

SABERES VERNACULARES BIOINSPIRADOS: releituras tecnológicas contra o aquecimento global.

BIOINSPIRED VERNACULAR KNOWLEDGE: technological reinterpretations against global warming.

CARVALHO, Flavio; Mestre; NEXT - PUC-Rio

fcarvalho@puc-rio.br

MAGALHÃES, Claudio Freitas de; Doutor; NEXT - PUC-Rio

claudio.design@dad.puc-rio.br

Resumo

Segundo o 4º Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), um acréscimo médio da temperatura global de 2°C a 5,8°C é uma realidade esperada. A aquisição de equipamentos de ar-condicionado dobrou entre 2005 e 2019 (ABRAÃO, 2021). As casas e apartamentos existentes, principalmente nas cidades, não estão preparados para essa mudança nos padrões climáticos, ou seja, para o aumento da temperatura. Diante disso, as alternativas vernaculares bioinspiradas surgem com a possibilidade de nos trazer soluções eficazes para esse cenário que se apresenta. Este artigo busca apresentar um levantamento sobre as soluções vernaculares bioinspiradas que usam a cerâmica para controle de temperatura e conforto térmico em habitações que foram revisitadas por novas tecnologias, tais como a fabricação digital, as simulações virtuais e outras experimentações físicas. Para tanto, foi realizada uma revisão bibliográfica sistemática, que encontrou diversos experimentos, produtos e sistemas simples – quase sempre cerâmicos – que foram abandonados em prol da eficiência da eletricidade e que, agora, ganham novas possibilidades.

Palavras-chave: saber vernacular, conforto térmico, cerâmica.

Abstract

According to the 4th Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2023), an average increase in global temperature of 2°C to 5,8°C is an expected reality. The acquisition of air conditioning equipment doubled between 2005 and 2019 (ABRAÃO, 2021). Existing houses and apartments, especially in cities, are not prepared for this change in weather patterns and rising temperatures. Bioinspired vernacular alternatives can bring us solutions. This article seeks to present a survey of bio-inspired vernacular solutions that use ceramics to control temperature and thermal comfort in homes that have been revisited by new technologies such as digital manufacturing, virtual simulations and other physical experiments. To this end, a review of the literature was carried out and found several experiments, products and simple systems - almost always ceramic - that were abandoned in favor of electricity efficiency and that now gain new possibilities.

Keywords: vernacular knowledge, thermal comfort, ceramics.

1 Introdução

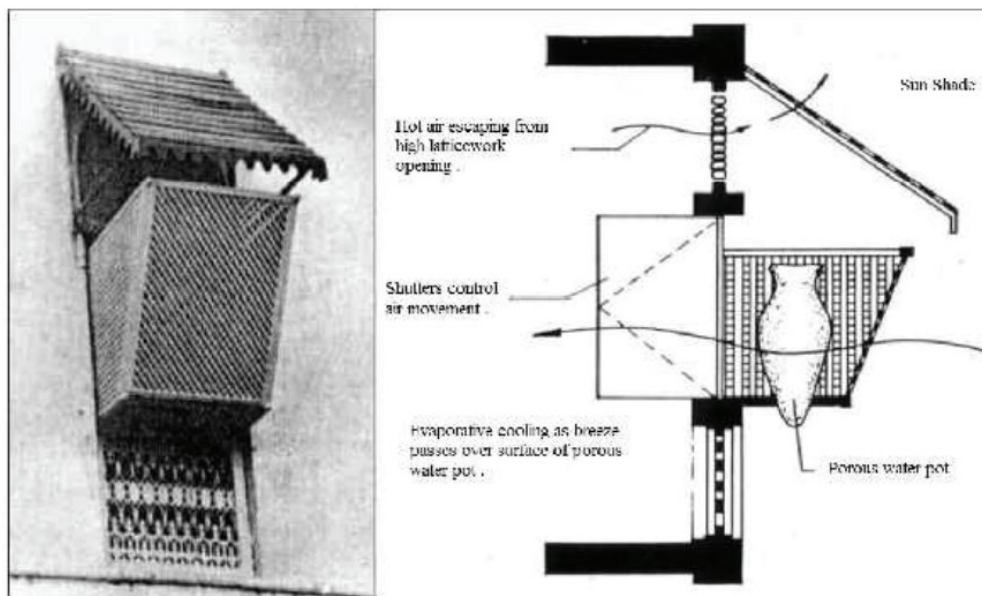
A crise climática global, somada ao desejo da sociedade por uma vida mais sustentável, são temas urgentes nas pautas atuais, em razão de sua relevância e dos impactos já percebidos. É possível afirmar que chegamos a esse ponto a partir do desenvolvimento das inúmeras tecnologias existentes, muitas delas sustentadas pela geração de energia elétrica.

Partindo desse cenário, propomos que nosso olhar se volte para as tecnologias vernaculares, as quais, por milênios, foram desenhadas para o conforto térmico, estejam elas na forma de objetos ou de detalhes arquitetônicos utilizados em habitações. A imersão ao universo das tecnologias vernaculares requer exercício e reflexão sobre a tendência mundial de busca por sustentabilidade, tendo como objetivo soluções que ajudem a mitigar os impactos do aquecimento global.

Na busca constante pela inovação, acabamos, cada vez mais, por deixar a vida mais complexa. Saberes básicos do dia a dia, como o entendimento do regime dos ventos ou o conhecimento sobre como se dá insolação em determinado terreno, são encontrados em aplicativos ou nos instrumentos digitais. Desenvolvidos por observação e empiricamente formulados, esses saberes básicos eram passados de geração para geração, aplicados na confecção de objetos e nos desenhos das construções, constituindo soluções simples e, ao mesmo tempo, de extrema sofisticação. Povos antigos, utilizando-se somente de materiais comuns e acessíveis, como a cerâmica e a água, criaram objetos, sistemas e revestimentos capazes de promover conforto térmico e bem-estar às populações.

Tomemos como ponto de partida de nossas abordagens a observação do “mashrabiya” (Figura 1), elemento arquitetônico de origem árabe, sendo muito comum nos países de clima desértico e que designa, arquitetonicamente, uma projeção para o exterior da janela, na qual pode estar contido um vaso cerâmico com água. Nessa construção, o vaso fica apoiado em uma estrutura de madeira, feita, geralmente, com treliça ornamentada. Esse vaso, quando repleto de água e a partir da ação do vento, refresca o ar que passa pelo interior da habitação, diminuindo a temperatura interna.

Figura 1 – Mashrabiya



Fonte: Taskan *et al.* (2022).

São diversas as tecnologias utilizadas durante séculos e que foram abandonadas em detrimento do uso de equipamentos eletrificados para controle de temperatura. O mashrabiya, o zaar (pot-in-pot) e o badgir (torres vento), por exemplo, são algumas delas, as quais foram substituídas por geladeiras, ar-condicionado, aquecedores etc. Hoje, saberes vernaculares como os acima descritos foram abandonados ou rejeitados por designers, arquitetos e engenheiros no desenvolvimento de novos produtos.

Mashrabiya é formado como uma treliça geralmente ao redor de janelas e varandas no segundo andar ou superior. Existem três definições principais para mashrabiya, que é definido de várias maneiras. Sua primeira definição é “uma treliça de madeira ou biombo projetado através de torno ou talha e circundando a varanda nos países islâmicos”. Em segundo lugar, é definido como “uma espécie de biombo utilizado para diversos fins”. Em terceiro lugar, é definido como “uma varanda com mata-mata e parapeito colocado sobre a porta para proteja a entrada.” Mashrabiya têm cinco funções principais. Eles regulam a luz, temperatura, umidade, e fluxo de ar e garantir privacidade. Embora seu material principal seja a madeira, há exemplos de mashrabiya construída com mármore, pedra, gesso e tijolo. Particularmente usado em condições de clima quente e na geografia islâmica, a mashrabiya é chamada de “mashrabiya” no Egito, Síria, Palestina, Líbano, Sudão, Austrália e Peru” (TASKAN *et al.*, 2022, p. 3).

Resta-nos claro, assim, que os saberes vernaculares aqui abordados foram abandonados em detrimento de um conforto térmico dependente da rede elétrica, cujos aparelhos são de grande complexidade formal e técnica. Atualmente, os sistemas de refrigeração para habitações, por exemplo, são, majoritariamente, compostos por um mix de ventiladores e de aparelhos de ar-condicionado.

Nossa abordagem inicial em relação a bibliografia é conduzida de forma assistemática, após pesquisas iniciais sobre o mashrabiya foi necessário ampliar a base e conhecimentos para dar corpo ao problema. Entender o papel do aquecimento global e ter um panorama atual da situação da tecnologia existente para o conforto térmico, a relação entre consumo e produção energética foi fundamental para iniciar uma busca estruturada em nossa pesquisa.

Após essa fase inicial procedemos com uma revisão bibliográfica sistemática (RBS), cujo planejamento foi alimentado pelas primeiras leituras e pode ser mais assertiva na busca pelas informações e pesquisas existentes.

2 Aquecimento global

O aquecimento global, considerando-se, ainda, o fato de o país estar situado, em grande parte, em uma zona de clima tropical, eleva enormemente o desejo e a necessidade pelo conforto térmico, sendo o aparelho de ar-condicionado a tecnologia diretamente relacionada a essa sensação de conforto. Inteligentes, com sensores e mecanismos diversos, esses aparelhos são, cada vez mais, computadorizados e integrados a casas inteligentes. Novas tecnologias continuam em desenvolvimento, as quais, uma vez empregadas, diminuem o gasto energético, sem perder a performance térmica. Trata-se de equipamentos sofisticados, confiáveis e precisos no controle da temperatura interna, cuja manutenção é realizada por especialistas. Por outro lado, por mais econômicos que possam ser, tais aparelhos são alimentados por um motor, demandando suprimento elétrico.

No cenário delineado, a reflexão a que somos conduzidos diz respeito ao impacto ambiental do uso desses aparelhos nas cidades, uma vez que o (aparentemente simples) ato de resfriar um

cômodo aquece o mundo. O ar-condicionado aquece o planeta não somente em razão do uso do aparelho em si, que solta o calor na atmosfera, mas, também, pelo trabalho de toda a rede elétrica, que suporta seu funcionamento, sem contar, ainda, com o impacto na fabricação e no descarte.

Os países do sul global, cuja média de temperatura é mais alta historicamente, são potenciais vítimas da realidade imposta pelo aquecimento global. Essa realidade sugere que, no hemisfério sul, é urgente a procura por soluções com baixo impacto ambiental, as quais possam ser implementadas com baixo custo de materiais e de produção. Tais soluções devem propiciar conforto térmico nas habitações sem, contudo, causar impacto no orçamento familiar. A observância aos aspectos financeiros se intensifica em razão das condições da renda familiar em determinadas regiões, somada ao fato de que muitas habitações não estão ligadas à rede elétrica.

A busca pelo sustentável, a qual viemos preconizando até aqui, a partir da real e efetiva mudança comportamental da sociedade, é a ferramenta de que precisamos para caminharmos até o Terceiro Horizonte, como propõe Daniel Wahl, em seu livro “Design de culturas regenerativas” (WHAL, 2019). Podemos, assim, considerar a evolução da Economia Circular (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2024), muito falada na mídia e adotada pelas empresas, como um comportamento a ser seguido. Para Wahl, não basta adotarmos os conceitos da Economia Circular: é urgente regenerar o ambiente ao qual a produção está inserida.

Sobre o conceito de Economia Circular, podemos dizer que tem por objetivo diminuir e, até mesmo, cessar o impacto ambiental em uma atividade produtiva. Na concepção do autor, o Design Regenerativo propõe cuidar dos aspectos ambientais não somente no que diz respeito à linha de produção; ele deve, sim, considerar todos os envolvidos, todos os ecossistemas explorados e, em linhas gerais, olhar para o planeta. Concordar com Daniel Wahl é uma condição para se pensar a nova cadeia produtiva e, não mais, uma ideia ou uma tendência.

Em outras palavras, o Horizonte 1 é o *business as usual*, ou o mundo em crise (H1). É caracterizado pela inovação incremental, que mantém o “*business as usual*” ativo. O Horizonte 3 representa a nossa visão de um mundo viável (H3). Talvez não sejamos capazes de definir cada detalhe desse futuro - já que o futuro é sempre incerto -, mas podemos intuir quais transformações fundamentais nos aguardam, e podemos prestar atenção a experimentos sociais, ecológicos, econômicos, culturais e tecnológicos ao nosso redor, que talvez sejam amostra desse futuro em nosso presente. O Horizonte 2 representa o mundo em transição (H2) - o espaço empreendedor e culturalmente criativo de inovações já tecnologicamente, economicamente e culturalmente viáveis que pode romper e transformar H1 em graus variados, com efeitos socioecológicos regenerativos, neutros ou degenerativos (WHAL, 2019, p. 68).

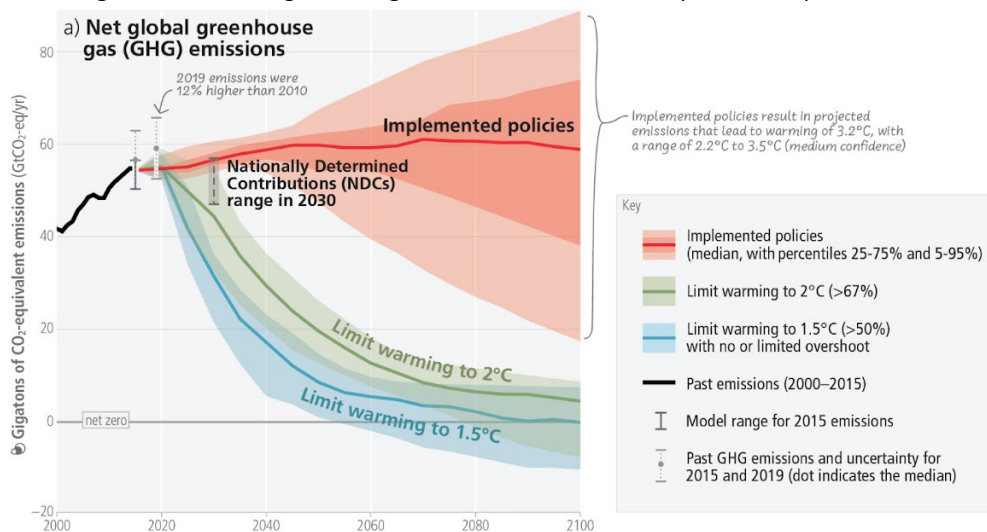
Uma pesquisa com mais de 4.000 jovens brasileiros, realizada no segundo trimestre de 2024 pela Questtonó, utilizando-se metodologias qualitativas e quantitativas, indicou uma grande preocupação da juventude com o aquecimento global e seus impactos no estilo de vida. Perguntados sobre quais são as preocupações em relação ao futuro do planeta, 60,5% citam o aquecimento global. Aquilo que, na virada do século, era uma preocupação nos meios acadêmicos e entre cientistas considerados alarmistas, agora, está no dia a dia das pessoas. Isso fica evidente quando a pesquisa indica que 83% dos entrevistados afirmam já terem mudado algum hábito por conta das mudanças climáticas que estamos enfrentando.

O aumento das emissões de gases, verificado anualmente, demonstra que esse cenário de altas temperaturas tende a se tornar uma realidade e um risco potencial, que deve impactar diversos setores de nossa sociedade. O relatório citado acima aponta, ainda, impactos gerados por essas alterações climáticas ao planeta. Em um futuro próximo, estaremos diante de questões a serem enfrentadas, por exemplo, no campo da saúde e do bem-estar (a partir do aumento de

doenças mentais e infecciosas), na transformação direta das cidades (em razão de efeitos climáticos, como inundações, deslizamentos, falta de água, incêndios etc.) e, também, pelos efeitos secundários dessas catástrofes. Com a mudança do clima, é esperado que, em alguns setores da economia, ocorram crises de abastecimento e problemas ainda não previstos, o que levará a reorganizações sociais e econômicas. O alto risco regional, causado pelo extremismo do clima, poderá aumentar as migrações forçadas. Além disso, a produção de alimentos espera enfrentar dificuldades em algumas culturas seculares mais sensíveis às variações climáticas, já sendo essa uma realidade verificada nos valores de commodities como o cacau, que, de acordo com as Nações Unidas, subiu 136% entre julho de 2022 e fevereiro de 2024 (IPCC, 2023). A biodiversidade dos ecossistemas terrestres, marítimos e das bacias hidrográficas se deparam com um alto risco de alterações significativas, e isso corresponde, diretamente, a uma diminuição da diversidade de espécies, fazendo com que diversas cadeias econômicas dependentes do extrativismo animal sejam reorganizadas.

Segundo o 4º Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), o acréscimo médio da temperatura global, de 1,5°C a 4°C, é uma realidade esperada. No gráfico abaixo (Figura 2), é possível observar que as políticas atuais sobre as emissões de gases, diretamente responsáveis pelo efeito estufa, trarão um aumento de temperatura esperado de 3,2°C na média global. O gráfico demonstra, ainda, o aumento das emissões, ano após ano, indicando que não haverá decréscimo na temperatura, caso permaneçam sendo praticadas as políticas atuais.

Figura 2 – Emissão global de gases do efeito estufa e as políticas implementadas



Fonte: IPCC (2023).

A previsão é de que os descompassos nas estações do ano sejam cada vez mais frequentes. Essa falta de regularidade e de variação na intensidade dos eventos climáticos provoca diversas incertezas nos mais variados campos. Nossa sociedade terá como desafios a adoção de novos comportamentos, a descoberta e a implementação de novos processos, de novos materiais e insumos, além do desenvolvimento de tecnologias inovadoras que resultem em produtos sustentáveis. Será necessária, ainda, a formação de profissionais multidisciplinares, para mitigar os prejuízos e as dificuldades que a indústria e as produções agropecuárias enfrentarão nos próximos anos.

3 Conforto térmico e o custo energético

Nas cidades, o aquecimento global já desenha os enormes desafios a serem enfrentados no futuro próximo. Diante dessa realidade, selecionamos o conforto térmico das habitações como foco de nossa pesquisa, levando em conta dois principais aspectos: o alto impacto da energia para alimentar sistemas que propiciem conforto térmico em habitações no orçamento do cidadão brasileiro e o grande consumo de energia elétrica no Brasil.

No Brasil, observa-se que os setores público e comercial, quando somados, correspondem a 48% do consumo final de energia, sendo aproximadamente 50% deste valor destinado ao condicionamento ambiental. Em 2012, o consumo médio por residência no Brasil era de 153 kWh/mês e saltou para 179 kWh/mês em 2022, um aumento de 17% (LABEEE, 2024).

A aquisição de equipamentos de ar-condicionado no Brasil dobrou entre 2005 e 2019 (ABRAÃO, 2021), um reflexo imediato do aumento de temperatura global que, repetidamente, ano após ano, estabelece novos recordes. Comprar um ar-condicionado tem custo elevado, uma vez que demanda investimento no aparelho, instalação e manutenção, tudo isso somado ao consumo de energia do aparelho em funcionamento. Quanto maior o poder aquisitivo de uma família mais aparelhos de ar-condicionado ela possui. O valor mensal com energia elétrica para manter o clima agradável chega a comprometer 10% do orçamento, para quem ganha até um salário mínimo, e pode chegar a 35%, para quem ganha mais de dez salários mínimos (EPE, 2023).

Na Universidade Federal de Santa Catarina, o LabEEE (Laboratório de Eficiência Energética em Edificações) desenvolve pesquisas sobre conforto térmico, transferência de calor, bioclimatologia, simulação termoenergética de edificações etc., sendo referência nacional para projetos de arquitetos, engenheiros e designers.

Podemos afirmar que conforto térmico é a condição global de uma pessoa na qual ela não prefira sentir nem mais calor nem mais frio; ou seja, é um estado total de bem-estar físico e mental que expressa satisfação com o ambiente térmico ao seu redor. Esse estado pode estar associado à individualidade de cada pessoa, o que faz com que um ambiente ameno possa ser considerado confortável para alguns, e desconfortável para outros (LABEEE 2024).

Habitações como casas e apartamentos, principalmente nas cidades, não estão preparadas para essa mudança nos padrões climáticos e no aumento da temperatura. Grande parte das moradias, nas últimas décadas, foi construída sem levar em conta a eficiência energética, em um desenho que conta com a fatura na oferta de eletricidade, incluindo, nesses projetos, o uso de dispositivos e eletrodomésticos para manter o conforto térmico. Desde os materiais empregados até o desenho arquitetônico, no que diz respeito à eficiência energética ou térmica, nada é pensado.

O *Harvard Center for Green Buildings and Cities* (CGBC, 2024) direcionou suas pesquisas (*House Zero*) às casas já construídas, com o objetivo de buscar soluções e descobrir como podemos melhorar aspectos como iluminação, ventilação e conforto térmico. Seus experimentos são realizados em uma casa secular, na qual as soluções implementadas são avaliadas e melhoradas, continuamente. A escolha por um imóvel com mais de cem anos de construção é muito interessante, considerando que a maioria das construções existentes no planeta não foi pensada de acordo com as novas demandas do aquecimento global. Novos materiais e processos construtivos são constantemente anunciados, permitindo minimizar os impactos, mas quase sempre são voltados para os novos empreendimentos, e dificilmente podem ser aplicados em residências e em construções existentes. Do ponto de vista do campo do *design*, essa aproximação feita pelo CGBC permite uma abordagem mais próxima do nosso fazer projetual.

O conforto térmico para construções tem como referência a norma ASHRAE Standard 55, publicada pela *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* dos Estados Unidos (ASHRAE, 2013). Essa norma é revisada e atualizada constantemente, sendo uma referência global muito citada em artigos e utilizada por engenheiros e arquitetos. A ASHRAE Standard 55 fornece métodos para efetuar o cálculo em ambientes distintos e suas recomendações foram estabelecidas por estudos de campo e por pesquisas científicas. Seu objetivo principal é estabelecer parâmetros para definir o que seria o conforto térmico em ambientes internos, consolidando-se como uma documentação amplamente utilizada mundialmente. A aplicação da norma em questão abrange diversos tipos de construções, preconizando que as condições internas sejam saudáveis para os habitantes. Assim, alguns parâmetros foram utilizados, a fim de estabelecer um padrão replicável, no qual a relação entre os ocupantes do edifício e as condições internas sejam confortáveis:

- temperatura do ar: um dos principais fatores, influenciando diretamente a sensação de calor ou de frio;
- umidade relativa: quantidade de vapor de água presente no ar, relacionada diretamente com a quantidade máxima que o ar poderia conter de água em determinada temperatura;
- velocidade do ar: diretamente relacionada com a ventilação interna, proporcionada pela orientação e pela arquitetura do ambiente em estudo;
- atividade metabólica: parâmetro que identifica o impacto da energia gasta pela pessoa que está presente no ambiente. A indumentária dos ocupantes também influencia, sendo determinante para o cálculo desse parâmetro.

O Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) também realiza um projeto para o desenvolvimento de uma Base Brasileira de Dados de Conforto Térmico. Essa iniciativa deve ser valorizada, divulgada e ampliada, para que dados relativos à nossa região possam servir de base ao se pensar em novas construções.

Este projeto tem como principal objetivo a formação de um banco de dados brasileiro focado nos aspectos relativos ao conforto térmico humano em ambientes internos, bem como da aceitabilidade do movimento do ar de usuários em edificações comerciais, institucionais e residenciais (LABEEE, 2024).

No Brasil, a NBR 15220 (ABNT, 2005), revisada em 2007, estabelece parâmetros e metodologias similares aos indicados pela ASHRAE 55. A vantagem da NBR 15220 é ter seus valores estabelecidos observando-se dados coletados localmente, como feito com a indexação das regiões bioclimáticas do Brasil.

4 Sistemas de resfriamento

Dentre os sistemas de resfriamento para ambientes habitados, os mais usados são os aparelhos de resfriamento mecânico por compressão, conhecido popularmente como ar-condicionado. Nas regiões sudeste, norte e nordeste, é considerado um aparelho utilizado em larga escala.

Atualmente, os resfriadores mecânicos de compressão de vapor (MVC) são comercialmente dominantes, apesar do uso intensivo de energia e do baixo desempenho em climas quentes. Em contraste, os sistemas de resfriamento evaporativo são mais ambientalmente amigáveis, pois consomem menos energia e seu desempenho melhora à medida que a

temperatura do ar aumenta e a umidade diminui (ARMER *et al.*, 2015, p. 3).

Esse, contudo, é somente um dos sistemas existentes para troca de calor. Nosso interesse está voltado para as tecnologias de resfriamento evaporativo, que transferem o calor utilizando a evaporação da água para resfriar o ar. Essa tecnologia, como visto anteriormente, é o princípio do funcionamento do mashrabiya. Autores como Amer, Boukhanouf e Ibrahim classificam essa tecnologia em: resfriadores evaporativos diretos (água e ar estão em contato direto) e resfriadores evaporativos indiretos (uma superfície separa os fluidos do contato com o ar), indicando que esses sistemas podem ser combinados e que podem, ainda, ser ativos ou passivos.

Os sistemas com resfriadores evaporativos diretos ativos são dependentes de eletricidade, sendo considerados equipamentos econômicos quando comparados aos sistemas de resfriamento mecânico por compressão. Por ser um processo adiabático, a temperatura do ar é constante durante a troca. Já os sistemas com resfriadores evaporativos diretos passivos não precisam de energia durante o uso, pois contam com processos naturais para resfriar o ar que está circulando. Uma superfície armazena água e o fluxo de ar faz a troca de calor, resfriando o ambiente.

Mesmo com a indústria apostando nos sistemas de resfriamento mecânico por compressão, o uso das tecnologias vernaculares é um caminho a ser retomado.

Os sistemas de resfriamento evaporativo oferecem uma alternativa eficiente e sustentável aos métodos tradicionais de resfriamento por compressão de vapor, especialmente em climas quentes e secos. Eles apresentam uma oportunidade significativa para reduzir o consumo de energia e as emissões de carbono, ao mesmo tempo em que proporcionam conforto térmico adequado. No entanto, desafios como a dependência das condições ambientais e a necessidade de manutenção contínua devem ser abordados para maximizar seu potencial. Pesquisas futuras devem focar no desenvolvimento de novos materiais, melhoria da eficácia e integração com outras tecnologias de resfriamento para criar soluções híbridas que atendam às necessidades crescentes de resfriamento de maneira sustentável (ARMER, *et al.*, 2015, p. 6).

Nosso interesse nos resfriadores evaporativos diretos passivos encontra no mashrabiya uma inspiração vernacular, por ser fabricado a partir de materiais naturais acessíveis e em processos de produção conhecidos.

5 Alternativas vernaculares bioinspiradas

Formulamos, aqui, uma pergunta pertinente ao estudo em questão: como podemos melhorar o conforto térmico das habitações existentes, sem aumentar o consumo de energia?

As alternativas vernaculares bioinspiradas, como vimos, são capazes de oferecer soluções surpreendentes. Essas soluções vernaculares bioinspiradas, a partir da cerâmica para controle de temperatura e conforto térmico em habitações, se beneficiam das tecnologias de fabricação digital, das simulações virtuais e de experimentações físicas.

A inspiração na tecnologia vernacular é conhecida pelo termo “mashrabiya”, um sistema que se baseia em uma solução simples e eficiente, quando conjugado com o desenho arquitetônico. No processo, um vaso cerâmico, geralmente de grandes proporções, repleto de água, é colocado em uma janela, cuja localização é definida pela direção dos ventos na região; na frente desse vaso, o desenho do prédio estende um corredor que, geralmente, corta a construção. Esse desenho facilita a ventilação, permitindo que o ar que passa pelo vaso cerâmico faça uma troca de calor com a superfície do vaso, diminuindo de temperatura e, por consequência, proporcionando conforto

térmico.

No planejamento para a RBS o protocolo de pesquisa teve como questão central os estudos apoiados em soluções vernaculares e suas atuais releituras, e que, sejam traduzidos em experimentos, produtos e sistemas simples – tenham aplicações práticas.

Como objetivo da Também buscamos soluções que se baseiam em materiais cerâmicos sem uso de eletricidade, muitas das quais, ao longo da história da humanidade, foram abandonadas em prol da eficiência da eletricidade e que, agora, ganham continuidade sob novos desenhos, formatos, materiais etc.

Em nossa RBS, foram selecionados 185 artigos, dissertações e teses, os quais mantêm relação direta com nossa pesquisa, em português, espanhol e inglês. Seguindo modelos propostos por Biolchini et al e Levy et al, estabelecemos na metodologia de execução da pesquisa o uso das palavras-chave na língua inglesa, por estarem presentes nos resumos em inglês (abstract) e, também, por serem largamente empregadas nos artigos para indexação nos mecanismos de busca. Também estabelecemos uma progressão no uso das palavras-chave.

Partindo do termo “mashrabiya”, presente nos primeiros artigos selecionados, ampliamos a busca com mais três palavras-chave: vernacular, *ceramic* e *passive cooling*, sendo usadas para a busca separadamente, juntas e alternadas.

Os primeiros resultados indicaram a necessidade de ampliar a busca, adicionando outros termos: *thermal comfort*, *sustainability*, *energy efficient*, *archaeology* e *3d print*. Abaixo, uma tabela com a quantidade de incidência das palavras-chave em relação à quantidade de conteúdos selecionados.

Tabela 1 – Comparativo das palavras-chave com os conteúdos selecionados

Palavra-chave	Incidência nos artigos	Percentual no total de artigos
<i>Mashrabiya</i>	15	8,11%
<i>Vernacular</i>	56	30,27%
<i>Ceramic</i>	53	28,65%
<i>passive cooling</i>	65	35,14%
<i>3d print</i>	12	6,49%
<i>Archaeology</i>	6	3,24%
<i>energy eficiente</i>	25	13,51%
<i>Simulation</i>	33	17,84%
<i>Sustainability</i>	17	9,19%
<i>venturi effect</i>	4	2,16%
<i>thermal Comfort</i>	20	10,81%
<i>Design</i>	14	7,57%
<i>Engineering</i>	27	14,59%
<i>Arquitetura</i>	81	43,78%
artigos selecionados	185	100%

Fonte: Elaboração própria, 2024.

Destacamos a relação dos termos pesquisados com o levantamento de dados. Inicialmente,

o termo “mashrabiya” figura em 8% dos conteúdos selecionados. Partindo dos artigos encontrados sob essa palavra-chave, adicionamos outras três, que eram comuns às primeiras pesquisas encontradas. O impacto das três primeiras palavras-chave que usamos se reflete na alta incidência perante o total de artigos, dissertações e teses selecionados. A referência ao termo “vernacular” aparece em 28% dos artigos; 30% do conteúdo tem relação com “cerâmica”; e “resfriadores evaporativos diretos passivos” (*passive cooling*) é relacionado em 35% das referências encontradas.

Nesse recorte, chama à atenção a elevada ocorrência em 35% do total de artigos selecionados o termo “*passive cooling*”, uma clara indicação de que esse interesse por resfriadores evaporativos diretos passivos condiz com a urgência climática e com o desejo de mudança da sociedade em direção a um futuro sustentável, confirmando, ainda, que esse índice aponta a direção correta de nossa pesquisa.

Para ampliar a pesquisa, tendo como foco a relação entre o vernacular e o estado da arte, adicionamos palavras-chave como 3d print, *energy efficient*, *simulation*, *sustainability*, *thermal comfort* e *venturi effect* na busca. Essa seleção de palavras se deu em razão da incidência nos primeiros conteúdos, estando de acordo com o foco de nossa pesquisa, que foi desenvolvida no NEXT (Núcleo de Experimentação Tridimensional), laboratório da pós-graduação do curso de Design da PUC-Rio, voltado à fabricação digital, à simulação virtual e à modelagem tridimensional.

Ao investigar a ocorrência das palavras acima, vale destacar que os termos *energy efficient* e *simulation* aparecem, respectivamente, com 13% e 17% do material selecionado. Quanto à eficiência energética, entendemos que as pesquisas buscam trazer resultados cientificamente medidos com tabelas e gráficos consistentes. As métricas aferidas e comprovadas, na competição com o mercado estabelecido dos equipamentos de resfriamento mecânico por compressão, são extremamente necessárias. A utilização da simulação virtual nas pesquisas aumentou em razão da facilidade de acesso às plataformas de simulação que os novos *softwares* modelagem 3D trazem embarcados. A possibilidade de realizar medições e experimentações com fluxo de gases e líquidos, com temperatura e com diversas variáveis, aumenta a acuracidade da pesquisa, trazendo novos dados e novas formas de pensar o problema.

O conteúdo selecionado também indicou uma predominância de pesquisas situadas no campo da arquitetura, com incidência em 43% de artigos nessa área. A engenharia aparece com 14% e o design responde, apenas, por 7% das fontes selecionadas. A aproximação com colegas da Engenharia foi um movimento utilizado para entender como avaliamos nossa pesquisa, sendo essa integração uma necessidade do percurso realizado. Acreditamos que a dificuldade desse tipo de pesquisa amplia o escopo tradicional do fazer do designer, requisitando do profissional que ele vista outros chapéus, que viva outras possibilidades. Como nos convida Maeda: ora sejamos engenheiros, ora sejamos cientistas, ora sejamos artistas, mas sempre seremos designers.

Elencamos, a seguir, pesquisas e questões inovadoras alinhadas ao nosso percurso.

5.1 Ecooler

Resultado de uma pesquisa realizada por Ahmed Atef Faggal, professor do departamento de arquitetura da Ain Shams University no Cairo, Egito, trata-se de um sistema de resfriamento evaporativo que pretende revisar técnicas tradicionais como o mashrabiya. Composto por peças cerâmicas ocas, com água em seu interior, é um sistema modular e interconectado, podendo ser montado de acordo com o espaço disponível.

Figura 3 – Parede divisória com o Ecooler



Fonte: Faggal *et al.* (2015).

O artefato lembra o cobogó brasileiro e o biombo, funcionando como elemento arquitetônico, com componentes de 33cm x 33cm e 2,7cm de profundidade, e de fácil conexão. Quando fechado, o sistema recebe água, 550ml, aproximadamente, por peça. O material utilizado é a cerâmica comum, facilmente encontrada, e não utiliza eletricidade, requerendo pouca manutenção.

As estratégias de projeto de edifícios climáticos são importantes e variadas, com diferentes benefícios. Sua prioridade é lidar com um ambiente com menos interferência de máquinas. A tela Ecooler é uma ferramenta que ajuda a alcançar um desempenho de construção perfeito em climas desérticos quentes e áridos como o Egito (FAGGAL, 2024, p. 11).

O Ecooler faz uma releitura da tecnologia vernacular da mashrabiya, buscando, contudo, preservar um desenho que possa ser identificado com a cultura local. Uma questão colocada é a que a integração maior com a arquitetura pode melhorar o desempenho. O autor também sugere conjugar com sistemas fotovoltaicos para captação de energia e, com isso, transformar o Ecooler de um sistema de resfriamento passivo em ativo. Em sua conclusão, Faggal sugere que estudos em larga escala são necessários para acessar o mercado já consolidado pelo uso do ar-condicionado.

5.2 Funis de Argila (Shisha)

A pesquisa intitulada “Uma abordagem vernacular ao arrefecimento passivo para populações de baixos rendimentos em assentamentos informais em climas quente”, 2021, realizada por Monica Zakaria, Marwa Dabaieh e Medhat Kazem, é um trabalho conjunto entre a Universidade de Malmo, na Suécia, e a Academia Árabe de Ciência, Tecnologia e Transporte Marítimo (AASTMT), do Egito.

Figura 4 – Funis de Shisha selecionados e o corte transversal



Fonte: Dabaieh *et al.* (2021).

O interesse inicial pela simulação computacional que o artigo propunha foi ampliado quando percebemos a abordagem humanitária da pesquisa, em que os pesquisadores escolheram trabalhar com sistemas de resfriamento passivo para populações de baixa renda que residem em assentamentos informais. A escolha pela peça de cerâmica Shisha, parte de um narguilé (funil de argila), facilmente encontrada na região e de baixo custo, denota o caráter inclusivo do projeto.

Em continuidade, foram selecionados alguns exemplares desses funis de argila para serem escaneados. Com a argila ainda crua, foi feito um corte transversal, e as peças foram postas para secar na sombra e ao ar livre, evitando rachaduras. No processo, foi utilizado o software ANSYS Fluent para uma simulação Dinâmica dos Fluidos Computacional pelos modelos tridimensionais dos funis de argila escaneados, em quatro estágios de simulações. Em um primeiro momento, simulações 3D indicaram os procedimentos e a análise; posteriormente, uma simulação 2D testou a eficiência dos funis de Shisha na distribuição do fluxo de ar. Posteriormente, foram realizadas simulações com emulação do funcionamento em espaços fechados. Dois cubos com 3,0m³ e 1,0m³ serviram de cenários para as duas últimas simulações descritas no artigo. Os funis foram dispostos perpendicularmente à parede e, também, com 45°, permitindo uma ventilação cruzada e/ou unidirecional.

O uso de simulação computacional acelera o desenvolvimento de produtos. A visualização tridimensional dos resultados e os dados obtidos permitem ao designer fazer escolhas com mais precisão. Volpato e Lopes (2017), em livro sobre manufatura aditiva, citam a diferença no entendimento e na percepção do projeto que um modelo tridimensional faz em relação a um desenho técnico, permitindo supor que a simulação agrega informações ao processo projetual. Como a disponibilidade cada vez maior dessas ferramentas está mudando a maneira com que colocamos novos produtos no mercado, esta pesquisa procura demonstrar a importância do uso de simulações computacionais como etapa no desenvolvimento para qualquer projeto.

5.3 Pottery water wall

Outra pesquisa que tem o Egito como base, sendo conduzida por Moustafa Anwar Moustafa e Srazali Aripin, usa a simulação computacional para validar um sistema de resfriamento passivo composto de uma parede de vasos cerâmicos e água, pretendendo aumentar ou diminuir a temperatura em habitações.

Partindo do clima quente e árido do Egito, a pesquisa utiliza a simulação Dinâmica dos Fluidos Computacional para avaliar o desempenho de tubos cerâmicos porosos, cheios de água, para aumentar a eficiência no conforto térmico em habitações. Os modelos foram testados em um quarto adiabático com 5x5x3m e uma "Pottery water wall" foi colocada a 20cm da fachada. As aberturas na parede e a quantidade de tubos variaram durante as medições.

Para a modelagem e a simulação, também foi utilizado o ANSYS Meshing, para a malhação, e o ANSYS Fluent, para a simulação, baseando-se na Equação de Energia de Fluxo Laminar e Radiação, para a transferência de calor entre o ar com a cerâmica porosa. Nessa simulação, foram utilizados dois padrões de temperatura: 40°C, no verão, e 3°C, no inverno.

Na simulação, alguns modelos conseguiram resfriar o ambiente entre 7°C e 10°C, no verão, e, no inverno, aqueceram o ambiente entre 9°C a 15°C. Nas condições extremas, o desempenho fica na casa dos 4°C, sendo esse o pior índice (tanto no verão como no inverno), o que, em nossa avaliação, não é ruim para um sistema que não demanda energia.

Interessante notar, ainda, que uma questão relacionada ao dimensionamento entre a área de abertura e a superfície de cerâmica porosa aparece na simulação computacional. Essa informação, extraída das análises, contudo, seria de difícil experimentação em uma situação real.

5.4 Tijolos com água

Tejero-González, Nocera, Costanzo e Velasco-Gómez publicaram, no *Journal of Physics*, uma pesquisa intitulada "Resfriamento evaporativo passivo através de tijolos cheios de água: uma investigação preliminar" (TEJERO, 2021). Para tanto, foi utilizada simulação física, em laboratório, para os testes, e seu modelo responde às necessidades da engenharia, livre de qualquer preocupação estética.

Usando tijolos de argila ociosos com água no interior permitiu que os mesmos estivessem como toda superfície úmida, o que favorece a troca. A simulação mostrou que dentro dos parâmetros estabelecidos não faz diferença a quantidade de fileiras de tijolos. também mostrou que, segundo os autores: "A eficácia da saturação do sistema não depende das condições psicrométricas do ar de admissão, mas a queda de temperatura alcançada depende fortemente (TEJERO-GONZÁLEZ *et al.*, 2022, p. 2).

Acompanhe, a seguir, algumas considerações tecidas pelos autores.

- Eficiência energética: por ser um sistema de resfriamento direto passivo, que não utiliza energia para seu funcionamento.
- Impacto ambiental: reduz o uso de sistemas de resfriamento mecânico por compressão e o uso de energia elétrica.
- Custo/benefício: usa materiais naturais, de fácil acesso e de fácil manufatura; tem produção simplificada e custo baixo de implementação.
- Versatilidade: por ser um sistema, adapta-se a diferentes tipos de construções e topologias.

6 Considerações finais

Quanto mais evidente o aumento da temperatura global por observação direta, maior a nossa responsabilidade no intuito de amenizar o impacto do efeito estufa. Nesse cenário, são as camadas menos favorecidas da sociedade que experimentam mais intensamente o extremo do clima, uma vez que menos recursos se traduzem em menos proteção. Felizmente, o desejo por uma sociedade mais sustentável está crescendo entre a população, e os mais jovens vão liderar essa mudança.

Hoje, a busca por soluções para controle da temperatura em ambientes internos encontra no mercado, quase que exclusivamente, aparelhos de ar-condicionado (resfriamento mecânico por compressão), sendo significativo, no orçamento familiar, o custo energético para manter em funcionamento esse tipo de aparelho. O conforto térmico em habitações vem sendo estudado desde a década de 1970, e, atualmente, arquitetos, engenheiros e designers têm à disposição manuais e tabelas que auxiliam na hora de projetar, permitindo um equilíbrio nas temperaturas internas, a partir da implementação de sistemas de refrigeração, oferecendo mais qualidade de vida nas residências.

Ao analisar as tecnologias vernaculares desenvolvidas para lidar com o controle da temperatura, elegemos os sistemas de resfriamento direto passivo como foco desta pesquisa, um sistema que alinha sustentabilidade, custo baixo e facilidade de montagem e de manutenção, sendo os resultados comprovados por séculos de uso.

A revisão bibliográfica sistemática (RBS) indicou que soluções de baixa tecnologia para conforto térmico em ambientes podem ser sofisticadas e eficientes mesmo partindo escolha dos materiais naturais e processos simples e produção e implementação. Aumentamos o entendimento do funcionamento destes objetos vernaculares quando são submetemos seu desenho original ou uma releitura em experimentos simulados por computador e experimentos físicos. Como verificamos tal união propicia a potencialização das soluções resultando em uma real adaptação dos saberes vernaculares bioinspirados às necessidades contemporâneas e futuras.

7 Referências

- AMER, O.; BOUKHANOUF, R. **A Review of Evaporative Cooling Technologies**. International Journal of Environmental Science and Development, v. 6, n. 2, p. 111-117, 2015. doi:10.7763/IJESD. 2015.V6.573.
- AMER, O.; BOUKHANOUF, R. **Experimental investigation of a novel heat pipe and porous ceramic based indirect evaporative cooler**. In: 2nd International Heat Transfer Symposium (IHTS 2016). Nottingham, UK, 2016.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS INC. **ASHRAE Handbook-2005: ASHRAE Fundamentals**. Atlanta: ASHRAE, 2005.
- ALOTHMAN, Hiba. **An Evaluative and Critical Study of Mashrabiya in Contemporary Architecture**. 2017. p. 07.
- BAHADORI, Mehdi N. **Passive Cooling Systems in Iranian Architecture**. Scientific American, v. 238, n. 2, p. 144-154, 1978. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0278-144>. Acesso em: 14 jul. 2024.
- BIOLCHINI, J.C.A., et al. **Scientific research ontology to support systematic review in software engineering**. *Advanced Engineering Informatics*, v.21, n.2, p.133-151, 2007.

- BRASIL ENERGIA. **Tarifa de eletricidade, percepções e fatos.** Editora Brasil Energia. Disponível em: <https://editorabrasilenergia.com.br/tarifa-de-eletricidade-percepcoes-e-fatos/>. Acesso em: 24 nov. 2023.
- CHEN, Wei; LIU, Song; LIN, Jun. **Analysis on the passive evaporative cooling wall constructed of porous ceramic pipes with water sucking ability.** Energy and Buildings, v. 86, p. 541-549, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.062>.
- CONFORTO, Edivandro Carlos; AMARAL, Daniel Capaldo; SILVA, Sérgio Luis da. **Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos.** In: 8º CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO E DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS, 2011, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre: [s.l.], 12 set. 2011.
- DABAIEH, Marwa; KAZEM, Medhat; ZAKARIA, Monica Michel. **A vernacular approach to passive cooling for low-income populations in informal settlements in hot climates.** Conference Paper, setembro de 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/354890892>. Acesso em: 14 jul. 2024.
- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Circular design guide.** Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-design-guide/overview>. Acesso em: 12 jul. 2024.
- EMEKCI, Seyda. **Return to the Basics: Vernacular Architecture as a Tool to Address Climate Change.** In: PEGO, Ana (ed.). Climate Change, World Consequences, and the Sustainable Development Goals for 2030. Hershey, PA: IGI Global, 2023. Cap. 11. DOI: 10.4018/978-1-6684-4829-8.ch011.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2006: Ano base 2005.** Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoesdadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-140/topico-124/BEN2006_Versao_Completa.pdf. Acesso em: 02 maio 2024. p. 26.
- FAGGAL, Ahmed Atef. **Using Ecooler technique to enhance thermal comfort in hot desert arid climate in Egypt.** 2015. Thesis (Associated Professor of Environmental Control) - Architectural Department, Faculty of Engineering, Ain Shams University, Cairo, Egypt. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/312041119>. Acesso em: 14 jul. 2024.
- HARVARD CENTER FOR GREEN BUILDINGS AND CITIES. Disponível em: <https://harvardcgbc.org/housezero/>. Acesso em: 20 jan. 2024.
- HILLIS, D. **The Enlightenment is Dead, Long Live the Entanglement.** Journal of Design and Science. 2017. Disponível em: <https://jods.mitpress.mit.edu/pub/ageofentanglement/release/1>. Acesso em: 08 mar. 2024.
- IPCC. AR6 synthesis **Report: Climate Change 2023.** Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/figures/figure-spm-5>. Acesso em: 24 fev. 2024.
- LABEEE. Conforto térmico. **Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE)**, UFSC, 2024. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/linhas-de-pesquisa/conforto-termico>. Acesso em: 16 abr. 2024.
- LEVY, Y.; ELLIS, T.J. **A system approach to conduct an effective literature review in support of information systems research.** *Informing Science Journal*, v.9, p.181-212, 2006.
- MOSTAFA, M. A.; ARIPIN, S. **CFD evaluation of the pottery water wall in a hot arid climate of Luxor, Egypt.** Journal of Green Building, v. 9, n. 4, p. 175-189, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3992/1943-4618-9.4.175>. Acesso em: 13 jul. 2024.
- NEXT. PUC-Rio. Disponível em: <https://next.dad.puc-rio.br/>. Acesso em: 29 jun. 2024.

TAŞKAN, Demet; ISMAEEL, Alzahraa Behzad. **An Architectural Element: Mashrabiya**. Artsanat, n. 17, 2022. DOI: 10.26650/artsanat.2022.17.841296.

TEJERO-GONZÁLEZ, A.; NOCERA, F.; COSTANZO, V.; VELASCO-GÓMEZ, E. **Resfriamento evaporativo passivo através de tijolos cheios de água: uma investigação preliminar**. Journal of Physics: Conference Series, v. 2069, p. 012123, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2069/1/012123.

VOLPATO, Neri. **Manufatura Aditiva – Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017.

WAHL, Daniel Christian. **Design de Culturas Regenerativas**. 1. ed. São Paulo: Editora Bambual, 2019.