



PROJETO DE GRADUAÇÃO

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

Por,
Vitor de Castro Nobre

Brasília, 11 de Dezembro de 2017

UNIVERSIDADE DE BRASILIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

ANÁLISE DA SOLUÇÃO DE CLIMATIZAÇÃO PASSIVA PARA HABITAÇÃO PRÉ FABRICADA DE BALNAÇO ENERGÉTICO NULO EM BRASÍLIA

POR,

Vitor de Castro Nobre Matrícula: 12/0023717

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. João Manoel Dias Pimenta, UnB/ ENM (Orientador) _____

Prof. Mario Benjamin Baptista de Siqueira, UnB/ ENM _____

Prof. Claudia Naves David Amorim, UnB/ FAU _____

Brasília, 11 de Dezembro de 2017

RESUMO

O presente trabalho efetuou a análise da proposta arquitetônica de uma habitação pré fabricada com balanço energético nulo (net Zero Energy Building – nZEB) em relação à ventilação natural. Para avaliar a eficácia da solução passiva de climatização, foi realizada uma simulação desse edifício para um ano na cidade de Brasília. Dessa forma foi possível propor uma solução híbrida de climatização, aproveitando o efeito passivo da construção e diminuir o consumo de energia relacionado ao conforto térmico.

A simulação termoenergética tanto do modelo apenas com ventilação natural quanto do modelo com uma climatização híbrida foram realizados com o software *EnergyPlus* usando como base a ferramenta *Airflow Network* para a modelagem dos fluxos de ar. Para a determinação dos parâmetros de envoltória e sombreamento do edifício, foi utilizado o software *OpenStudio*.

As simulações realizadas mostraram que a ventilação natural em Brasília é bastante efetiva para minimizar as condições de desconforto térmico. Uma climatização ativa de baixo custo que aproveite o efeito da ventilação natural pode ser uma alternativa ao ar condicionado convencional.

ABSTRACT

This project aims to analyze the architectural design of the net Zero Energy Building (nZEB) related to the natural ventilation. The nZEB is a pre-fabricated dwelling designed to have good thermal conditions at the Brasilia region. This project simulated the building with the Brasilia weather file, and the results allowed this work to design a hybrid system of an evaporative cooling with the natural ventilation that already exists.

The thermoenergetic simulation uses the *Airflow Network* tool, present on the *EnergyPlus* software to model the airflow rates that exist inside the thermal zones and the exterior of the building. The software used to determine the geometry and the construction parameters is the *OpenStudio*.

The simulations showed that the natural ventilation at the Brasilia region is effective in minimizing the thermal discomfort conditions. When an eco-friendly active climate control is used taking advantage of the natural ventilation, it may be an alternative to the conventional air conditioning system.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 TEMA EM ESTUDO E SUA RELEVÂNCIA.....	1
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
1.3 OBJETIVOS	5
1.4 METODOLOGIA.....	5
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	6
2 CONCEITOS TEÓRICOS.....	7
2.1 NZEB.....	7
2.2 VENTILAÇÃO NATURAL	8
2.3 RESFRIAMENTO EVAPORATIVO	11
2.4 SISTEMA HÍBRIDO.....	13
2.5 CONFORTO ADAPTATIVO	14
3 RECURSOS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS	16
3.1 SKETCHUP	16
3.2 OPENSTUDIO.....	17
3.3 ENERGYPLUS.....	18
3.3.1 AIRFLOW NETWORK.....	20
4 CASA ZERO	22
4.1 PROPOSTA ARQUITETÔNICA	22
4.2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS.....	22
4.3 PADRÃO DE UTILIZAÇÃO	25
4.4 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS	27
5 SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA – CASO SIMPLES	29
5.1 AMBIENTE SIMULADO	29
5.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	30
5.3 ANÁLISE DE RESULTADOS	34
6 SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA – CASA ZERO	36
6.1 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	36
6.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	37
6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS	44
6.4 IMPLEMENTAÇÃO DO RESFRIAMENTO EVAPORATIVO	46
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
7.1 CONCLUSÕES	49
7.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
ANEXOS.....	53

LISTA DE FIGURAS

1.1	Perspectivas de crescimento da demanda mundial de energia primária (IEA, 2013)	1
2.1	Esquema representativo de ventilação natural (Ghiaus, Roulet, 2005)	9
2.2	Esquema representativo do funcionamento de um resfriador evaporativo (Ice House Brasil, 2011)	11
2.3	Carta psicrométrica com dois processos de resfriamento evaporativo representados (ASHRAE, 2015)	13
2.4	Temperaturas operativas aceitáveis segundo a ASHRAE 55-2010 (ASHRAE, 2010)	14
3.1	Interface de utilização do programa Sketchup	16
3.2	Interface do OpenStudio aliado ao Sketchup	17
3.3	Interface de utilização do OpenStudio	18
3.4	Interface de utilização do EnergyPlus	19
3.5	Esquema representativo de nós e conexões do Airflow Network	21
4.1	Planta baixa da casa zero (Sudbrack, 2017)	23
4.2	Padrão de ocupação da casa zero (Sudbrack, 2017)	25
4.3	Padrão de iluminação da casa zero (Sudbrack, 2017)	26
4.4	Cargas térmicas separadas por cômodo (Sudbrack, 2017)	27
5.1	Modelo tridimensional em raio X com os nomes das zonas térmicas	29
5.2	Horas totais de desconforto térmico a partir do critério de PMV	31
5.3	Horas totais de desconforto térmico a partir do critério adaptativo com aceitabilidade de 90%	31
5.4	Horas totais de desconforto térmico a partir do critério adaptativo com aceitabilidade de 80%	32
5.5	Horas totais de desconforto térmico para o caso simples na Orientação Norte	33
5.6	Horas totais de desconforto térmico para o caso simples na Orientação Leste	33
5.7	Horas totais de desconforto térmico para o caso simples na Orientação Oeste	34
6.1	Modelo tridimensional da casa zero produzido para o OpenStudio	36
6.2	Modelo tridimensional da casa zero em raio X	37
6.3	Horas totais de desconforto térmico para as simulações com alteração no controle de ventilação	39
6.4	Temperaturas operativas para o quarto 1 na simulação com ventilação controlada	39
6.5	Temperaturas operativas para a sala-cozinha na simulação com ventilação controlada	40
6.6	Temperaturas operativas para o quarto 2 na simulação com ventilação controlada	40
6.7	Temperaturas operativas para o quarto 3 na simulação com ventilação controlada	41
6.8	Horas totais de desconforto térmico para as simulações com alteração na orientação	41
6.9	Horas totais de desconforto térmico para as simulações com alteração na localização	42
6.10	Temperaturas operativas para a casa zero na simulação sem ventilação	44
6.11	Temperaturas operativas para a casa zero na simulação com ventilação constante	45
6.12	Temperaturas operativas para a casa zero na simulação com ventilação controlada	45
6.13	Temperaturas operativas para a casa zero na simulação com o resfriador evaporativo	47

LISTA DE TABELAS

4.1	Materiais de construção utilizados na casa zero e seus valores de transferência de calor	24
4.2	Período de utilização dos equipamentos elétricos da casa zero	26
4.3	Caracterização do clima de Brasília a partir das Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990 INMET	28
5.1	Total de horas desconfortáveis termicamente a partir da ASHRAE 55 com aceitabilidade de 80% em relação às horas totais ocupadas para o caso simples	32
6.1	Total de horas desconfortáveis termicamente a partir da ASHRAE 55 com aceitabilidade de 80% em relação às horas totais ocupadas para a casa zero	43
6.2	Total de horas desconfortáveis termicamente para o modelo com resfriamento evaporativo em comparação com o modelo com apenas ventilação natural	48
6.3	Consumo de água e energético causados pelo resfriador evaporativo	48

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A	Área	$[m^2]$
C_p	Calor específico a pressão constante	$[kJ/kg.K]$
C_{pw}	Coeficiente de pressão de vento	
G	logaritmo de razão entre espessura de paredes	
g	Aceleração da gravidade	$[m/s^2]$
$\dot{m}$	Vazão mássica	$[kg/s]$
P	Pressão	$[Pa]$
T	Temperatura	$[^{\circ}C]$
U	Coeficiente de transferência de calor	$[W/m^2.K]$
v	Velocidade	$[m/s]$
z	Altura	$[m]$

Símbolos Gregos

α	Ângulo	$[^{\circ}]$
Δ	Variação entre duas grandezas similares	
ρ	Massa específica	$[kg/m^3]$

Subscritos

m	nó m
n	nó n
W	vento
ref	correção para altura e característica dos arredores
o	saída
i	entrada
∞	ao redor do duto
ot	operativa
e,m	média mensal externa

Sobrescritos

- Variação temporal

Siglas

AQUA	Alta Qualidade Ambiental
ASHRAE	Sociedade Americana de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado
BESTEST	Teste de Simulação Energética de Edifícios
IEA	Agência Internacional de Energia
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
nZEB	Nearly Zero Energy Building (Edifício com balanço energético quase nulo)
netZEB	Net Zero Energy Building (Edifício com balanço energético nulo)
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
REHVA	Associação Europeia de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado)

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo contextualiza o tema deste trabalho, apresentando a busca da sustentabilidade no projeto de novos edifícios, apresenta a metodologia a ser utilizada para se atingir os objetivos propostos.

1.1 TEMA EM ESTUDO E SUA RELEVÂNCIA

O desenvolvimento tecnológico humano até alguns anos atrás desconsiderava completamente qualquer impacto ambiental. Porém com a descoberta do quanto nossas ações podem ser danosas ao meio ambiente, a exemplo do aquecimento global, a preocupação com o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis passou a ser necessária.

A matriz energética mundial (Fig. 1.1) ainda é altamente dependente de combustíveis fósseis, combustíveis esses que após passarem pelo processo de combustão liberam uma grande quantidade de gases que contribuem para o efeito estufa. Com isso, reduzir o consumo energético significa diminuir diretamente o impacto humano na mudança climática da Terra.

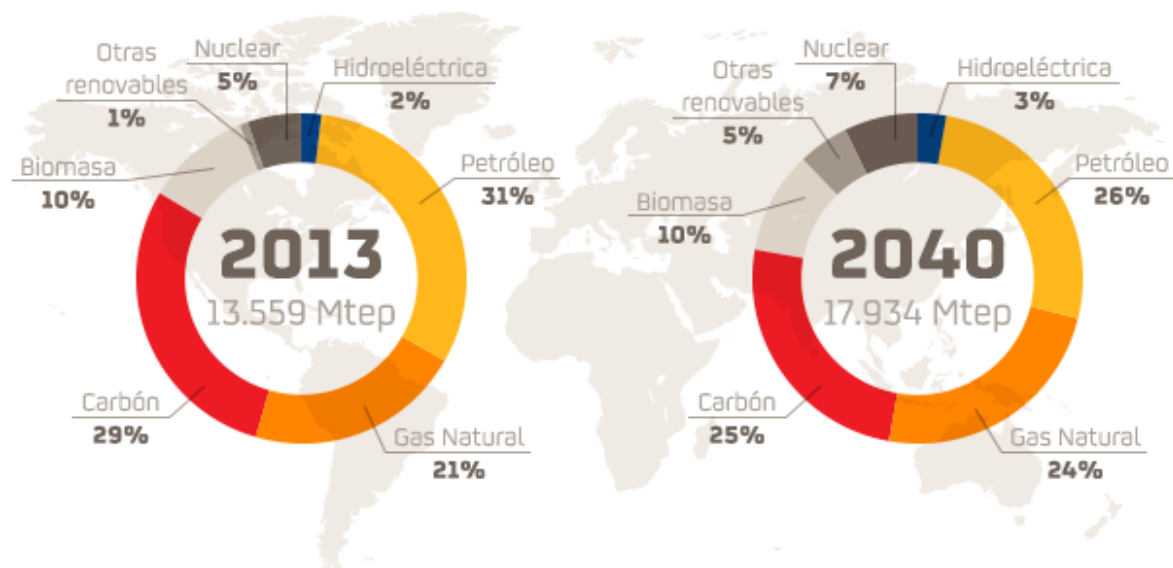


Figura 1.1 – Perspectivas de crescimento da demanda mundial de energia primária (IEA, 2013)

Na União Europeia, prédios 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%.

Sabendo da necessidade de diminuir o consumo energético dos edifícios, surgiu o conceito de edificação com balanço energético nulo (nZEB) e as políticas de incentivo ao desenvolvimento de novos

prédios com menor consumo energético. Para se obter o balanço energético nulo os prédios devem também gerar energia, de preferência a partir de fontes renováveis.

A *Energy Performance of Buildings Directive* de 2010 e a *Energy Efficiency Directive* de 2012 são as principais legislações europeias que guiam a redução de consumo de energia nas edificações.

De acordo com a *Energy Efficiency Directive* os países da União Europeia devem reformar pelo menos 3% dos prédios que pertencem ou que são ocupados pelos governos, visando eficiência energética; os governos devem adquirir apenas prédios altamente eficientes energeticamente e elaborar estratégias a longo prazo de renovação de seus prédios.

De acordo com a *Energy Performance of Buildings Directive* todos os certificados de performance energética devem ser incluídos nos anúncios dos prédios; os países europeus devem estabelecer métodos de inspeção de aquecimento e ar condicionado; todas as novas edificações particulares devem ser nZEBs até 31 de Dezembro de 2020, e as públicas até 31 de Dezembro de 2018; os países da União Europeia devem criar índices mínimos de performance energética para construções, grandes reformas e para substituição de sistemas de ar condicionado, aquecimento, telhados e paredes. Para ajudar os países a implementar essa directiva e alcançar os objetivos propostos, a Comissão Europeia promove a criação de normas e ajuda a treinar profissionais na área da construção civil qualificados a trabalhar em eficiência energética.

Nos Estados Unidos foram definidos objetivos de implementação de ZEBs a partir do EISA (Ato de Independência e Segurança Energética) de 2007. O EISA de 2007 autoriza a Iniciativa nZEB a ajudar os Estados Unidos a alcançarem a meta de até 2030 terem todos os novos prédios comerciais construídos como nZEBs; em 2040, 50% dos prédios comerciais e em 2050 todos os prédios comerciais serem nZEBs.

Na região de Lombardia na Italia mais de 3500 novas construções foram classificadas de alta performance energética entre 2007 e 2012. 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 das melhores e mais utilizadas formas de se resfriar um ambiente sem adotar algum sistema mecânico é a partir da ventilação natural. A ventilação natural geralmente é favorecida a partir do projeto arquitetônico ao posicionar as aberturas do edifício.

Existem também soluções ativas de climatização que são mais eficientes energeticamente, tais como o resfriamento evaporativo. Soluções assim são adotadas ao se esgotar as possibilidades de alcançar o conforto térmico apenas com as soluções passivas.

1.2 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.

Em Dallo, Bruni e Sarto (2013) os autores fazem um estudo do estado da arte dos nZEBs e netZEBs e propõe o método SACERT (Sistema per la certificazione degli edifici) para avaliá-los. O método SACERT foi concebido com o envolvimento da associação de construtores local e a universidade Politecnico di Milano. Foi feito também um estudo da aplicabilidade do método usando um prédio já existente.

Em Bourrelle, Andresen e Gustavsen (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.

Em Ascione et al. (2016) os autores estudam 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, Maas e Hauser (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.

Em Carvalho (2015) foi realizada uma análise do potencial de utilização da ventilação natural como forma de climatização da sala de estudo do edifício I do ISCTE-IUL, um prédio universitário localizado em Lisboa. Após a análise, 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. Ele propôs então um sistema mecânico de ventilação em complemento à ventilação, formando assim um modelo híbrido de climatização, onde a parte mecânica só seria acionada em caso de necessidade.

Em Moraes e Labaki (2017) foram analisadas 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, Talukdar e Jain (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.

Em Miyazaki, Akisawa e Nikai (2011) os autores propõem uma chaminé térmica que funciona aliada a um resfriador evaporativo. 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.

Em Cuce e Riffat (2016) é realizado uma pesquisa sobre o estado da arte de sistemas de resfriamento evaporativo aplicados ao conforto térmico de edifícios. Explica inicialmente os princípios de funcionamento dos resfriadores evaporativos e cita alguns exemplos de estudos desses sistemas aplicados em construções reais. E conclui o estudo afirmando que esses sistemas tem uma grande capacidade de diminuir o consumo energético e os custos operativos em climas quentes e áridos.

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo central avaliar a ventilação natural na arquitetura da residência pré-fabricada com balanço energético nulo, levando em consideração Brasília como cidade de implementação do projeto.

Associado a este objetivo central, também são apresentados os seguintes objetivos complementares:

- Análise da capacidade de simulação de ventilação natural do Software *Energy Plus*;
- Simulação termoenergética em evolução livre da casa zero;
- Comparar resultados de simulação termoenergética com e sem a utilização da ferramenta *Airflow Network (Energy Plus)*;
- Comparar a sensibilidade do conforto térmico em relação a orientação e localização da casa zero;
- Análise e proposição de um sistema com resfriamento evaporativo aliado a ventilação natural já existente.

1.4 METODOLOGIA

O trabalho iniciou-se com uma pesquisa sobre edifícios com alto desempenho energético e suas aplicações para reduzir os problemas ambientais e diminuir custos operativos. Foram analisados estudos que conceituavam os nZEBs e avaliavam o seu desempenho. Em seguida foram estudados métodos de simulação de ventilação natural e de implantação de sistemas energeticamente eficientes como o resfriamento evaporativo.

Paralelamente aos estudos teóricos, foi analisada a dissertação de mestrado da mestra em arquitetura Larissa Olivier Sudbrack (Sudbrack, 2017) da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, que apresenta a proposta de arquitetura da casa zero, uma habitação pré-fabricada com balanço energético nulo.

Para a realização do trabalho foi necessário realizar simulações de evolução livre de um pequeno ambiente fictício no *EnergyPlus* considerando ventilação natural, para determinar as diferenças de simulação entre o *EnergyPlus* e o *OpenStudio*, já que o segundo não é capaz de integrar a ferramenta *Airflow Network* em suas análises. Essas simulações incluíam também, mudanças na orientação desse ambiente fictício, para que fosse possível determinar a influência da direção do vento em relação às aberturas, no conforto térmico do ambiente.

Foi realizada a modelagem da casa zero a partir do *OpenStudio* e com ele foram determinadas as condições geométricas do ambiente, condições construtivas, e os cronogramas de ocupação e iluminação.

O modelo criado com o auxílio do *OpenStudio* foi então exportado para o *EnergyPlus* onde enfim foram colocadas as condições climáticas e os parâmetros necessários para os cálculos de conforto térmico relacionados à ventilação natural.

A partir dos resultados obtidos com a simulação termoenergética foi integrado um sistema híbrido de climatização, englobando a ventilação natural e o resfriamento evaporativo nos horários necessários, utilizando um controle por termostato no resfriador evaporativo. Foi analisado ainda o consumo energético do equipamento e o seu custo de operação.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é constituído por 7 capítulos estruturando a linha de raciocínio utilizada para alcançar os objetivos propostos.

O primeiro capítulo realiza uma análise do tema em estudo e a sua relevância, de forma que o leitor entenda a necessidade da realização de pesquisas na área de edifícios sustentáveis, apresenta os objetivos e a metodologia para obtenção dos resultados das análises. O segundo capítulo apresenta os conceitos teóricos necessários para entendimento do tema, mostra como é feita a modelagem e apresenta as equações utilizadas na simulação da ventilação natural, e explica o conceito de resfriamento evaporativo. O terceiro capítulo apresenta os *softwares* e ferramentas utilizados para a simulação termoenergética e obtenção dos resultados. O quarto capítulo apresenta a proposta da casa zero, um nZEB pré-fabricado, que será analisada sob a ótica da ventilação natural aliada à climatização. O quinto capítulo mostra o edifício fictício analisado para mostrar o potencial de simulação de ventilação natural do *EnergyPlus* e os resultados obtidos. O sexto capítulo apresenta os resultados da simulação da ventilação natural na casa zero, e propõe um sistema híbrido de climatização. O sétimo capítulo apresenta as conclusões do projeto e propostas para trabalhos futuros.

2 CONCEITOS TEÓRICOS

Este capítulo apresenta ao leitor os conceitos teóricos necessários para se entender o tema, as equações que regem a simulação de ventilação natural e o método de climatização que será utilizado.

2.1 NZEB

Uma edificação com energia quase zero (nearly Zero Energy Building) é um prédio com alto desempenho energético, com um consumo muito baixo de energia. Esse pequeno consumo de energia deve ser suprido quase em sua totalidade por fontes renováveis, incluindo fontes do próprio prédio.

O desempenho energético de um prédio é determinado pela quantidade de energia calculada ou medida para atender a demanda de uso típico do prédio. Essa demanda inclui a climatização de ar e água, e a iluminação.

O relatório de 2013 da *REHVA* (Associação Europeia de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) definiu nZEBs e as fronteiras de sistema para se calcular a energia gasta nos prédios. Um netZEB (net zero) é um prédio que tenha exatamente um gasto de energia primária (soma de energias térmicas e elétricas) de 0 kWh/(m²a), ou seja, que produza ao final do ano a mesma quantidade de energia que consumiu. Já um nZEB (nearly zero) não tem uma eficiência energética tão alta a ponto de ter um balanço zero de energia, mas atinge valores menores que os definidos legalmente em cada país.

Já o relatório de 2014 passou a incluir no cálculo de desempenho energético a utilização de energia elétrica dos equipamentos usados no prédio por perceber que estes representam boa parte do consumo. E padronizou os fatores de multiplicação de cada tipo de energia (térmica ou elétrica).

Atualmente os valores nacionais para classificação nZEB na Europa variam de 0 kWh/(m²a) na Holanda a 210 kWh/(m²a) no Chipre, isso varia de acordo com a forma de utilização de energia em cada país e a ambição de modernização da classificação.

No Brasil, o grande incentivo para a melhora do desempenho energético dos edifícios acontece a partir da etiquetagem de eficiência energética PROCEL, que muitas vezes podem ser vinculados a certificações de sustentabilidade, como o LEED e o AQUA. Em Lamberts e Borgstein (2013) é citado um projeto piloto que coletou dados em 2300 edifícios comerciais nos 27 estados, entre janeiro e dezembro de 2012. Edifícios comerciais que englobavam escritórios, agências bancárias e edifícios públicos. Esse projeto apurou que nas regiões Norte e Nordeste os edifícios consomem em média 300 kWh/(m²a), nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, 236 kWh/(m²a) e 263 kWh/(m²a), respectivamente. Já a região Sul apresentou uma média de 185 kWh/(m²a).

Os métodos de avaliação de um nZEB dependem dos objetivos do projeto, das intenções do investidor e das preocupações ambientais que estão com o maior enfoque, dependem se levam em consideração a emissão de gases de efeito estufa e o custo de energia.

O tipo de energia a ser considerada como consumida pelo edifício pode variar. Nas primeiras metodologias utilizadas apenas era considerada a energia consumida no conforto térmico, como no aquecimento ou resfriamento do prédio. Depois passaram a considerar a energia total consumida no edifício, incluindo aquela relacionada ao uso do prédio. Algumas metodologias passaram inclusive a levar em consideração a energia incorporada na produção dos materiais de construção.

O equilíbrio energético de um prédio pode ser visto de duas maneiras diferentes. A primeira delas consiste em comparar o uso energético e a geração energética por parte de energias renováveis. A segunda é obtida comparando a energia entregue ao prédio e a energia devolvida à rede elétrica. A aplicação de cada uma delas depende mais do estágio de desenvolvimento do projeto. A primeira é mais aplicada na concepção inicial e cálculos preliminares, já a segunda é mais facilmente aplicável no prédio já em operação.

As opções energéticas no projeto de um edifício nZEB pode ser hierarquizada da seguinte forma, sendo 1 as opções preferenciais e 5 as últimas a serem consideradas:

1. Redução do consumo de energia a partir de tecnologias construtivas de baixo consumo: Aproveitamento de luz solar, equipamentos de conforto térmico de alta eficiência, ventilação natural, resfriamento evaporativo.
2. Geração de energia a partir de fontes renováveis dentro do contorno da edificação: Painéis fotovoltaicos, aquecimento solar de água, e usina eólica no edifício.
3. Geração de energia a partir de fontes renováveis nos arredores: Painéis fotovoltaicos, aquecimento solar da água, hidroelétrica de baixo impacto e usina eólica nos arredores e não no contorno do edifício.
4. Geração de energia nos arredores a partir de fontes renováveis produzidas externamente: Biomassa, paletes de madeira, etanol ou biodiesel produzidos externamente, ou utilização de resíduos gerados pelo edifício para produção de energia nos arredores.
5. Aquisição de energia gerada por fontes renováveis externas: Aquisição de energia gerada externamente a partir de usinas eólicas, painéis fotovoltaicos e hidroelétricas, aquisição de créditos de carbono.

2.2 VENTILAÇÃO NATURAL

Ventilação natural consiste no fluxo de ar externo causado pelo vento e por pressões térmicas através de aberturas intencionais na envoltória do edifício. Sob certas circunstâncias, a ventilação natural é capaz

de efetivamente controlar temperatura e os contaminantes do ar interno, sendo em alguns casos o único meio de se resfriar um ambiente, quando a ventilação forçada não está disponível.

A disposição, localização e o controle das aberturas de ventilação devem combinar os efeitos do vento e das temperaturas sobre o ar para atingir as taxas de ventilação desejadas e uma boa distribuição do ar ventilado através do edifício. A ventilação natural pode ocorrer de diversas maneiras, algumas delas estão exemplificadas na Figura 2.1

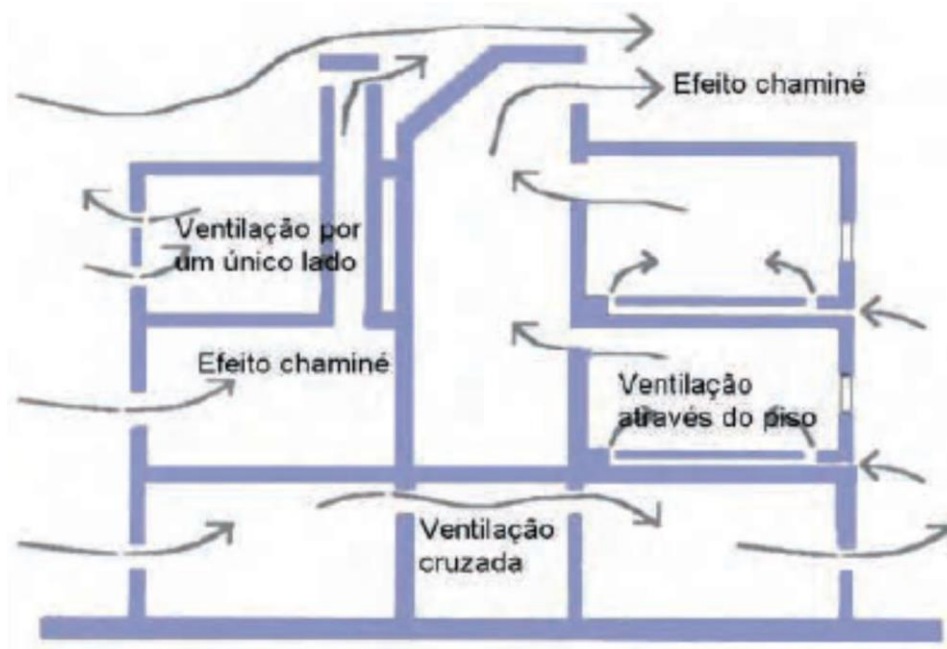


Figura 2.1 – Esquema representativo de ventilação natural (Ghiaus, Roulet, 2005)

Para se obter a rede de fluxo de ar entre todos os cômodos de um prédio, será criada uma malha onde cada ambiente é um nó e cada comunicação entre os ambientes serão as conexões. A variável em cada nó é pressão e em cada conexão é uma taxa de fluxo de ar. A diferença de pressão em cada conexão é governada pela equação de Bernoulli, sendo assim dada por:

$$\Delta P = \left(P_n + \frac{\rho v_n^2}{2} \right) - \left(P_m + \frac{\rho v_m^2}{2} \right) + \rho g(z_n - z_m) \quad (1)$$

onde,

ΔP diferença de pressão total entre os nós n e m [Pa]

P_n pressão total no nó n [Pa]

P_m pressão total no nó m [Pa]

v_n velocidade do fluxo de ar no nó n [m/s]

v_m velocidade do fluxo de ar no nó m [m/s]

ρ massa específica do ar [kg/m³]

g aceleração da gravidade [9,81m/s²]

z_n altura do nó n [m]

z_m altura do nó m [m]

Os termos são rearranjados e são adicionados os efeitos provenientes do vento:

$$\Delta P = P_n - P_m + P_S + P_W \quad (2)$$

onde,

P_S diferença de pressão devido às diferenças de altura e massa específica [Pa]

P_W diferença de pressão devido ao vento [Pa]

Para o cálculo dos coeficientes de pressão de vento para cada uma das fachadas do edifício, são utilizadas as equações de Swami e Chandra (1988) para edifícios de pequeno porte:

$$C_{pw,n} = 0,6 \cdot \ln \left[1,248 - 0,703 \operatorname{sen} \left(\frac{\alpha}{2} \right) - 1,175 \operatorname{sen}^2(\alpha) + 0,131 \operatorname{sen}^3(2\alpha G) + 0,769 \cos \left(\frac{\alpha}{2} \right) + 0,07 G^2 \operatorname{sen}^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right) + 0,717 \cos^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right] \quad (3)$$

onde,

C_{pw} coeficiente de pressão de vento em superfície

$C_{pw,n}$ valor de C_p para o ângulo entre a direção do vento e a normal da fachada n

α ângulo entre a direção do vento e a normal externa da fachada analisada [graus]

G logaritmo natural da razão entre a largura da parede da fachada analisada e a largura da parede adjacente

n índice do ângulo incidente com incrementos de 30 graus

O cálculo dos coeficientes de pressão de vento só pode ser realizado no *EnergyPlus* para edifícios retangulares, de forma que serão calculados apenas 4 coeficientes de pressão, um para cada fachada.

Com os coeficientes de pressão do vento calculados pode-se então determinar a pressão do vento, desconsiderando diferença de altura e perda de pressão:

$$P_w = C_{pw} \rho \frac{v_{ref}^2}{2} \quad (4)$$

onde,

v_{ref} velocidade do vento meteorológica corrigido para altura e característica dos arredores [m/s]

Para os cálculos de temperatura em cada nó é utilizada a equação de distribuição de temperatura através de um duto, para uma dada taxa de fluxo de ar e uma temperatura de entrada. De forma que as

conexões entre os nós são consideradas dutos que tem um certo fluxo de ar definido pelas pressões em cada nó. Sendo assim, a temperatura de saída é dada por:

$$T_o = T_\infty + (T_i - T_\infty) \cdot \exp\left(-\frac{UA}{\dot{m}c_p}\right) \quad (5)$$

onde,

T_o temperatura de saída [°C]

T_∞ temperatura ao redor do duto [°C]

T_i temperatura de entrada [°C]

U coeficiente de transferência de calor [W/m²K]

A Área de Superfície (Perímetro·Comprimento) [m²]

$\dot{m}$ taxa de fluxo de ar [kg/s]

C_p calor específico do fluxo de ar [J/kg·K]

2.3 RESFRIAMENTO EVAPORATIVO

Resfriamento evaporativo é um método sustentável, energeticamente eficiente e relativamente barato de se obter conforto térmico em um determinado ambiente. Consiste em reduzir a temperatura de bulbo seco do ar a aproximando da temperatura de bulbo úmido através da evaporação de água. O processo é exemplificado na Figura 2.2.

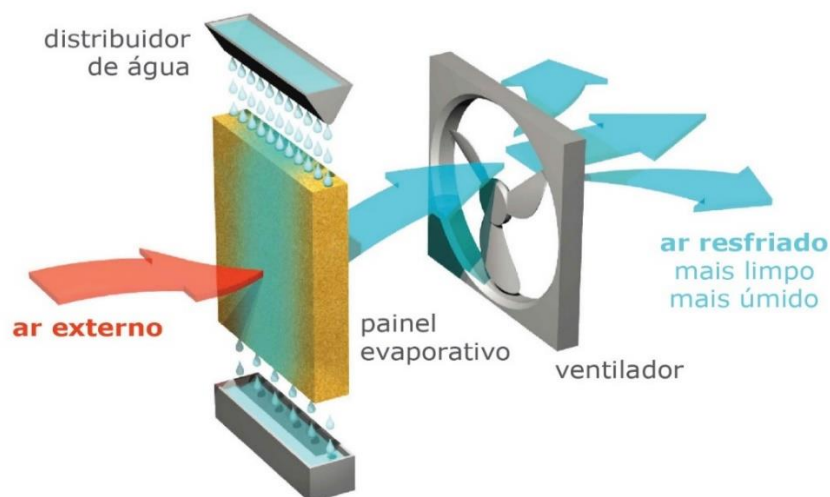


Figura 2.2 – Esquema representativo do funcionamento de um resfriador evaporativo (Ice House Brasil, 2011)

O processo de resfriamento evaporativo consiste em uma troca adiabática de energia. Calor precisa ser adicionado à água para que esta evapore. O ar no qual a água é evaporada fornece esse calor, dessa

forma, a temperatura de bulbo seco do ar diminui e a concentração de água no ar aumenta. A quantidade de calor removido do ar é a mesma quantidade de calor absorvida pela água evaporada como calor de vaporização. Se a água é recirculada no equipamento de resfriamento evaporativo direto, a temperatura da água no reservatório se aproxima da temperatura de bulbo úmido do ar que entra no processo.

A máxima redução na temperatura de bulbo seco é a diferença entre as temperaturas de bulbo úmido e seco do ar que entra no equipamento. Se o ar é resfriado até a temperatura de bulbo úmido, ele se torna saturado e o processo é 100% eficiente. A efetividade é a redução da temperatura de bulbo seco do ar que sai do equipamento dividido pela diferença entre as temperaturas de bulbo úmido e seco do ar que entra no equipamento. Teoricamente, resfriamento evaporativo adiabático direto não é 100% efetivo, mas resfriadores evaporativos chegam a ser entre 85 e 95% efetivos.

Quando um resfriador evaporativo sozinho não é capaz de fornecer as condições necessárias, algumas alternativas podem ser capazes de satisfazer as necessidades e ainda assim se manterem eficientes energeticamente e econômicas. Pode-se aumentar o volume disponível de água que fica recirculando pelo resfriador evaporativo direto e ser resfriada utilizando refrigeração mecânica, dessa forma seriam obtidas temperaturas de bulbo úmido e seco mais baixas além de se reduzir a umidade. Ao se comparar os custos do uso de apenas refrigeração mecânica, essa configuração reduz os custos de operação em algo entre 25 e 40%. Para se maximizar esse efeito econômico, alguns sistemas podem combinar evaporadores indiretos, evaporadores diretos, aquecedores, e refrigeração mecânica de várias formas diferentes.

Um resfriador evaporativo indireto evita a umidificação do ar circulado. Uma corrente de ar é resfriada evaporativamente como no resfriador evaporativo direto, essa corrente de ar é a chamada corrente secundária. Com o auxílio de um trocador de calor ar-ar, esse ar secundário absorve o calor da corrente de ar primária que será a corrente a ser circulada no ambiente. Dessa forma se evita que o calor enviado para o ambiente resfriado tenha sua concentração de água aumentada, abaixando assim simultaneamente as temperaturas de bulbo úmido e seco.

Com a carta psicrométrica da Figura 2.3 é possível demonstrar o que acontece com a temperatura do ar ao passar por resfriadores evaporativos. Em um resfriador evaporativo direto, o ar que entra com uma temperatura inicial de bulbo seco de 35°C e bulbo úmido de 24° C, com uma efetividade de 80% consegue ter sua temperatura de bulbo seco reduzida em 8,8°C. O ar chega ao final do processo de resfriamento evaporativo direto com uma temperatura de 26,2°C.

Na carta psicrométrica da Figura 2.3 está demonstrado também um resfriamento evaporativo indireto. No resfriamento evaporativo indireto, o resfriamento ocorre na linha de ponto de orvalho constante. Com uma efetividade de 60% e assumindo que o ar primário e o secundário estão sob a mesma circunstância inicial de temperatura de bulbo seco de 35°C e bulbo úmido de 24°C, a queda na temperatura de bulbo seco chega a 6,6°C, resultando numa temperatura final de 28,4°C. Porém, o

processo indireto resfria sem modificar a razão de mistura do ar com a água, reduzindo assim também a temperatura de bulbo úmido, chegando a uma temperatura de bulbo úmido de 22,1°C.

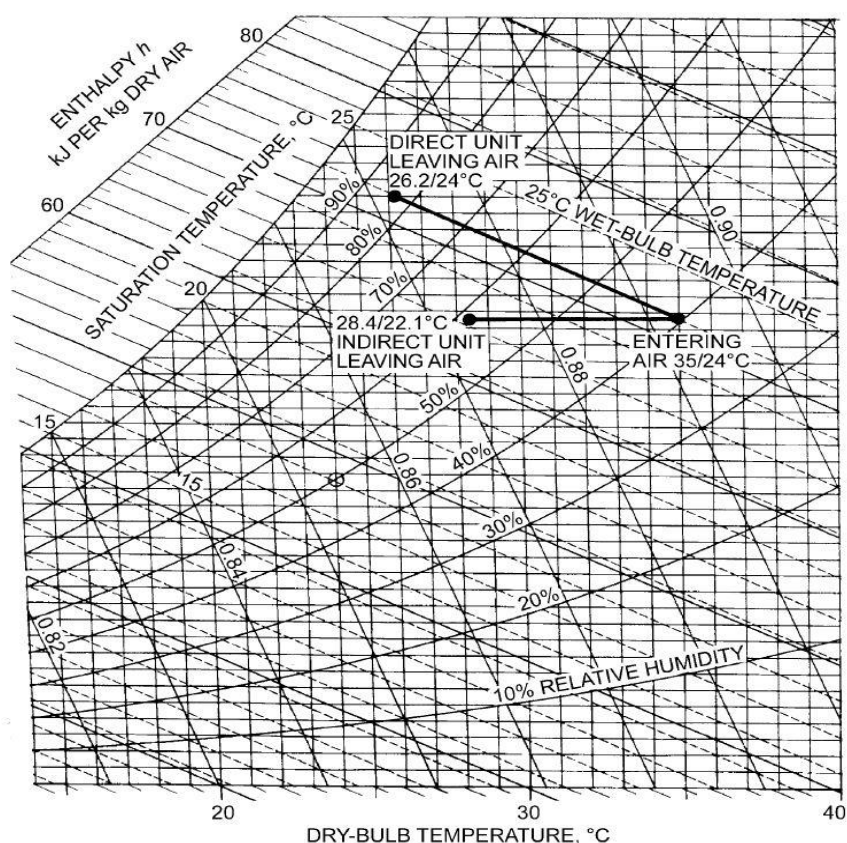


Figura 2.3 – Carta psicrométrica com dois processos de resfriamento evaporativo representados (ASHRAE, 2015)

2.4 SISTEMA HÍBRIDO

O sistema híbrido nesse caso consiste em adotar a solução ativa de climatização sem abandonar a solução passiva. Pode-se manter a ventilação natural como principal forma de obtenção de conforto térmico. Porém em certos horários a ventilação natural sozinha não será capaz de manter as condições térmicas confortáveis para os ocupantes, nesses horários o resfriamento evaporativo entraria em operação.

Para se determinar os horários de operação é necessário antes fazer a simulação de ventilação natural. A simulação termoenergética retornará os horários de desconforto térmico e assim será possível determinar cronogramas de operação do resfriador evaporativo e cronogramas de abertura e fechamento de janelas e portas.

O sistema híbrido pode até ser automatizado no final da etapa de projeto, a partir de termostatos que liguem e desliguem os equipamentos de climatização ativa, a partir de determinadas temperaturas de operação.

2.5 CONFORTO ADAPTATIVO

O modelo de conforto térmico adaptativo foi desenvolvido para uso em edificações que sejam naturalmente ventiladas, e determina as condições internas aceitáveis baseadas na temperatura média mensal externa e na temperatura operativa interna. Um espaço naturalmente ventilado é definido como um espaço onde as condições térmicas são controladas primariamente pelos próprios ocupantes a partir da abertura ou fechamento das janelas. Esse modelo já leva em consideração as mudanças nas vestimentas dos ocupantes ao comparar as temperaturas internas aceitáveis com as condições climáticas externas, dessa forma não é necessário estimar o valor de isolamento ou permeabilidade das roupas dos ocupantes.

A norma utilizada nesse trabalho para determinar o conforto térmico dos ocupantes da edificação é a ASHRAE 55 (2010). Essa norma prevê que a média mensal da temperatura externa, utilizada para determinar os limites aceitáveis das temperaturas internas, é a média simples da temperatura externa média dos últimos 30 dias. Apesar da norma especificar dois limites de aceitabilidade, 80% e 90%, o limite de 80% será utilizado já que ele é recomendado para a maioria das aplicações. Uma representação gráfica desses limites de aceitabilidade é mostrada na Figura 2.4.

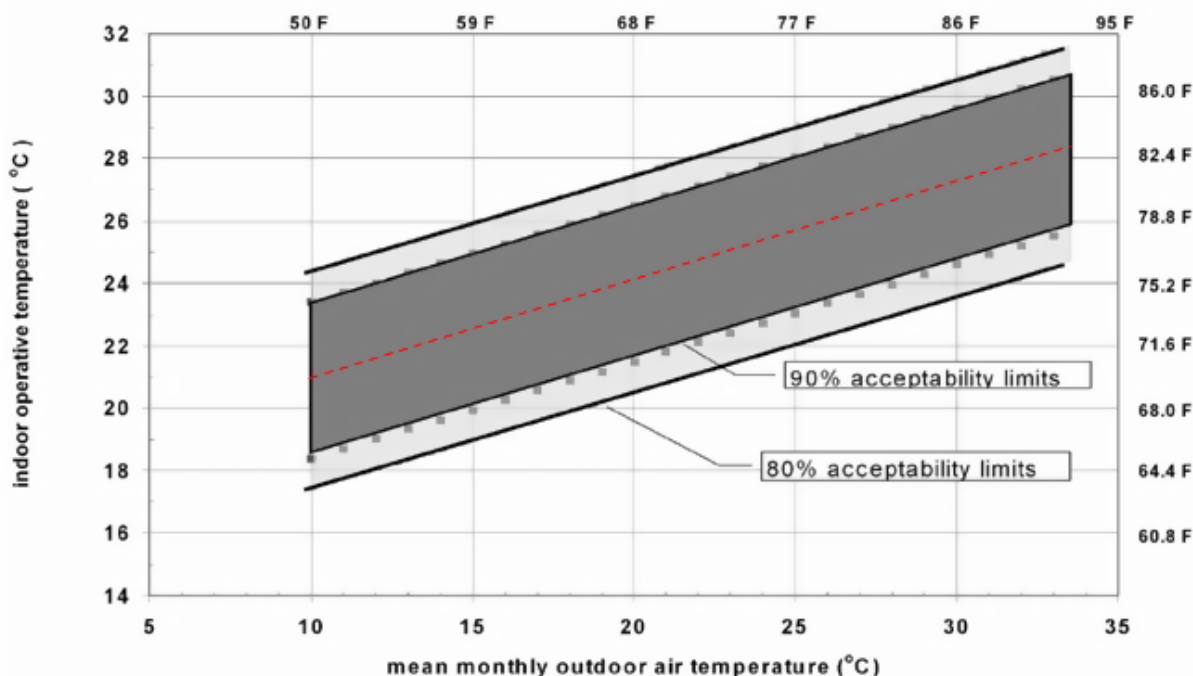


Figura 2.4 – Temperaturas operativas aceitáveis segundo a ASHRAE 55-2010 (ASHRAE, 2010)

Esse método só pode ser utilizado caso a média mensal de temperatura externa esteja entre 10,0 °C e 33,5°C. Quando esse método gráfico é utilizado não é necessário especificar nenhum limite para

umidade e velocidade do ar. A linha central da Figura 2.4, tracejada em vermelho, é a temperatura de conforto, e é dada por:

$$T_{ot} = 0,31T_{e,m} + 17,8 \quad (6)$$

onde,

T_{ot} temperatura operativa [°C]

$T_{e,m}$ temperatura média mensal externa de bulbo seco [°C]

A temperatura operativa é calculada como uma média simples da temperatura de bulbo seco interna e a temperatura radiante média das superfícies internas. A temperatura média mensal externa é calculada a partir do arquivo climático inserido na simulação. A região de conforto de 80% é simétrica em relação à linha central, e pode ser definida como:

$$T_{ot} = 0,31T_{e,m} + 17,8 \pm 3,5 \quad (7)$$

A região de conforto de 90% é também simétrica em relação à linha central, e pode ser definida como:

$$T_{ot} = 0,31T_{e,m} + 17,8 \pm 2,5 \quad (8)$$

3 RECURSOS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS

Este capítulo se destina a apresentar os programas necessários para a simulação termoenergética do prédio em questão e como cada um contribuirá nesse processo.

3.1 SKETCHUP

O *Sketchup* (Trimble, 2017) é um programa computacional de modelagem em três dimensões utilizado em diversas áreas, tais como desenhos arquitetônicos, *design* de interiores, engenharia civil e engenharia mecânica. Existem hoje duas versões disponíveis do *Sketchup*, a versão *Pro* que é paga mas que é bastante completa e abre espaço para diversas funcionalidades e aplicações, e a versão *Make* que é gratuita.

A versão *Make* foi utilizada porque suas funcionalidades de criação de modelos 3D são suficientes para determinar a geometria do edifício. No *Sketchup* foi possível determinar as dimensões básicas do prédio, as dimensões dos objetos de fenestração, dos pontos de acesso e dos detalhes de sombreamento.

A Figura 3.1 apresenta a interface de utilização do *Sketchup* e as ferramentas de criação dos modelos tridimensionais.

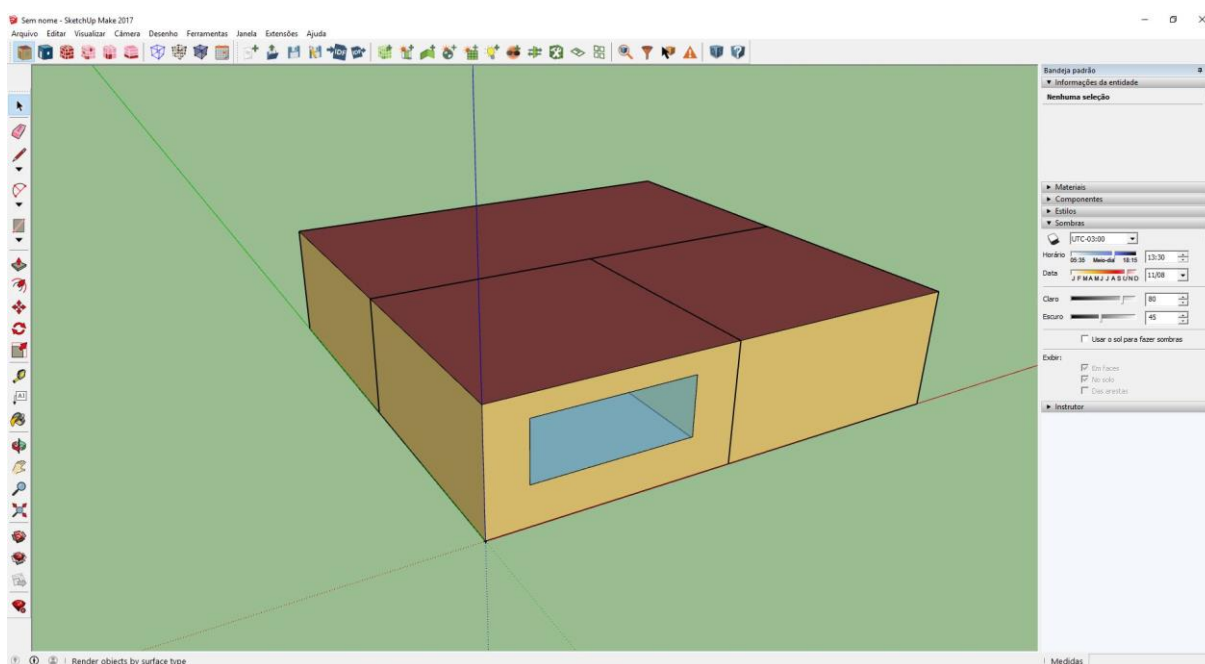


Figura 3.1 – Interface de utilização do programa *Sketchup*

3.2 OPENSTUDIO

O *OpenStudio* (NREL, 2017) é um programa de código aberto desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis do Departamento de Energia dos Estados Unidos, e reúne uma coleção de ferramentas que facilitam a modelagem energética de construções. O programa foi criado para facilitar o desenvolvimento e aplicação de soluções para melhorar a performance energética de edifícios ainda em fase de projeto.

O *plugin* do *OpenStudio* para *Sketchup* reconhece as formas 3D e dá significados físicos para elas, considerando portas como objetos de fenestração, janelas como objetos de fenestração e iluminação, objetos externos como sombreamentos. O material das paredes, portas e janelas são definidas no *OpenStudio*, assim como o padrão de utilização do prédio: cronograma de ocupação, cronograma de abertura de janelas.

Todos os cálculos relacionados ao conforto térmico realizados no *OpenStudio* são feitos utilizando o *EnergyPlus* como motor de cálculo. O *OpenStudio* funciona como uma interface mais amigável de utilização do *EnergyPlus*, facilitando assim a definição da geometria, materiais de construção, equipamentos internos, iluminação e ocupação do edifício.

A Figura 3.2 apresenta a interface do *Sketchup* em associação com o *plugin* do *OpenStudio*, onde é possível determinar os nomes e características físicas de cada elemento geométrico criado no modelo tridimensional. A Figura 3.3 apresenta a interface do *OpenStudio* onde são determinados os aspectos construtivos de forma mais detalhada e os padrões de utilização de cada um dos ambientes.

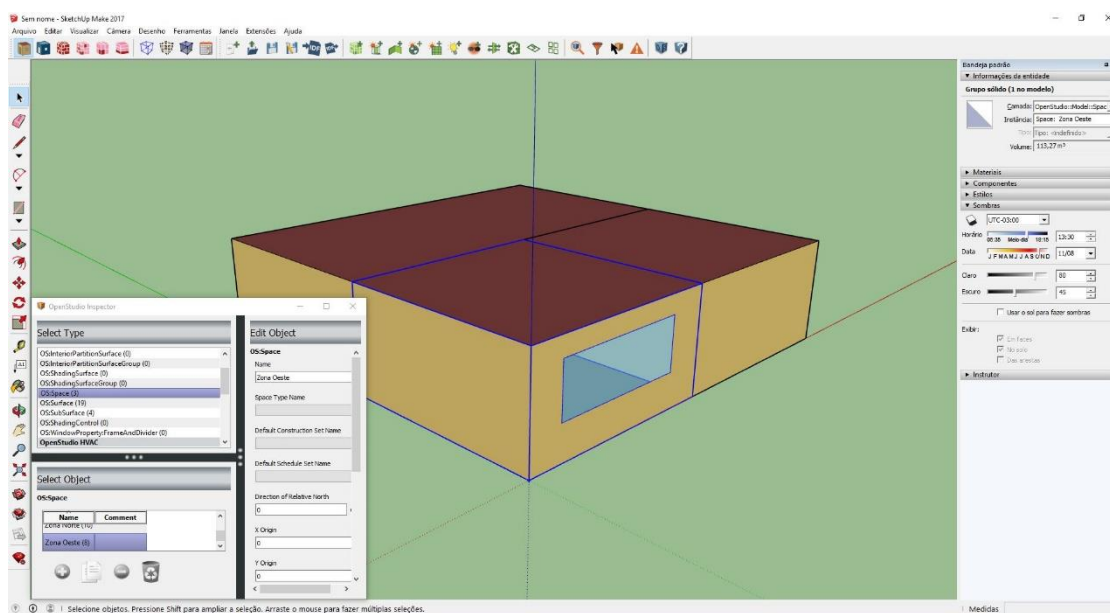


Figura 3.2 – Interface do *OpenStudio* aliado ao *Sketchup*

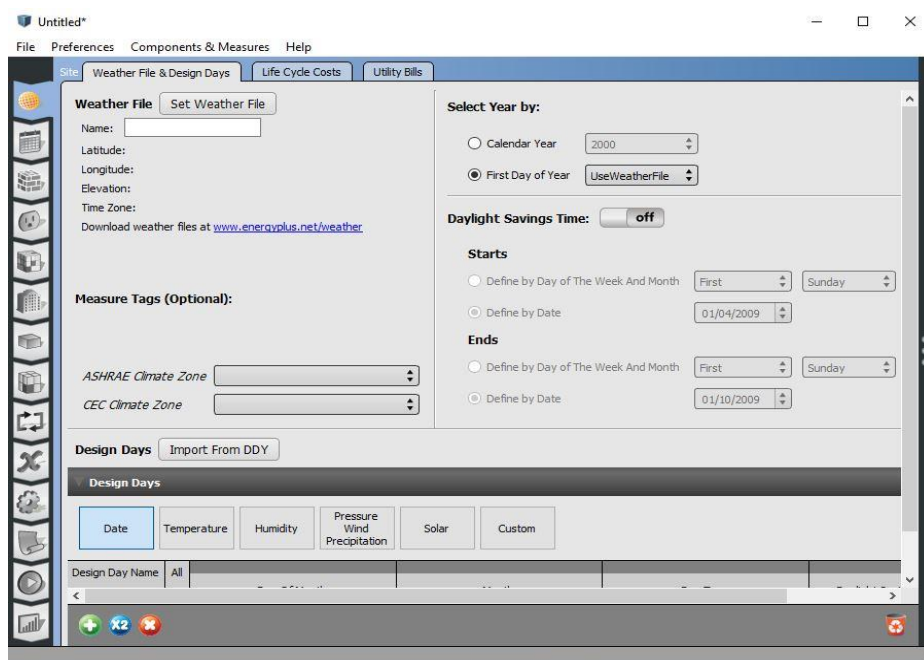


Figura 3.3 – Interface de utilização do *OpenStudio*

3.3 ENERGYPLUS

O *EnergyPlus* (NREL, 2017) é um programa de simulação de carga térmica e análise energética baseado em dois programas já existentes, o BLAST e o DOE-2, que já eram utilizados na década de 80 como ferramentas para simulação termoenergética. O *EnergyPlus* é um software gratuito, cujo desenvolvimento é financiado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. O público-alvo desse programa são os arquitetos ou engenheiros que pretendem dimensionar sistemas de ar condicionado e aquecimento ou otimizar a performance energética de edificações.

O *EnergyPlus* é um programa confiável para se realizar simulações termoenergéticas, já que é um programa validado pelo BESTEST (Teste de Simulação Energética para Edifícios). Esse teste foi desenvolvido pela IEA (Agência Internacional de Energia) para testar softwares de simulação energética, e já está incluído na norma ASHRAE 140 como método padrão para validação de programas de simulação termoenergética.

O *EnergyPlus* calcula as cargas térmicas necessárias para manter o conforto térmico, o consumo energético dos equipamentos internos do prédio associados à utilização do edifício. Para isso o *EnergyPlus* usa como entradas o arquivo climático da localização do edifício, as condições de ocupação, os parâmetros geométricos e construtivos da edificação.

O cálculo de cargas térmicas é baseado no balanço de calor, o que permite o cálculo simultâneo dos efeitos radiantes e convectivos, tanto nas superfícies internas quanto nas externas para cada passo de tempo, passo esse que pode ser horário ou fração de hora. A transferência de massa também é considerada junto com a transferência de calor para gerar os dados de movimentação de ar entre as zonas

térmicas. Os cálculos de fenestração incluem controles de sombreamentos nas janelas e balanços de calor camada a camada para considerar de forma apropriada a energia solar absorvida nas janelas.

Os modelos de conforto térmico considerados pelo *EnergyPlus* são baseados no cronograma de ocupação, temperatura, umidade, etc. Os relatórios gerados pelo programa podem ser customizados de acordo com a aplicação, podendo variar de anual para frações de hora, e gerando dados para diferentes equipamentos que fazem parte do sistema de climatização.

É importante lembrar que o *EnergyPlus* não possui uma interface amigável para o usuário, sendo projetado para ser apenas um motor de cálculo para outros programas. Porém, uma das ferramentas contempladas no *EnergyPlus* que não podem ser utilizadas ainda na atual versão do *OpenStudio* é o *Airflow Network* e que se faz necessária para o desenvolvimento deste trabalho.

A Figura 3.4 apresenta a interface do *EnergyPlus* e como ficam dispostas as informações necessárias para a simulação termoenergética.

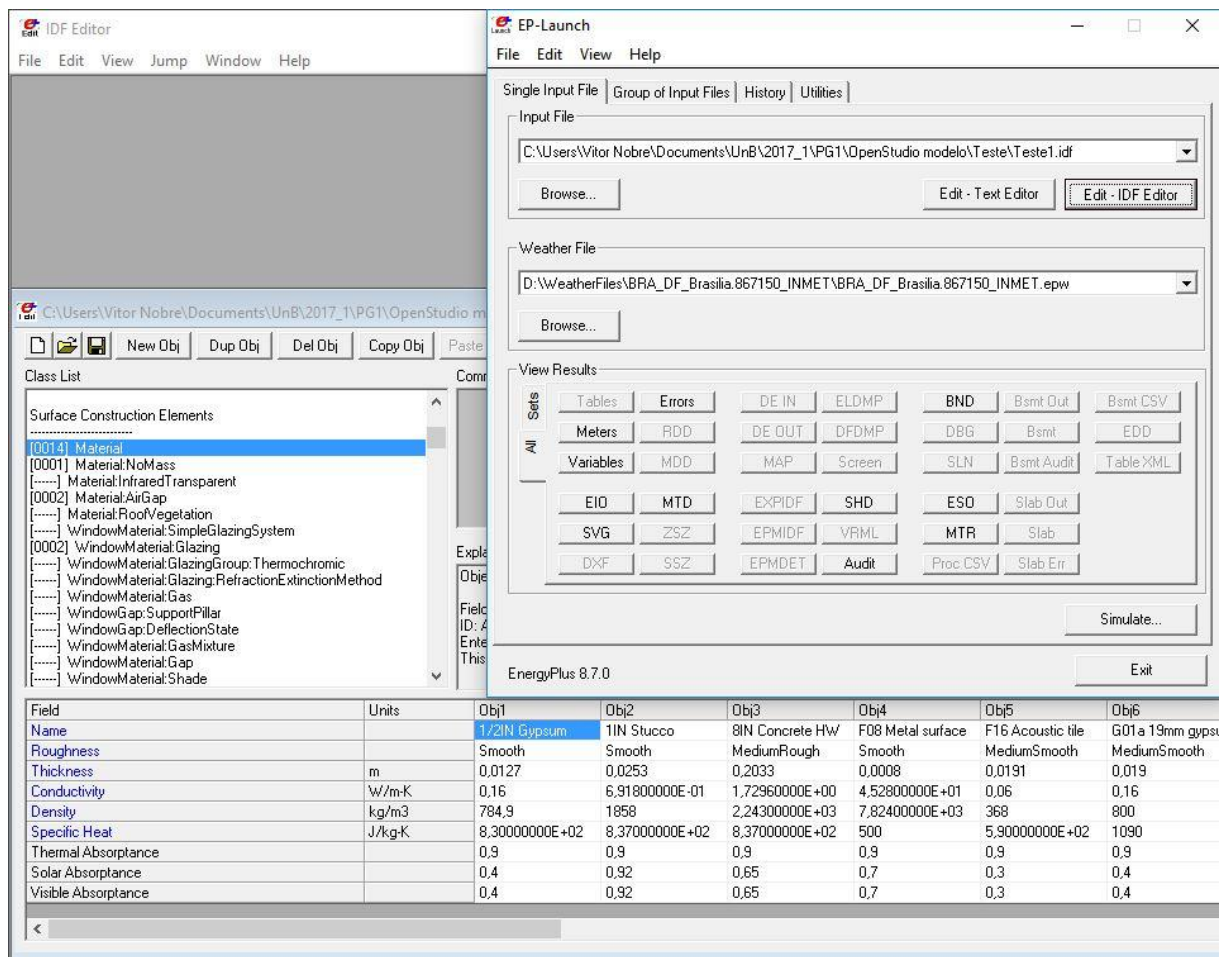


Figura 3.4 – Interface de utilização do *EnergyPlus*

3.3.1 AIRFLOW NETWORK

O modelo *Airflow Network* é um recurso do *EnergyPlus* que é capaz de simular o fluxo de ar entre várias zonas térmicas devido ao vento incidente sobre a envoltória e também o fluxo forçado pelo sistema de climatização. O modelo pode também simular os ganhos ou perdas de calor e umidade no sistema de distribuição de ar. O *Airflow Network* é capaz de:

- Calcular o fluxo de ar através de infiltrações no exterior ou em superfícies entre zonas, infiltrações nas portas e janelas mesmo fechadas
- Simular ventilação natural, levando em consideração portas e janelas completamente ou parcialmente abertas
- Controlar o quanto a ventilação natural vai ter efeito sobre o prédio ao controlar aberturas e fechamentos de portas e janelas
- Calcular fluxo de ar entre zonas, a partir de superfícies abertas ou infiltrações
- Calcular a pressão do vento nas aberturas do prédio a partir da velocidade e direção do vento e da orientação da superfície
- Calcular fluxos de ar e pressões em dutos ou outros componentes de um sistema de distribuição forçada de ar
- Determinar o impacto de exaustores de ar nos fluxos internos de ar, pressões, temperaturas e umidade, e no consumo energético

Porém o *Airflow Network* possui algumas restrições. O modelo só pode utilizar ventiladores a volume constante, ou seja, não consegue ainda modelar equipamentos de volume de ar variável. Não é possível também obter informações detalhadas de fluxo de ar ou gradiente de temperatura dentro de uma zona térmica. Outro limitante da utilização do *Airflow Network* é a falta de modelagem do transporte de poluentes e contaminantes.

A Figura 3.5 mostra um exemplo de como o fluxo de ar pode se comportar em uma configuração bem simples, com apenas três zonas térmicas, três janelas externas que podem ser abertas e duas portas internas. Dois nós externos são indicados, sendo um deles referente a fachada com duas janelas e o outro referente a fachada que contém a outra janela. Esse fluxo de ar ocorre em um dado passo de tempo da simulação, mas pode ter seu comportamento alterado conforme a pressão do vento em cada janela, se as janelas estão abertas e o quanto estão abertas, e as temperaturas em cada zona e no exterior.

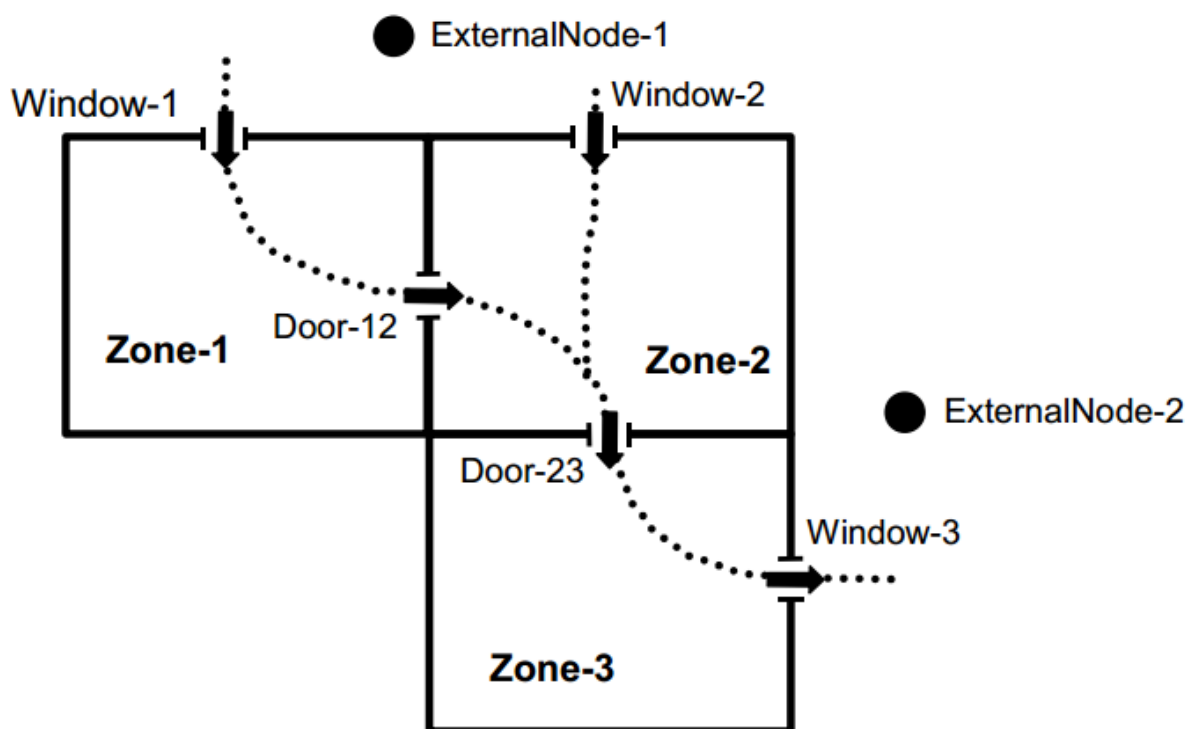


Figura 3.5 – Esquema representativo de nós e conexões do *Airflow Network*

Algumas das informações necessárias para os cálculos de fluxo de ar são automaticamente extraídos da modelagem do prédio, tais como o volume das zonas, a orientação e localização das superfícies do prédio que contém aberturas que permitem a movimentação de ar. Os outros parâmetros são definidos pelo usuário e inseridos na forma de objetos do *EnergyPlus*.

Os parâmetros a serem incluídos incluem os coeficientes de pressão do vento, que podem ser inseridos manualmente pelo usuário, ou calculados pelo programa se o prédio for retangular. Devem ser especificados também as características das aberturas nas superfícies e dos exaustores, e os controles de aberturas de portas e janelas. Os nós externos devem ser ligados às zonas térmicas, estabelecendo as comunicações de ar.

4 CASA ZERO

Este capítulo apresenta a habitação pré fabricada que será analisada e mostra como as características climáticas serão inseridas na simulação termoenergética.

4.1 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 Figura 4.1 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.

4.2 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.

Dessa forma a Tabela 4.1 descreve os materiais da cobertura e das paredes que foram considerados neste trabalho.

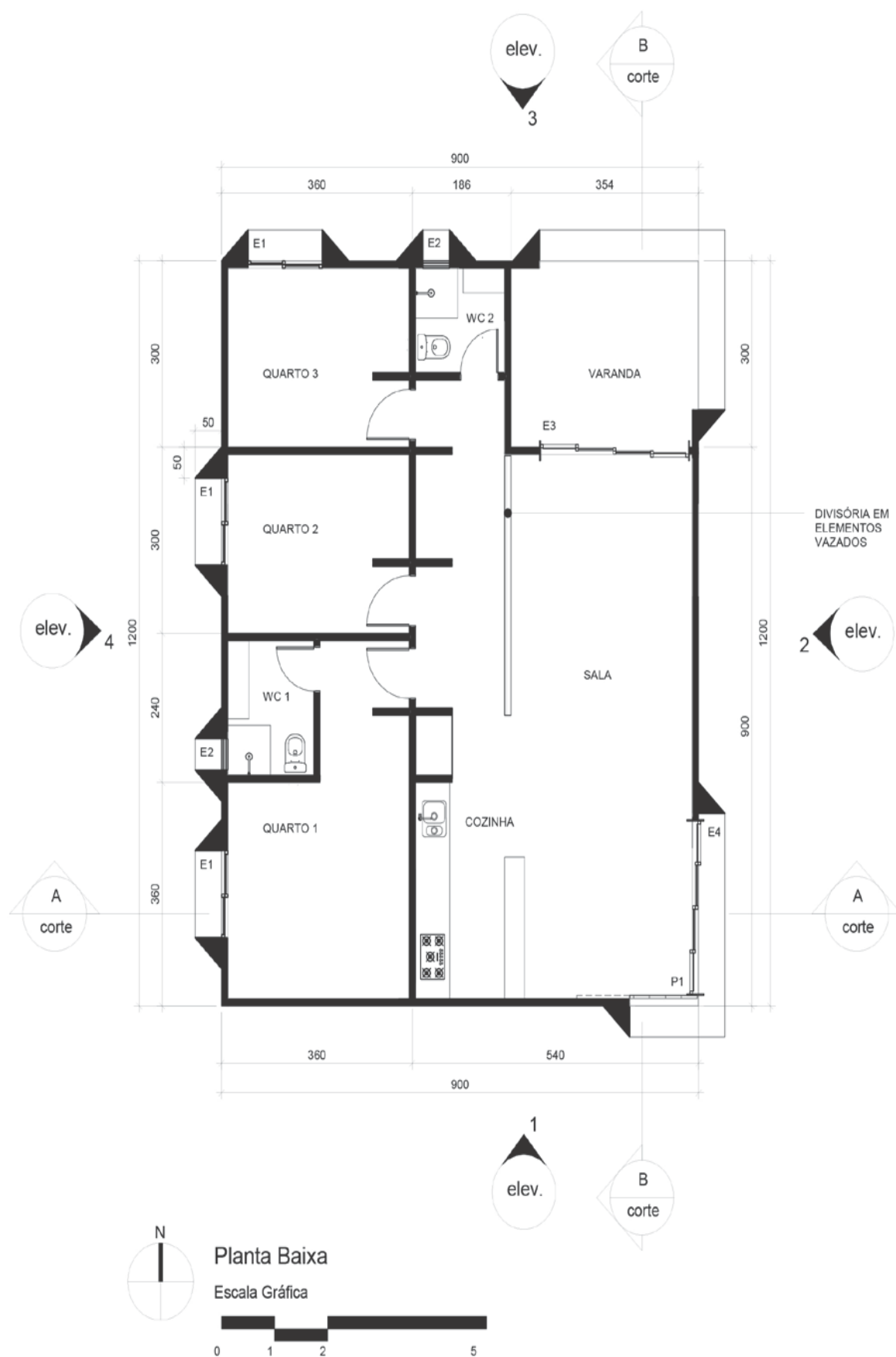


Figura 4.1 – Planta baixa da casa zero (Sudbrack, 2017)

Tabela 4.1. Materiais de construção utilizados na casa zero e seus valores de transferência de calor.

Descrição	Material	Espessura [m]	Condutividade [W/m·K]	Calor específico [J/kg·K]	Massa Específica [kg/m³]	Absortância	Transmitância [W/m²·K]
Cobertura composta de placa de CLT (Cross Laminated Timber), e aplicação de manta impermeabilizante aluminizada na face externa.	Manta aluminizada	0,003	0,23	1460	1000	0,05	0,59
	CLT	0,20	0,13	2100	550	—	
Parede composta de painel de tijolos cerâmicos e argamassa armada, com 140mm de espessura, e pintura branca nas faces interna e externa.	Argamassa armada e pintura branca	0,025	1,15	1000	2100	0,2	1,65
	Bloco cerâmico	0,01	0,9	920	1300	—	
	Ar	0,03	0,023	1012	1,20	—	
	Bloco cerâmico	0,01	0,9	920	1300	—	
	Ar	0,03	0,023	1012	1,20	—	
	Bloco cerâmico	0,01	0,9	920	1300	—	
	Argamassa armada e pintura branca	0,025	1,15	1000	2100	0,2	
Piso cerâmico de 10mm, argamassa de nivelamento de 20mm, e laje armada de 100mm	—	—	—	—	—	—	0,25
Vidro	—	—	—	—	—	—	5,385

Para as janelas e portas envidraçadas, foi considerado um vidro transparente simples de 4mm de espessura, com transmitância visível de 0,89 e fator solar 0,87.

4.3 PADRÃO DE UTILIZAÇÃO

O padrão de utilização considerado será o mesmo presente em Sudbrack (2017). O padrão de utilização 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 4.2 descreve graficamente o padrão de ocupação da residência.

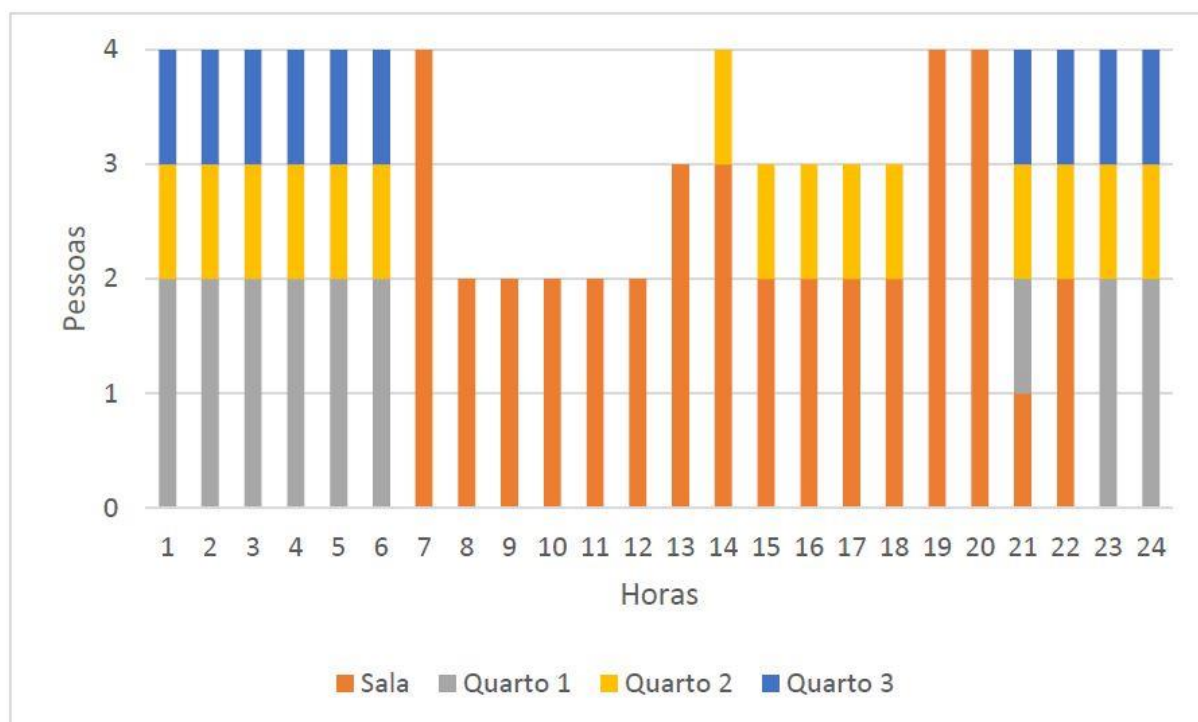


Figura 4.2 – Padrão de ocupação da casa zero (Sudbrack, 2017)

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 4.3. Devido à utilização da iluminação artificial a partir de lâmpadas LED, a densidade de potência de iluminação artificial é de 5,0W/m².

Os equipamentos elétricos utilizados para determinação de consumo energético e carga térmica estão descritos na Tabela 4.2, estão presentes nessa tabela também os seus padrões de utilização.

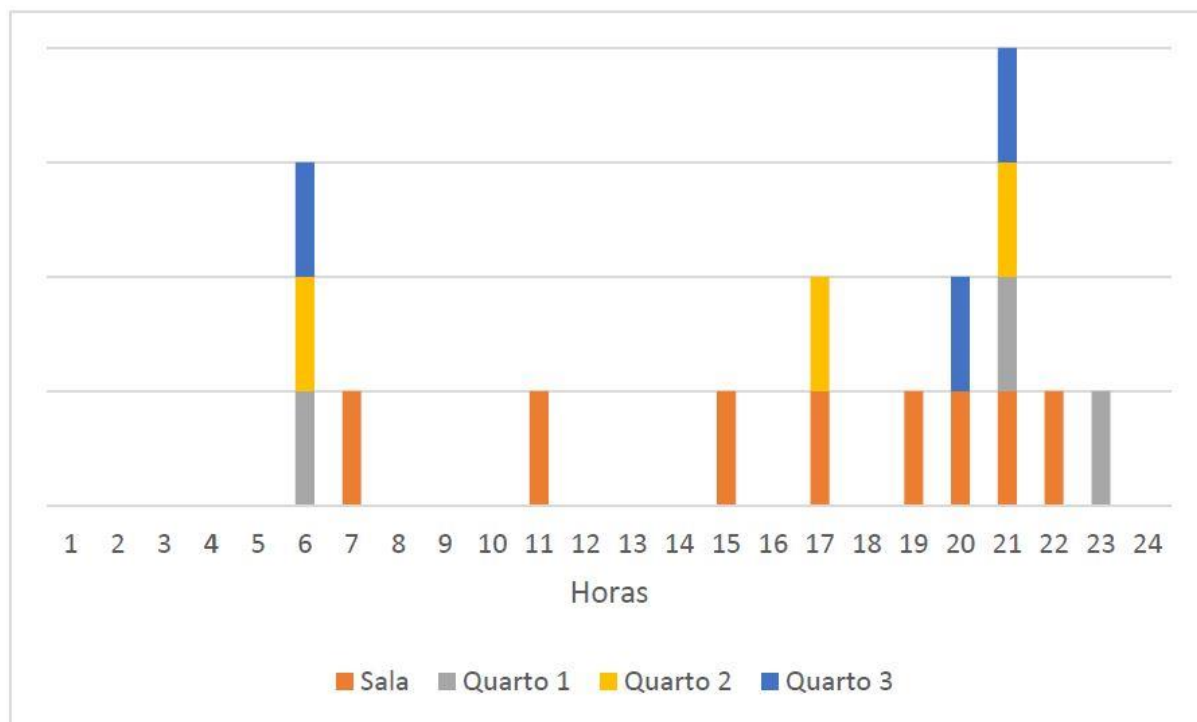


Figura 4.3 – Padrão de iluminação da casa zero (Sudbrack, 2017)

Tabela 4.2. Período de utilização dos equipamentos elétricos da casa zero.

Ambiente	Equipamento	Fração Radiante	Potência [W]	Período
Sala-cozinha	Cooktop indução	0,5	7200	12:00-12:30
	Diversos	0,5	50	12:00-16:00
	Forno	0,5	2500	20:00-20:30
	Geladeira	0,5	85	00:00-24:00
	Lava e seca	0,5	1500	13:00-13:45
	Lava louças	0,5	1500	14:00-15:00
	Televisão	0,5	120	14:00-22:00
Quarto 1	Diversos	0,5	50	22:00-24:00
Quarto 2	Computador	0,5	250	20:00-23:00
	Diversos	0,5	50	22:00-24:00
Quarto 3	Diversos	0,5	50	22:00-24:00

Dessa forma, os valores de carga térmica devidos a utilização da residência podem ser resumidos graficamente, e estão apresentados na Figura 4.4.

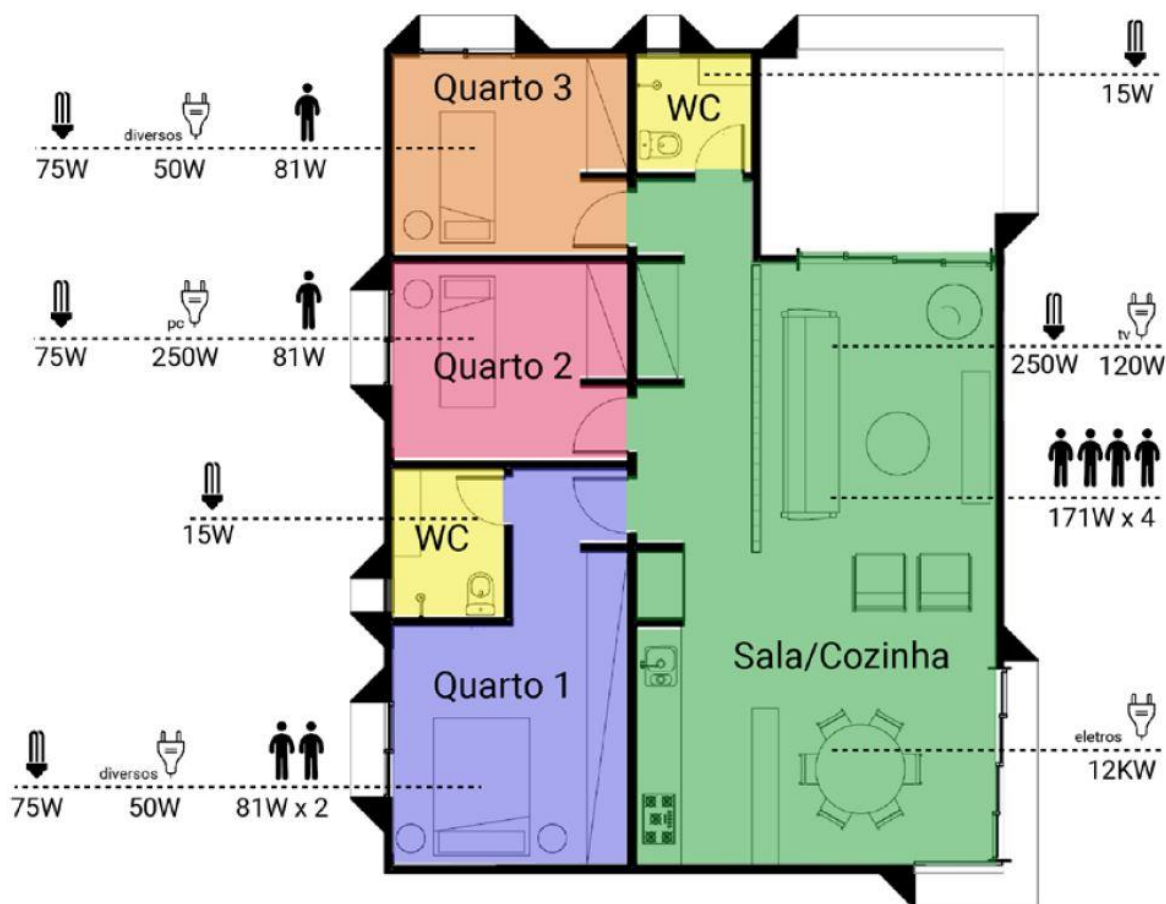


Figura 4.4 – Cargas térmicas separadas por cômodo (Sudbrack, 2017)

4.4 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.

O arquivo climático INMET 2016 apresenta as seguintes coordenadas geográficas:

- Latitude: -15,78 °
- Longitude: -47,93 °
- Elevação: 1160 m

Esse arquivo climático é o arquivo disponível com as coordenadas geográficas mais próximas das coordenadas do suposto local que será construído o edifício nZEB:

- Latitude: -15,99 °
- Longitude: -47,82 °
- Elevação: 1050 m

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 Normais Climatológicas do Brasil de 1961-1990 do INMET foi possível concluir que o vento predominante de Brasília ocorre no sentido Leste-Oeste. Os demais dados estão presentes na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Caracterização do clima de Brasília a partir das Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990 INMET.

Mês	Direção do vento predominante		Temperatura mínima [°C]	Temperatura máxima [°C]	Temperatura média compensada [°C]
	Pontos Cardeais	Graus [°]			
Janeiro	Calmo	16	17,4	26,9	21,2
Fevereiro	Calmo	39	17,4	26,7	21,3
Março	Calmo	65	17,5	27,1	21,5
Abril	Leste	92	16,8	26,6	20,9
Maio	Leste	102	15,0	25,7	19,6
Junho	Leste	99	13,3	25,2	18,5
Julho	Leste	98	12,9	25,1	18,3
Agosto	Leste	94	14,6	27,3	20,3
Setembro	Leste	93	16,0	28,3	21,7
Outubro	Calmo	70	17,4	27,5	21,6
Novembro	Calmo	26	17,5	26,6	21,1
Dezembro	Calmo	3	17,5	26,2	21,0
Ano	Leste	76	16,1	26,6	20,6

5 SIMULAÇÃO TERMOENERGETICA – CASO SIMPLES

Este capítulo mostra em um caso simples o que foi desenvolvido com a casa zero e demonstra a importância da adição da ferramenta Airflow Network na simulação.

5.1 AMBIENTE SIMULADO

Afim de se obter prática com o software *EnergyPlus* e a ferramenta *Airflow Network*, o arquivo exemplo presente no *EnergyPlus* (*AirflowNetwork3zVentAutoWPC*) foi simulado e estudado. O arquivo em questão traz modelado um edifício simples com três zonas térmicas, duas janelas externas e uma porta. A Figura 5.1 apresenta o modelo com visão em raio X no *OpenStudio*.

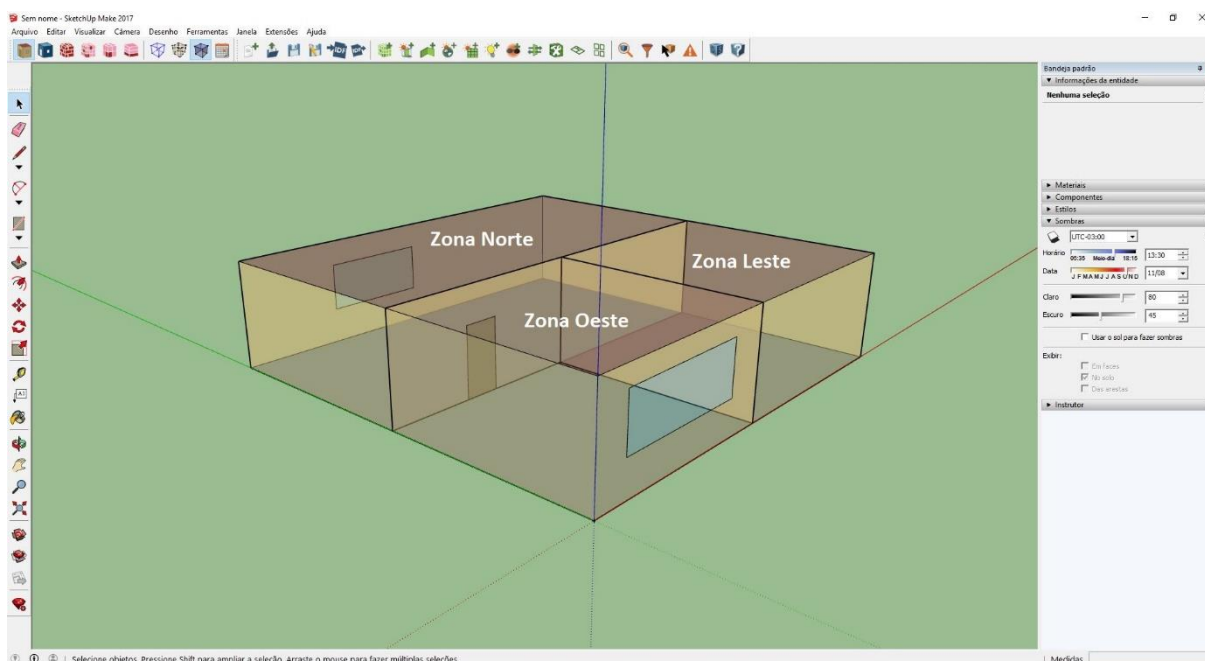


Figura 5.1 – Modelo tridimensional em raio X com os nomes das zonas térmicas

O modelo tem dimensões de 12,2 m x 12,2 m x 3,05 m, sendo que a zona Norte ocupa metade da área construída, e as outras zonas ocupam um quarto da área construída. Em sua orientação original, uma das janelas está exposta ao ambiente externo na direção norte e a outra na direção sul. Uma porta interna comunica as duas zonas com janelas, a Zona Norte e a Zona Oeste. A Zona Leste fica isolada das outras zonas em relação à ventilação natural. Esse caso simples simula um pequeno escritório, de forma que os ambientes só são ocupados em dias de semana, às 7:00 os ocupantes chegam nas zonas, e

desocupam os ambientes às 18:00. A Zona Norte tem uma ocupação máxima de 4 pessoas, enquanto as Zonas Oeste e Leste tem uma ocupação máxima de 3 pessoas.

A localização considerada para esse pequeno edifício com escritórios será a mesma do estudo de caso principal. Dessa forma, o arquivo climático utilizado para a simulação será o INMET 2016 de Brasília. O passo de tempo utilizado nessa simulação mais simples foi de 1/6 de hora, ou 10 minutos.

5.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Depois de definidos geometria, aspectos construtivos, e aspectos de ocupação, duas 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 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.

Outras duas simulações foram realizadas a fim de verificar a influência da direção do vento. Sabendo que Brasília tem uma predominância de direção de ventos bem definida, o modelo simples de escritório teve sua orientação modificada duas vezes, de forma a privilegiar a ventilação em determinadas zonas e ver seus efeitos sobre o edifício. A simulação em sua orientação original, onde a janela da Zona Norte está apontada para o Norte, foi chamada de Orientação Norte. A terceira simulação foi realizada girando o edifício 90° no sentido horário, de forma que a janela da Zona Norte passou a apontar para o Leste e foi chamada de Orientação Leste, privilegiando assim a incidência direta do vento predominante na janela da Zona Norte. A quarta e última simulação foi realizada girando o edifício 90° no sentido anti-horário, de forma que a janela da Zona Norte passou a apontar para o Oeste e foi chamada de Orientação Oeste, privilegiando assim a incidência direta do vento predominante na janela da Zona Oeste.

Para efeitos de comparação, mais de um critério de conforto térmico foi utilizado. O método de conforto adaptativo da ASHRAE 55 foi utilizado levando em consideração seus dois critérios de aceitabilidade, os limites de 80% e 90%. Além do método de conforto adaptativo, foi utilizado o critério de Fanger de voto médio previsto (PMV), onde a faixa de conforto compreende de -0,5 a 0,5. Para analisar o conforto térmico só foram levadas em consideração as horas em que os ambientes estavam ocupados.

A Figura 5.2 traz o número de horas de desconforto térmico totais em 1 ano para cada um dos ambientes mostrados na Figura 5.1, a partir do critério de Fanger de voto médio previsto, ou seja, o número de horas em que o PMV seria menor que -0,5 ou maior que 0,5. As Figuras 5.3 e 5.4 mostram o número de horas de desconforto térmico totais em 1 ano para cada um dos ambientes do edifício, a partir do critério de conforto adaptativo. A Figura 5.3 utiliza o modelo adaptativo com limite de 90% de aceitabilidade e a Figura 5.4

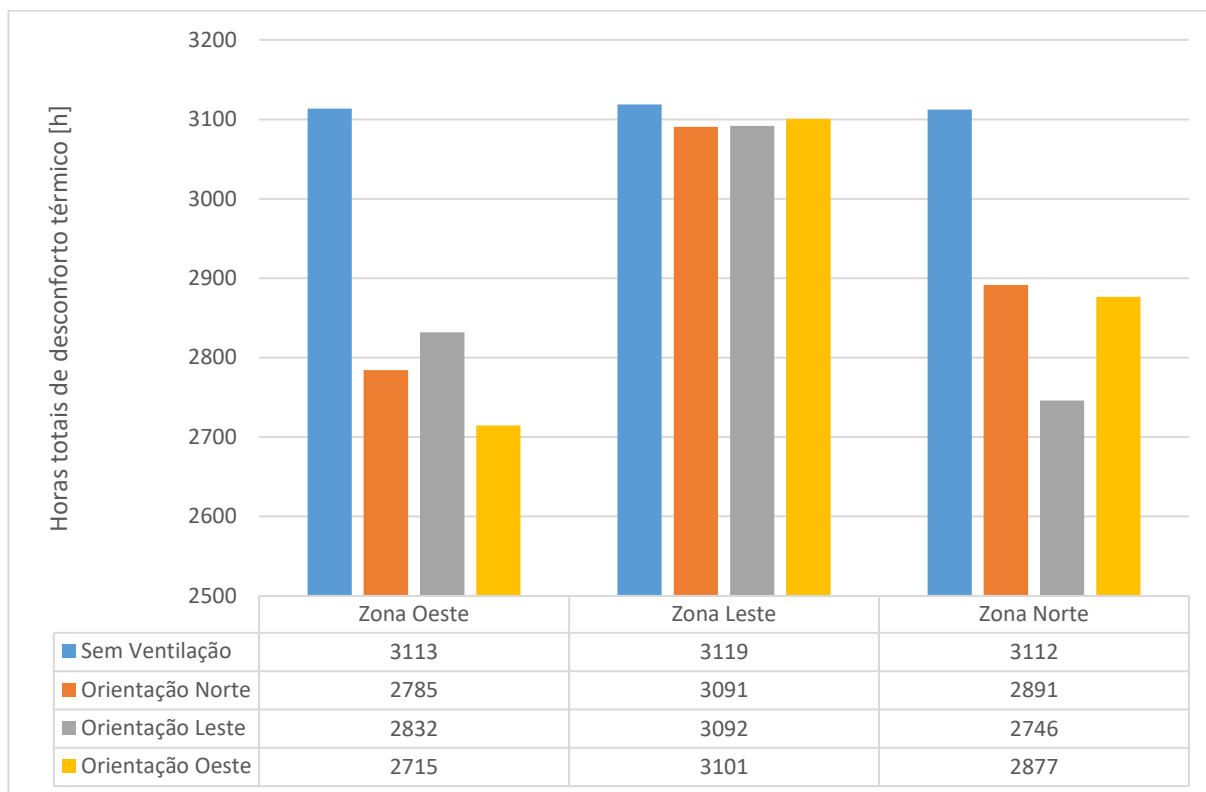


Figura 5.2 – Horas totais de desconforto térmico a partir do critério de PMV

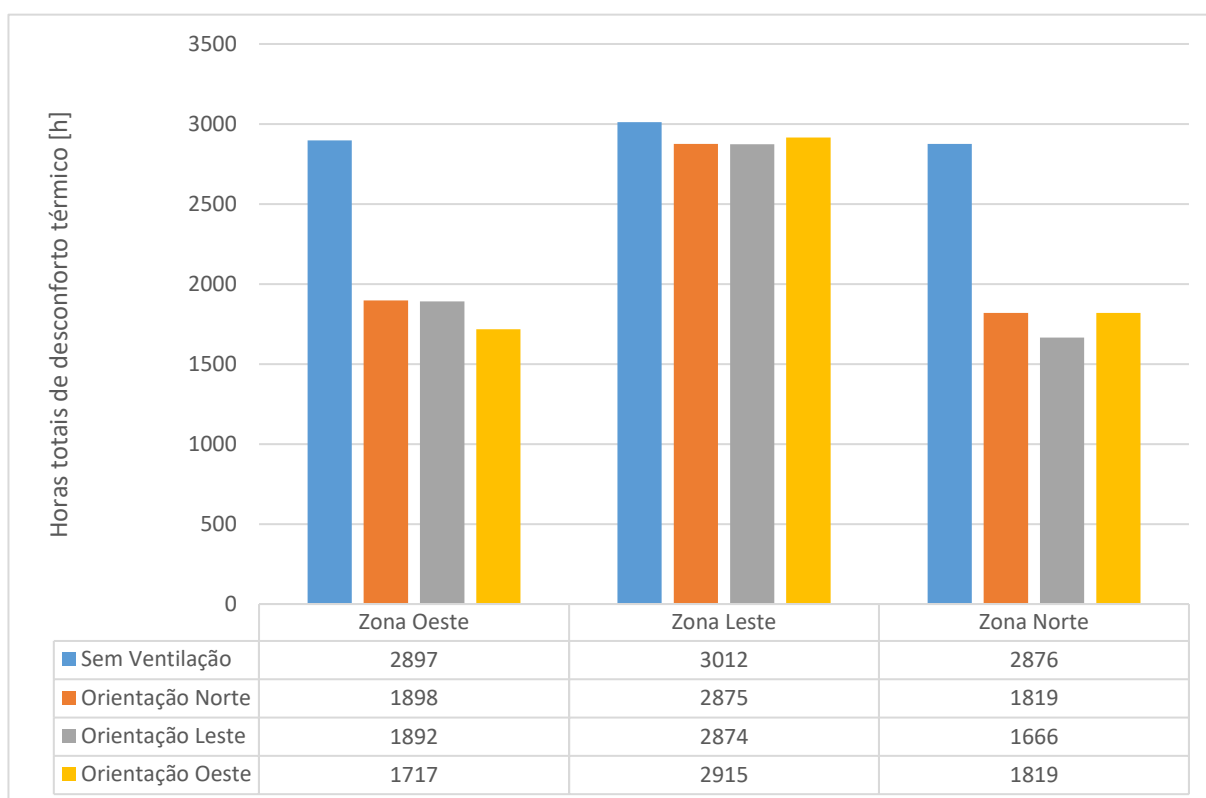


Figura 5.3 – Horas totais de desconforto térmico a partir do critério adaptativo com aceitabilidade de 90%

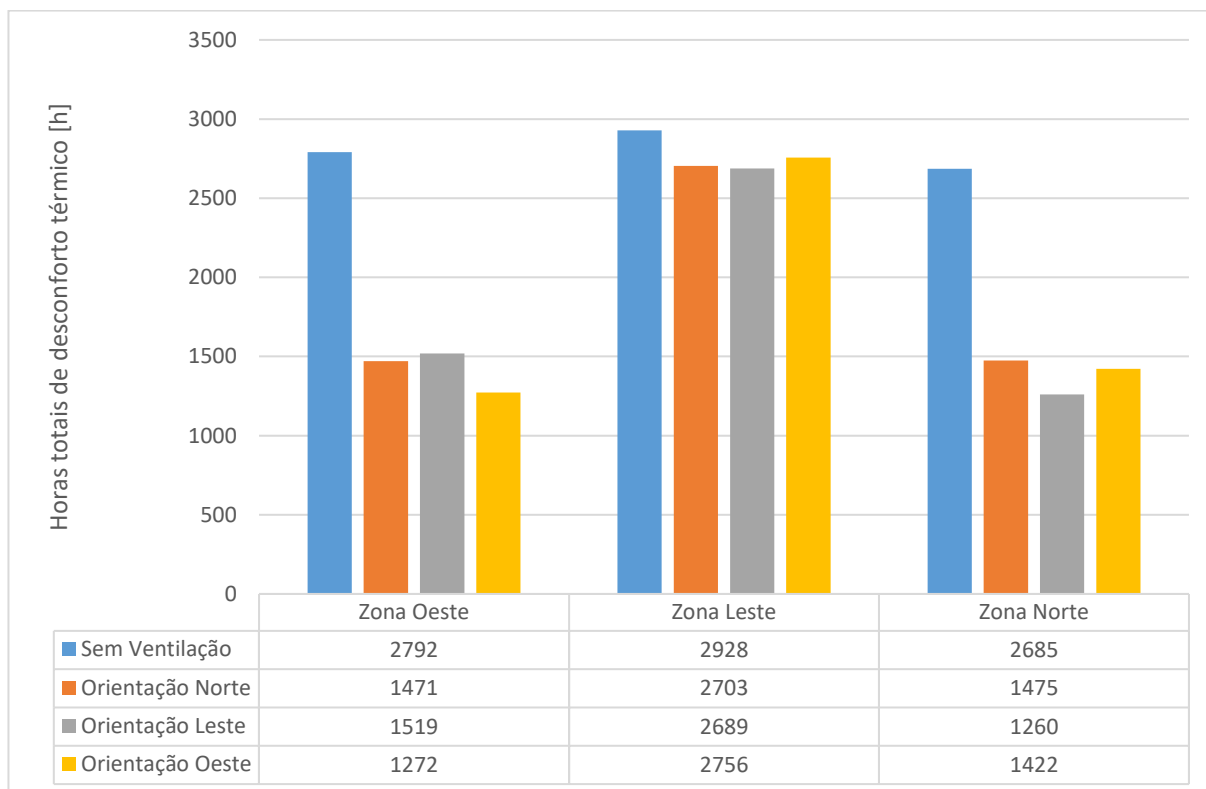


Figura 5.4 – Horas totais de desconforto térmico a partir do critério adaptativo com aceitabilidade de 80%

Utilizando o conforto adaptativo como principal critério de conforto térmico desse trabalho, podemos criar uma relação entre o total de horas ocupadas e o total de horas desconfortáveis termicamente em cada ambiente, para cada orientação. A Tabela 5.1 apresenta percentualmente quantas horas são desconfortáveis termicamente para cada ambiente.

Tabela 5.1. Total de horas desconfortáveis termicamente a partir da ASHRAE 55 com aceitabilidade de 80% em relação às horas totais ocupadas para o caso simples.

Zonas	Horas ocupadas	Sem Ventilação		Orientação Norte		Orientação Leste		Orientação Oeste	
		Horas	%	Horas	%	Horas	%	Horas	%
Zona Oeste	3120	2791,67	89,48	1470,5	47,13	1519,33	48,70	1272	40,77
Zona Leste	3120	2928,33	93,86	2703,17	86,64	2688,5	86,17	2756,33	88,34
Zona Norte	3120	2684,83	86,05	1475,17	47,28	1260,33	40,40	1422	45,58

As Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 facilitam a visualização da diferença entre os cenários simulados e apresenta graficamente o total de horas de desconforto térmico em cada uma das simulações.

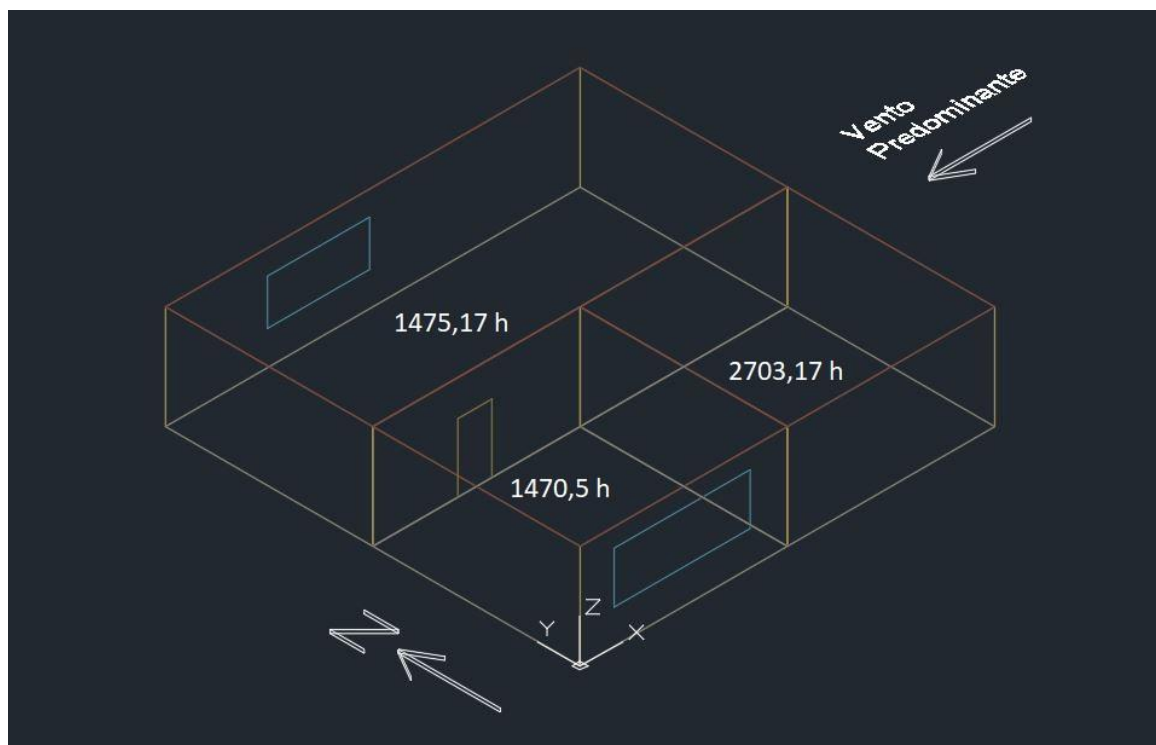


Figura 5.5 – Horas totais de desconforto térmico para o caso simples na Orientação Norte

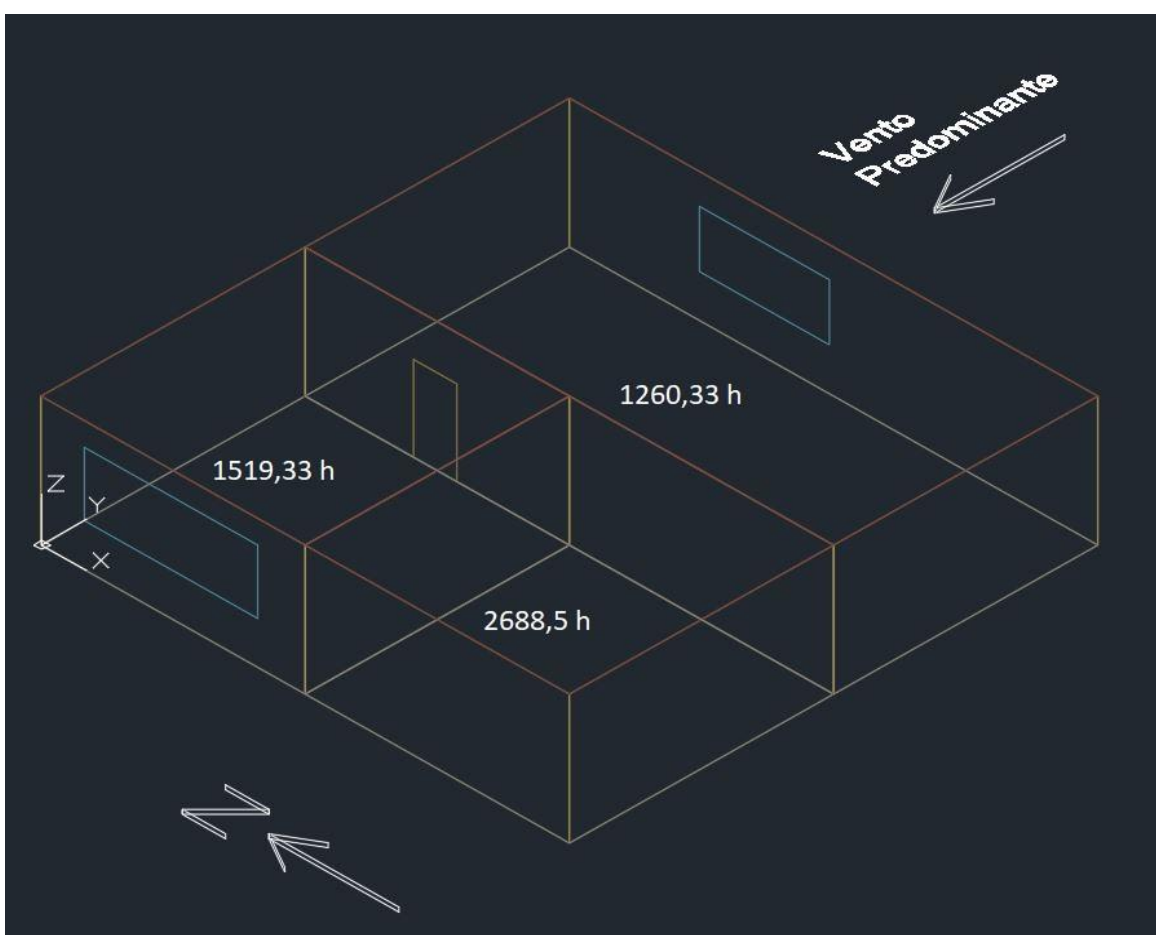


Figura 5.6 – Horas totais de desconforto térmico para o caso simples na Orientação Leste

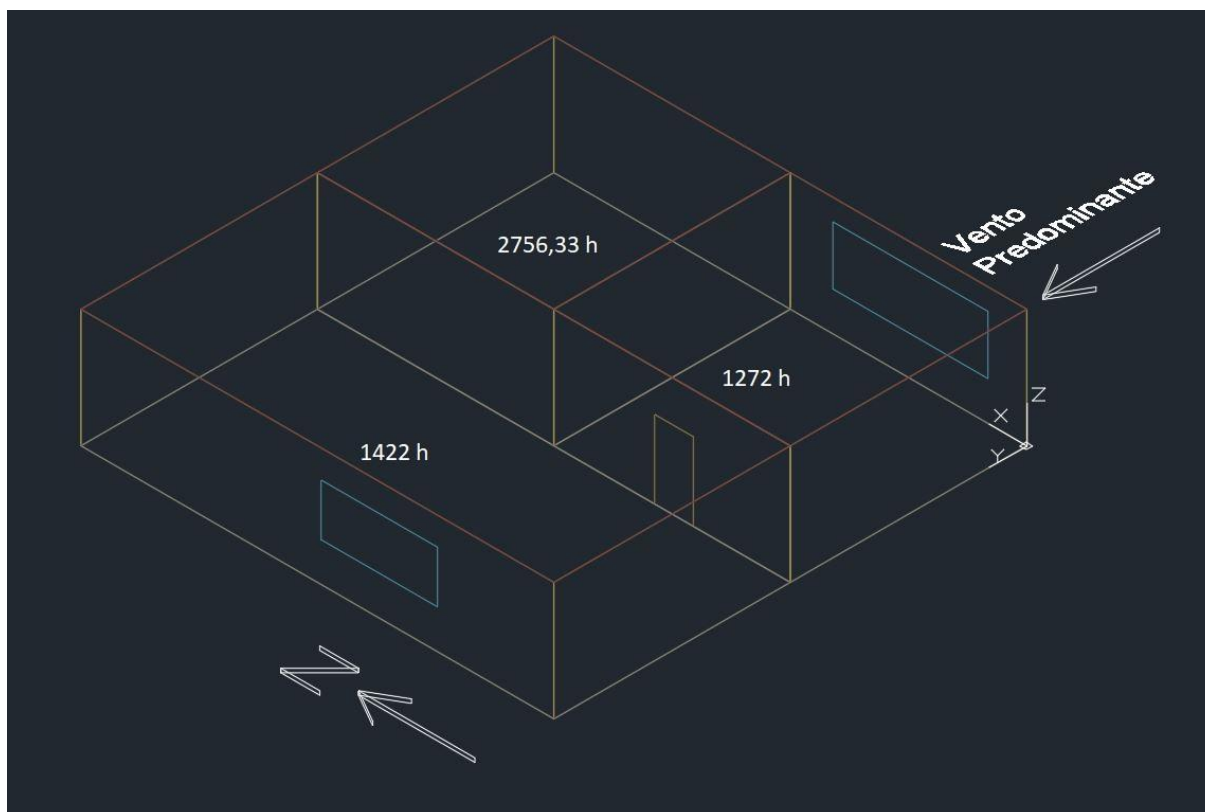


Figura 5.7 – Horas totais de desconforto térmico para o caso simples na Orientação Oeste

5.3 ANÁLISE DE RESULTADOS

As simulações do caso simples foram importantes para a familiarização com o modelo de ventilação natural do *Energy Plus*, o *Airflow Network*. Além disso, foi possível ver a diferença entre uma simulação termoenergética que não considera os efeitos de ventilação natural de outra, um pouco mais complexa, mas que leva em consideração essa climatização passiva.

A configuração do edifício considerado no caso simples facilita a visualização da importância da análise da ventilação natural, já que duas zonas térmicas se comunicam entre si com uma porta interna, e com o ambiente externo a partir de uma janela cada. A outra zona térmica é praticamente isolada da influência dos ventos, já que não se comunica com as outras zonas, nem com o ambiente externo a partir de aberturas. Essa diferença de configuração das zonas se reflete na simulação, e isso fica claro ao comparar o número de horas totais de desconforto na simulação Sem Ventilação e na Orientação Norte. A Zona Oeste e a Zona Norte, zonas com janelas e comunicáveis entre si, apresentam uma diferença bem significativa entre os resultados das duas primeiras simulações, com uma redução de 89% das horas ocupadas para 47% para a Zona Oeste, e de 86% para 47% para a Zona Norte. Já a Zona Leste, que não apresenta janelas nem portas, apresentou uma redução bem pequena do total de horas desconfortáveis, apenas de 94% para 87% das horas ocupadas.

As três últimas simulações, Orientação Norte, Orientação Leste e Orientação Oeste, possibilitaram demonstrar a influência da direção do vento no conforto do edifício. Mostra também a importância da

escolha dos locais das aberturas do edifício baseadas na direção predominante do vento, já que nas simulações variando a orientação do edifício houve uma forte dependência do ambiente mais privilegiado em relação ao conforto térmico, a direção de sua janela com o ambiente externo e a direção predominante do vento. A segunda simulação, a Orientação Norte, não favorece nenhuma das duas janelas do edifício, o que não impede a ventilação cruzada nos escritórios, mas que também não privilegia nenhuma das duas zonas térmicas que se comunicam com o ambiente externo, por isso foi tomada como referência.

A terceira simulação, a Orientação Leste, ao expor a janela da Zona Norte à incidência predominante de ventos, privilegia a Zona Norte em relação ao conforto térmico e isso se reflete na simulação. A Zona Norte passou de um desconforto térmico em 47% das horas totais ocupadas para 40%. A Zona Oeste teve um pequeno aumento nas horas em que o ambiente está desconfortável termicamente, passando de 47 % para 49% do total de horas ocupadas. A Zona Leste teve uma diferença bastante pequena em suas horas de conforto térmico, e que pouca relação tem com a nova direção da incidência predominante dos ventos. A quarta simulação, a Orientação Oeste, ao expor a janela da Zona Oeste à incidência predominante dos ventos, privilegia a Zona Oeste em relação ao conforto térmico. A Zona Oeste passou de um desconforto térmico em 47% das horas totais ocupadas na simulação de referência para 41% na Orientação Oeste. A Zona Norte teve uma pequena diminuição das horas de desconforto, passando de 47% para 46% das horas totais ocupadas. A Zona Leste novamente apresentou uma variação muito baixa nas suas horas de desconforto, e que pouco se relacionam com a nova incidência predominante de ventos.

A partir das quatro simulações foi possível também comparar dois diferentes métodos de avaliação do conforto térmico, o método de Fanger, muito utilizado em ambientes climatizados, e o método de conforto adaptativo, apropriado para edifícios naturalmente ventilados. Com os resultados foi possível concluir que o método de voto médio previsto é o mais rígido, apresentando muito mais horas de desconforto térmico que o outro método. Já o método de conforto adaptativo leva em consideração o comportamento dos ocupantes em ambientes não climatizados, já que eles podem mudar suas vestimentas para se sentirem mais confortáveis de acordo com as condições climáticas externas, de forma que uma situação não confortável em um ambiente climatizado pode ser aceitável em um ambiente naturalmente ventilado. O método do conforto adaptativo AHSRAE 55 foi avaliado ainda, segundo dois limites de aceitabilidade diferentes, sendo o limite de 90% mais criterioso e utilizado somente em casos onde é exigido um alto padrão de conforto térmico, já o limite de 80% é utilizado em aplicações comuns e é um pouco menos rígido.

6 SIMULAÇÃO TERMOENERGETICA – CASA ZERO

Este capítulo apresenta as simulações realizadas para a casa zero, apresentando as horas de desconforto térmico e acrescenta uma proposta de climatização ativa complementar à ventilação natural.

6.1 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Para simular a ventilação natural da casa zero, primeiro foi necessário modelá-la no *OpenStudio* com a ajuda do *Sketchup* para determinar a geometria do edifício, a partir das plantas disponíveis em Sudbrack (2017). As Figura 6.1 e 6.2 apresentam o modelo construtivo da casa zero utilizado para a simulação termoenergética da casa zero.

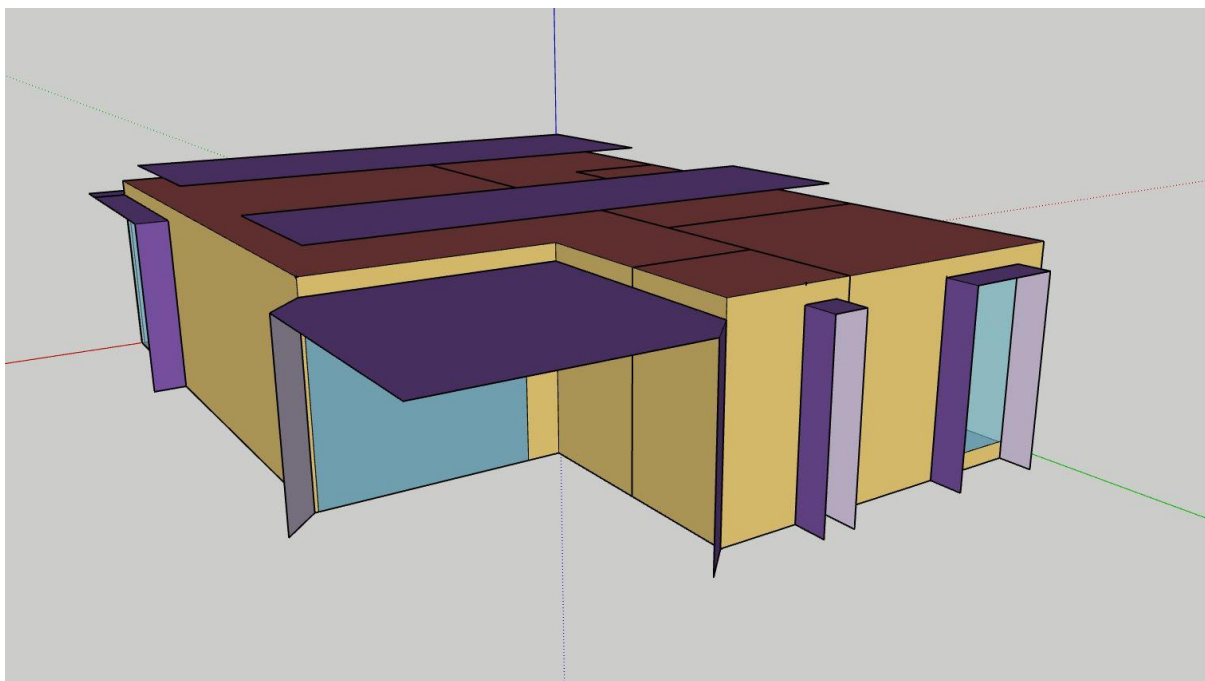


Figura 6.1 – Modelo tridimensional da casa zero produzido para o *OpenStudio*

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 apresentados no Capítulo 4 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*.

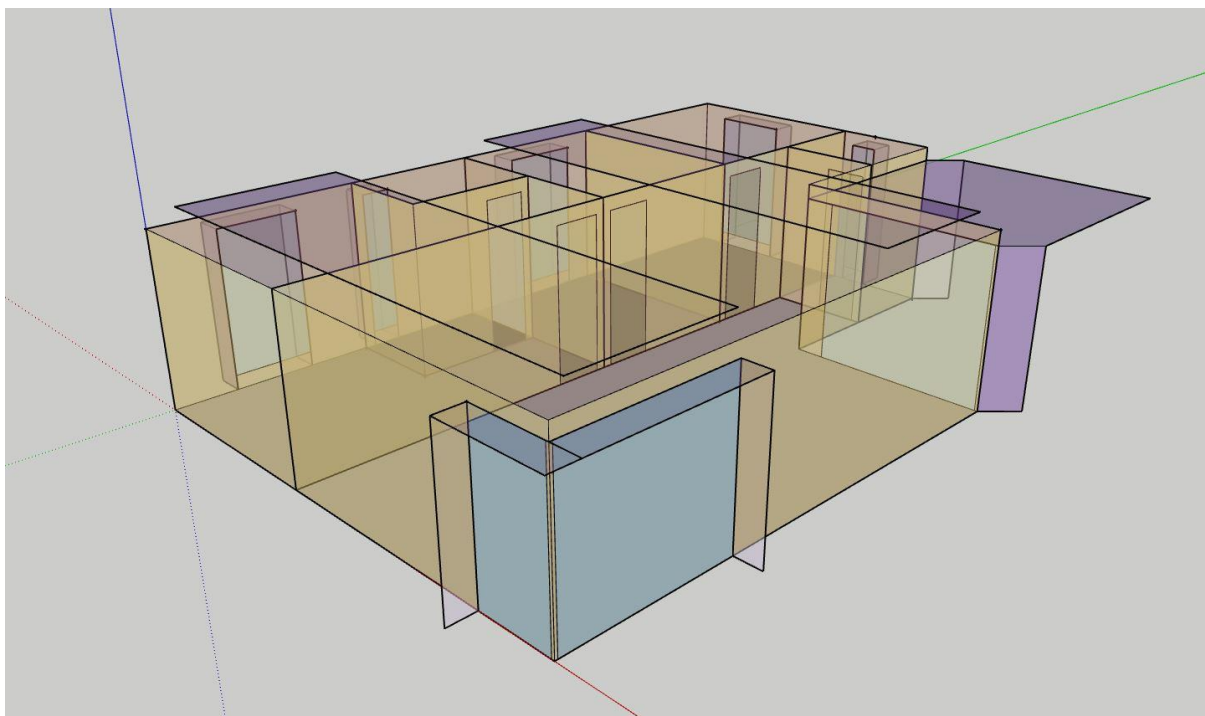


Figura 6.2 – Modelo tridimensional da casa zero em raio X

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%.

6.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

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 é constante, de forma que todas as janelas e portas estão abertas durante todo o dia, 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 (linha central da Figura 2.4), 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 Campos do Jordão, Cuiabá, Curitiba, Foz do Iguaçu, Porto Alegre, Rio Branco, Rio de Janeiro (Niterói), Salvador e São Luís. Todos os arquivos climáticos utilizados foram os do INMET 2016. Pelo 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 6.3 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.

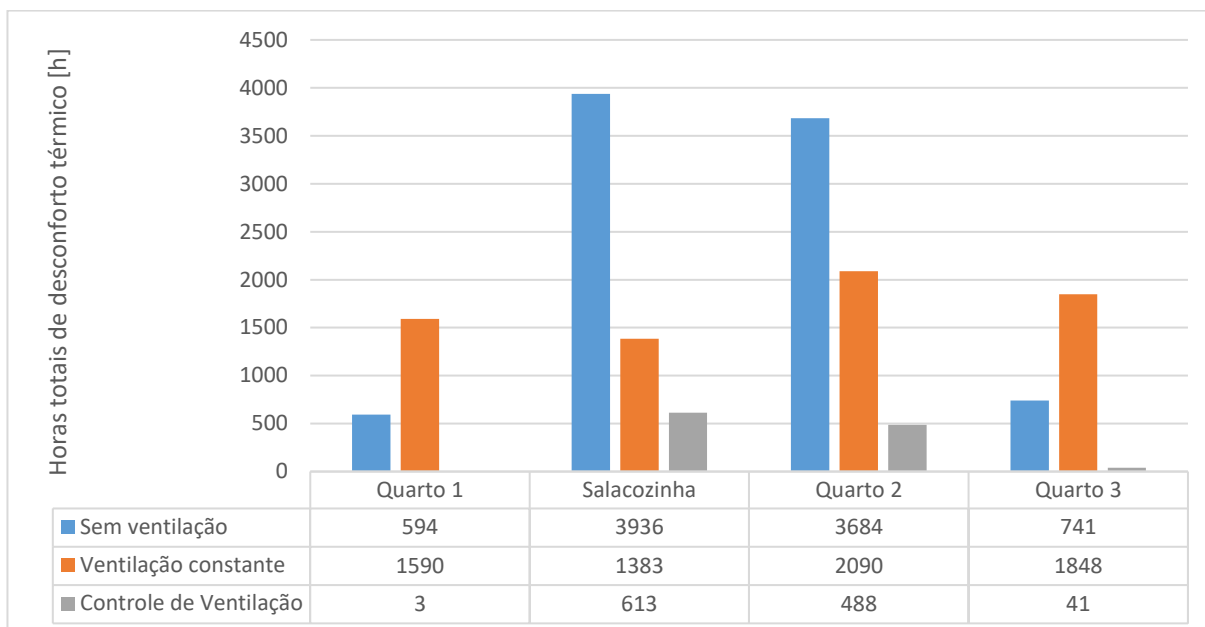


Figura 6.3 – Horas totais de desconforto térmico para as simulações com alteração no controle de ventilação

As Figuras 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7 apresentam graficamente como são determinadas as horas totais de desconforto térmico para cada um dos ambientes da terceira simulação, a simulação com ventilação controlada. As horas que não se encaixam dentro dos limites de aceitabilidade são contabilizadas como horas de desconforto térmico. Para facilitar a visualização, cada uma das figuras apresentam as horas ocupadas de um dos ambientes da casa zero.

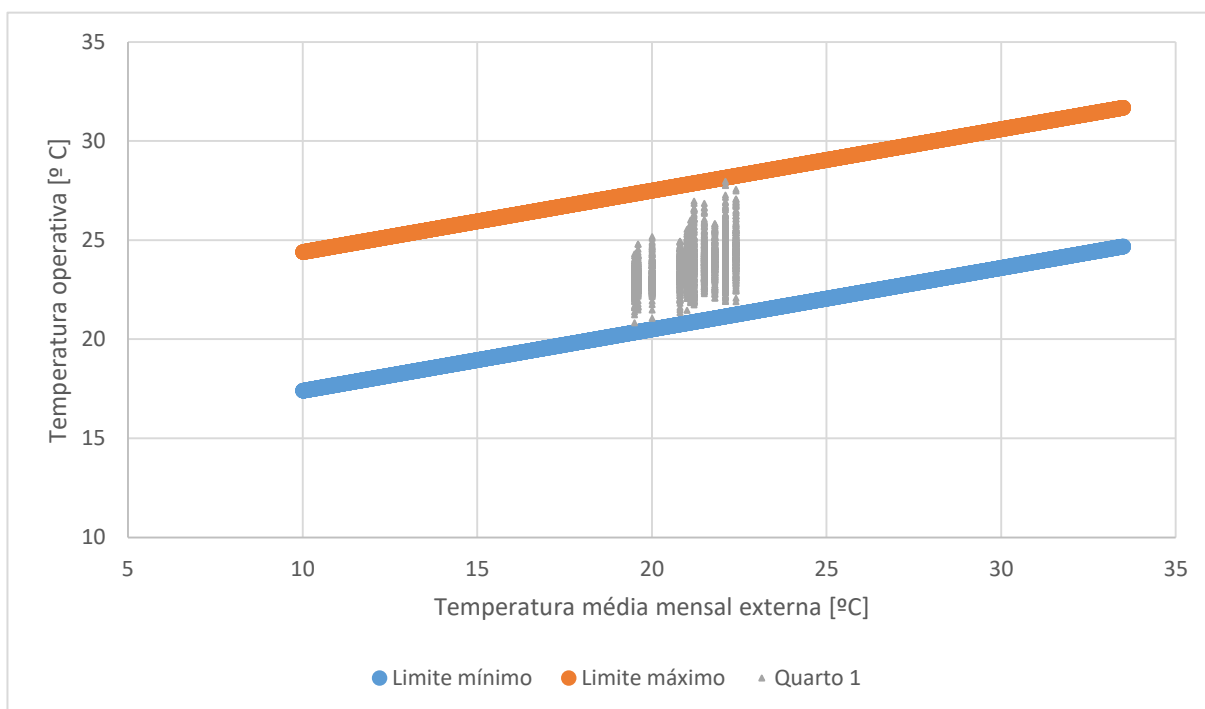


Figura 6.4 – Temperaturas operativas para o quarto 1 na simulação com ventilação controlada

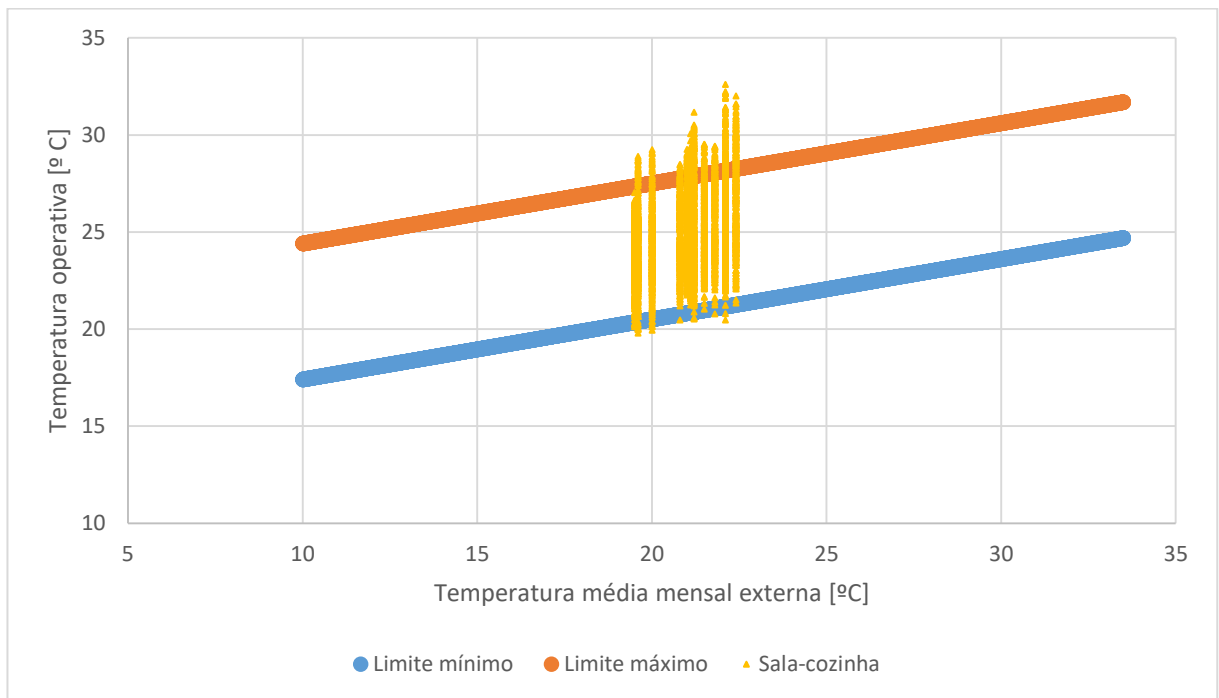


Figura 6.5 – Temperaturas operativas para a sala-cozinha na simulação com ventilação controlada

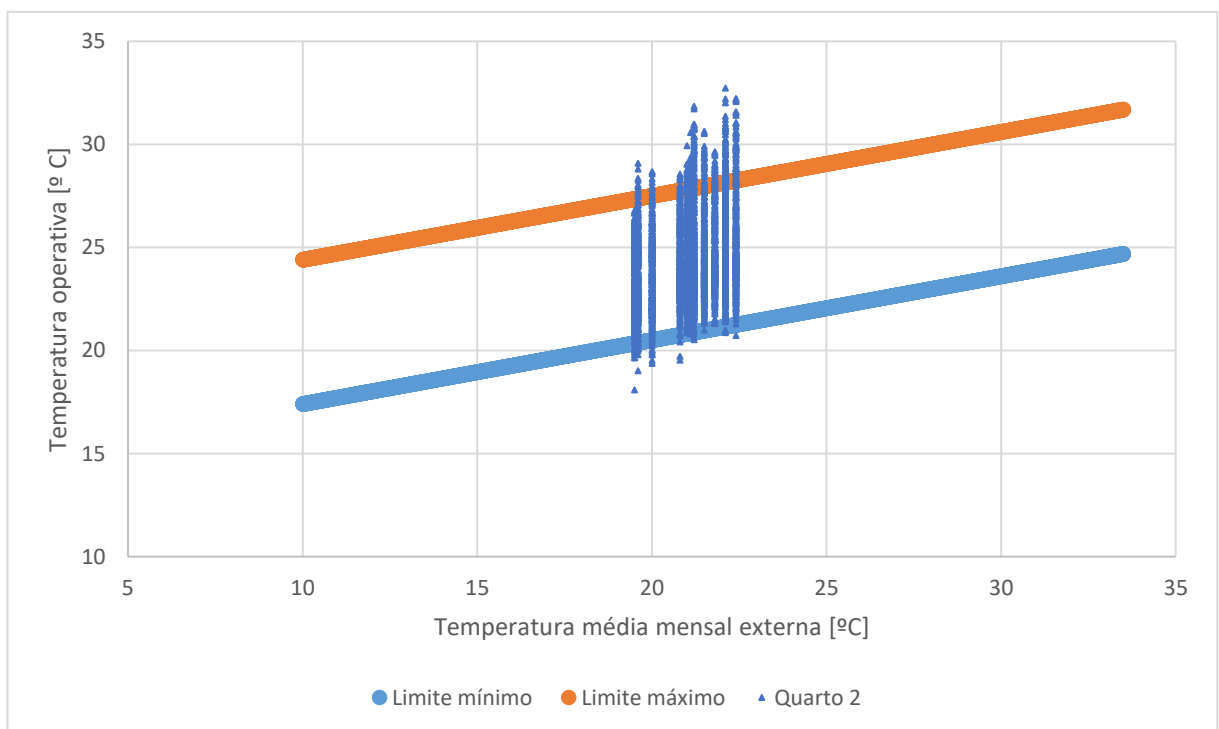


Figura 6.6 – Temperaturas operativas para o quarto 2 na simulação com ventilação controlada

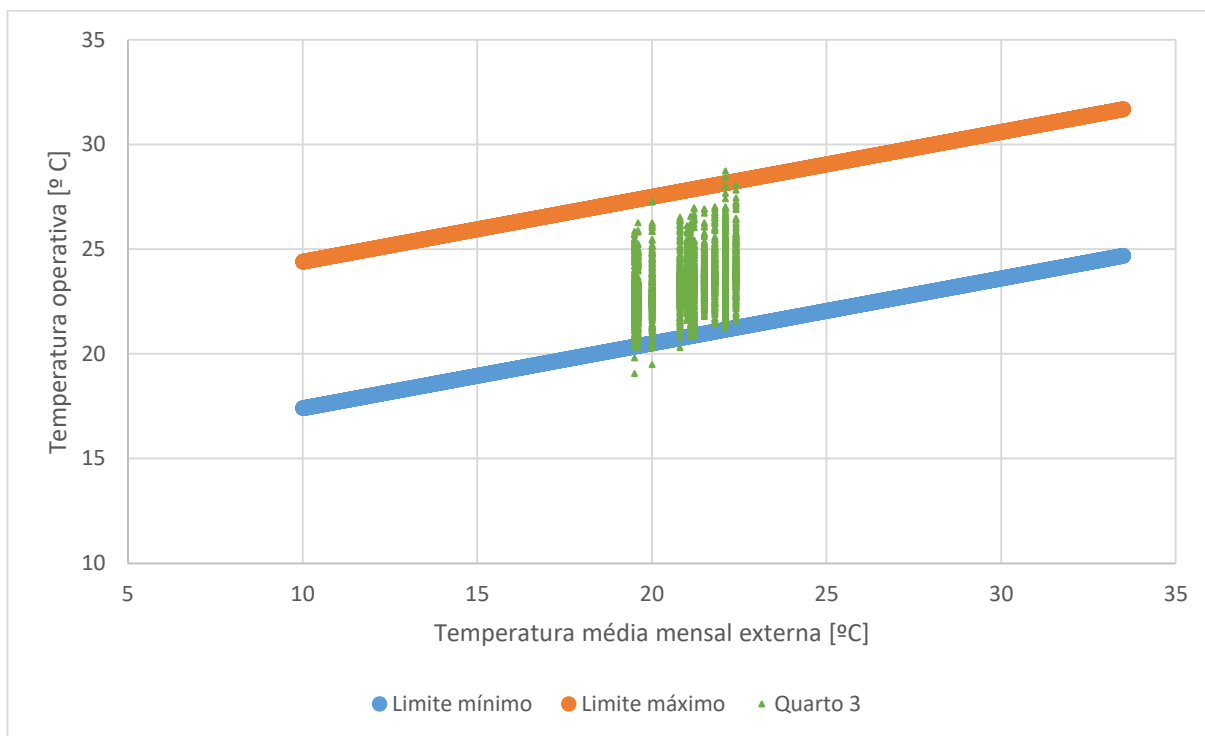


Figura 6.7 – Temperaturas operativas para o quarto 3 na simulação com ventilação controlada

A Figura 6.8 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°.

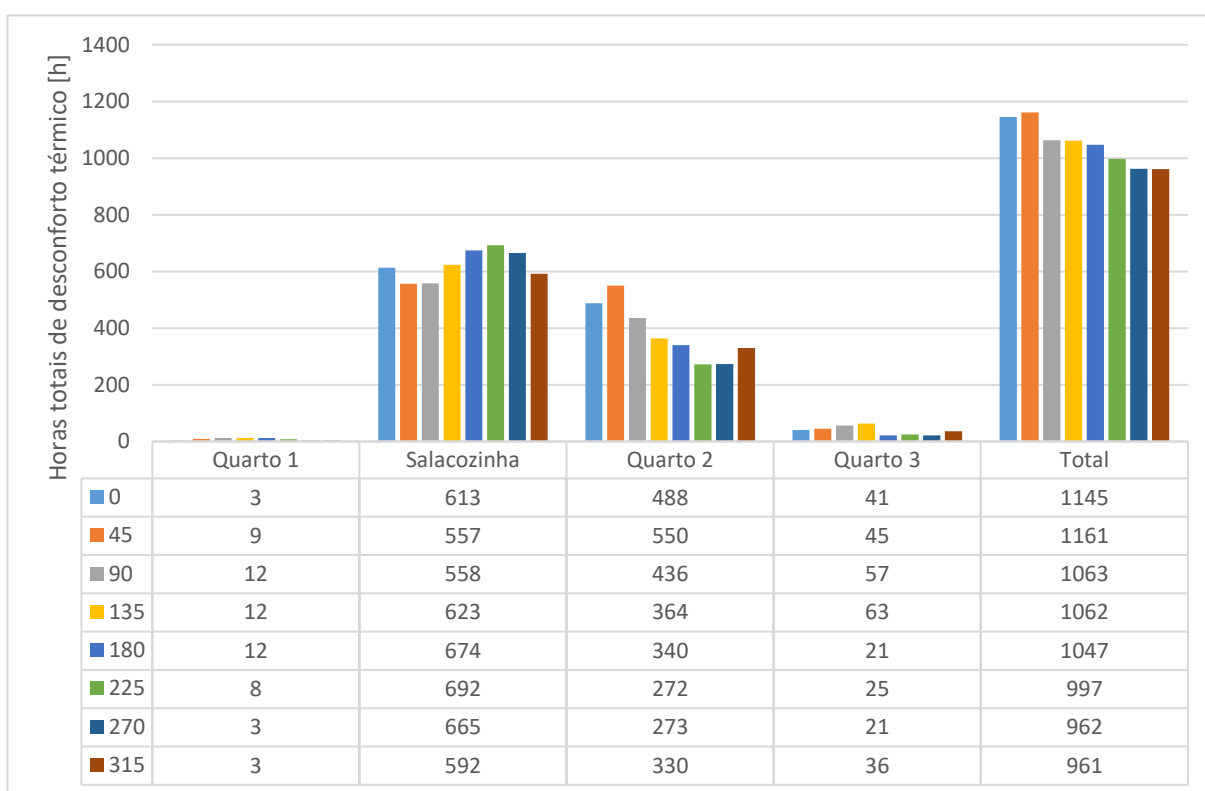


Figura 6.8 – Horas totais de desconforto térmico para as simulações com alteração na orientação

A Figura 6.9 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.

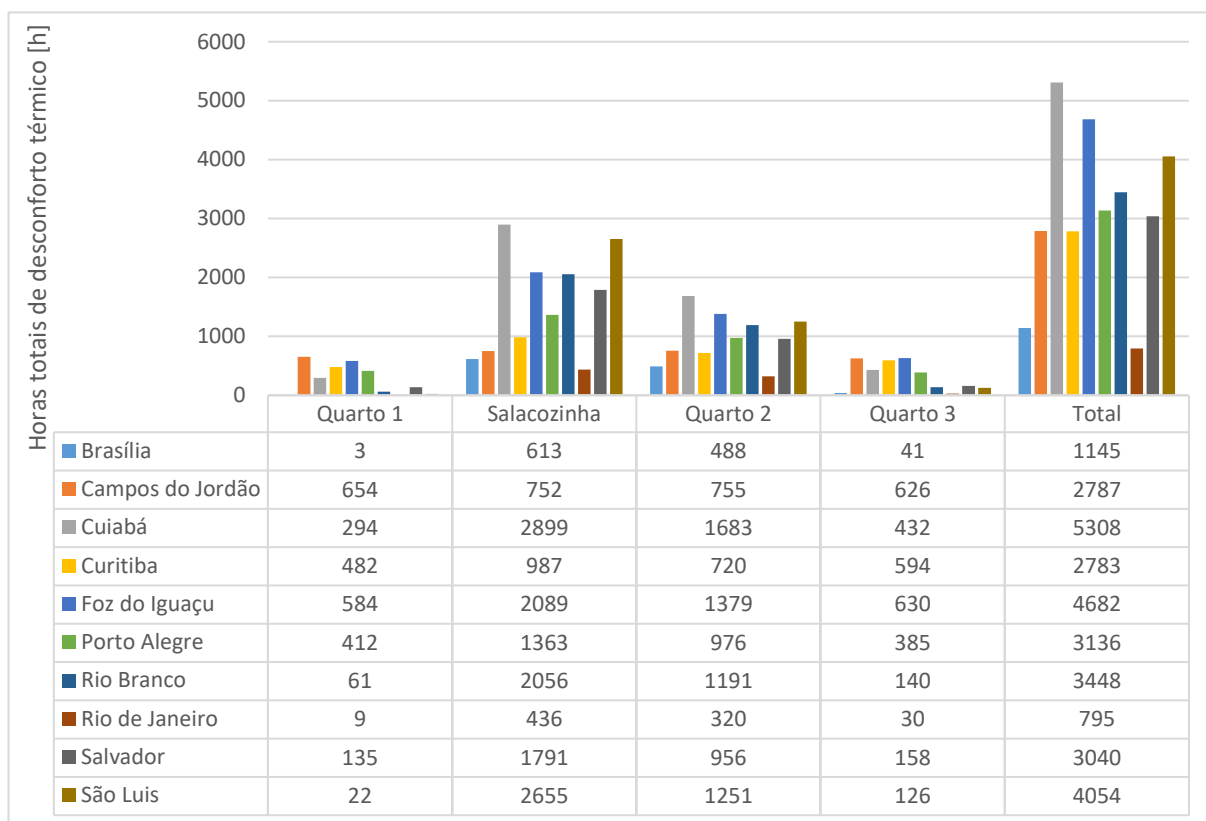


Figura 6.9 – Horas totais de desconforto térmico para as simulações com alteração na localização

A Tabela 6.1 apresenta percentualmente o número de horas desconfortáveis em relação às horas ocupadas para cada um dos ambientes. A tabela apresenta todas as simulações realizadas para a casa zero, agrupando as que avaliam os mesmos parâmetros. As primeiras comparam o controle de ventilação, seguidas das que comparam a orientação, e finalmente as que comparam localização.

Tabela 6.1. Total de horas desconfortáveis termicamente a partir da ASHRAE 55 com aceitabilidade de 80% em relação às horas totais ocupadas para a casa zero.

Zonas	Quarto 1		Sala-cozinha		Quarto 2		Quarto 3	
Horas ocupadas	3285		5840		5475		3650	
Sem ventilação	594	18,08%	3936	67,40%	3684	67,29%	741	20,30%
Ventilação constante	1590	48,40%	1383	23,68%	2090	38,17%	1848	50,63%
Ventilação controlada	3	0,09%	613	10,50%	488	8,91%	41	1,12%
0°	3	0,09%	613	10,50%	488	8,91%	41	1,12%
45°	9	0,27%	557	9,54%	550	10,05%	45	1,23%
90°	12	0,37%	558	9,55%	436	7,96%	57	1,56%
135°	12	0,37%	623	10,67%	364	6,65%	63	1,73%
180°	12	0,37%	674	11,54%	340	6,21%	21	0,58%
225°	8	0,24%	692	11,85%	272	4,97%	25	0,68%
270°	3	0,09%	665	11,39%	273	4,99%	21	0,58%
315°	3	0,09%	592	10,14%	330	6,03%	36	0,99%
Brasília	3	0,09%	613	10,50%	488	8,91%	41	1,12%
Campos do Jordão	654	19,91%	752	12,88%	755	13,79%	626	17,15%
Cuiabá	294	8,95%	2899	49,64%	1683	30,74%	432	11,84%
Curitiba	482	14,67%	987	16,90%	720	13,15%	594	16,27%
Foz do Iguaçu	584	17,78%	2089	35,77%	1379	25,19%	630	17,26%
Porto Alegre	412	12,54%	1363	23,34%	976	17,83%	385	10,55%
Rio Branco	61	1,86%	2056	35,21%	1191	21,75%	140	3,84%
Rio de Janeiro	9	0,27%	436	7,47%	320	5,84%	30	0,82%
Salvador	135	4,11%	1791	30,67%	956	17,46%	158	4,33%
São Luís	22	0,67%	2655	45,46%	1251	22,85%	126	3,45%

6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A primeira simulação, onde a casa zero não é ventilada, ou seja, está todas as horas do ano com suas janelas e portas fechadas, tem condições muito precárias de conforto térmico para dois ambientes, a sala-cozinha e o quarto 2, ambos com mais de 67% do tempo ocupado desconfortável termicamente. A segunda simulação, que implementa a ventilação natural, porém não a controla, de forma que as janelas e portas estão abertas todas as horas do ano, consegue atenuar o desconforto térmico das zonas mais prejudicadas na primeira simulação. A sala-cozinha passou de 67% de horas desconfortáveis para 24% e o quarto 2 de 67% para 38%. Já o quarto 1 passou de 18% para 48% e o quarto 3 de 20% para 51% de desconforto nas horas ocupadas. Esses resultados indicam que a ventilação constante atenuou o desconforto térmico causado pelo calor na sala-cozinha e no quarto 2, porém começou a causar um desconforto térmico por frio nos quartos 1 e 3, já que os mesmos são ocupados apenas no período noturno. As Figuras 6.10 e 6.11 apresentam as temperaturas operativas da simulação sem ventilação e com ventilação natural, respectivamente, juntamente com os limites de aceitabilidade do conforto adaptativo, e com elas é possível perceber que a primeira apresenta apenas desconforto por calor enquanto a segunda diminuiu a quantidade de horas desconfortáveis por calor mas introduziu o desconforto térmico por frio.

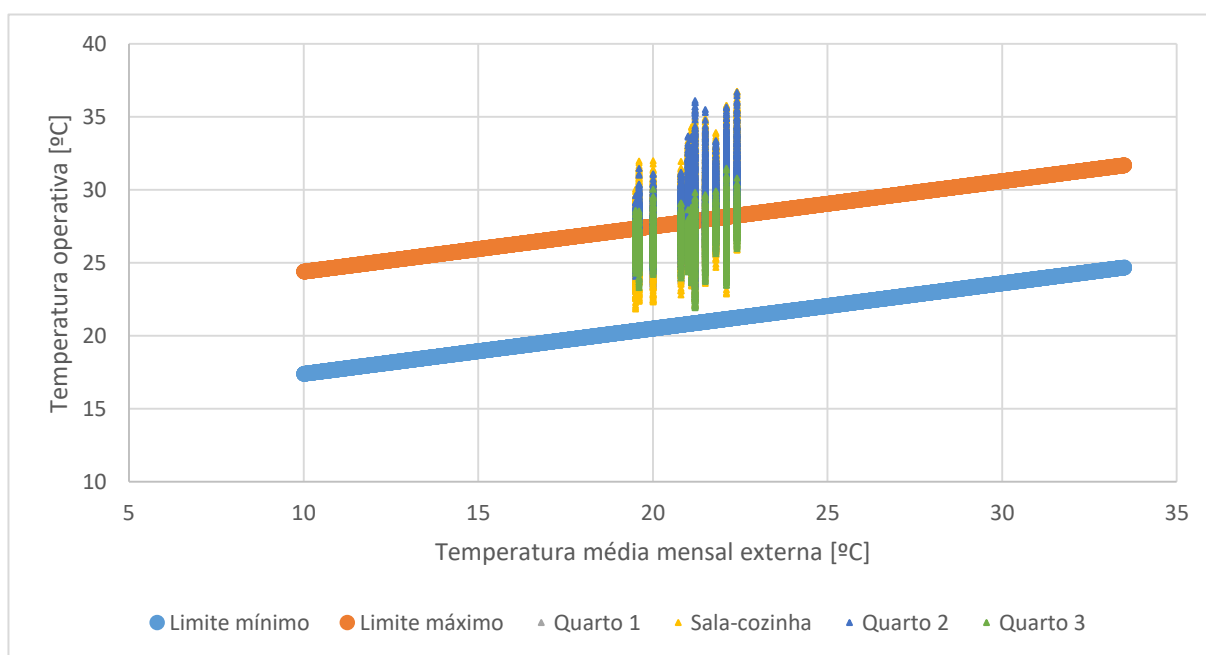


Figura 6.10 – Temperaturas operativas para a casa zero na simulação sem ventilação

A terceira simulação, além de implementar a ventilação natural, adota um controle de aberturas que evita o desconforto térmico causado pelo frio. Isso possibilitou a essa simulação obter valores muito bons de conforto térmico em relação às anteriores. A sala-cozinha passou de 67% para 11%, o quarto 2 de 67% para 9%, o quarto 3 de 20% para 1%, e o quarto 1 passou de 18% de horas desconfortáveis para 0% do total de horas ocupadas. O quarto 1 com a ventilação controlada passou a ser uma zona que praticamente não tem necessidade de ser climatizada ativamente.

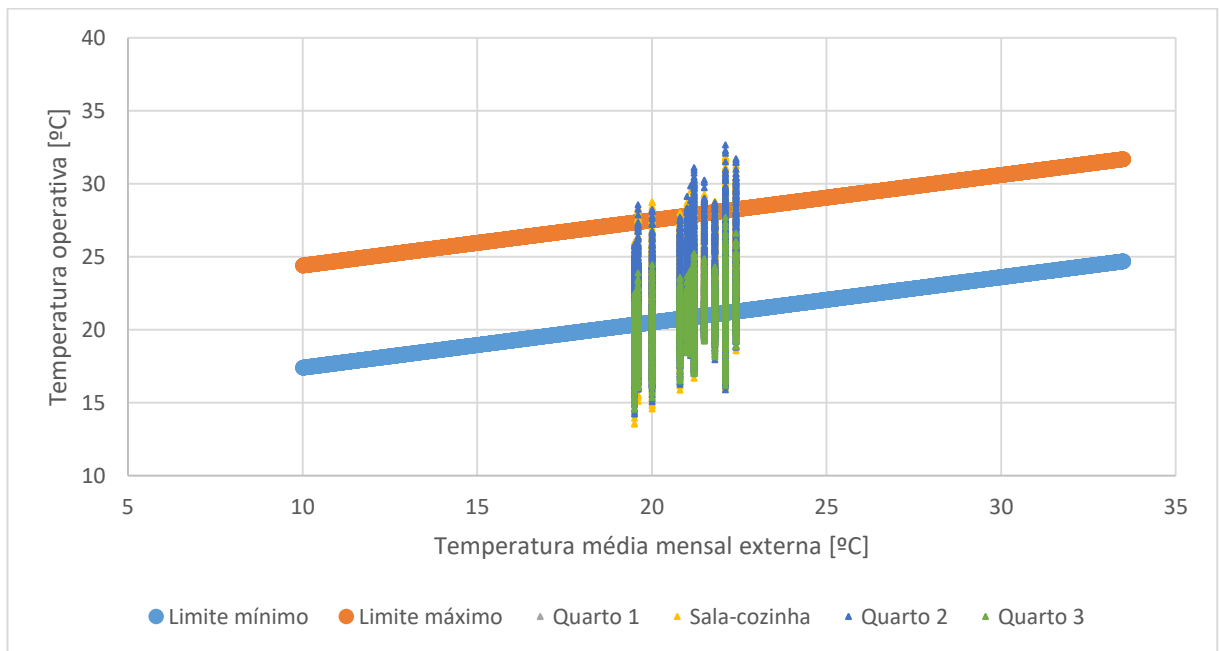


Figura 6.11 – Temperaturas operativas para a casa zero na simulação com ventilação constante

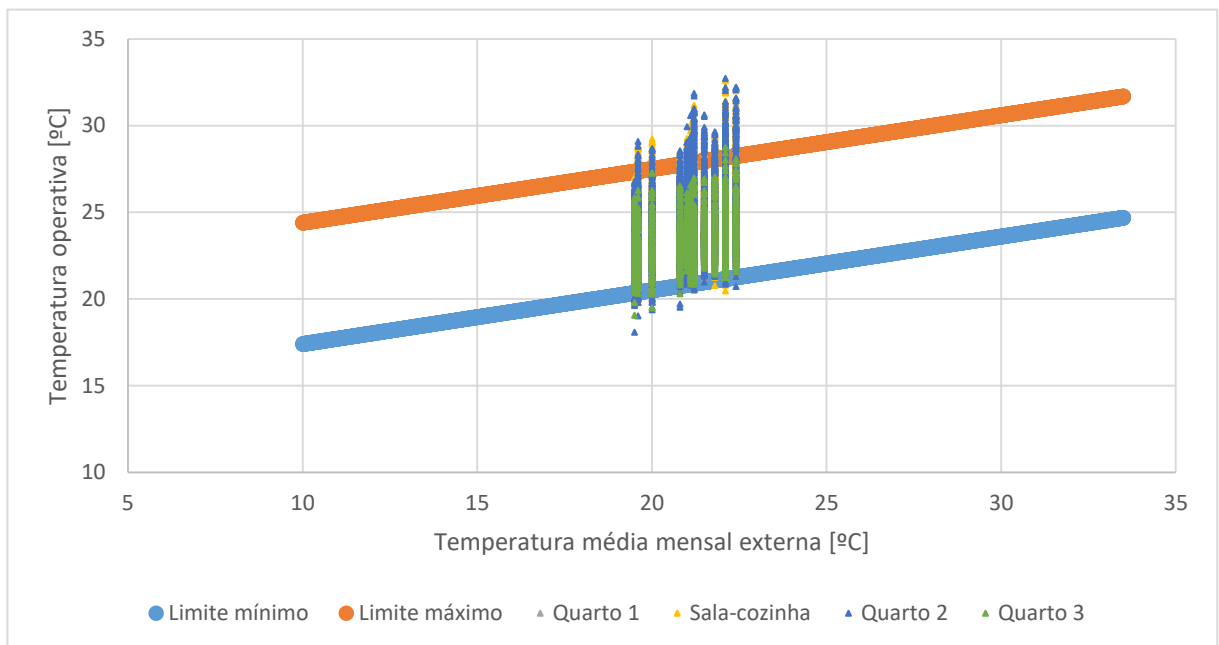


Figura 6.12 – Temperaturas operativas para a casa zero na simulação com ventilação controlada

É importante salientar que a simulação com ventilação controlada leva em consideração que os ocupantes são responsáveis por fechar as janelas e portas antes até da condição de frio, e que as janelas e portas estarão abertas sempre que essa condição de temperatura operativa abaixo da temperatura de conforto não seja atendida. Em uma situação real pode ser que as pessoas não controlem tão bem as aberturas da casa, de forma que isso torna essa simulação um caso idealizado.

As simulações que avaliam a orientação da casa zero, partindo da terceira simulação como a orientação 0°, mostraram que essa orientação e a de 45° são as piores em relação ao conforto térmico, já que apresentaram os maiores valores de total de horas desconfortáveis durante o ano. O quarto 1 teve

suas melhores condições de conforto térmico em três orientações, a 0°, 270° e 315°. A sala-cozinha teve seus melhores valores de conforto térmico em 45° e 90°, provavelmente porque nessas orientações a porta de vidro da varanda e a porta de vidro pequena passaram a proporcionar uma ventilação cruzada nesse ambiente. O quarto 2 teve suas melhores condições de conforto com as orientações 225° e 270°. Já o quarto 3 teve suas melhores condições de conforto com as orientações 180°, 225° e 270°. Para essas simulações é mais difícil chegar a uma conclusão de como a orientação melhorou ou piorou o desempenho térmico de cada um dos ambientes, já que além do vento predominante passar a incidir em outras superfícies, a irradiação solar também passa a influenciar mais ou menos cada um dos ambientes para cada nova orientação. Apesar disso, é possível determinar que as melhores orientações para a construção da casa zero nesse terreno considerado são a 270° e 315°.

As simulações seguintes puderam determinar que Brasília, junto do Rio de Janeiro, são as melhores cidades dentre as avaliadas para a construção da casa zero com essas características construtivas, já que tiveram os menores valores para o total de horas desconfortáveis termicamente. Muitos fatores podem contribuir ou não para uma cidade favorecer o conforto térmico da casa zero, dentre eles os próprios materiais de construção escolhidos, já que certos materiais apresentam bom desempenho térmico em climas mais quentes e outros em climas mais frios. Em relação ao clima das cidades, o método de conforto térmico adaptativo privilegia cidades que tenham uma pequena amplitude térmica durante o ano, ou que as mudanças de temperatura média mensal aconteçam gradativamente. As zonas 4 e 5 tiveram melhores resultados para conforto térmico, enquanto as cidades nas zonas 7 e 8 apresentaram um total elevado de horas de desconforto térmico.

6.4 IMPLEMENTAÇÃO DO 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 6.13 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 6.2 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 6.3 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.

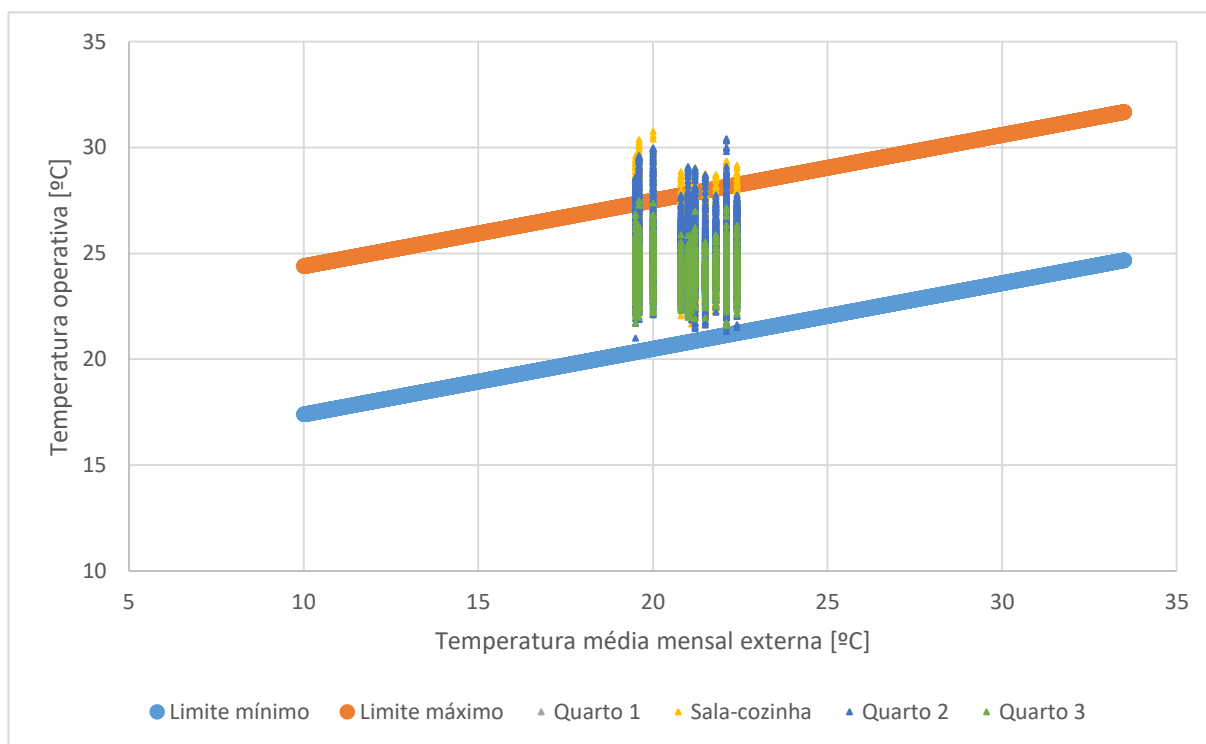


Figura 6.13 – Temperaturas operativas para a casa zero na simulação com o resfriador evaporativo

Tabela 6.2. 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 6.3. 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.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este último capítulo visa apresentar o que foi possível concluir com o projeto até então e propor as atividades a serem realizadas na continuação do projeto.

7.1 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.

7.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Futuramente, outros trabalhos podem realizar análises mais profundas em relação a localidade, verificando a viabilidade da ventilação natural em outras cidades, não só do Brasil. 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. Podem ser 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.

Outros trabalhos podem tentar desvincular o funcionamento do resfriador evaporativo ao funcionamento do ventilador, e tentar aproveitar a própria ventilação natural para empurrar o ar pelo painel evaporativo. Ou podem ser aplicadas formas mais sofisticadas de controle de cada um dos componentes do resfriador evaporativo, para que não dependam apenas de um termostato em um ambiente definido.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

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 1 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. Normais 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.

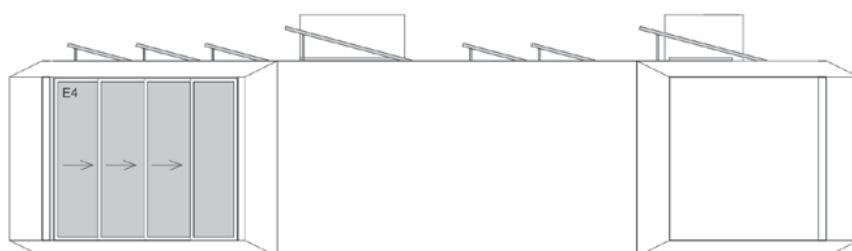
ANEXOS

	Pág.
Anexo I	
Elevações da Casa Zero	53
Anexo II	
Temperaturas Operativas e Limites de Aceitabilidade de 80% - Caso Simples	54

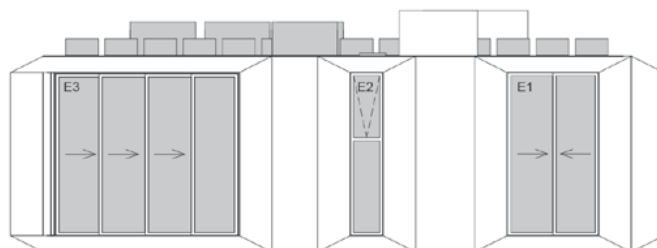
ANEXO I: Elevações da Casa Zero



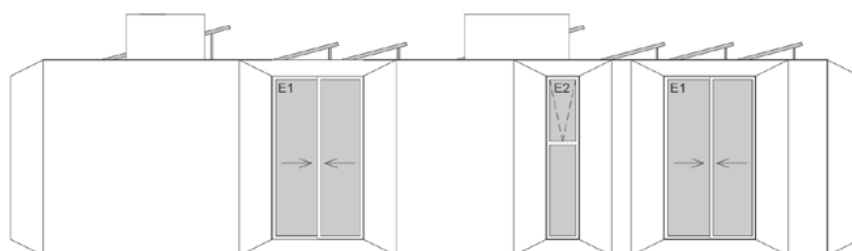
Elevação 1 - Sul



Elevação 2 - Leste



Elevação 3 - Norte



Elevação 4 - Oeste

Escala Gráfica



ANEXO II: Temperaturas Operativas e Limites de Aceitabilidade de 80% - Caso Simples

