

CASOS DE ESTUDO SOBRE A INTEGRAÇÃO DE PROCESSOS DE PROJETO ALGORÍTMICO EM FLUXOS DE TRABALHO DE PROJETO EM MODELO BIM

{Inês Caetano, Catarina Belém, Guilherme Ilunga, Sofia Feist, António Leitão}⁽¹⁾,
{Francisco Bastos}⁽²⁾

(1) INESC-ID/Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa

(2) CiTUA/Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa

Resumo

Os processos de *Design Algorítmico* têm um enorme potencial, pouco explorado pela grande maioria dos gabinetes de arquitetura de pequena dimensão: na produtividade, na redução de custo/tempo ou na liberdade experimental. Para esse fim, é necessário combinar os processos de projeto arquitetónico BIM com os de raiz algorítmica.

Este artigo apresenta dois casos práticos resultantes dessa combinação. O primeiro centrou-se no controlo da incidência solar na fachada duma habitação isolada, tendo em vista o seu conforto lumínico. O segundo focou-se na integração de equipamento em unidades de quartos de hotel, como método de remodelação e reutilização de dois edifícios centenários.

A partir da descrição destes dois casos práticos, são discutidos e analisados os obstáculos encontrados ao longo do processo, as vantagens e desvantagens do mesmo, as lições aprendidas, e a implementação e avaliação de soluções de protótipo pela equipa de arquitetos, de modo a fomentar a sua aplicação futura na prática arquitetónica.

1. INTRODUÇÃO

O paradigma BIM tem-se vindo a instituir, cada vez mais, como processo de conceção e produção na prática arquitetónica. Esta abordagem permite integrar toda a informação necessária ao projeto de arquitetura e construção num modelo federado que funciona como uma base de dados única, distribuída e sincronizada de partes logicamente ligadas e coordenadas

relativas a diferentes usos BIM [1], possibilitando assim a inclusão de critérios técnicos e de desempenho do edifício em fases preliminares do processo, como também a visualização 3D mais detalhada dos resultados.

Por outro lado, a revolução algorítmica está a mudar a prática da arquitetura [2], [3]. Graças às suas vantagens inerentes, estas abordagens têm sido rapidamente adotadas por diversos estúdios de arquitetura de maiores dimensões, promovendo assim ambientes de trabalho colaborativo compostos por equipas multidisciplinares com diferentes áreas de especialização. Porém, esta realidade ainda não se estendeu à maioria dos ateliers de pequena dimensão. Felizmente, isto não significa que estes não possam vir a beneficiar das vantagens das abordagens algorítmicas na produtividade, redução de custos e de tempo dos projetos, liberdade de experimentação, entre outros benefícios [4]. Para tal, é importante integrar o paradigma algorítmico nos processos de arquitetura e, em particular, na metodologia BIM, a qual nos últimos anos tem vindo rapidamente a substituir a metodologia tradicional baseada no desenho 2D. Neste artigo, são descritos dois casos práticos, nos quais esta integração foi aplicada. Os resultados obtidos, os obstáculos encontrados, as vantagens e desvantagens identificadas, e o processo de aprendizagem provenientes do processo colaborativo são analisados e discutidos.

2. INTEGRAÇÃO DO DESIGN ALGORÍTMICO E TRABALHO COLABORATIVO

A prática colaborativa foi introduzida no processo de projeto no século XVIII como resultado do divórcio entre o campo da arquitetura e da engenharia [5], incentivando assim os arquitetos a colaborar com outros especialistas. Atualmente, de modo a acompanhar os paradigmas que vão emergindo, incluindo o *Design Algorítmico*, tornou-se também necessário colaborar com especialistas em técnicas de programação.

A realidade atual de uma prática colaborativa entre arquitetura, engenharia e matemática, a qual combina técnicos especialistas em diferentes áreas, já faz parte do processo de projeto de alguns ateliers: *Advanced Geometry Unit* da ARUP, *Advanced Modelling Group* e *Computational Design & Research* do atelier Aedas, *Specialist Modelling Group* do Foster & Partners, entre outros. O sucesso destes estúdios de arquitetura são a prova de como, no meio de uma realidade complexa como a do desenho paramétrico e algorítmico, o trabalho colaborativo pode melhorar o processo de projeto, tornando-o por sua vez mais eficiente, sendo a contribuição de um especialista em programação cada vez mais relevante.

O nosso objetivo é explorar uma abordagem de projeto colaborativo que permita aos ateliers de menores dimensões tirar proveito de técnicas algorítmicas. Este tipo de colaboração foi previamente explorado por Caetano e Leitão [6], no desenvolvimento de uma fachada para um edifício residencial, utilizando uma abordagem algorítmica para BIM. Este artigo segue uma perspetiva semelhante, embora mais aprofundada: o processo de colaboração inclui também a análise e otimização das várias soluções de projeto produzidas algoritmicamente.

Nas secções seguintes, são apresentados os dois exemplos desenvolvidos num estúdio de arquitetura de pequena escala, onde à equipa base de projeto se integraram arquitetos especialistas em *Design Algorítmico*. A intervenção destes acabou por abranger múltiplas frentes, focando-se em questões projetais de naturezas diversas, incluindo a exploração geométrica e visual de cada uma das soluções, bem como a sua análise lumínica, espacial e

funcional (Figura 1). No final, os exemplos desenvolvidos demonstraram que a colaboração com especialistas em processos algorítmicos traz várias vantagens a todo o processo de projeto e modelação BIM.

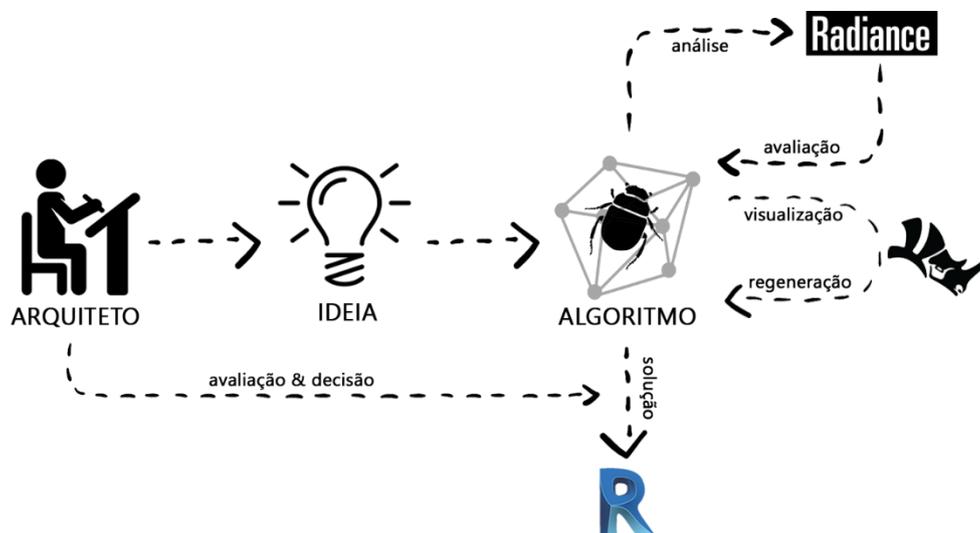


Figura 1: *Workflow* do processo colaborativo – a ideia conceptual é inicialmente implementada algoritmicamente; a visualização dos modelos 3D das opções geradas é feita no *Rhino*; simultaneamente, o cálculo do desempenho lumínico de cada opção é feito na ferramenta de análise *Radiance*; por fim, o algoritmo permite criar, automaticamente, o modelo 3D da(s) opção(s) seleccionada(s) com as respetivas famílias BIM.

A interoperabilidade e portabilidade entre as diferentes aplicações utilizadas (i.e., CAD, BIM e ferramentas de análise), adveio do uso do *Rosetta* [7], uma ferramenta de *Design Algorítmico* que, através da descrição de um único programa algorítmico, permite gerar modelos idênticos nessas aplicações. Para além disso, como por vezes a representação dos modelos 3D difere entre ferramentas, o *Rosetta* é o responsável pela adaptação automática do modelo a cada software, não só evitando erros e perdas de informação, como também libertando o utilizador de trabalho extra. Deste modo, foi possível utilizar uma abordagem baseada na programação capaz de operar num universo de diversas plataformas, gerindo de forma eficiente a passagem de informação entre softwares tendo em conta a sua função respetiva, sendo deste modo dispensável a utilização de formatos universais de arquivo como o IFC.

3. CASO DE ESTUDO 1 – OPTIMIZAÇÃO LUMÍNICA

O primeiro caso prático enfrentou uma situação complexa de controlo da incidência solar numa habitação unifamiliar voltada para o oceano Atlântico. O uso do projeto algorítmico visou gerar um conjunto de painéis de sombreamento para a fachada, cujo padrão geométrico se baseou num conceito de aleatoriedade que, simultaneamente, proporcionasse um bom desempenho lumínico à habitação.

O padrão geométrico dos painéis evoluiu consideravelmente ao longo de todo o processo de projeto, como resultado do uso de uma abordagem algorítmica – esta permitiu visualizar, de forma quase imediata, o impacto das alterações no projeto e, simultaneamente, explorar múltiplas derivações do conceito inicial. Na última iteração, optou-se por um padrão geométrico baseado em barras de madeira horizontais, cujo comprimento ia alternando entre a dimensão total do painel e dimensões mais pequenas (Figura 2.A). O comprimento das barras menores deveria ser aleatório, assim como também o seu posicionamento ao longo do comprimento do painel (Figura 2.B-C). Para um maior controlo das soluções geradas, foram estabelecidas algumas restrições a este comportamento aleatório, tais como (i) os tamanhos máximo e mínimo que as barras podiam ter, (ii) o número de diferentes tamanhos possíveis para as barras, e (iii) a distância máxima entre barras (Figura 2.D-E).

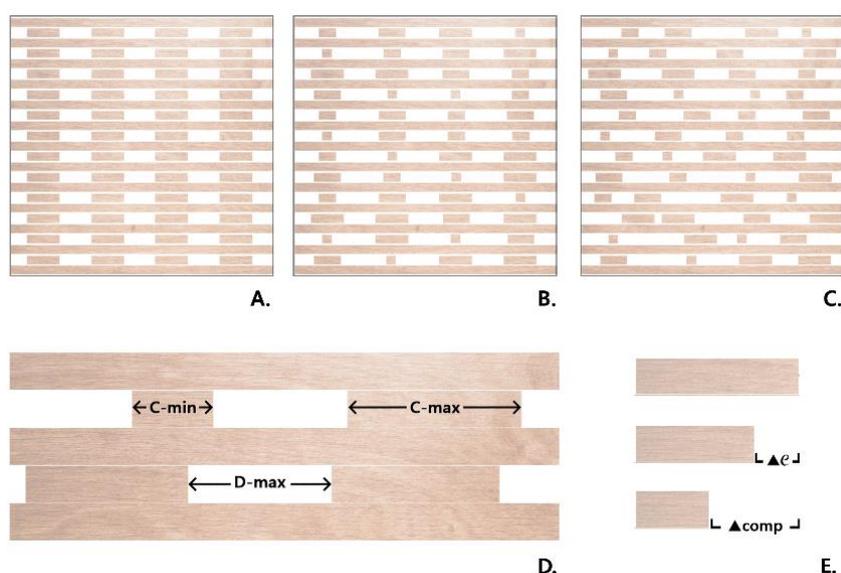


Figura 2: Representação conceptual do padrão geométrico dos painéis: A. alternância entre barras maiores e menores; B-C. tamanho e posicionamento aleatórios das barras menores; D. restrições geométricas do padrão: tamanho mínimo e máximo das barras menores e a distância máxima entre estas; E. gama de tamanhos possíveis.

Recorreram-se a diversas ferramentas digitais para a geração de resultados, simulação do desempenho lumínico, e produção do modelo final BIM (Figura 1). Inicialmente, através do *Rosetta*, i.e., o ambiente de programação utilizado, foi gerado um conjunto de variações do conceito inicial, resultante da introdução de diferentes valores para os parâmetros do padrão. Os respetivos modelos 3D iam sendo visualizados no *Rhinoceros* (ferramenta de modelação com uma *performance* mais rápida que a ferramenta BIM adotada pelo atelier), permitindo assim analisar e avaliar rapidamente um conjunto de opções, e, de seguida, sugerir alterações de parâmetros a aplicar nas iterações seguintes que visassem quer uma harmonia visual para os painéis, quer o seu equilíbrio geométrico entre *cheios-vazios*. Assim, este processo cíclico de *geração-visualização* permitiu selecionar os melhores valores para os parâmetros do modelo final numa perspetiva visual compositiva.

Tendo como objetivo obter um conjunto de painéis de sombreamento otimizados em termos do seu desempenho lumínico, a fase seguinte focou-se na análise de uma amostra de soluções em

relação à métrica de *Spatial Useful Daylight Illumination* (sUDI) [8]. Para tal, considerou-se, não só o conjunto de variações resultantes das premissas iniciais para os parâmetros, mas também uma amostra mais ampla de soluções provenientes de valores divergentes dessas premissas. Sem recurso a ferramentas de automação e fazendo uso apenas das funcionalidades nativas da plataforma BIM *Revit*, este processo de otimização iria precisar que o modelo fosse alterado manualmente para, de seguida, se executar a análise correspondente. Este processo manual tornar-se-ia assim extremamente moroso, pois teria de ser iterativamente repetido até se encontrar uma solução aceitável. Para além disso, existe a agravante de que, por vezes, só ao final de centenas de iterações é que se obtêm resultados meritórios, tornando todo o processo de otimização inviável em termos de tempo e custos. Recorrendo a processos algorítmicos, esta tarefa é automatizada e, conseqüentemente, acelerada, permitindo a análise de uma gama de variações maior num espaço de tempo mais curto.

Para iniciar o processo de otimização, começou por se identificar as divisões da habitação a serem submetidas à análise, i.e., os espaços interiores cuja iluminação natural iria ser diretamente afetada pelos painéis de sombreamento a otimizar. De seguida, implementámos um processo de otimização ganancioso, baseado em diferentes técnicas de amostragem para a geração das diferentes variações. Primeiramente, utilizou-se a Amostragem de Monte Carlo (AMC) [9], permitindo assim testar o fluxo de trabalho da otimização. Contudo, como a AMC necessita de um elevado número de amostras de modo a conseguir produzir resultados viáveis, esta técnica não seria temporalmente aceitável devido ao custo das avaliações exigidas pela análise lumínica. Como alternativa, utilizou-se a Amostragem por Hipercubo Latino, a qual permitiu reduzir o número de variações obtidas, melhorando assim a cobertura e a amplitude do intervalo de resultados possíveis para os painéis [10]. Numa primeira fase, esta técnica permitiu-nos obter uma solução com 100% de sUDI, embora esta tivesse uma probabilidade de encadeamento elevada, reduzindo assim o conforto no interior.

O processo de otimização foi repetido novamente, apenas considerando as restrições impostas pelas premissas iniciais: o comprimento das barras menores só podia ter 5 valores diferentes: 5, 10, 15, 20, ou 25cm (i.e., $\mathcal{E}_{min} = 5\text{cm}$, $\mathcal{E}_{max} = 25\text{cm}$, e $\Delta\mathcal{E} = 5\text{cm}$). Apenas a distância entre barras (D_{max}) é que ditava a luz que penetrava no interior da habitação. Inicialmente, estabeleceu-se 20cm para esse parâmetro e, seguidamente, geraram-se 50 amostras, obtendo-se 45% como valor máximo de sUDI, o qual estava longe de ser ótimo. Por conseguinte, o processo de otimização foi repetido, desta vez, com um D_{max} de 100cm, gerando-se de seguida mais 200 amostras. O gráfico de dispersão da Figura 3 organiza as amostras obtidas, demonstrando que, até a um D_{max} de 50cm, os valores de sUDI obtidos sobem rapidamente até aos 80%. Em contrapartida, a partir desse valor, as percentagens de sUDI obtidas convergem lentamente até aos 100%. Todavia, a maioria das soluções cujos valores de sUDI eram mais elevados, resultavam de parâmetros que se desviavam dos propostos pelos arquitetos.

Nesta fase, o desafio foi o de selecionar uma solução que, não só tivesse um bom desempenho lumínico, mas que também cumprisse os objetivos conceptuais dos arquitetos que não eram considerados pelo processo de otimização. Nesse sentido, começou-se por avaliar até que ponto as premissas iniciais iriam restringir a escolha final, i.e., a facilidade que os arquitetos teriam em aceitar opções que se afastassem da sua ideia inicial. Para tal, foram apresentadas sete opções das amostras obtidas à equipa, sem informar acerca dos valores respetivos das variáveis, nem dos níveis de sUDI correspondentes. A seleção dos exemplos a apresentar foi estratégica, de modo a obter-se uma amostragem heterogénea (Figura 3): a opção A resulta inteiramente de restrições impostas pelos arquitetos; as opções B-F derivam das mesmas restrições que a opção

A, com a exceção da variável *D-max*, cujo valor aumenta da solução B à F; contrariamente às anteriores, a opção G não considera a maioria das premissas impostas.

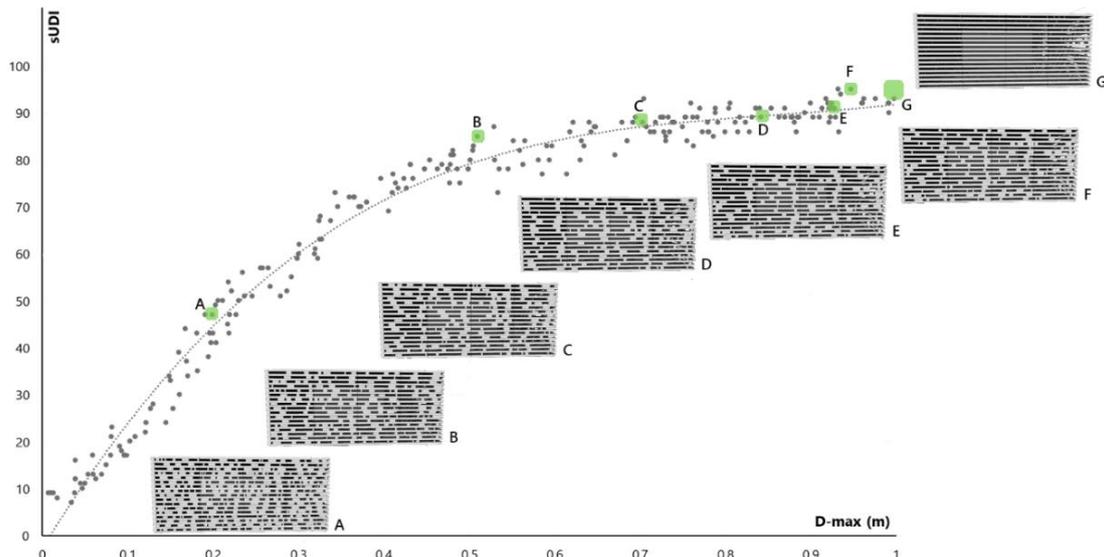


Figura 3: O gráfico com a amostra obtida durante o processo de otimização, no qual é visível a evolução da métrica *sUDI* com a alteração do parâmetro *D-max*.

Após a análise das opções, os arquitetos elegeram como melhor solução a opção C, como segunda melhor a opção D, e como pior a opção A. De forma geral, as opções com um conjunto de características mais equilibradas foram as que tiveram uma maior aceitação, i.e., as opções com níveis de *sUDI* aceitáveis (acima dos 80%) e que não se desviavam demasiado da intenção inicial. Pelo contrário, nenhuma das opções correspondentes aos valores de *sUDI* mais elevados (opções E, F e G) foi considerada. Isto significa que, apesar de apresentarem o melhor desempenho lumínico, estas opções não satisfaziam tão bem os critérios visuais e compositivos procurados como as opções B e C. Ainda assim, estas também não foram consideradas como piores opções, provando que, mesmo quando a solução se desvia do conceito inicial (como é o caso extremo da opção G), esta pode ainda vir a ser considerada como uma solução possível. Relativamente à pior solução (opção A), embora correspondesse ao valor de *sUDI* mais baixo da amostra, esta opção era, ao mesmo tempo, a que respeitava todas as restrições impostas pelos arquitetos. Esta escolha foi analisada mais pormenorizadamente, concluindo-se que resultou do facto do padrão dos painéis ser demasiado denso, permitindo sugerir de seguida uma nova restrição ao modelo algorítmico: percentagem mínima de aberturas superior a 50%. Uma vez estabelecido o padrão geométrico, sendo escolhida a opção C, a abordagem algorítmica utilizada até esta fase, permitiu gerar igualmente os painéis nas famílias BIM correspondentes, possibilitando assim a sua total integração no modelo BIM final (Figura 4). Em suma, este exemplo ilustrou, não só as vantagens em seguir uma abordagem algorítmica para BIM no processo de desenho, análise, e otimização de um edifício, como também os benefícios dum processo de trabalho colaborativo baseado na integração de equipas de especialistas num atelier de arquitetura de pequenas dimensões.

4. CASO DE ESTUDO 2 – DISTRIBUIÇÃO AUTOMÁTICA DE MOBILIÁRIO

O segundo desafio considerou a reabilitação e a adaptação de um edifício residencial do século XIX para um estabelecimento hoteleiro. Durante o desenvolvimento deste projeto, uma das principais limitações encontradas resultou da necessidade em equipar todos os quartos com as instalações e equipamentos necessários para este tipo de programa. Dada a pré-existência do edifício, e a sua organização espacial original, todos os quartos eram espacialmente diferentes, possuindo diversas configurações, formas, dimensões, e posições para as portas e janelas. O desafio constou em adaptar as instalações e equipamentos hoteleiros a cada configuração de quarto, sendo que havia também o interesse em explorar diferentes opções para o posicionamento dos equipamentos em cada uma das situações. Dado o elevado número de quartos, a adaptação manual dos equipamentos a todos estes, bem como a exploração de configurações possíveis para cada um, tornar-se-ia um processo demasiado prolongado e trabalhoso que, conseqüentemente, iria limitar a exploração de alternativas.

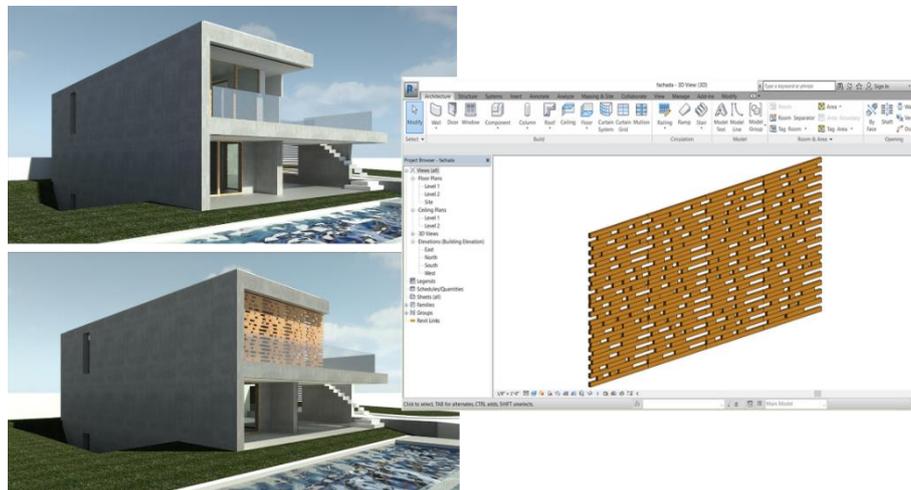


Figura 4: Esquerda – *renders* do modelo 3D antes e depois da intervenção; Direita – *printscreens* dos painéis de sombreamento escolhidos em formato *REVIT*.

Para abordar este problema, desenvolveu-se um algoritmo que recebe como parâmetros as dimensões do quarto, a posição da porta e das janelas, as dimensões de cada elemento do equipamento, assim como o espaço de circulação necessário para a sua utilização. Com base nesta informação, o algoritmo coloca e orienta de forma estocástica os elementos dentro da área do quarto, gerando um conjunto de hipóteses que é filtrado de acordo com heurísticas que asseguram que as soluções geradas cumprem os requisitos de construção e as restrições estabelecidas pelos arquitetos. Foram implementados dois tipos de condicionantes para o algoritmo: (1) condicionantes de construção e (2) condicionantes de programa. As primeiras consideram a exequibilidade do projeto, assegurando a funcionalidade das soluções obtidas, e.g., os equipamentos não se podem intersestar, cada equipamento deve ter o seu espaço próprio para circulação e utilização, etc. As segundas incluem um conjunto de preferências programáticas a considerar no projeto dos quartos, e.g., que o lavatório ou a banheira deveriam ser colocados ao lado de uma janela. Note-se que estas preferências não impedem a geração de

soluções, apenas as classifica de modo a que as soluções que cumprem mais preferências sejam mostradas em primeiro lugar.

Tal como no caso de estudo anterior, o algoritmo foi evoluindo como resultado da constante interação entre os especialistas em processos algorítmicos e os arquitetos. Numa fase inicial, gerou-se um conjunto de soluções para serem avaliadas pelos arquitetos em termos da sua viabilidade e adequabilidade ao projeto. O *feedback* que ia sendo obtido permitiu ir introduzindo, de forma iterativa, melhorias e alterações ao algoritmo, i.e., novas regras para o posicionamento dos elementos, as quais se iam traduzindo em novas condicionantes. Através deste processo cíclico de *geração-avaliação* foi possível orientar as soluções obtidas de acordo com o parecer dos arquitetos (Figura 5).

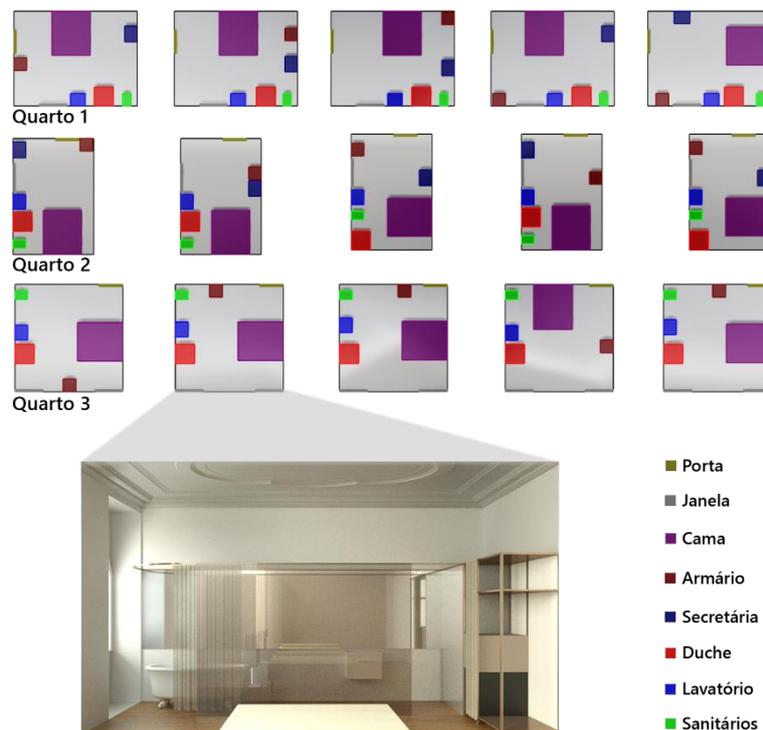


Figura 5: Soluções obtidas para três tipos de quartos. Os retângulos representam os diferentes elementos que compõem os quartos, cujas dimensões foram definidas pelos arquitetos. Em baixo, é visível um *render* duma das configurações obtidas.

Atualmente, este projeto encontra-se ainda em fase de desenvolvimento com as equipas a definir novas condicionantes e preferências de modo a garantir a adequabilidade das soluções obtidas e, futuramente, a produção das soluções num formato que seja imediatamente utilizável pelos arquitetos, o qual seja já constituído pelas famílias BIM respetivas.

5. CONCLUSÕES

Apesar de já terem sido reconhecidas as vantagens das abordagens algorítmicas, os ateliers de pequenas dimensões, que já seguem um paradigma BIM, ainda têm uma grande dificuldade em

as adotar devido, principalmente, à falta de tempo e de recursos. Nestes casos, a colaboração com especialistas em *Design Algorítmico* é uma boa alternativa, a qual permite integrar os benefícios desejados, sem que ocorram mudanças drásticas no modo de trabalho do atelier. Neste artigo são explorados dois exemplos desse tipo de colaboração, da qual fizemos recentemente parte. Ambos os exemplos descrevem um desafio proposto pelo estúdio de arquitetura: (1) criação de um conjunto de painéis de sombreamento, com um certo grau de aleatoriedade, que fossem otimizados em relação ao seu desempenho lumínico, e (2) a implementação de um algoritmo capaz de mobilar automaticamente um conjunto de quartos de hotel com características espaciais diferentes.

O objetivo era utilizar processos algorítmicos de modo a responder aos problemas apresentados e, em seguida, apresentar um conjunto de soluções possíveis para se utilizar nas fases seguintes do processo de projeto BIM. Em ambos os casos, utilizaram-se processos algorítmicos na produção de variações dos projetos pretendidos. De seguida, foram aplicados alguns métodos de amostragem de modo a guiar a geração das diferentes opções até que os critérios de desempenho impostos fossem atingidos. Em todas as etapas, a interação *especialista-arquiteto* foi crucial: as soluções geradas eram discutidas, dando origem a novas restrições e preferências a ter em consideração no projeto. Este processo iterativo foi repetido até a equipa estar satisfeita com a solução final, a qual foi depois gerada em formato BIM, permitindo a sua total integração na metodologia de trabalho do atelier.

A abordagem proposta permite a utilização do *Design Algorítmico* em ateliers com práticas baseadas em processos BIM, sem perturbar o seu método de trabalho habitual, sendo uma solução interessante para sensibilizar os estúdios de arquitetura a integrar na sua equipa de projeto uma equipa de especialistas em processos algorítmicos. A nossa estratégia segue a iniciativa mista proposta por Chaszar & Joyce [11], a qual envolve continuamente o arquiteto na elaboração de requisitos, na análise das variações obtidas, na implementação de soluções protótipo, na avaliação das soluções, e nas interações subsequentes do processo. O objetivo é que o atelier mantenha o controlo sobre o processo de projeto mas, dada a multiplicidade de agentes envolvidos, é inevitável que algum desse controlo seja perdido [12]. Outra limitação crítica do processo é o facto do conhecimento algorítmico permanecer com a equipa de especialistas. No caso dos ateliers com recursos suficientes, é preferível que esse conhecimento seja integrado na sua estrutura interna, de modo a poder intervir continuamente na prática arquitetónica da equipa. Para tal, os membros do estúdio devem participar nos desenvolvimentos algorítmicos que vão ocorrendo, promovendo assim o futuro desenvolvimento interno de tais técnicas [13].

Futuramente, planeamos estender a colaboração com os ateliers a outras atividades que possam beneficiar das abordagens algorítmicas como, por exemplo, análise e otimização de comportamento estrutural e de conforto térmico, bem como geração automática de imagens e animações foto-realistas das soluções produzidas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por fundos nacionais através da *Fundação para a Ciência e a Tecnologia* (FCT), com a referência *UID/CEC/50021/2013*, e pela bolsa de Doutoramento sob

o contrato da Universidade de Lisboa (UL), Instituto Superior Técnico (IST), e da unidade de *Investigação e Inovação em Engenharia Civil para a Sustentabilidade* (CERIS). O desenvolvimento do trabalho foi possível devido à colaboração do Atelier dos Remédios.

REFERÊNCIAS

- [1] K. M. Kensek and D. E. Noble, Eds., *Building Information Modeling: BIM in Current and Future Practice*, 1st ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2014.
- [2] F. Imbert, K. S. Frost, A. Fisher, A. Witt, V. Tourre, and B. Koren, “Concurrent Geometric, Structural and Environmental Design: Louvre Abu Dhabi,” in *Advances in Architectural Geometry 2012*, L. Hesselgren, S. Sharma, J. Wallner, N. Baldassini, P. Bompas, and J. Raynaud, Eds. Vienna: Springer Vienna, 2013, pp. 77–90.
- [3] R. Van Der Heijden, E. Levelle, and M. Riese, “Parametric Building Information Generation for Design and Construction,” in *ACADIA 2015: Computational Ecologies: Design in the Anthropocene [Proceedings of the 35th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture]*, 2015, pp. 417–429.
- [4] L. Santos, J. Lopes, and A. Leitão, “Collaborative Digital Design: When the architect meets the software engineer,” in *Digital Physicality - Proceedings of the 30th eCAADe Conference*, 2012, vol. 2, pp. 87–96.
- [5] S. Giedion, *Space, Time and Architecture*. Cambridge: The Harvard University Press, 1941.
- [6] I. Caetano and A. Leitão, “Integration of an Algorithmic BIM Approach in a Traditional Architecture Studio,” in *Protocols, Flows and Glitches, Proceedings of the 22nd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2017*, 2017, pp. 633–642.
- [7] J. Lopes and A. Leitão, “Portable generative design for CAD applications,” *Integr. Through Comput. - Proc. 31st Annu. Conf. Assoc. Comput. Aided Des. Archit. ACADIA 2011*, pp. 196–203, 2011.
- [8] A. Nabil and J. Mardaljevic, “Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors,” *Energy Build.*, vol. 38, no. 7, pp. 905–913, 2006.
- [9] A. Shapiro, “Monte Carlo Sampling Methods,” in *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Elsevier, 2003, pp. 353–425.
- [10] M. D. McKay, R. J. Beckman, and W. J. Conover, “A Comparison of Three Methods for Selecting Value of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code,” *Technometrics*, vol. 21, no. 2, pp. 239–245, 1979.
- [11] A. Chaszar and S. C. Joyce, “Generating freedom : Questions of flexibility in digital design and architectural computation,” *Int. J. Archit. Comput.*, vol. 14, no. 2, pp. 167–181, 2016.
- [12] A. Chaszar, “Issues of Control and Command in Digital Design and Architectural Computation,” in *CAADence in Architecture*, 2016.
- [13] C. Sharples, “Technology and Labor,” in *Building (in) the Future: Recasting Labor in Architecture*, P. Deamer and P. G. Bernstein, Eds. New York, NY, USA: Princeton Architectural Press, 2010, pp. 90–99.