

ANÁLISE DE CLIMATIZAÇÃO PASSIVA PARA HABITAÇÃO PRÉ FABRICADA DE
BALANÇO ENERGÉTICO NULO EM BRASÍLIA

Vitor de Castro Nobre¹ – vitorcnobre@yahoo.com.br

Larissa Olivier Sudbrack² – larissa.sudbrack@gmail.com

Claudia Naves David Amorim² – clamorin@unb.br

João Manoel Dias Pimenta¹ – pimenta@unb.br

¹Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica

LaAR - Laboratório de Ar Condicionado e Refrigeração, www.facebook.com/UnB.LaAR

²Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo

A1 - Aplicações para Conforto

Resumo. Uma proposta arquitetônica de uma habitação residencial pré-fabricada de balanço energético nulo foi analisada neste trabalho, em relação às soluções passivas de climatização com foco para a ventilação natural. Diferentes estratégias foram avaliadas por simulações computacionais através do programa EnergyPlus para um ano na cidade de Brasília e outras capitais. As simulações, foram efetuadas tanto para o modo de ventilação natural quanto para o de climatização híbrida usando a ferramenta Airflow Network para a modelagem dos fluxos de ar através dos ambientes internos. Para a determinação dos parâmetros de envoltória e sombreamento do edifício, foi utilizado o programa OpenStudio. Os resultados obtidos mostraram que a ventilação natural em Brasília é uma estratégia bastante efetiva para minimizar as condições de desconforto térmico quando se consideram apenas as horas em que o ambiente está ocupado e um modelo adaptativo para definição das condições de conforto. Para outras capitais e para edificações comerciais há um aumento expressivo do número de horas de desconforto requerendo-se a adoção de outras medidas para garantir o conforto. Sendo assim, são propostas no artigo o uso de soluções híbridas envolvendo outros processos.

Palavras-chave: Ventilação Natural, Resfriamento Evaporativo, NZEB, EnergyPlus, Airflow Network.

1. INTRODUÇÃO

A matriz energética mundial é altamente dependente de combustíveis fósseis que liberam uma grande quantidade de gases que contribuem para o efeito estufa, além da poluição do ar e outros efeitos nocivos. Reduzir o consumo energético significa diminuir diretamente a influência humana na mudança climática, além desses efeitos.

Na União Europeia, edifícios são responsáveis por 40% do consumo de energia e 36% das emissões de CO₂. Prédios antigos costumam consumir mais de 5 vezes mais óleo para aquecimento do que prédios novos. Atualmente 35% dos prédios europeus tem mais de 50 anos de idade, melhorando a eficiência energética dos prédios seria possível reduzir o consumo energético da União Europeia entre 5 e 6% e as emissões de CO₂ em 5%.

Com a necessidade de diminuir o consumo energético dos edifícios, surgiu o conceito de edificação com balanço energético nulo (nZEB) e as políticas de incentivo à eficiência energética em edifícios. Contudo, para alcançar o balanço energético nulo os prédios devem também gerar energia (a partir de fontes renováveis).

As razões para se investir em nZEBs não são apenas éticas e ambientais, mas também econômicas. Clientes que investem em prédios de alta eficiência energética tem como objetivo reduzir ou até mesmo zerar seus custos operativos. Além disso, prédios com certificações verdes são valorizados no mercado de imóveis.

Segundo Pérez-lombard, Ortiz e Pout (2008), a climatização pode representar de 42 a 68% do consumo energético de uma residência. Os processos de aquecimento em climas frios e resfriamento em climas quentes são processos que demandam bastante energia. Por isso, uma das principais formas de diminuir o consumo de um edifício é a partir da adoção de soluções passivas de climatização, e se for necessário procurar soluções ativas de alta performance energética.

Uma solução passiva de interesse é a ventilação natural que pode ser uma solução efetiva quando favorecida a partir do projeto arquitetônico que posiciona devidamente as aberturas do edifício. Além disso, soluções ativas de climatização, tais como o resfriamento evaporativo podem ser adotadas ao se esgotar as possibilidades de alcançar o conforto térmico apenas com as soluções passivas.

2. BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O conceito de edificações nZEB é algo que vem sendo bastante estudado, pois alguns países já adotaram metas de em alguns anos uma grande parte de seus edifícios terem seu balanço energético nulo ou algo muito perto disso.

Em Marszal et al. (2011) é realizada uma comparação dos conceitos de ZEB existentes levando-se em consideração como é medido o equilíbrio energético, o período levado em conta, como a energia consumida e gerada é considerada no equilíbrio e os fatores que normalizam a geração de energia e gás carbônico equivalente.

Dallo et al. (2013) apresentaram o estado da arte dos nZEBs propondo o método SACERT (Sistema per la certificazione degli edifici) para avaliá-los. O método foi concebido com o envolvimento da associação de construtores local e a universidade Politecnico di Milano e a aplicabilidade foi demonstrada para um prédio existente.

Em Bourrelle et al. (2013) é proposta uma análise diferente dos nZEBs, os autores acreditam que levar em consideração apenas o impacto do prédio na rede elétrica não é suficiente, sabendo que nem toda a energia elétrica proveniente de fontes renováveis é verdadeiramente renovável, já que um investimento inicial de energia não renovável foi utilizado. A proposta desse estudo é uma forma de contabilizar na energia consumida do edifício, a energia incorporada, dessa forma tornando mais difícil de o prédio ter um balanço zero de energia. Isso pressionaria não só o edifício a diminuir seu consumo de energia, como também tornar a rede elétrica mais eficiente.

Ascione et al. (2016) estudaram os benefícios de aplicar um trocador de calor ar-solo em um prédio NZEB na cidade de Palermo na Itália, caracterizada pelo clima mediterrâneo. Com o trocador de calor adicionado ao sistema de ar condicionado foram obtidas reduções no consumo energético anual entre 24 e 38%. A solução de geração de energia do prédio foi a utilização de painéis fotovoltaicos.

Um dos principais métodos de climatização passiva de edifícios atualmente é a ventilação natural, por isso a sua modelagem e simulação é estudada a algum tempo.

Em Schmidt et al. (1999) foi criado um modelo matemático para ventilação cruzada em ambientes. Chegou-se à conclusão que a taxa de fluxo de ar depende da velocidade do vento local, da diferença de temperaturas externas e internas e dos efeitos turbulentos do fluxo.

Em Belleri e Lollini (2012) foi analisada a confiabilidade de resultados simulados para o Airflow Network já que por ser uma ferramenta de cálculo mais simples que o CFD poderia gerar maiores incertezas no projeto, mas exige menor custo computacional. Os autores chegaram à conclusão que a altas temperaturas ou com a presença de vento os resultados simulados têm um bom grau de confiabilidade.

Uma análise do potencial de utilização da ventilação natural foi apresentada por Carvalho (2015) para climatização da sala de estudo de um prédio universitário em Lisboa. O autor percebeu que a ventilação natural não era capaz de assegurar o conforto térmico do edifício em todas as horas de ocupação, porém 90% das horas poderiam ser satisfeitas apenas com esse recurso. Propôs então um sistema mecânico complementar à ventilação, formando assim um modelo híbrido de climatização, onde a parte mecânica só seria acionada em caso de necessidade.

Morais e Labaki (2017) analisaram três tipologias diferentes de construção em relação à ventilação natural mas dessa vez usando como método de análise a dinâmica de fluidos computacional (CFD) obtendo dessa forma resultados bem precisos dos perfis de velocidade interna dos ambientes. O resultado serviu para criticar a arquitetura de alguns edifícios e ressaltar qualidades de certos detalhes na fachada que auxiliavam a ventilação natural.

Na maioria dos casos, a climatização passiva não é suficiente para garantir o conforto térmico de um ambiente, é necessário adotar um método ativo de alta eficiência energética e um desses métodos pode ser o resfriamento evaporativo.

Em Khandelwal et. al (2010) os autores analisam um prédio que funciona como uma biblioteca na Índia. O prédio já funciona com uma climatização com água gelada, porém foi simulado um sistema evaporativo aliado ao sistema de água gelada. Os resultados mostraram que é possível se economizar até 15% do consumo anual de energia, mantendo o conforto térmico do edifício.

O uso de uma chaminé térmica combinada à um resfriador evaporativo é proposta por Miyazaki et al. (2011). A taxa de fluxo de ar induzida pela chaminé térmica foi simulada, e quando havia radiação solar o fluxo de ar era suficiente para o resfriador evaporativo. O sistema simulado era capaz de mitigar os ganhos de calor de um escritório comum do Japão.

Cuce e Riffat (2016) realizaram uma pesquisa sobre o estado da arte de sistemas de resfriamento evaporativo aplicados ao conforto térmico de edifícios, concluindo que esses sistemas tem uma grande capacidade de diminuir o consumo energético e os custos operacionais em climas quentes e áridos.

3 CASO de ESTUDO: CASA ZERO

3.1 Proposta Arquitetônica

Foi apresentado em Sudbrack (2017) o projeto de uma habitação pré-fabricada modular, e mostra as três plantas possíveis. Para esse trabalho será levado em consideração o projeto com os três módulos conectados, tendo assim uma sala-cozinha, um banheiro, uma varanda e três quartos, sendo um deles uma suíte, totalizando 108 m². A área escolhida como referência para o projeto é um lote de 700m² localizado em condomínio residencial a sudeste do Plano Piloto, o Condomínio Santa Mônica. A Fig.1 apresenta a planta baixa da casa zero.

A casa zero tem como objetivo reduzir ao mínimo possível o consumo energético, e com isso poder ser autossustentável, já que o projeto prevê utilização de placas fotovoltaicas e aquecimento solar de água. A principal medida para diminuir o consumo energético dessa habitação ainda em projeto, foi priorizar a ventilação natural do espaço, de forma que todos os ambientes têm grandes aberturas para o ambiente externo. Para proteger essas aberturas envidraçadas da irradiação solar, foram utilizados brises horizontais e verticais.

3.2 Características Construtivas

Em Sudbrack (2017) foram comparadas diversas combinações de materiais para a cobertura e parede da edificação, de forma a obter o melhor conjunto de materiais para a construção da casa zero. Pela preocupação do projeto em ser uma

edificação com balanço energético nulo, a melhor combinação de materiais para a cobertura e paredes foi aquela que gerou o menor consumo energético em relação à climatização dos ambientes. Informações detalhadas sobre as características dos materiais de construção utilizados na casa zero e suas propriedades térmicas encontram-se disponíveis em Sudbrack (2017) e foram usadas nas simulações deste trabalho



Figura 1. Planta baixa da casa zero (Sudbrack, 2017)

3.3 Padrão de Utilização

O padrão de utilização (Sudbrack, 2017) engloba: o padrão de ocupação, o padrão de iluminação e o padrão de utilização dos equipamentos elétricos presentes em cada ambiente. A ocupação da residência é a de uma família de 4 moradores, sendo um casal e dois filhos. O quarto 1 tem ocupação máxima de duas pessoas, os quartos 2 e 3 tem ocupação máxima de uma pessoa cada, e a sala-cozinha é ocupada por todos os moradores em certos momentos. A Figura 2 descreve graficamente o padrão de ocupação da residência.

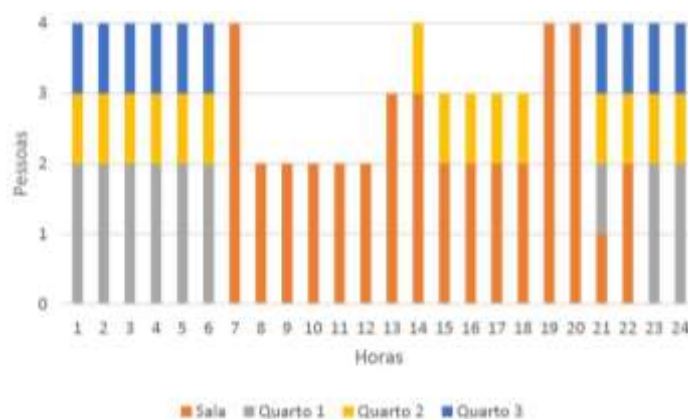


Figura 2. Padrão de ocupação da casa zero (Sudbrack, 2017)

Os valores metabólicos considerados no projeto são de 45W/m² nos quartos e 95W/m² na sala-cozinha. Tendo uma área de pele média de 1,80m², o valor de carga térmica por ocupante é dado por 81W/pessoa nos quartos e 171W/pessoa na sala-cozinha. A fração radiante dessa carga térmica considerada é de 0,3.

O padrão de iluminação da casa zero está diretamente ligado ao padrão de ocupação e está descrito graficamente na Figura 3. Devido à utilização da iluminação artificial a partir de lâmpadas LED, a densidade de potência de iluminação artificial é de 5,0W/m².

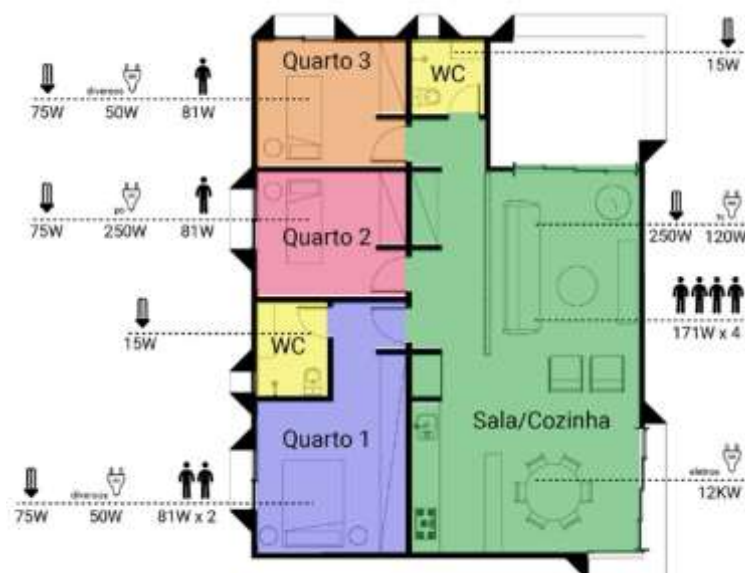


Figura 3. Cargas térmicas separadas por cômodo (Sudbrack, 2017)

3.4 Condições Climáticas

A forma de se reproduzir as condições climáticas de determinado ambiente numa simulação termoenergética é através de um arquivo climático com informações das 8760 horas do ano. Essas informações climáticas incluem as temperaturas de bulbo seco do ar, umidade relativa, temperatura do ponto de orvalho, velocidade e direção dos ventos, pressão atmosférica e irradiância global sobre o plano horizontal.

O arquivo climático a ser utilizado nesse trabalho como referência para Brasília é o arquivo climático INMET 2016 que passou por correções nas variáveis de radiação global horizontal e de temperatura de bulbo seco em relação ao arquivo INMET 2012. Como o principal objetivo do trabalho é avaliar a ventilação natural da casa zero, é importante caracterizar o clima de Brasília, principalmente em relação à direção do vento predominante. A partir das Normas Climatológicas do Brasil de 1961-1990 do INMET foi possível obter valores de direção e velocidade do vento

4 SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA

4.1 Parâmetros de Simulação

Para simular a ventilação natural da casa zero, primeiro foi necessário modelá-la no OpenStudio com a ajuda do Sketchup, a partir das plantas disponíveis em Sudbrack (2017). A Fig. 4 apresenta a maquete virtual da casa zero, para fins de simulação termoenergética.

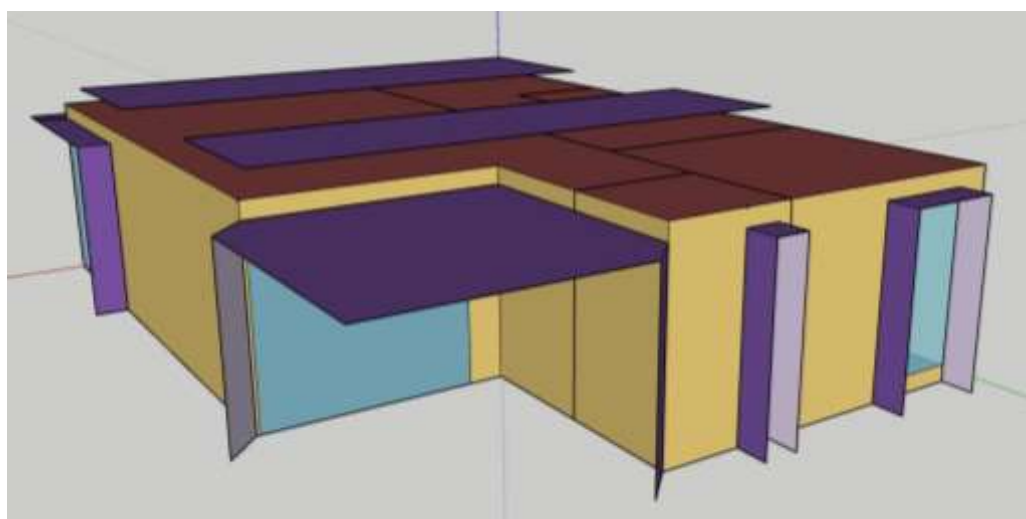


Figura 4. Modelo tridimensional da casa zero produzido para o OpenStudio

Para essa etapa de modelagem da casa zero no OpenStudio, é muito importante levar em consideração além da geometria do edifício, os sombreamentos na casa. Os brises foram considerados para atenuar o efeito da incidência solar

nas superfícies envidraçadas. Foram modeladas no teto duas superfícies planas que simulam o efeito de sombreamento causado pelas placas fotovoltaicas a serem instaladas na casa zero.

Após a modelagem dos aspectos geométricos da construção, foram adicionados os parâmetros construtivos e de utilização no OpenStudio. Para a implementação da ventilação natural na casa zero, o modelo gerado no OpenStudio foi exportado para o EnergyPlus, onde foram adicionados os objetos da ferramenta AirFlow Network.

Para a ventilação natural, um dos parâmetros importantes a serem considerados é a área efetiva de ventilação das aberturas, ou seja, qual a área da abertura realmente permite a troca de ar entre o ambiente e o exterior. Para a porta P1 (pequena porta de vidro que comunica a sala-cozinha com o ambiente externo) e para as demais portas internas da casa, foi utilizada uma área efetiva de 50% quando abertas. Para as portas E3 e E4 (grandes portas envidraçadas de correr que comunicam a sala-cozinha com o ambiente externo) devido à sua configuração, dividida em 4 painéis de vidro, a área efetiva considerada foi de 75% quando abertas, já que 3 painéis sobrepõem o último painel. Para as janelas E1 (janelas presentes nos quartos) foi considerada uma área efetiva de 100%. Para as janelas E2 (janelas presentes nos banheiros) foi considerada uma área efetiva de 50%.

4.2 Resultados da Simulação - Ventilação

Depois de definidos geometria, aspectos construtivos, e aspectos de ocupação, três simulações iniciais foram realizadas.

A primeira simulação desconsiderava totalmente qualquer efeito de troca de calor por fluxo de ar entre as janelas, portas ou frestas, situação bem semelhante a uma “evolução livre” do edifício com todas as janelas e portas fechadas durante todo o dia, todos os dias do ano.

A segunda simulação considerava todo o efeito da ventilação natural no edifício, levando em consideração velocidade e direção dos ventos, e o fluxo de ar entre zonas térmicas, inclusive pela infiltração de ar pelas paredes. Porém, para a segunda simulação, a ventilação pode ocorrer e todas as janelas e portas estão abertas durante todos os dias do ano.

A terceira simulação é similar à segunda simulação, porém foi implementado um controle para abertura e fechamento das janelas e portas. As janelas e portas de cada um dos ambientes se abrem sempre que a temperatura operativa for maior que a temperatura de conforto da ASHRAE 55, dessa forma se evita o desconforto térmico por frio. O fechamento das janelas dos banheiros, áreas sem ocupação definida, ocorre quando sua temperatura interna for menor que 21° C. A terceira simulação será tomada como referência por representar melhor a realidade, já que os ocupantes podem exercer essa função de controlar a ventilação, abrindo ou fechando as janelas e portas.

Outras 7 simulações foram realizadas afim de determinar a influência da orientação da casa zero no conforto térmico em cada um de seus ambientes. A casa teve sua orientação girada no sentido horário 45° a cada nova simulação tomando como base a terceira simulação, a com ventilação controlada. Dessa forma, foram simulados os cenários em que a casa está orientada em 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° e 315° em relação à terceira simulação.

Finalmente, 9 simulações adicionais foram realizadas afim de comparar a viabilidade da ventilação natural como forma efetiva de climatização em Brasília, e em outras cidades do Brasil. A terceira simulação foi refeita alterando-se o arquivo climático utilizado. A casa zero teve sua arquitetura simulada para o zoneamento bioclimático da ABNT: Campos do Jordão e Curitiba estão inseridas na zona 1; Foz do Iguaçu e Porto Alegre estão inseridas na zona 3; Brasília está na zona 4; Rio de Janeiro (Niterói) está na Zona 5; Cuiabá está inserida na zona 7; Rio Branco, Salvador e São Luís estão inseridas na zona 8.

Como critério para a determinação do conforto térmico foi utilizado o método de conforto adaptativo presente na norma ASHRAE 55 com limites de aceitabilidade de 80%. O passo de tempo utilizado para essas simulações foi de 1 hora, devido ao grande número de simulações e essas simulações terem como intuito comparar os parâmetros de controle de ventilação, orientação e localidade da casa zero.

A Figura 5 apresenta o número total de horas de desconforto térmico em cada um dos ambientes para cada uma das três primeiras simulações, as simulações que apresentam diferenças entre si no modo de controle da ventilação natural.

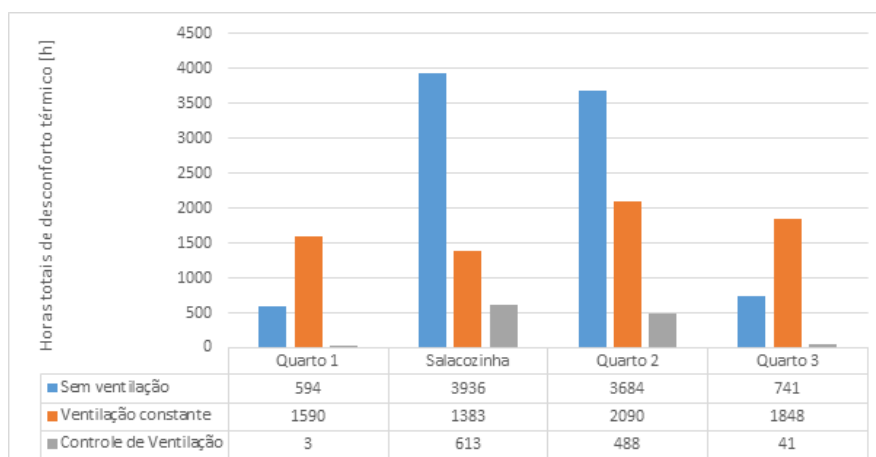


Figura 5. Horas totais de desconforto térmico para as simulações com alteração no controle de ventilação

A Figura 6 apresenta o número total de horas de desconforto térmico em cada um dos ambientes para cada uma das 8 simulações que apresentam diferenças entre si na orientação da casa zero no mesmo lote, sendo a simulação com ventilação controlada, a simulação com orientação a 0°.

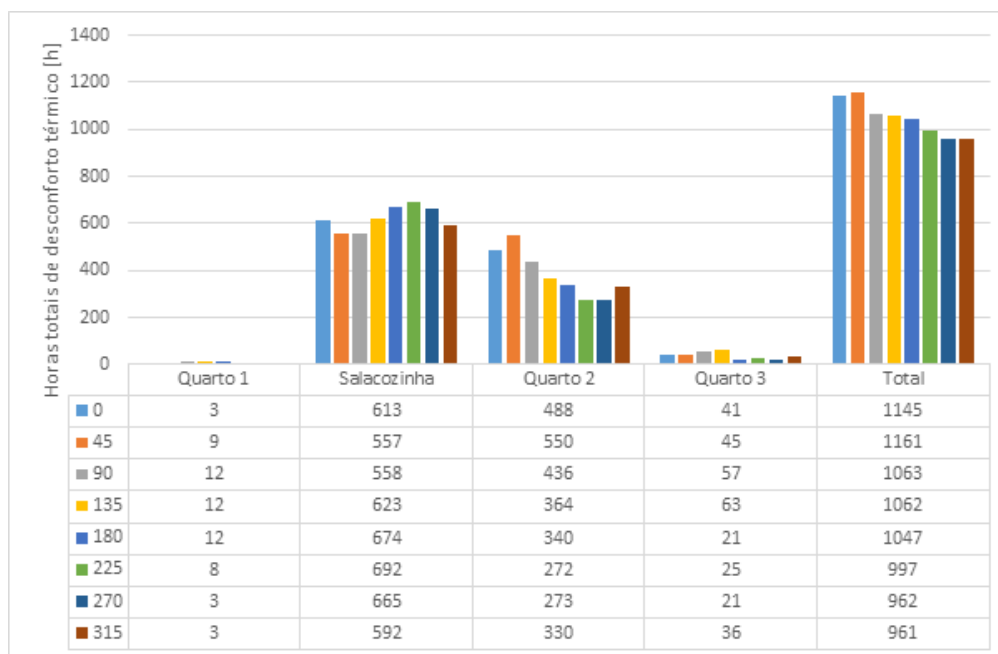


Figura 6. Horas totais de desconforto térmico para as simulações com alteração na orientação

A Figura 7 apresenta o número total de horas de desconforto térmico em cada um dos ambientes para cada uma das 10 simulações que apresentam diferenças entre si na localização da construção da casa zero.

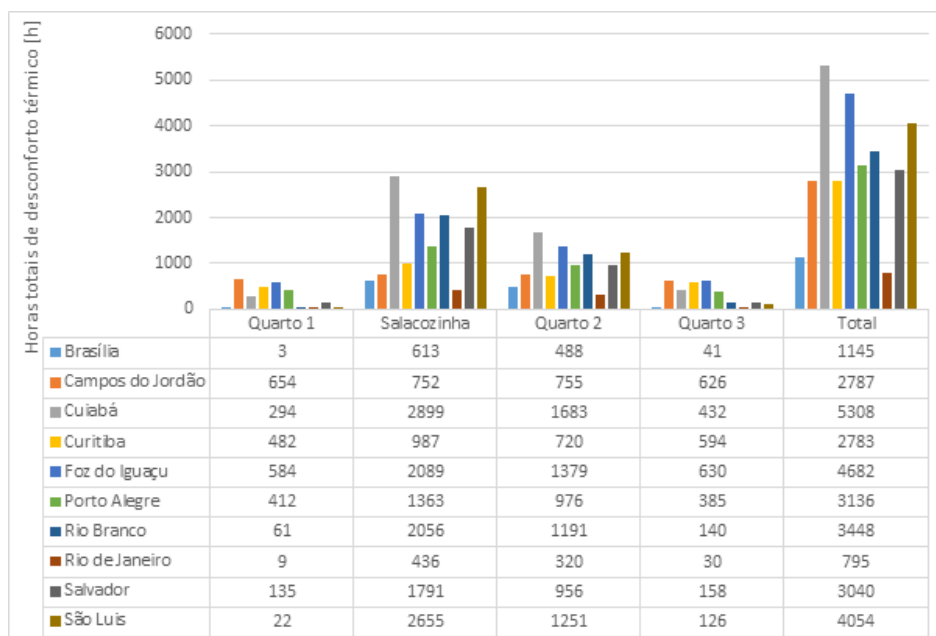


Figura 7. Horas totais de desconforto térmico para as simulações com alteração na localização

4.3 Resultados da Simulação – Ventilação + Resfriamento Evaporativo

Foi tomado como referência para a implementação de um sistema de climatização ativo, a casa zero em sua orientação original, com a ventilação controlada, em Brasília. O sistema de climatização ativo escolhido para atuar juntamente com a ventilação natural foi o resfriamento evaporativo direto. Um resfriador evaporativo foi adicionado ao modelo da casa zero no EnergyPlus, esse resfriador consiste em um painel evaporativo de 30 cm de largura com uma área de 1,75 m² alimentado por um distribuidor de água, e em um ventilador com uma vazão de 1,5 m³/s.

O funcionamento do distribuidor de água está associado ao funcionamento do ventilador, este que por sua vez tem seu funcionamento condicionado a um termostato na sala-cozinha. O ventilador é acionado sempre que a temperatura

média da sala-cozinha for mais alta que 25° C, e será desligado toda vez que a temperatura média da sala-cozinha for menor que 23° C. A saída de ar do resfriador evaporativo está localizada na sala-cozinha, já que é a zona térmica com maior número total e relativo de horas desconfortáveis termicamente. Dessa forma, o ar climatizado será transportado para os outros ambientes a partir da ventilação natural.

Essa nova simulação, com a implementação do resfriador evaporativo, teve seu passo de tempo diminuído de 1 hora para 1/6 de hora ou 10 minutos. Essa diminuição do passo de tempo serve para obter uma resposta mais precisa, já que o controle por termostato ocorre com um atraso, ou seja, ele precisa ler uma temperatura em um passo de tempo para somente no próximo passo atuar sobre o resfriador. Um passo de tempo de 1 hora seria muito alto e isso se traduziria em uma resposta não muito factível.

A Figura 8 apresenta as temperaturas operativas dos ambientes com a implementação do modelo híbrido de ventilação natural aliada ao resfriamento evaporativo. Tendo em mente que agora cada ponto no mapa não representa uma hora, mas 10 minutos de desconforto térmico, dessa forma, a cada 6 pontos que extrapolem os limites de aceitabilidade, será contabilizada 1 hora de desconforto térmico.

A Tabela 1 apresenta as horas de desconforto térmico totais e relativas para cada um dos ambientes da casa zero antes e depois da implementação do resfriador evaporativo. A Tabela 2 apresenta a energia total consumida no ventilador e no distribuidor de água, e o total de água consumida no ano. Para os valores financeiros de energia e água foram utilizados os valores do mês de outubro de 2017 em Brasília. O valor do metro cúbico de água é de R\$ 2,95, já o valor da energia elétrica é de R\$0,6265 por kWh.

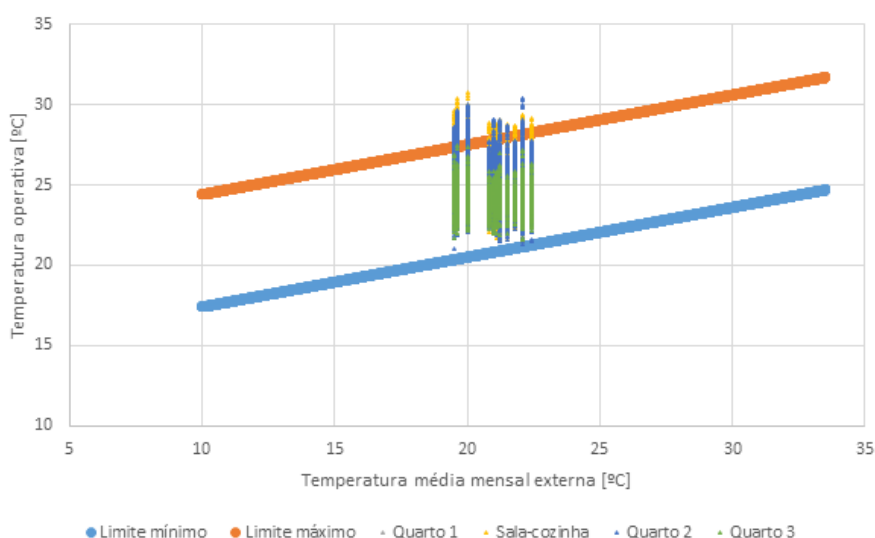


Figura 8. Temperaturas operativas para a casa zero na simulação com o resfriador evaporativo

Tabela 1. Total de horas desconfortáveis termicamente para o modelo com resfriamento evaporativo em comparação com o modelo com apenas ventilação natural.

Zonas	Horas ocupadas	Ventilação natural		Modelo híbrido	
		Horas	%	Horas	%
Quarto 1	3285	3	0,09	0	0,00
Sala-cozinha	5840	613	10,50	114,5	1,96
Quarto 2	5475	488	8,91	97	1,77
Quarto 3	3650	41	1,12	10,33	0,28

Tabela 2. Consumo de água e energético causados pelo resfriador evaporativo.

Equipamento	Consumo de água [m³]	Consumo elétrico [kWh]	Preço [R\$]		
			Água	Energia Elétrica	Total
Distribuidor de água	26,20	331,40	77,30	207,62	284,92
Ventilador	—	1889,14	—	1183,55	1183,55
Resfriador Evaporativo	26,20	2220,54	77,30	1391,17	1468,47

Com a implementação do resfriador evaporativo foi possível zerar as horas de desconforto térmico do quarto 1 e reduzir de 1,12% para 0,28% as horas desconfortáveis termicamente do quarto 3. Porém os maiores impactos do modelo híbrido ocorreram nas zonas que tinham os maiores valores de horas de desconforto, a sala-cozinha passou de 10,50% para 1,96% e o quarto 2 reduziu de 8,91% para 1,77% do total de horas ocupadas. Ou seja, a implementação do modelo híbrido

conseguiu fazer com que a casa zero estivesse em condições de conforto térmico em todos os seus ambientes mais de 98% das horas ocupadas.

É possível perceber pelos resultados de consumo do resfriador, que o maior impacto financeiro de sua operação está vinculado ao consumo elétrico do ventilador. O distribuidor de água é responsável por apenas 15% do consumo energético total do resfriador evaporativo. A implementação e operação do resfriador evaporativo com esses parâmetros custa ao usuário em média R\$ 122,37 por mês.

5. CONCLUSÕES

A casa zero pré-fabricada proposta em Sudbrack (2017) foi projetada para ser autossuficiente energeticamente e o primeiro passo para que isso fosse possível era o de tornar a casa termicamente confortável para os ocupantes durante o máximo de tempo sem uma climatização ativa ligada. A climatização passiva responsável por melhorar as condições de conforto da casa zero é a ventilação natural, aliada à envoltória.

Esse trabalho avaliou a partir do EnergyPlus o quão eficiente a ventilação natural controlada pelos ocupantes é em atenuar as condições de desconforto térmico. O ambiente mais prejudicado do ponto de vista das condições térmicas continuava sendo confortável termicamente quase 90% das horas ocupadas.

As simulações realizadas mostraram que a orientação original do projeto, como esperado e previsto em Sudbrack (2017), é uma das orientações com maior total de horas de desconforto térmico. Caso o projeto fosse realmente implementado no local considerado, a melhor opção seria reorientar a casa 45° ou 90° no sentido horário.

Foi possível avaliar que para esse projeto, Brasília é uma das cidades avaliadas com melhor desempenho térmico. A zona bioclimática em que Brasília se encontra é bastante afetada termicamente com a ventilação natural e o resfriamento evaporativo. Algumas zonas apresentam um total de horas de desconforto térmico muito elevados, mostrando que a ventilação natural sozinha em determinados locais não é suficiente para tornar um ambiente confortável termicamente.

A ventilação natural, para o ambiente com mais horas de ocupação, conseguiu tornar esse ambiente confortável termicamente em 89% das horas ocupadas. No caso em que não havia ventilação, esse mesmo ambiente só era confortável termicamente em 32% das horas ocupadas.

Apesar de a ventilação natural controlada ser bastante eficiente em diminuir as horas de desconforto térmico da casa zero, alguma estratégia de climatização ativa deve ser implementada. Esse trabalho propôs uma solução híbrida, que alia um resfriador evaporativo aos efeitos de ventilação natural. O resfriador evaporativo proposto foi capaz de tornar toda a casa zero confortável termicamente em 98% do tempo ocupado ao custo de operação total anual inferior a R\$1500,00 para o caso de estudo.

Como propostas para trabalhos futuros pode-se sugerir:

- Outras formas de controle da ventilação podem ser buscadas, que não dependam apenas dos ocupantes para atuar sobre as janelas e portas. Um padrão mais realista de abertura e fechamento das portas e janelas pode ser buscado, já que nem sempre é viável mantê-las abertas.
- Outras opções de climatização ativa de baixo consumo energético podem ser analisadas para a casa zero, de forma a determinar a melhor opção, a que consuma menos energia elétrica.
- Implementadas também as ferramentas de geração de energia da casa zero, tais como as placas fotovoltaicas ao modelo com climatização ativa e os equipamentos elétricos para determinar o balanço energético do edifício.
- Desvincular o funcionamento do resfriador evaporativo ao funcionamento do ventilador, e tentar aproveitar a própria ventilação natural através do painel evaporativo.
- Considerar formas mais elaboradas de controle de cada um dos componentes do resfriador evaporativo, para que não dependam apenas de um termostato em um ambiente definido.

4 REFERÊNCIAS

2009 ASHRAE handbook. Atlanta, GA: ASHRAE, 2009.

2015 ASHRAE handbook. Atlanta, GA: ASHRAE, 2015.

ASCIONE, F. et al. Earth-to-air heat exchanger for NZEB in Mediterranean climate. *Renewable Energy*, v. 99, p. 553-563, 2016.

BELLERI, A., LOLLINI, R., 2012, "Uncertainties in Airflow Network Modelling to Support Natural Ventilation Early Stage Design", 33rd AIVC - 2nd Tightvent conference: Optimising Ventilative Cooling and Airtightness for [Nearly] Zero-Energy Buildings, IAQ and Comfort.

BOURRELLE, J.; ANDRESEN, I.; GUSTAVSEN, A. Energy payback: An attributional and environmentally focused approach to energy balance in net zero energy buildings. *Energy and Buildings*, v. 65, p. 84-92, 2013.

Buildings - Energy - European Commission. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>>.

CARVALHO, F. Avaliação da viabilidade de um sistema de ventilação natural: aplicação à sala de estudo do Edifício I do ISCTE-IUL. Mestre—[s.l.] Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Universidade de Lisboa, 2015.

CUCE, P.; RIFFAT, S. A state of the art review of evaporative cooling systems for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 54, p. 1240-1249, 2016.

- DALL'O', G.; BRUNI, E.; SARTO, L. An Italian pilot project for zero energy buildings: Towards a quality-driven approach. *Renewable Energy*, v. 50, p. 840-846, 2013.
- INMET. Normas climatológicas do Brasil 1961-1990. [s.l: s.n.].
- KHANDELWAL, A.; TALUKDAR, P.; JAIN, S. Energy savings in a building using regenerative evaporative cooling. *Energy and Buildings*, v. 43, n. 2-3, p. 581-591, 2011.
- KURNITSKI, J. nZEB definitions in Europe, 2014.
- LABEEE. Manual de Simulação Computacional de Edifícios Naturalmente Ventilados no Programa EnergyPlus. Florianópolis: [s.n.].
- LABEEE. Apostila do Curso Básico do Programa EnergyPlus. Florianópolis: [s.n.].
- LAMBERTS, R.; BORGSTEIN, E. Benchmarking e Etiquetagem energética em uso, 2013.
- MARSZAL, A. et al. Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, v. 43, n. 4, p. 971-979, 2011.
- MIYAZAKI, T.; AKISAWA, A.; NIKAI, I. The cooling performance of a building integrated evaporative cooling system driven by solar energy. *Energy and Buildings*, v. 43, n. 9, p. 2211-2218, 2011.
- MORAIS, J.; LABAKI, L. CFD como ferramenta para simular ventilação natural interna por ação dos ventos: estudos de caso em tipologias verticais do "Programa Minha Casa, Minha Vida". *Ambiente Construído*, v. 17, n. 1, p. 223-244, 2017.
- nZEB definitions in Europe: REHVA. Disponível em: <<http://www.rehva.eu/publications-and-resources/rehva-journal/2014/022014/nzeb-definitions-in-europe.html>>. Acesso em: 22 nov. 2017.
- PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; POUT, C. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, v. 40, n. 3, p. 394-398, 2008.
- PINTO, G. Proposta de edificação experimental com balanço energético nulo para a Universidade de Brasília. Graduado—[s.l.] Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2014.
- SCHMIDT, D.; MAAS, A.; HAUSER, G. Experimental and Theoretical Case Study on Cross Ventilation. *Nordic Journal of Building Physics*, v. 2, 1999.
- SUDBRACK, L. Casa Zero: Diretrizes de projeto para habitação pré fabricada de balanço energético nulo em Brasília. Mestre—[s.l.] Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, 2017.
- TEIXEIRA, H. Proposta de um edifício de caráter experimental segundo o conceito nZEB para a Universidade de Brasília. Graduado—[s.l.] Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2015.
- US DEPARTMENT OF ENERGY. Engineering Reference: EnergyPlus Version 8.8.0 Documentation. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://energyplus.net/documentation>>.
- US DEPARTMENT OF ENERGY. Input Output Reference: EnergyPlus Version 8.8.0 Documentation. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://energyplus.net/documentation>>.
- VERSAGE, R. Ventilação natural e desempenho térmico de edifícios verticais multifamiliares em Campo Grande. Mestre—[s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

PASSIVE CLIMATIZATION ANALYSIS FOR A NET ZERO ENERGY PREFABRICATED HOUSE IN BRASÍLIA

Abstract. *An architectural proposal of a prefabricated house with zero energy balance was analyzed in this work, in relation to passive air conditioning solutions with a focus on natural ventilation. Different strategies were evaluated by computational simulations through the EnergyPlus program for one year in the city of Brasília and other capitals. The simulations were performed for both the natural ventilation mode and the hybrid air conditioning mode using the Airflow Network tool to model airflow through the indoor environments. The OpenStudio program was used to determine the building envelope and shading parameters. The results obtained showed that the natural ventilation in Brasília is a very effective strategy to minimize the thermal discomfort conditions when considering only the hours in which the environment is occupied and an adaptive model to define comfort conditions. For other capitals and for commercial buildings there is an expressive increase in the number of hours of discomfort requiring the adoption of other measures to ensure comfort. Therefore, the use of hybrid solutions involving other processes is proposed in the article.*

Keywords: Natural Ventilation, Evaporative Cooling, NZEB, EnergyPlus, Airflow Network Keyword