas áreas de atuação e a pertinência do seu uso, e descrevem-se ainda o seu formalismo técnico e o modo como o aparecimento de implementações em computador tem sido fundamental para o seu uso mais alargado. No terceiro tópico, aborda-se a ontologia de desenho urbano. No quarto tópico, discute-se o uso das gramáticas enquanto ferramenta de estudo e análise da forma urbana, recorrendo a exemplos de gramáticas desenvolvidas com esse objetivo. No quinto tópico, focam-se as gramáticas originais que permitem desenvolver novas soluções, quer de construção nova, quer de renovação da estrutura urbana e do edificado, recorrendo também a exemplos reconhecidos nessa área. Por fim, tecem-se algumas considerações sobre os resultados da investigação atual e indicam-se algumas linhas de investigação futura.

Gramáticas da forma

As gramáticas da forma são sistemas de algoritmos ou regras de forma que permitem gerar e compreender composições gráficas por meio de uma computação com formas em vez de símbolos. Esses sistemas surgiram nos anos de 1970 por meio do artigo seminal *Shape Grammars and the Generative Specification of Painting and Sculpture*, de George Stiny & James Gips (Stiny & Gips, 1972). As gramáticas da forma são, geralmente, utilizadas para analisar estilos ou linguagens de desenho (gramáticas analíticas), mas podem também ser empregadas para criar uma nova linguagem de desenho (gramáticas originais). As gramáticas de transformação são aquelas que começam por uma abordagem analítica, pretendendo ainda gerar novas linguagens de desenho, o que as torna, simultaneamente, originais (Knight, 1999).

As gramáticas são gerativas porque com elas é possível gerar soluções de desenho que correspondam a uma linguagem de desenho. O termo “gerativo” é aqui usado a partir do verbo gerar em lugar do termo “generativo”, também utilizado por alguns autores de língua portuguesa quando se referem a gramáticas

da forma (do inglês “generative”, de “generate”). Uma característica importante das gramáticas da forma, nomeadamente quando aplicadas à arquitetura e ao desenho urbano, é o fato de permitirem a geração de múltiplas soluções. De fato, as gramáticas não procuram uma solução para um problema, mas sim uma diversidade de soluções que respondam ao mesmo problema e que possam surgir como variantes.

No início do seu uso, as gramáticas foram essencialmente utilizadas como ferramentas de análise de formas de construção e estilos ou de linguagens de desenho do passado. Alguns trabalhos, como os da gramática da arquitetura de Frank Lloyd Wright (Koning & Eizenberg, 1981), da gramática das vilas de Palladio (Stiny & Mitchell, 1978) e ainda da gramática das casas da Malagueira de Duarte (2005), são exemplos de como as gramáticas da forma podem captar linguagens de desenho, explicá-las e, com elas, desenvolver novas soluções.

A arquitetura e o urbanismo são áreas nas quais o uso das gramáticas da forma tem sido mais recorrente, tanto no âmbito das abordagens analíticas como das originais.

Em uma ótica de introdução de novas linguagens de desenho, com o objetivo de gerar novos desenhos de habitações, os trabalhos de Benrós et al. (2011), Eloy (2012) e Coimbra & Romão (2013) abordam o problema da falta de habitação condigna e pretendem responder a um desenho adaptado às necessidades do utilizador, gerando, desse modo, novas soluções habitacionais. Destas, as implementações como a de Strobbe (Strobbe et al., 2016), que implementou as gramáticas de transformação dos apartamentos Rabo-de-Bacalhau (Eloy, 2012), permitem gerar automaticamente novas soluções de projeto — neste caso, para reabilitação habitacional.

Na área do urbanismo, as gramáticas originais têm sido usadas para gerar e simular novos tecidos urbanos, quer em contexto de ensino (Beirão & Duarte, 2009; Duarte & Beirão, 2011), quer em contexto profissional, por exemplo, com o software CityEngine, que permite gerar cidades de grande escala e complexidade. É possível apontar duas abordagens referentes às gramáticas analíticas urbanas: os trabalhos de Duarte et al. (2006), que estudaram a estrutura de parte da Medina de Marrakech, e de Paio & Turkienicz (2010), que estudaram o planeamento urbano de origem portuguesa nos séculos XVI-XVIII.

Os sistemas gerativos de projeto, como as gramáticas da forma, são utilizados em diversas circunstâncias,

tendo como principais objetivos: i) o estudo de um corpus de desenho, por exemplo, o trabalho de um arquiteto ou designer ou o estudo da evolução de uma realidade construída, tema que será desenvolvido na seção Estudo e Análise da Cidade; ii) e a definição de um sistema de projeto em situações em que a definição de uma gramática se justifique, tema que será desenvolvido adiante, na seção Ferramenta para Desenho Urbano.

Usos das gramáticas

O uso das gramáticas para compreensão de estruturas passadas permite interpretar o modo como determinadas obras ou locais foram desenhados e, assim, perceber linguagens de desenho. O desenvolvimento de uma gramática da forma, por exemplo, sobre as vilas de Palladio, não tem que reproduzir necessariamente o modo como Palladio as desenhou. O que se pretende é que a gramática consiga gerar as vilas que foram utilizadas para inferir a gramática (corpus da gramática), assim como novas instâncias que cumpram as mesmas regras de desenho. Com uma ferramenta dessas, historiadores, projetistas e críticos podem compreender melhor a obra de diversos autores e acompanhar a sua evolução. Para a educação, o uso de gramáticas já definidas e também a própria criação de uma gramática constituem ferramentas que Knight (2000) considera serem as melhores para se aprender sobre os estilos do passado e as linguagens de projeto, sob o ponto de vista da composição. Ainda, segundo Knight, o processo de definição de uma gramática obriga o gramático (projetista) a sistematizar as suas soluções e a simplificá-las, tornando inteligíveis as situações complexas.

Com o recurso às novas linguagens de projeto, os projetistas podem desenvolver gramáticas originais que lhes permitam criar um vasto espaço de soluções alternativas de desenho. Essas experiências são geralmente realizadas em âmbito educacional, seja na escala do desenho urbano (Duarte & Beirão, 2011), seja na do edifício (Ferrão & Eloy, 2014), mas também com a intenção de resolver algum problema social, como habitação em locais onde ocorreram catástrofes (Benrós et al., 2011) ou reabilitação de habitação atualmente pouco funcional (Eloy, 2012). O investimento de tempo que implica a construção de uma gramática com alguma complexidade faz com

que seja pertinente desenvolvê-la sempre que haja a necessidade de gerar uma série de alternativas para um mesmo tipo de projeto.

Segundo Cagan (2001), as gramáticas da forma podem suportar processos de desenho de rotina e processos criativos. O uso de gramáticas da forma permite que, em um universo bem definido, o projetista possa fazer uso delas para criar algo diferente do modo tradicional de olhar para o trabalho de projetar. Eloy et al. (In press) concluíram que, para certas especificidades do projeto, as gramáticas da forma permitem gerar soluções com qualidade semelhante ou superior à das soluções geradas por arquitetos.

Formalismo

O formalismo das gramáticas baseia-se na criação de algoritmos que geram e compreendem composições gráficas por meio de computação direta com formas, em vez da computação indireta, e por intermédio do uso de símbolos ou textos (Knight, 2000). As gramáticas da forma incluem regras de forma e um vocabulário de formas e relações espaciais entre essas formas. Segundo Stiny (1980), as gramáticas são definidas por quatro componentes: formas (S) (S de *Shape*, em inglês), regras (R), rótulos (L) (L de *Label*, em inglês) e forma inicial (I). As regras de forma são aplicadas passo a passo, começando pela aplicação de uma regra

(R) a uma forma inicial (I); com isso, são geradas soluções de desenho (ver Figura 1).

O formalismo de uma gramática da forma é ainda definido em uma série de álgebras que determinam o modo como os elementos desenhados são representados (Stiny 1992). Uma álgebra U_{ij} contém formas i , que são um conjunto finito de elementos básicos – pontos, linhas, planos, volumes –, os quais são definidos por $i = 0, 1, 2$ ou 3 , respectivamente, e são combinados na dimensão $j \geq i$. As dimensões $j = 0, 1, 2$ ou 3 são, respectivamente, 0D, 1D, 2D e 3D. Tendo $j \geq i$ e $i \geq 0$, a álgebra $U12$ define-se como um plano com linhas (ver Figura 1), e $U22$, como um plano com outros planos.

Essas regras de forma são do tipo $A \rightarrow B$, em que A e B são formas, com A sendo a forma do lado esquerdo da regra, e B, a forma do lado direito da regra. Um desenho é a forma final atingida após a aplicação das regras da gramática a determinada forma inicial. Essa aplicação de regras executada passo a passo com o objetivo de obter um desenho final denomina-se derivação.

O conceito de subforma em gramáticas é de extrema importância, pois permite trabalhar com entidades menores do que as formas. As subformas estão contidas nas formas e são partes da forma em que estão embebidas. A emergência é um fenômeno que, como nos processos de desenho manuais, ocorre também nas gramáticas, consistindo no aparecimento

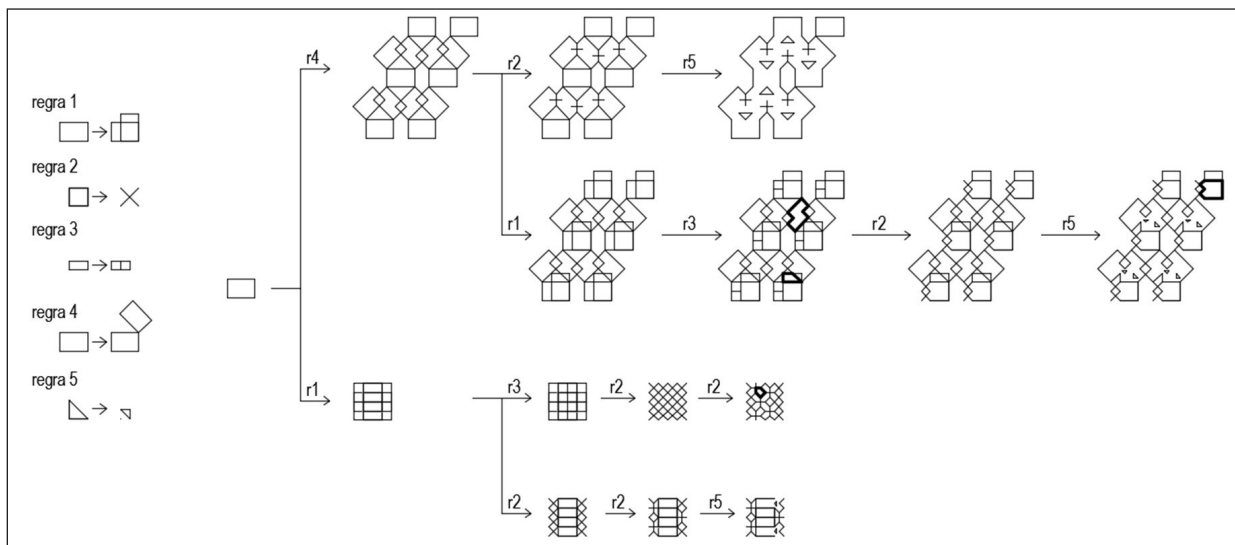


Figura 1 - Exemplo de uma gramática original composta por cinco regras (à esquerda)

Fonte: Desenho do autor.

de formas inesperadas e que não foram definidas no vocabulário de formas. As formas emergentes são definidas por subformas (ver Figura 1).

Na figura, apresentam-se algumas derivações que começam em uma forma inicial (retângulo), à qual são aplicadas regras de modo aleatório. As regras aplicadas estão indicadas em cada um dos passos da derivação. Em negrito, estão salientadas algumas formas emergentes que surgem ao longo da derivação.

Na aplicação de regras, podem ser utilizadas transformações euclidianas de modo que o lado esquerdo da regra se adapte à forma encontrada no direito. Essas transformações, definidas por Stiny (1980), são a translação, a rotação, a reflexão e a escala ou as composições destas. Duas formas são geometricamente similares quando uma pode ser transformada na outra por meio da aplicação de transformações euclidianas.

Além das transformações euclidianas, é necessário, por vezes, que uma forma possa ser parametrizada de tal modo que uma regra se aplique não apenas a formas idênticas, mas também a uma família de formas. Para isso, utilizam-se gramáticas paramétricas, nas quais a forma do lado esquerdo da regra inclui parâmetros que podem variar, como entre uma gama de valores dimensionais (ver Figura 2). Uma forma específica é definida quando se atribuem valores às variáveis. Por exemplo, na Figura 2, ao se atribuírem valores às variáveis A, B, C, D, E, F, G e H, são obtidos infinitos desenhos dos quais se selecionaram quatro exemplos.

Implementação informática

As gramáticas da forma podem ser utilizadas para gerar soluções à mão, simulando um número limitado de resultados, ou por meio da utilização de

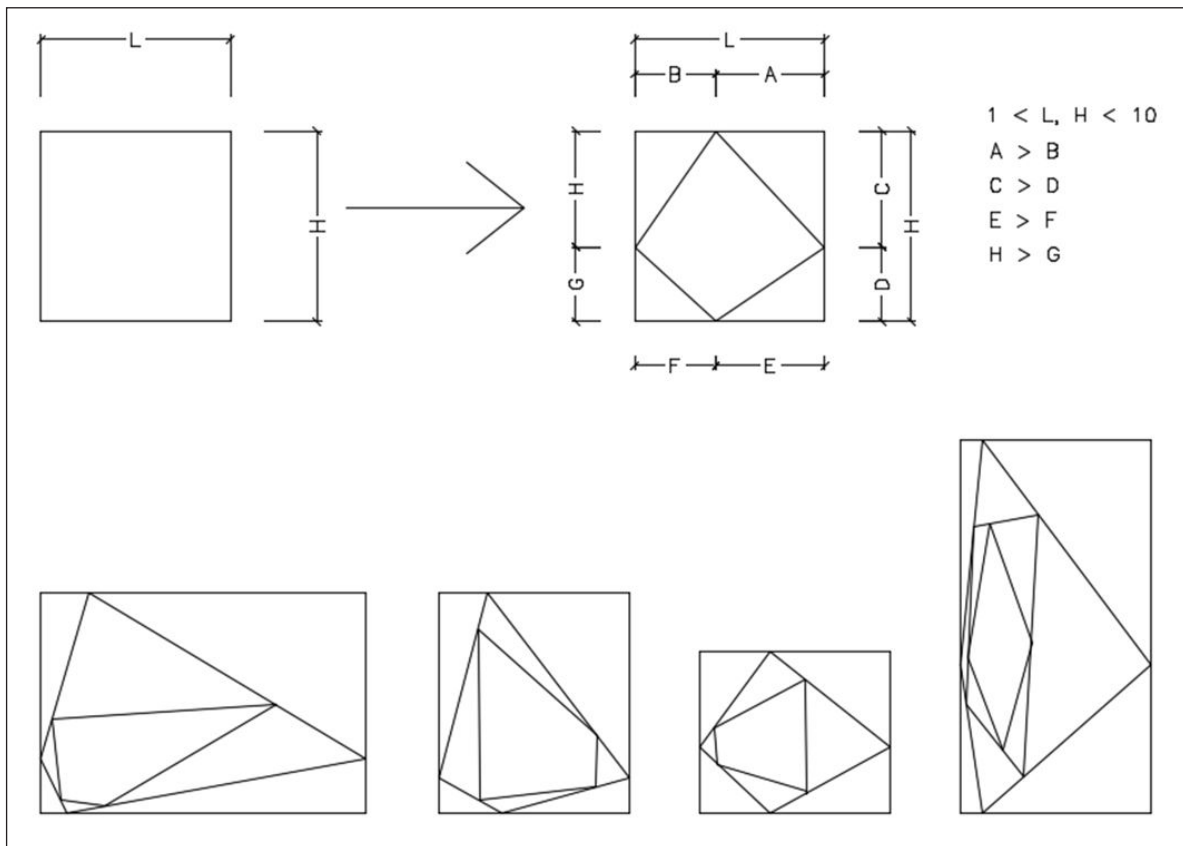


Figura 2 - Exemplo de uma regra paramétrica que cria um quadrilátero dentro de outro quadrilátero e alguns desenhos criados pela aplicação da regra em dois passos

Fonte: Desenho do autor.

interpretadores desenvolvidos em computador. A dificuldade em implementar informaticamente essas gramáticas tem sido, até agora, o maior entrave para a sua plena utilização como método efetivo de análise e projeto (Chau et al., 2004; Gips, 1999). De fato, as implementações em computador disponíveis para uso com gramáticas da forma são raras e não constituem ainda um sistema atrativo para o projetista, já que requerem conhecimentos de programação ou de linguagem muito técnica que ultrapassam as competências que os projetistas dominam atualmente. As implementações disponíveis dividem-se em três grandes grupos (Li et al., 2009): os sistemas de uma única gramática, os sistemas de adição de formas simples e os sistemas gerais.

Essas implementações começaram por se focar na geração de desenhos que correspondessem a uma única gramática fixa e, assim, permitiam gerar soluções de desenho de acordo com apenas uma linguagem. Exemplos dessas implementações são a gramática para as casas Queen Anne, de Flemming (1987), e a Yingzao Fashi, de Li (2002), cujos desenvolvimentos não permitem gerar outro tipo de edifícios. Os sistemas que funcionam a partir da adição de formas possibilitam que o utilizador defina um número restrito de regras com base em formas simples. Desses sistemas, o 3D shaper, de Wang & Duarte (2002), usa formas tridimensionais paralelepípedicas. O desenvolvimento de ferramentas que permitem a criação de uma gramática revela-se mais difícil de realizar. Os interpretadores gerais que permitem ao próprio utilizador a introdução das suas regras de desenho estão sendo realizados, mas os resultados práticos ainda estão longe de ser utilizados em projeto. Com sistemas dessa natureza, os utilizadores podem introduzir qualquer gramática e gerar soluções com base nelas. Exemplos de interpretadores gerais são os desenvolvidos por Li et al. (2009), o Shape Grammar Interpreter (SGI, 2015), desenvolvido por Trescak et al. (2009), e o GRAPE (SWAP Architekten ZT GmbH, 2017), de Grasl (2012), todos para formas bidimensionais. Hoisl & Shea (2011) desenvolveram outro interpretador geral, Spapper (Spapper, 2015), que trabalha com formas tridimensionais.

A dificuldade sentida por muitos em desenvolver ferramentas operacionais com base em gramáticas da forma e que resolvam problemas de projeto tem feito com que algumas propostas de implementação se baseiem em desenho paramétrico, tornando-se mais

operativas para o utilizador, mas perdendo alguns dos formalismos das gramáticas da forma, por exemplo, CityEngine, de Parish & Müller (2001), baseado em linguagem procedimental, e Citymaker, de Beirão (2012), fundamentado em linguagem paramétrica. Esses sistemas permitem algum tipo de geração de forma e baseiam-se em sistemas autônomos não ligados a um software CAD (Strobbe, 2015), ou em sistemas plug-in em um software CAD, como GRAPE (Grasl, 2012), para o Revit, ou nas implementações de Andrew Li, inicialmente, para o Autocad e, agora, para o Rhino (Li, 2017).

Apesar da evolução que tem sido feita nessa área, esses sistemas continuam sendo essencialmente acadêmicos, sem aspirações de, em um futuro próximo, serem utilizados em um cenário real. Exceção a essa regra é o software CityEngine, que permite gerar ambientes urbanos tridimensionais de grande escala, que já é utilizado por projetistas e decisores, como as câmaras municipais.

Ontologia de desenho urbano

A definição de uma gramática da forma que trabalhe com a geração de elementos físicos urbanos requer, a princípio, que se defina uma ontologia que forneça um vocabulário comum e na qual esteja descrito o modelo de dados utilizado. Uma ontologia deve descrever os indivíduos (objetos), as classes (conjuntos ou tipos de objetos), os atributos (propriedades dos objetos) e os relacionamentos (forma como os objetos se relacionam entre eles), de modo que o sistema conheça todos os dados com que irá trabalhar.

Diversos autores (Beirão et al., 2009c; Montenegro, 2015; Montenegro & Duarte, 2009; Trento et al., 2010) têm se dedicado a definir ontologias para desenho urbano que permitam realizar inferências sobre os objetos urbanos cuja manipulação é pretendida. Os trabalhos desses autores definem modos e processos de sistematizar essa ontologia. A definição de quais componentes e descrições que devem ser incluídos em uma ferramenta de desenho do espaço urbano é um passo decisivo que, pela natureza de um trabalho computacional desse tipo, tem de ser totalmente claro e não ambíguo.

A ontologia dos elementos urbanos da cidade é geralmente dividida em subontologias, contendo, cada uma delas, as características de um domínio

específico da cidade, nomeadamente redes, bairros, zonas, pontos notáveis (landmarks) e paisagem (Beirão et al., 2009c) (ver Figura 3). Para Beirão et al. (2009c), cada uma dessas subontologias é composta por sistemas, como o sistema de ruas ou o sistema de transportes, que se encontram na subontologia das redes. Esses autores defendem que essa ontologia deve incluir as várias visões que os projetistas e todos os envolvidos no processo de desenho urbano têm. De fato, a configuração das ruas depende de

inúmeros fatores, como os topográficos, funcionais, sociais e culturais, que não são vistos por todos os intervenientes do mesmo modo. O sistema de ruas inclui, por sua vez, inúmeras classes de objetos, cada qual com tipos de objetos que têm atributos específicos e parâmetros. Em uma gramática da forma, esses objetos são definidos por uma representação da forma e uma descrição da forma, que constituem o léxico, a sintaxe e a semântica.

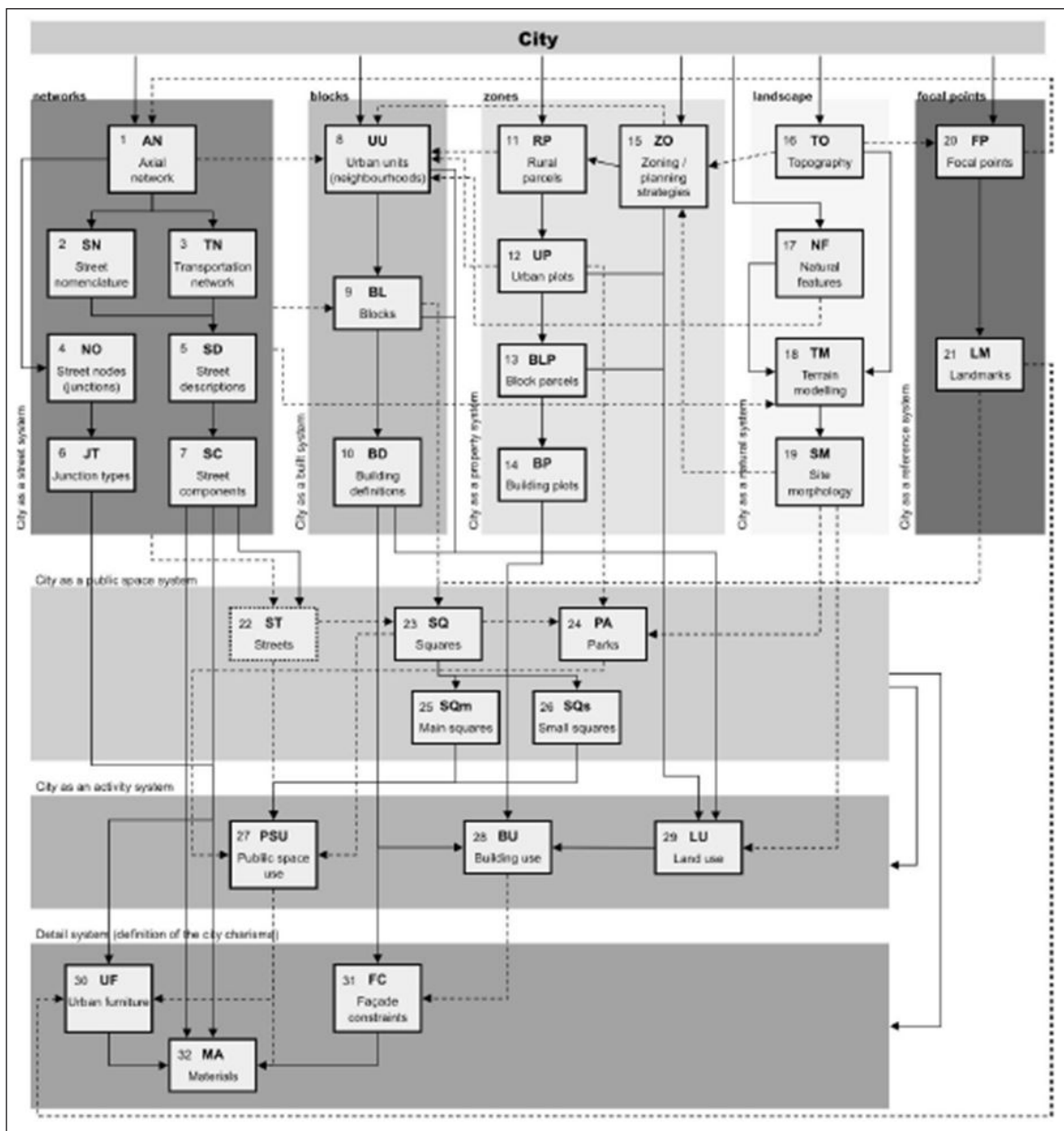


Figura 3 - Diagrama representando uma ontologia leve para a representação do meio urbano

Fonte: Reproduzido de Montenegro (2015, p. 78).

A ontologia utilizada entre várias gramáticas complementares tem que ser comum, de modo a garantir a sua interoperabilidade. Na gramática definida no projeto City Induction, criaram-se três módulos: um de formulação, um de desenho e um de avaliação das soluções (Montenegro & Duarte, 2009). Para garantir a interoperabilidade necessária entre esses módulos, a definição de uma ontologia comum foi uma questão primordial.

Estudo e análise da cidade

As abordagens às gramáticas analíticas urbanas têm sido realizadas, quer como puro instrumento histórico de análise de padrões de desenho, quer como instrumento de definição de processos de transformação da realidade existente em outra, adaptável às contingências dos diversos contextos sociais, econômicos e políticos contemporâneos.

Um exemplo do primeiro caso é o trabalho de Paio & Turkienicz (2010), que sistematiza o planejamento urbano de origem portuguesa nos séculos XVI-XVIII e constitui um estudo de cariz histórico. Por outro lado, os trabalhos de Duarte et al. (2006), de Jacobi et al. (2009), de Beirão et al. (2009a), de Paio et al. (2011) e de Barros et al. (2013), entre outros, distinguem-se por começarem por uma abordagem analítica, mas prosseguirem com o objetivo de transformar o caso estudado em novas propostas de desenho urbano ou de reabilitação.

Paio & Turkienicz (2010) elaboraram uma gramática analítica sobre as cidades históricas de origem portuguesa desenvolvidas nos séculos XVI-XVIII e concluíram que o desenho dessas cidades se baseou em um padrão de uso de regras geométricas e de simetria cuja estrutura é passível de ser incorporada em um sistema gerativo de cidades. De acordo com Duarte et al. (2006), o trabalho de Catherine Teeling (1996) constitui uma das primeiras experiências de uso das gramáticas da forma para o desenho urbano. Essa autora trabalhou em uma área das docas de Friedichshafen, na Alemanha, sobre a qual concebeu uma gramática que explica o crescimento urbano da zona. A abordagem de Teeling baseou-se na divisão recursiva de quadriláteros, do geral para o particular, em uma ação top-down, na medida em que a ordem urbana geral é aquela que define a ordem particular, em lugar de ser a ordem particular bottom-up, por exemplo, do assentamento de cada casa, a definir a ordem geral como acontece com tecidos urbanos

medievais. Ambos os exemplos de Paio & Turkienicz (2010) e de Catherine Teeling (1996) constituem trabalhos que se focaram na compreensão dos princípios de desenho que estiveram na origem de determinada morfologia urbana.

Outros trabalhos estão sendo realizados com o objetivo de permitir o desenho de novas estruturas urbanas que sigam os princípios de desenho do tecido existente, mas que incorporem respostas às necessidades atuais. Esses trabalhos incluem uma primeira fase de análise histórica com trabalho de campo e escolha de um corpus de análise e, em seguida, uma fase de inferição e definição das regras da gramática. Dependendo dos objetivos e das escalas de desenho pretendidas, essas gramáticas podem ser uma ou várias, como no caso da gramática de Marrakech (Duarte et al., 2006).

Essas gramáticas são paramétricas, de modo a permitir maior variação das formas finais em virtudes dos valores utilizados em cada parâmetro da forma, tendo sido a U12 a álgebra geralmente escolhida para trabalhar o desenho urbano, acontecendo que, em alguns casos, como em Barros et al. (2013), desenvolveram-se modelos tridimensionais. A aplicação das gramáticas urbanas analíticas e de transformação tem sido realizada com base em software de programação, como o AutoLisp ou o Grasshopper, que são plug-in dos software Autocad/Autodesk e Rhinoceros, respectivamente, e permitem a construção de modelos paramétricos bidimensionais e tridimensionais. Enquanto o AutoLisp é uma linguagem de programação por texto e símbolos, o Grasshopper é uma linguagem de programação gráfica que, para utilizadores não programadores, tem uma dificuldade consideravelmente menor. Com o Grasshopper, à medida que os valores dos parâmetros estabelecidos são alterados, o modelo geométrico é automaticamente atualizado.

O trabalho de Duarte et al. (2006) sobre a cidade de Marrakech teve como objetivo capturar algumas das características do tecido urbano da cidade tradicional muçulmana e usá-las no planejamento urbano contemporâneo. Procurava-se desenvolver um sistema computacional capaz de gerar configurações urbanas e habitações que, seguindo os padrões culturais e espaciais encontrados na área, fossem mais sustentáveis e eficientes energeticamente.

Seguindo a mesma linha de raciocínio, no âmbito do projeto City Induction (ver Ferramenta para Desenho Urbano), Beirão et al. (2009c) trabalharam em uma gramática para a cidade de Praia, em Cabo Verde, projetada pelo arquiteto Chuva Gomes, também com

o objetivo de criar uma implementação de desenho urbano que, por meio da leitura dos padrões da cidade, codificados em regras, gerasse novas malhas e

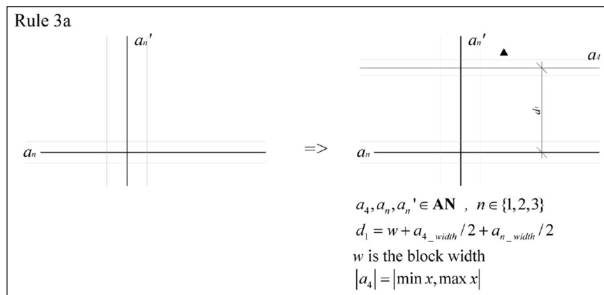


Figura 4 - Regra 3a, que adiciona um eixo a_4 paralelo a um eixo a_n
 Fonte: Reproduzido de Beirão et al. (2009b, p. 582).

avaliasse os desenhos gerados. As malhas ortogonais que se pretendiam obter foram geradas de dois modos diferentes: um por meio da adição de eixos em uma direção e depois na direção perpendicular (ver Figura 4 e Figura 5); e outro por intermédio da adição de blocos de células. Nessa investigação, os autores criaram uma gramática descritiva focando-se nas descrições para desenho urbano que correspondessem às condições específicas do contexto.

O estudo dos assentamentos informais, com a finalidade de captar a orgânica humana que os gerou e os princípios de coesão social que, apesar da falta de condições de habitabilidade, neles estão presentes, tem sido alvo de investigação, realizada por diversos autores. Paio et al., (2011), com o projeto

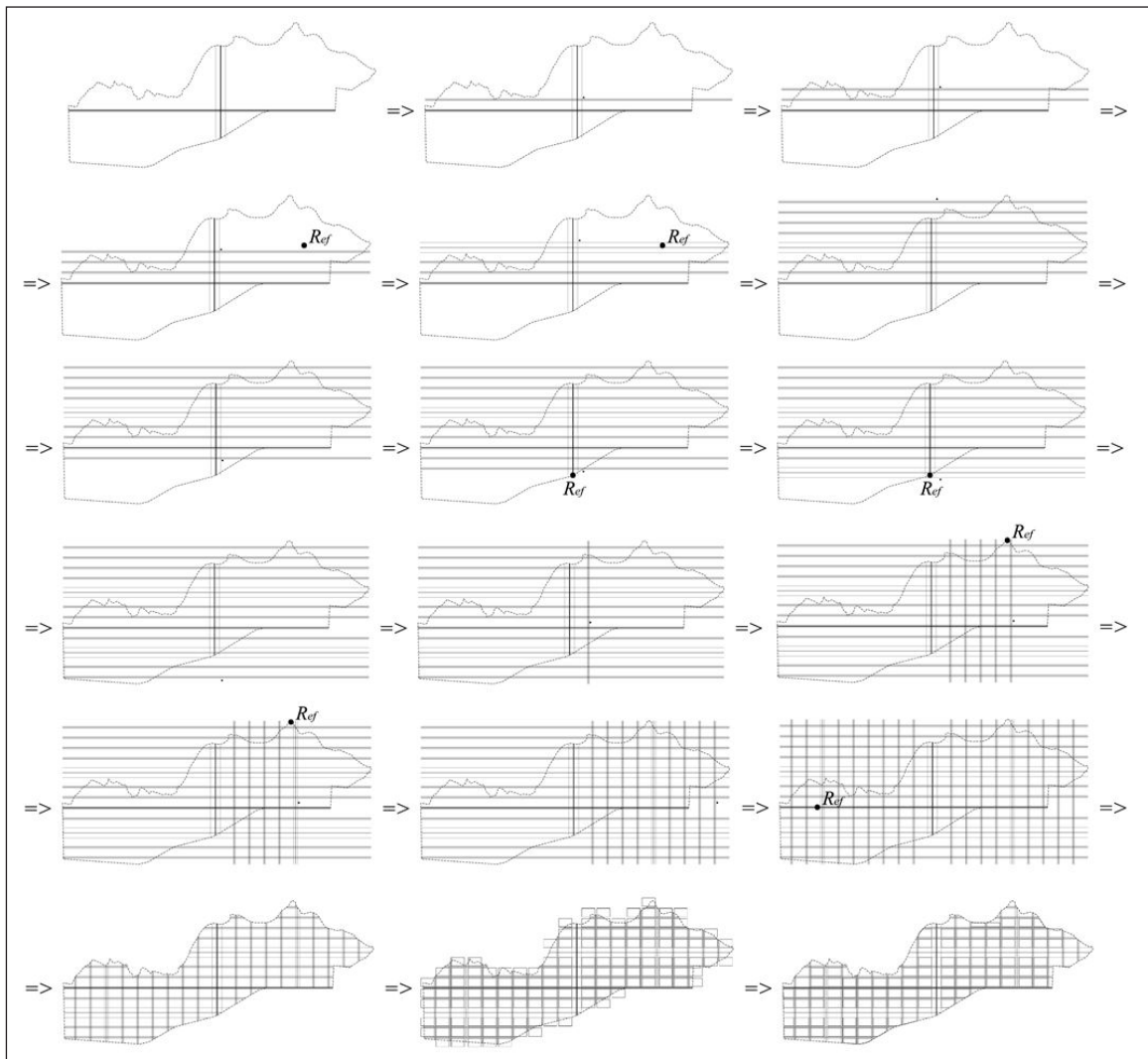


Figura 5 - Derivação da cidade da Praia até a fase de AdjustigBlockCells

Fonte: Reproduzido de Beirão et al. (2009b, p. 582).

Emergencies4all, propuseram-se estudar os princípios de geração dos assentamentos informais em cidades como Luanda e daí verificar quais as características que os tornam representativos de um sistema de valores de uma sociedade, características que pudessem ser transferidas para uma gramática de geração de novas habitações, adaptadas às necessidades e às aspirações contemporâneas. A análise do assentamento informal (musseque) de Marçal, em Luanda, revelou alguns padrões básicos de ocupação, tais como: i) as áreas verdes eram resultantes de espaços sobrando da ocupação; ii) as primeiras casas a serem implantadas eram localizadas na rua principal; iii) só depois de todos os espaços da rua principal estarem preenchidos, a implantação das casas passou a ocupar as áreas mais distantes da estrada principal. Os assentamentos informais (caniços) da cidade de Maputo também são estudados por Barros et al. (2013) com o propósito de captar as regras informais de desenho das habitações, partindo de lógicas dimensionais e sociais. O objetivo desse trabalho, ainda em curso, é o desenvolvimento de uma ferramenta paramétrica que realize análises morfológicas e simulações e gere soluções de desenho que garantam maior qualidade de vida aos moradores. Para tal, os autores encontram-se desenvolvendo um sistema que irá recorrer à sintaxe espacial (Hillier et al., 1976) e ao método Spacematrix (Pont & Haupt, 2009), na fase do suporte da decisão, e às gramáticas da forma, para explorar a qualidade de emergências que caracterizam esses assentamentos (Figura 6).

O trabalho de Rua et al. (2013) ilustra o uso de sistemas à base de regras para gerar modelos 3D de cidades existentes ou do passado. A particularidade

desse trabalho é a sua realização em um software GeoBIM, o CityEngine da ESRI, que integra os SIG (Sistemas de Informação Geográfica) e os BIM (Building Information Modeling). Os sistemas SIG integram dados espaciais providos de diferentes fontes, como mapas, censos e imagens de satélite, permitindo, assim, modelar fenômenos geográficos e realizar análises espaciais. Por outro lado, com o BIM, é possível modelar tridimensionalmente edifícios por meio da sua geometria, informações geográficas e propriedades construtivas. O software GeoBIM funciona com uma combinação de ambas as abordagens, facilitando a concepção do edificado no território, e vice-versa, conferindo a possibilidade de se realizarem análises quantitativas das alternativas geradas e facilitando a hipótese de atualização permanente dos modelos.

Ferramenta para desenho urbano

Apesar de haver um corpo extenso de trabalho que demonstra a potencialidade das gramáticas da forma para captar as regras embebidas em composições existentes, a criação de novas gramáticas para geração de novas linguagens de desenho é, como já referido, uma realidade ainda inexpressiva.

Em urbanismo, a abordagem com recurso às gramáticas originais tem sido usada para gerar e simular novos tecidos urbanos, no contexto de trabalhos de ensino e de investigação e em contexto profissional. Dos primeiros, destacam-se os trabalhos desenvolvidos na Universidade de Lisboa, essencialmente no âmbito



Figura 6 - Modelo 3D de uma geração de parte da cidade de Maputo

Fonte: Reproduzido de Barros et al. (2013, p. 722).

do projeto City Induction, e na ETH de Zurique, a que se fará referência neste tópico.

O uso das gramáticas da forma na atividade de gerar soluções de desenho para edifícios ou para áreas urbanas tem de garantir que, além da manipulação da forma geométrica, os modelos incluam toda a semântica necessária ao desenho urbano. Nesse sentido, Beirão et al. (2009a) mencionam o uso de gramáticas discursivas que permitem a geração de projetos sintático e semanticamente corretos, combinadas com o uso de padrões urbanos.

Além dessa questão, a estrutura das ferramentas criadas para geração de desenho urbano é geralmente tripartida, incluindo um módulo de formulação do problema de projeto, um módulo de geração de soluções e um módulo de avaliação. No projeto City Induction, desenvolveu-se um sistema que inclui esses três subsistemas ou módulos para a geração de malhas urbanas: um módulo de formulação do programa (Montenegro & Duarte, 2009), um módulo de geração de soluções (Beirão et al., 2008) e um módulo de avaliação das soluções geradas (Gil & Duarte, 2008). Também o trabalho desenvolvido por Celani et al. (2011) segue a mesma estrutura tripartida de formulação, geração e avaliação.

O modelo de geração de malhas urbanas desenvolvido no projeto City Induction tem como antecedentes os trabalhos de Alexander et al. (1977) e Gamma et al. (1995) sobre a linguagem de padrões e os padrões de projeto. Por causa do uso dessas abordagens, é possível, por meio das gramáticas da forma, criar um formalismo de descrição de padrões mediante regras de forma (Beirão et al., 2009a). Essas regras compõem um módulo de indução de padrões urbanos (UIP, acrônimo de Urban Induction Patterns), que constitui uma gramática discursiva, visto integrar uma gramática de projeto (gramática da forma) e uma gramática de programa (gramática descritiva). A gramática descritiva inclui uma base de dados com aspectos legais, de recomendações de qualidade e outros atributos que informem a forma. A gramática descritiva define as descrições de semântica, necessárias para cada passo da aplicação da gramática em determinado contexto urbano, enquanto a gramática da forma inclui as regras de forma necessárias a cada um desses passos.

Como referido anteriormente, diversos autores têm realizado trabalhos no sentido de desenvolver aplicações que gerem planos urbanos otimizados,

baseados em conceitos contemporâneos de desenho urbano. Na investigação de Celani et al. (2011), tinha-se a pretensão de gerar tecidos urbanos vernaculares, designados por Marshall (2004) como “estruturas características”, usando regras paramétricas de subdivisão e algoritmos genéticos para otimizar os resultados obtidos. A utilização de um aplicativo com base em linguagens paramétricas foi a solução encontrada por Raposo et al. (2001) para a simulação e a análise de desempenho de soluções urbanas em lotes com edifícios de diferentes alturas. Com a referida ferramenta, esses autores pretendiam gerar soluções de ocupação de novos edifícios em tecidos preexistentes com geometria irregular, cumprindo a regulamentação atual no que respeita à insolação e à densidade de construção. A ferramenta usada por Raposo et al. (2001) permitiu fornecer simulações instantâneas sobre a dimensão e a forma ótimas para os edifícios em tecidos urbanos irregulares, de acordo com parâmetros regulamentares e incidência solar.

Por seu lado, Vidmar & Koželj (2015) desenvolveram um método de desenho urbano paramétrico que permite conjugar aspectos quantitativos (uso do solo, alturas de edifícios, índices de áreas), de abordagem top-down, com aspectos qualitativos (forma dos edifícios e espaços entre eles), de abordagem bottom-up. Esse método baseia-se em um conceito de mapas paramétricos que representam a distribuição espacial dos parâmetros-chave da construção (critérios quantitativos, top-down) em toda a área e que são carregados preliminarmente na área de desenvolvimento urbano virtual. Logo que os mapas paramétricos são carregados, é iniciado o desenho urbano por meio do posicionamento dos edifícios (critérios qualitativos, bottom-up), que adaptam os seus parâmetros à medida que se altera a sua localização. Para avaliar esse novo método, Vidmar & Koželj (2015) desenvolveram um protótipo de uma aplicação interativa em Maya (software de modelação 3D da Autodesk) (Figura 7).

Jacobi et al. (2009) propõem um sistema participativo em três fases para as fases iniciais do desenho urbano, no qual incluem entrevistas a cidadãos, desenho com base em gramáticas paramétricas e nova iteração com cidadãos.

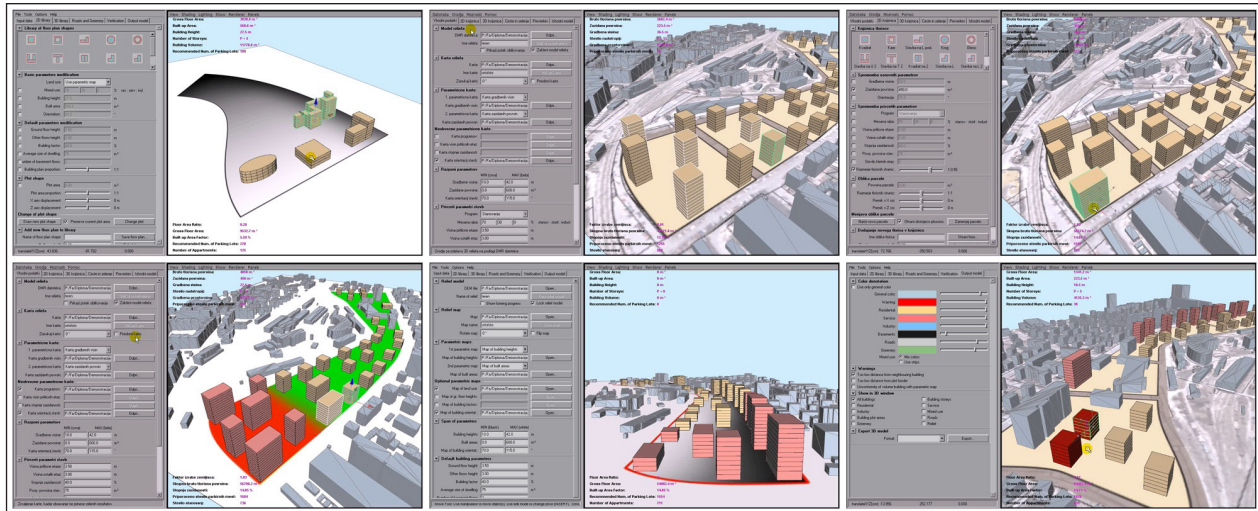


Figura 7 - Capturas de ecrã do protótipo desenvolvido por Vidmar & Kozelj
 Fonte: Reproduzido de Vidmar & Kozelj (2015, p. 50).

Ferramentas digitais disponíveis para desenho urbano

O desenvolvimento de software comercial, com interface amigável que usa procedimentos de gramática da forma, tem sido uma evolução muito positiva para os projetistas que começaram a utilizar esses sistemas para a geração de planejamento urbano (Schirmer & Kawagishi, 2011). As ferramentas atuais abordam, de modo muito eficiente, os aspectos quantitativos do desenho urbano, permitindo elaborar os cálculos analíticos simples e uma complexa pesquisa de índole computacional (Vidmar, 2013).

Investigadores da ETH Zurique (Müller et al., 2006; Parish & Müller, 2001) desenvolveram o software CityEngine (ESRI, 2017), que permite gerar cidades de grande escala e complexidade por meio do uso de uma linguagem procedimental, tendo como base as gramáticas da forma. Com o CityEngine, é possível gerar ambientes urbanos a partir do zero, com base em um conjunto hierárquico de regras que podem ser alargadas, dependendo das necessidades do utilizador. A criação de um sistema urbano no CityEngine reduz-se à geração da rede de tráfego e dos edifícios, com os dados de uso do solo sendo um input do utilizador no sistema. Por meio da introdução de dados, como a densidade populacional e as fronteiras urbanas, a aplicação gera um sistema viário, divide o terreno em lotes e cria uma geometria apropriada para os edifícios nos respectivos lotes. Além do uso de princípios e objetivos globais de desenho, é ainda

possível a introdução de constrangimentos locais. Na esfera do desenho dos edifícios, é utilizada uma gramática da forma (designada por gramática CGA, de Computer Generated Architecture), com regras de geração que iterativamente cria mais detalhe no desenho. Nos edifícios, as regras de geração começam por criar um volume simples e depois continuam a estruturar a fachada até adicionar detalhes às janelas, às portas e aos ornamentos (Müller et al., 2006).

O CityZoom (2017) é um sistema de apoio à decisão para planejamento urbano. Além de gerar soluções de projeto urbano, o software CityZoom inclui módulos de avaliação iterativa das soluções geradas sob o ponto de vista do conforto ambiental, projeção de sombras, fluxos e análise do cumprimento de regulamentos (Turkienicz et al., 2007).

Os software Modelur (2017) e CityCAD — Holistic City Software (CityCAD, 2017) são outras ferramentas paramétricas de desenho de cidades: o primeiro funciona com o Sketchup e o segundo é um aplicativo independente. Projetos que integram Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e CAD ou BIM (como o CityEngine), em uma base comum de projeto, permitem estabelecer a ligação entre um modelo tridimensional paramétrico e os seus dados urbanos e tirar partido dessa relação.

As grandes vantagens do uso de sistemas paramétricos baseados em gramáticas da forma para desenho urbano são a rapidez de obtenção de alternativas de desenho e a rápida alteração dessas alternativas, com base na mudança de alguns parâmetros. A possibilidade de

experimentar diversas alternativas em fases iniciais do projeto faz com que haja um aumento da qualidade nas soluções geradas (Vidmar, 2013). A redução de erros e a possibilidade de otimizar as soluções, de acordo com determinadas prioridades, são outras vantagens dessas abordagens.

Considerações finais

Neste artigo, fez-se uma análise dos desenvolvimentos atuais mais impactantes em gramáticas da forma, com aplicação em desenho urbano. O objetivo foi o de compreender em que medida as gramáticas da forma podem ser utilizadas como parte de uma metodologia para um projeto flexível do espaço urbano que responda aos requisitos e às necessidades do contexto urbano e edificado.

No âmbito do que foi anteriormente desenvolvido, considera-se que as gramáticas analíticas urbanas têm inúmeras aplicações, quer como instrumento de análise histórica de padrões de desenho, quer como instrumento de definição de processos de transformação da realidade existente, em outra forma de realidade, mais adaptável às contingências dos contextos sociais, econômicos e políticos contemporâneos. De fato, a metodologia das gramáticas da forma tem sido extensamente utilizada para análise de cidades e de diversos tipos de padrões urbanos existentes, mas a sua utilização em métodos de geração de novas propostas urbanas é ainda inexpressiva. Apesar disso, fez-se referência neste trabalho a um conjunto de investigação e de desenvolvimento de software comercial que se baseia na lógica das gramáticas da forma e que já permite gerar projetos de conjuntos urbanos que correspondam aos diversos requisitos do projeto. Os principais objetivos na automatização do processo de planejamento urbano — por via do desenvolvimento de software específico — são a definição de propostas que respondam a critérios específicos e a obtenção de um retorno acerca das configurações espaciais propostas que revelem as suas potencialidades e fragilidades (Koenig & Klein, 2016). Os resultados da investigação atual mostram que as gramáticas da forma permitem gerar alternativas de desenho urbano que são coerentes com uma linguagem de projeto e com as quais o técnico pode projetar avaliando as soluções de projeto e alterando-as iterativamente.

O futuro caminho para o uso das gramáticas da forma em desenho urbano passa pelo desenvolvimento de metodologias e, principalmente, pela existência de software de uso comercial que seja amigável para os utilizadores não programadores. Uma maior interoperabilidade entre aplicações permitirá ainda que o processo de avaliação das soluções finais não dependa apenas dos algoritmos implementados em uma aplicação, mas possa ser informado por várias outras mais especializadas em cada um dos domínios, independentemente de serem fluxos e comportamentos humanos, eficiência energética, iluminação, usos do solo, densidades, entre outros.

Referências

- Alexander, C., Ishikawa, S., & Silverstein, M. (1977). *A pattern language: towns, buildings, construction*. New York: Oxford University Press.
- Barros, P., Beirão, J., & Duarte, J. (2013). The language of Mozambican slums. In R. Stouffs & S. Sariyildiz (Eds.), *Computation and Performance – Proceedings of the 31st eCAADe Conference* (Vol. 2, pp. 715-724). Delft, The Netherlands: Faculty of Architecture, Delft University of Technology.
- Beirão, J. (2012). *CityMaker: designing grammars for urban design*. Delft: Delft University of Technology.
- Beirão, J. N., & Duarte, J. P. (2009). Urban design with patterns and shape rules. In E. Stolk, & M. te Brommelstroet (Eds.), *Model town, using urban simulation in new town planning* (pp. 1-12). Amsterdam: Sun Publishers.
- Beirão, J., Duarte, J., & Stouffs, R. (2008). Structuring a Generative Model for Urban Design: Linking GIS to Shape Grammars. In *Architecture in computro: 26th eCAADe conference proceedings* (pp. 929-938). Antwerpen (Belgium): The Higher Institute of Architecture Sciences, Henry van de Velde.
- Beirão, J., Duarte, J. P., & Stouffs, R. (2009a). Grammars of Designs and Grammars for Designing. Grammar-Based Patterns for Urban Design. In T. Tidafi, & T. Dorta. (Eds.), *Joining Languages, Cultures and Visions: CAAD Futures 2009* (pp. 1-15). Montréal: Les Presses de Université de Montréal.
- Beirão, J., Duarte, J., & Stouffs, R. (2009b). An Urban Grammar for Praia: Towards Generic Shape Grammars for Urban Design. In *Computation: The New Realm of*

- Architectural Design, 27th eCAADe Conference Proceedings* (pp. 575-584). Istanbul: Istanbul Technical University, Faculty of Architecture.
- Beirão, J., Montenegro, N., Gil, J., Duarte, J. P., & Stouffs, R. (2009c). The city as a street system : a street description for a city ontology. In *Proceedings of the 13th Congress of the Iberoamerican Society of Digital Graphics, SIGraDi 2009* (pp. 132-134). São Paulo: Sigradi.
- Benrós, D., Granadeiro, V., Duarte, J. P., & Knight, T. (2011). Automated Design and Delivery of Relief Housing : The Case of Post-Earthquake Haiti. In *CAAD Futures 2011: Designing Together* (pp. 247-264). Liège: Les Éditions de L'Université de Liège editora.
- Cagan, J. (2001). Engineering shape grammars. In E. K. Antonsson, & J. Cagan (Eds.), *Formal engineering design synthesis* (pp. 65-92). Cambridge: Univerity Press. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511529627.006>.
- Celani, G., Beirão, J., Duarte, J. P., & Vaz, C. (2011). Optimizing the 'characteristic Structure': Combining Shape Grammars and Genetic Algorithms to Generate Urban Patterns. In *eCAADe 29* (pp. 491-500). Ljubljana: Faculty of Architecture, University of Ljubljana.
- Chau, H. H., Chen, X., McKay, A., & De Pennington, A. (2004). Evaluation of a 3d Shape Grammar Implementation. In J. S. Gero. (Ed.), *Design Computing and Cognition'04* (pp. 357-376). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-2393-4_19.
- CityZoom. (2017). Recuperado em 22 de novembro de 2017, de <http://www.simmlab.ufrgs.br/software/software.html>
- Coimbra, E., & Romão, L. (2013). The rehabilitation design process of the bourgeois house of oporto: shape grammar simplification (pp. 677-686). In *eCAADe 2013. Computer Performance* (Vol. 2). Delft: Delft University of Technology.
- Duarte, J. P. (2005). Towards the mass customization of housing: the grammar Siza's Houses at Malagueira. *Environment and Planning. B, Planning & Design*, 32(3), 347-380. <http://dx.doi.org/10.1068/b31124>.
- Duarte, J. P., & Beirão, J. (2011). Towards a methodology for flexible urban design: designing with urban patterns and shape grammars. *Environment and Planning. B, Planning & Design*, 38(5), 879-902. <http://dx.doi.org/10.1068/b37026>.
- Duarte, J. P., Ducla-Soares, G., Caldas, L. G., & Rocha, J. (2006). An urban grammar for the medina of marrakech: towards a tool for urban design in islamic contexts. In J. Gero (Ed.), *Design computing and cognition '06* (pp. 483-502). USA: Springer. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-5131-9_25.
- Eloy, S. 2012. *A transformation grammar-based methodology for housing rehabilitation*. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa.
- Eloy, S., Vermaas, P. E., & Andrade, M. (In press). The quality of designs by shape grammar systems and architects: a comparative test on refurbishing Lisbon's Rabo-de-Bacalhau apartments. *Journal of Architectural and Planning Research*.
- Esri CityEngine – ESRI. (2017). Recuperado em 22 de novembro de 2017, de <http://www.esri.com/software/cityengine>
- Ferrão, J., & Eloy, S. 2014. As Gramáticas Da Forma No Processo de Criação Arquitetónica. As Gramáticas Originais E O Desenho Do Espaço. In Associação das Escolas de Arquitetura e Urbanismo de Língua Portuguesa, & Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa (Ed.), *Atas do 3º Seminário Internacional Arquiteturas do Mar, da Terra e do Ar, Volume Cidades Desejadas e Sonhadas, Ideias do Amanhã* (pp. 319-328). Lisboa: Faculdade de Arquitetura, Universidade de Lisboa.
- Flemming, U. (1987). More than the sum of parts: the grammar of Queen Anne Houses. *Environment and Planning. B, Planning & Design*, 14(3), 323-350. <http://dx.doi.org/10.1068/b140323>.
- Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., & Vlissides, J. 1995. *Design patterns: elements of reusable object-oriented software*. USA: Addison-Wesley.
- Gil, J., & Duarte, J. P. (2008). Towards an urban design evaluation framework. Integrating spatial analysis techniques in the parametric urban design process. In *Architecture in Computro: Proceedings of the 26th eCAADe Conference* (pp. 257-264). Antwerpen: The Higher Institute of Architecture Sciences, Henry van de Velde.
- Gips, J. (1999). Computer implementation of shape grammars. In *Workshop on Shape Computation* (pp. 1-11). Cambridge: MIT. Recuperado em 22 novembro 2017, de <http://www.shapegrammar.org/implement.pdf>
- Grasl, T. (2012). Transformational Palladians. *Environment and Planning. B, Planning & Design*, 39(1), 83-95. <http://dx.doi.org/10.1068/b37059>.
- Hillier, B., Leaman, A., Stansall, P., & Bedford, M. (1976). Space syntax. *Environment and Planning. B, Planning & Design*, 3(2), 147-185. <http://dx.doi.org/10.1068/b030147>.

- Hoisl, F., & Shea, K. (2011). Interactive, visual 3D spatial grammars. In J. S. Gero (Ed.), *Design Computing and Cognition '10* (pp. 643-662). USA: Springer Science. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-0510-4_34.
- Holistic City Software – CityCAD. (2017). Recuperado em 22 de novembro de 2017, de <https://www.holisticcity.co.uk/>
- Jacobi, M. M., Halatsch, J., Kunze, A., Schmitt, G., & Turkienicz, B. 2009. A grammar-based system for the participatory design of urban structures. In *SIGraDi 2009, Proceedings of the 13th Congress of the Iberoamerican Society of Digital Graphics* (pp. 27-29). USA: SIGraDi.
- Knight, T. (1999). *Applications in architectural design, and education and practice*. Recuperado em 22 de novembro de 2017, de <http://www.arch.usyd.edu.au/kcdc/journal/vol2/articles/knight/index.html>
- Knight, T. (2000). *Shape grammars in education and practice: history and prospects*. Recuperado em 22 de Novembro de 2017, de <http://web.mit.edu/tknight/www/IJDC/>
- Koenig, R., & Klein, B. (2016). Computational urban planning: using the value lab as control center. *FCL Magazine* (special issue), 38-45.
- Koning, H., & Eizenberg, J. (1981). The language of the prairie: frank lloyd wright's prairie houses. *Environment and Planning. B, Planning & Design*, 8(3), 295-323. <http://dx.doi.org/10.1068/b080295>.
- Li, A. I. (2017). *The interpreter project*. Recuperado em 22 de novembro de 2017, de <http://andrew.li/interpreter>
- Li, A. I-K. 2002. A prototype interactive simulated shape grammar. In K. Koszewski, & S. Wrona (Eds.), *Design education: Connecting the Real and the Virtual, Proceedings of the 20th Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe* (pp. 314-317). Warsaw: Warsaw University of Technology.
- Li, A. I-K., Chen, L., Chau, H. H., & Wang, Y. (2009). A prototype system for developing two and three dimensional shape grammars. In *Proceedings of the 14th International Conference Computer-Aided Architectural Design Research in Asia* (pp. 717-726). Douliou, Taiwan: National Yunlin University of Science & Technology Department of Digital Media Design.
- Marshall, S. (2004). *Streets and patterns: the structure of urban geometry*. London: Spon Press.
- Modelur. (2017). Recuperado em 22 de novembro de 2017, de <http://www.modelur.com/>
- Montenegro, N. (2015). *CityPlan – towards development of a methodology and computational tool to support urban design*. Lisboa: Faculdade de Arquitetura, Universidade de Lisboa.
- Montenegro, N., & Duarte, J. P. (2009). Computational ontology of urban design. Towards a city information model. In *Computation: The New Realm of Architectural Design, 27th eCAADe Conference Proceedings* (pp. 253-260). Istanbul: Faculty of Architecture, Istanbul Technical University.
- Müller, P., Wonka, P., Haegler, S., Ulmer, A., & Van Gool, L. (2006). Procedural modeling of buildings. *ACM Transactions on Graphics*, 25(3), 614. <http://dx.doi.org/10.1145/1141911.1141931>.
- Paio, A., & Turkienicz, B. (2010). A grammar for portuguese historical urban design. In *Future cities: Proceedings of the 28th Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe* (p. 349). Zurich, Switzerland: ETH Zurich.
- Paio, A., et al. (2011). Emerg.cities4all. Towards a shape grammar based computational system tool for generating a sustainable and integrated urban design. In *Respecting Fragile Places 29th eCAADe Conference Proceedings*. Ljubljana: Faculty of Architecture (Slovenia).
- Parish, Y. I. H., & Müller, P. (2001). Procedural modeling of cities. In *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*.
- Pont, M. B., & Haupt, P. (2009). *Space, density and urban form*. Netherlands: Technical University Delft. <http://dx.doi.org/9789052693750>.
- Raposo, M., Camara, A., Sampio, M., Raposo, P., & Andrade, F. (2001). A city simulator. In *Reinventing the Discourse - How Digital Tools Help Bridge and Transform Research, Education and Practice in Architecture: Proceedings of the Twenty First Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture* (pp. 52-61). New York: SUNY Buffalo.
- Rua, H., Falcão, A. P., & Roxo, A. F. (2013). Digital models – proposal for the interactive representation of urban centres. The downtown lisbon city engine model. In R. Stouffs, & S. Sariyildiz. *Computation and Performance, Proceedings of the 31st eCAADe Conference* (Vol. 1, pp. 265-274). Delft University of Technology.
- Schirmer, P., & Kawagishi, N. (2011). Using shape grammars as a rule based approach in urban planning - a report on practice. In *Respecting Fragile Places, 29th eCAADe*

- Conference Proceedings* (pp. 116-124). Ljubljana: Faculty of Architecture Ljubljana.
- Shape Grammar Interpreter – SGI. (2015). Recuperado em 22 de novembro de 2017, de <https://sourceforge.net/projects/sginterpreter/>
- Spapper. (2015). Recuperado em 22 de novembro de 2017, de <https://sourceforge.net/projects/spapper/>
- Steinø, N., Miray B., Yıldırım, & Özkar, M. (2013). Parametric design strategies for collaborative and participatory urban design. In *Computation and Performance, Proceedings of the 31st eCAADe Conference* (Vol. 1, pp. 195-204). Delft: Delft University of Technology.
- Stiny, G. (1980). Kindergarten grammars: designing with Froebel's building gifts. *Environment and Planning. B, Planning & Design*, 7(4), 409-462. <http://dx.doi.org/10.1068/b070409>.
- Stiny, G. (1992). Weights. *Environment and Planning. B, Planning & Design*, 19(4), 413-430. <http://dx.doi.org/10.1068/b190413>.
- Stiny, G., & Gips, J. (1972). Shape grammars and the generative specification of painting and sculpture. In O. Petrocelli (Ed.). *The best computer papers of 1971*. New Jersey: Auerbach.
- Stiny, G., & Mitchell, W. J. (1978). The palladian grammar. *Environment and Planning. B, Planning & Design*, 5(1), 5-18. <http://dx.doi.org/10.1068/b050005>.
- Strobbe, T. 2015. *Computer-aided exploration of architectural design spaces: a digital sketchbook*. Gent, Belgium: University of Gent.
- Strobbe, T., Eloy, S., Pauwels, P., Verstraeten, R., De Meyer, R., & Van Campenhout, J. (2016). A graph-theoretic implementation of the rabo-de-bacalhau transformation grammar. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 30(2), 138-158. <http://dx.doi.org/10.1017/S0890060416000032>.
- SWAP Architekten ZT GmbH. (2017). *GRAPE*. Recuperado em 22 de novembro de 2017, de <http://grape.swap-zt.com/>
- Teeling, C. (1996). Algorithmic design: generating urban form. *Urban Design Studies*, 2, 89-100.
- Trento, A., Fioravanti, A., & Loffreda, G. (2010). Ontologies for cities of the future. The quest of formalizing interaction rules of urban phenomena (pp. 797-804). In *Future Cities, 28th eCAADe Conference Proceedings*. Zurich: ETH Zurich.
- Trescak, T., Esteva, M., & Rodriguez, I. (2009). General shape grammar interpreter for intelligent designs generations. In *Proceedings of the 2009 6th International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization: New Advances and Trends, CGIV2009* (pp. 235-240). USA: IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/CGIV.2009.74>.
- Turkienicz, B., Bellaver, B., & Grazziotin, P. (2007). CityZoom. A Visualization tool for the assessment of planning regulations. In *Predicting the Future, 25th eCAADe Conference Proceedings* (pp. 375-382). Frankfurt am Main: Faculty of Architecture and Civil Engineering, FH Wiesbaden.
- Vidmar, J. 2013. Parametric maps for performance-based urban design. A lateral method for 3D urban design. In R. Stouffs, & S. Sariyildiz (Eds.), *Computation and Performance – Proceedings of the 31st eCAADe Conference* (Vol. 1, pp. 311-316). Delft: Delft University of Technology.
- Vidmar, J., & Koželj, J. (2015). Adaptive urbanism: a parametric maps approach. *Scientific Journal*, 3, 44-52.
- Wang, Y., & Duarte, J. P. (2002). Automatic generation and fabrication of designs. *Automation in Construction*, 11(3), 291-302. [http://dx.doi.org/10.1016/S0926-5805\(00\)00112-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0926-5805(00)00112-6).

Recebido: Nov. 24, 2017

Aprovado: Abr. 04, 2018