

EDITORA



UnB

Simulação, Ambiente e Energia no Espaço Construído

**Caio Frederico e Silva, Gustavo de Luna Sales,
Joára Cronemberger e Vanda Alice Garcia Zanoni
(Organizadores)**



Pesquisa,
Inovação
& Ousadia



Universidade de Brasília

Reitora
Vice-Reitor

Márcia Abrahão Moura
Enrique Huelva

EDITORA



UnB

Diretora

Germana Henriques Pereira

Conselho editorial

Germana Henriques Pereira (Presidente)
Fernando César Lima Leite
Beatriz Vargas Ramos Gonçalves de Rezende
Carlos José Souza de Alvarenga
Estevão Chaves de Rezende Martins
Flávia Millena Biroli Tokarski
Jorge Madeira Nogueira
Maria Lidia Bueno Fernandes
Rafael Sanzio Araújo dos Anjos
Sely Maria de Souza Costa
Verônica Moreira Amado

EDITORA



UnB

Simulação, Ambiente e Energia no Espaço Construído

Caio Frederico e Silva, Gustavo de Luna Sales,
Joára Cronemberger e Vanda Alice Garcia Zanoni
(Organizadores)



Pesquisa,
Inovação
& Ousadia

Coordenadora de produção editorial
Preparação e revisão

Equipe editorial

Luciana Lins Camello Galvão
Alexandre Vasconcellos de Melo

© 2018 Editora Universidade de Brasília

Direitos exclusivos para esta edição:
Editora Universidade de Brasília
SCS, quadra 2, bloco C, nº 78, edifício OK,
2º andar, CEP 70302-907, Brasília, DF
Telefone: (61) 3035-4200
Site: www.editora.unb.br
E-mail: contatoeditora@unb.br

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser armazenada ou reproduzida por qualquer meio sem a autorização por escrito da Editora.

Esta obra foi publicada com recursos provenientes do Edital DPI/DPG nº 2/2017.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade de Brasília

S614 Simulação, ambiente e energia no espaço construído /
 organizadores, Caio Frederico e Silva ... [et al.]. – Brasília :
 Editora Universidade de Brasília, 2020.
 284 p. ; 23 cm. – (Pesquisa, inovação & ousadia).

ISBN 978-65-5846-043-5

1. Simulação computacional. 2. Desempenho energético. 3.
Sustentabilidade. I. Silva, Caio Frederico e (org.). II. Série.

CDU 72

Sumário

Prefácio	7
<i>Otto Ribas</i>	
Apresentação	9
Parte 1: Inputs – conforto, vento e luz	
Capítulo 1. Simulação do clima urbano do Distrito Federal: experimentando o ENVI-met	17
<i>Caio Frederico e Silva e Marta Adriana Bustos Romero</i>	
Capítulo 2. Caracterização de dados e arquivos climáticos de Brasília para simulação higrotérmica.....	55
<i>Vanda Alice Garcia Zanoni e José Manoel Morales Sánchez</i>	
Capítulo 3. Ferramentas para a simulação de ventilação natural na Arquitetura	99
<i>Gustavo de Luna Sales e Marta Adriana Bustos Romero</i>	
Capítulo 4. Qualidade da luz natural e ferramentas para o projeto arquitetônico	127
<i>Júlia Teixeira Fernandes e Cláudia Naves David Amorim</i>	

Parte 2: Outputs – ambiente construído e energia

Capítulo 5. Irradiação solar: ferramenta de análise para o uso de energia solar fotovoltaica em edifícios no Brasil 173

Joára Cronemberger e Estefanía Caamaño-Martín

Capítulo 6. Análise do balanço energético de casa pré-fabricada ZEB em Brasília 215

Larissa Sudbrack e Cláudia Naves David Amorim

Capítulo 7. Considerações sobre uma pauta para governança da eficiência energética 259

*Tássia Fonseca Latorraca, Raquel Naves Blumenschein e
Maria Vitória Duarte Ferrari*



Parte 2

Outputs – ambiente
construído e energia



CAPÍTULO 6

Análise do balanço energético de casa pré-fabricada ZEB em Brasília

Larissa Sudbrack e Cláudia Naves David Amorim

1. Balanço energético nulo

Em função da crise energética e das conseqüentes políticas reguladoras, surgiram propostas de edificações conhecidas como “*zero-energy building (ZEB)*”, termo que se refere a um edifício com demanda energética reduzida, por meio de estratégias passivas e sistemas eficientes que fazem com que o balanço anual de energia necessária para seu funcionamento possa ser suprido por tecnologias renováveis, considerando-se o período de um ano (TORCELLINI *et al.*, 2006). Para alcançar tal resultado, são incorporados ao projeto dos edifícios conceitos de *tecnologias passivas* (arquitetura), *ativas* (equipamentos) e *proativas* (produção de energia) (ROMERO; REIS, 2012). Tais projetos, complexos, envolvem metodologia específica, maior nível de detalhamento e planejamento, além de equipes multidisciplinares com profissionais de formações específicas e especialistas.

São vários os conceitos relacionados aos edifícios de balanço energético nulo. Além do simples “*ZEB (zero-energy building)*”, temos os NZEB – *nearly zero energy buildings* –, edifícios de alta *performance* energética, em que a pequena quantidade de

energia que necessita é fornecida por fontes renováveis. Já a sigla NZEB diz respeito aos “*net-zero energy buildings*”, que são edifícios em que necessariamente há uma troca entre a energia fornecida pela rede e a energia renovável produzida pelo edifício.

O primeiro passo em relação à possibilidade de ZEBs no Brasil foi dado em 2012, com a Resolução Normativa nº 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012), que estabelece as condições gerais para o sistema de compensação de energia elétrica, tendo sido posteriormente alterada pela Resolução nº 687, em novembro de 2015 (ANEEL, 2015). Para fins deste capítulo, o principal assunto tratado nessas resoluções é o sistema de compensação de energia elétrica, no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito à distribuidora local e, posteriormente, compensada com o consumo de energia elétrica ativa. Com o objetivo de compensação, a unidade consumidora passa a ter um crédito em quantidade de energia ativa a ser consumida por um prazo de 60 meses.

Isso permite que o sistema fotovoltaico, por exemplo, torne-se mais economicamente viável, uma vez que as baterias de armazenamento residencial são, ainda, muito caras. Além disso, devolver a energia à rede faz com que se aproveite toda a infraestrutura já existente nas cidades e grandes centros urbanos.

1.1 Residências ZEB: a influência do projeto no desempenho térmico e luminoso da edificação e seu impacto no consumo energético residencial

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), a análise do consumo de energia de uma edificação é tão importante para o processo de projeto quanto quaisquer das outras ferramentas usadas comumente pelos projetistas, estando diretamente relacionada às decisões do projeto arquitetônico, sendo o desempenho térmico e luminoso da envoltória o mais afetado pelas decisões do arquiteto.

Mais da metade dos projetos ZEB construídos no contexto mundial é residencial. Isso ocorre por duas razões principais: uma delas é que a maior parte dos

edifícios em geral é residencial; e a outra, pelo fato de que é em casa os conceitos de economia de energia são mais facilmente percebidos, uma vez que as altas taxas de energia elétrica podem ser sentidas no bolso mais diretamente (VOSS; MUSALL, 2013). A maioria dos edifícios ZEB localiza-se em climas onde o aquecimento tem um papel dominante no consumo (VOSS; MUSALL, 2013). Em países tropicais como o Brasil, a maior demanda é de resfriamento, o que exige estudos específicos.

A Agência de Energia Internacional (IEA) publicou, em 2014, um relatório com 30 estudos de caso sobre edifícios de balanço energético nulo em todo o mundo. Dentre eles, cinco são residências unifamiliares em climas em que o aquecimento e o resfriamento são predominantes. A Tabela 1 compara os diferentes consumos de energia elétrica nesses estudos de caso, e mostra valores de consumo energético em casas ZEB nesses países.

Tabela 1: Comparativo de consumo energético (uso final) em Casas ZEB

Localidade	Nome do projeto	Arquiteto	Consumo (kWh/m ² .ano)
Dinamarca	Energy Flex House	Henning Larsens Architects	28
França	Le Charpak	Villa & Battesti	11
Itália	Leaf House	MEP	74
Itália	Casa Zero Energy	Arnaldo Savorelli	17
Espanha	Lima	J. Sabate, C. Peters, H. Espe	57

Fonte: Adaptado de IEA (2014).

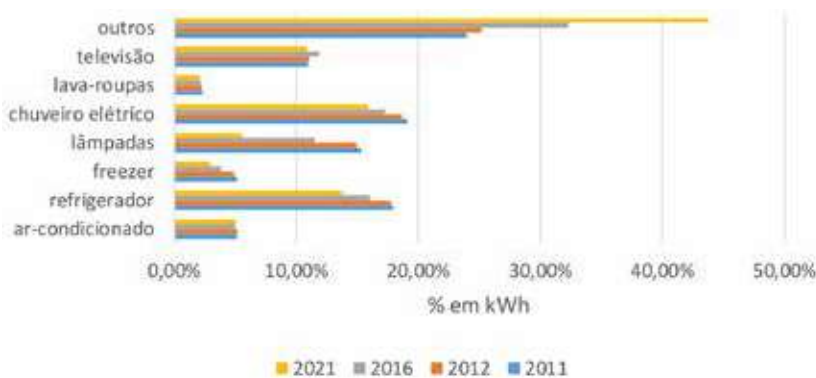
Para Voss e Musall (2013), a questão mais importante acerca das casas ZEB é a redução do consumo. Estratégias de projeto como ventilação natural, iluminação natural, sombreamento de aberturas no verão e aproveitamento do calor do sol no inverno estão presentes em quase todos os casos. Os equipamentos de suprimento energético são em sua maior parte coletores solares térmicos para aquecimento da água, sistemas fotovoltaicos para energia elétrica e aquecimento geotérmico.

No que diz respeito à influência do projeto no consumo de uma casa, de todos os usos finais residenciais, é possível relacionar diretamente a iluminação e o condicionamento de ar e o aquecimento de água (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014), sendo este menos relacionado à arquitetura. A iluminação natural tem menor impacto, pois mesmo que a luz do dia possa ser aproveitada, o sistema de iluminação artificial é utilizado à noite, e seu consumo nunca chegará a zero, embora possa ser minimizado. Portanto, de modo geral, a influência do projeto de uma casa em seu consumo energético está diretamente relacionada com os sistemas de resfriamento e aquecimento do ar interior, que, por sua vez, relacionam-se às condições de conforto térmico dos usuários.

1.2 Consumo energético no setor residencial no Distrito Federal

O gráfico da Figura 1 mostra como o consumo de energia elétrica está dividido no setor residencial e sua provável evolução em 10 anos, devido ao crescimento demográfico e econômico. É visível que, ao mesmo tempo que os índices de consumo de vários equipamentos como lâmpadas e refrigeradores caem, outros, como ar-condicionado, mantêm-se ou até mesmo aumentam.

Figura 1: Consumo de energia elétrica no setor residencial no Brasil em 2011 e previsão para o ano de 2021



Fonte: Adaptado de EPE (2012).

Estudos feitos pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2012) mostram a evolução da eficiência energética nos próximos 10 anos, bem como a demanda elétrica nos diferentes setores. No setor residencial, é esperado que as lâmpadas representem a maior evolução em termos de eficiência, devido à difusão da tecnologia LED e à política de proibição de comercialização de lâmpadas halógenas (EPE, 2012). Os dados da Tabela 2 dão uma previsão da demanda energética no Brasil no ano de 2050.

Tabela 2: Posse média de equipamentos selecionados (2013-2050)

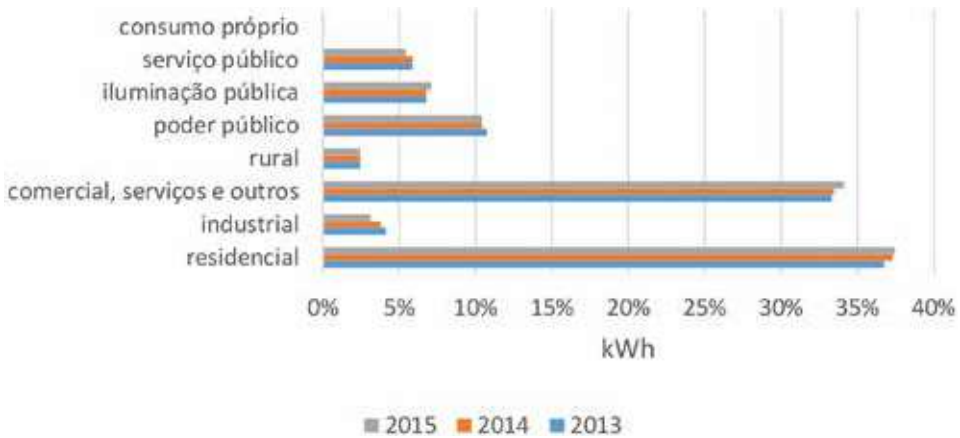
Equipamento	2013	2050
Ar-condicionado	0,23	0,65
Geladeira	1,03	1,03
Lâmpada	8,25	12,13
Chuveiro	0,70	0,32
Televisão	1,61	2,32
Máquina de lavar	0,68	0,94
Freezer	0,18	0,12

Fonte: Adaptado de EPE (2014, p. 117).

A partir desses dados, evidencia-se que o ar-condicionado é responsável pelas maiores taxas de crescimento.

O consumo energético residencial no Distrito Federal (DF) representou 37% do consumo total da cidade nos últimos três anos, de 2013 a 2015 (CEB, 2016), e pode ser visto na Figura 2; e uma redução no consumo em todos os setores pode ser notada. Devido à crise hídrica no Brasil nos últimos anos, o aumento das tarifas de energia elétrica foi de aproximadamente 25%, em 2015. Como reflexo desse aumento nas taxas, a redução do consumo de energia elétrica se deu em praticamente todos os setores.

Figura 2: Demanda energética por setor no Distrito Federal



Fonte: Adaptado de CEB (2016).

Figura 3: Consumo médio mensal (kWh) por pessoa nas Regiões Administrativas do Distrito Federal de 2013 a 2015



Fonte: Adaptado de CEB (2016).

O consumo médio mensal de energia elétrica no DF (Figura 3), no setor residencial, é de 79 kWh por pessoa. Percebe-se que esse consumo está também relacionado às diferentes faixas de renda e classe econômica que prevalecem nas regiões avaliadas: por exemplo, na Região Administrativa do Bairro Lago Sul, o consumo é cerca de três vezes maior que nas Regiões de Planaltina, São Sebastião e Recanto das Emas.

2. A norma ASHRAE 55-2013 e as condições de conforto térmico para ambientes ventilados naturalmente

O Brasil não possui norma de conforto térmico para edificações naturalmente ventiladas. Há, portanto, pesquisadores que vêm se empenhando para elaborar uma proposta para a primeira norma brasileira de conforto térmico humano em edificações com ventilação natural (LAMBERTS *et al.*, 2013). De acordo com Sorgato (2015), a proposta da norma está sendo desenvolvida com base na norma internacional ASHRAE Standard 55-2013, cujas condições de conforto térmico nela consideradas serão apresentadas a seguir.

Segundo Olesen (2007), citado por Sorgato (2015, p. 52), os critérios para a avaliação do conforto térmico em edificações condicionadas naturalmente devem ser diferentes dos critérios adotados para edificações com condicionamento artificial, devido às diferentes expectativas e adaptações dos usuários. Para as edificações condicionadas naturalmente, alguns modelos adaptativos fazem uma relação entre a temperatura no interior da edificação e a temperatura do ar, levando em consideração que os usuários se adaptam às variações sazonais e ao clima local. Segundo De Dear e Brasger (2002) citado por Sorgato (2015, p. 52), as teorias dos modelos adaptativos estabelecem, além dos fatores físicos e fisiológicos, a importância da expectativa e as preferências térmicas dos ocupantes do ambiente. Assim, a satisfação do usuário é influenciada pela expectativa do clima ambiente, relacionada às condições existentes.

O objetivo da ASHRAE 55-2013 é especificar as combinações de fatores ambientais térmicos e fatores pessoais e subjetivos que produzem condições ambientais favoráveis à maioria dos ocupantes de um ambiente.

Os fatores ambientais a que essa norma diz respeito são temperatura, radiação térmica, umidade e velocidade do ar; os fatores pessoais são os de atividade e vestimenta. As condições térmicas especificadas por essa norma são tidas como aceitáveis para indivíduos adultos, saudáveis, em localidades de até 3.000 metros de altitude, em espaços internos projetados para a ocupação humana por períodos não inferiores a 15 mm.

A norma apresenta dois métodos para a avaliação do conforto térmico nas edificações: o método da aceitabilidade térmica, baseado no PMV, e o método da aceitabilidade térmica, para ambientes condicionados naturalmente. O segundo método, também denominado Método de Modelo Adaptativo, aplica-se a ambientes ventilados naturalmente controlados pelos usuários, como é o caso das edificações residenciais unifamiliares abordadas neste capítulo.

A ASHRAE 55-2013 determina que há uma relação das condições do ambiente e os fatores pessoais que determinam a aceitabilidade dos usuários. A seção 5.4 da norma aborda a determinação de condições térmicas aceitáveis em espaços naturalmente condicionados controlados por seus usuários, por meio da abertura e do fechamento das janelas dos ambientes. Quando houver climatização artificial nos ambientes, seja de resfriamento, seja de aquecimento, essa normativa não poderá ser utilizada; ela se aplica a locais em que os usuários exerçam atividades com taxas metabólicas, variando entre 1,0 e 1,3 met (atividades físicas praticamente sedentárias) e em locais em que seja possível aos usuários a adaptação de suas vestimentas para se adaptar às condições climáticas externas e internas. É importante ressaltar que essa norma não pode ser aplicada em localidades em que a temperatura externa mínima seja menor que 10 °C ou em que a temperatura máxima seja maior que 33,5 °C. Portanto, ela pode ser aplicada a várias outras cidades brasileiras.

3. Ferramentas de simulação computacional térmica e energética de edificações

A simulação computacional é uma ferramenta que permite a avaliação integrada das opções de projeto, sob condições de operação realísticas, e dá aos projetistas a oportunidade de visualizar antecipadamente o desempenho dos sistemas e tomar decisões criteriosas para melhorá-lo (CLARK, 2001). No entanto, apesar de ser uma ferramenta multidisciplinar e abrangente (HENSEN; LAMBERTS, 2011), a simulação computacional é complexa e requer conhecimento multidisciplinar.

Atualmente, existem diversos programas para a simulação do desempenho térmico e energético de edificações. O Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, 2013) apresenta uma lista de programas computacionais para simulação e avaliação de eficiência energética, energias renováveis e sustentabilidade em edificações.

O EnergyPlus é um dos programas de simulação de edificações bastante utilizados mundialmente, que calcula as trocas térmicas, os índices de iluminação e o consumo energético das edificações a partir da modelagem física do edifício e de seus sistemas de ventilação, iluminação, aquecimento e resfriamento (DOE, 2013). O programa é, em primeiro lugar, um gerenciador de simulação, ou seja, não existe uma interface formal para o usuário; no entanto, é permitido o uso de outras interfaces desenvolvidas por uma terceira parte, que possibilite modelar a geometria dos edifícios e inserir informações como dados térmicos de materiais, padrões de ocupação, entre outros.

O *software* DesignBuilder é um dos programas utilizados como interface do EnergyPlus. Ele permite a análise do consumo de energia de edifícios; é validado pela ASHRAE Standard 140; modela 8.760 horas por ano; modela variações horárias de ocupação, potência de iluminação, equipamentos e sistemas de ar-condicionado, definidos separadamente para cada dia da semana, mês, podendo ser incluídos feriados e períodos em que o edifício encontra-se desocupado; modela efeitos de inércia térmica; permite a modelagem de multizonas térmicas; e tem capacidade de simular as estratégias bioclimáticas adotadas no projeto, caso o edifício proposto utilize sistema de condicionamento de ar (SILVA, 2014).

4. Procedimentos metodológicos

4.1 Definição do projeto da casa pré-fabricada a ser simulada

Sudbrack (2017) desenvolveu um projeto de casa pré-fabricada a fim de analisar estratégias de projeto para atingir o balanço energético nulo. Para que seja

possível fixar algumas variáveis a serem utilizadas nas simulações, foram definidas algumas premissas de projeto. Essas premissas consideram, entre outros fatores, as estratégias bioclimáticas para a cidade de Brasília, previstas na NBR 15220-3 (ABNT, 2005), para que a casa tenha o melhor desempenho térmico possível, e que seja verificada a necessidade de se utilizar um sistema de climatização artificial ou não. O uso desse sistema impactará diretamente no consumo energético da residência, por isso é um ponto importante a se considerar.

A escolha de um projeto em que a edificação é térrea está relacionada também a uma das estratégias para ZEBs (de modo geral), em que a proporção entre a área disponível de cobertura para a instalação de equipamentos geradores de energia seja suficiente ou maior do que a área interna que deve ser abastecida. O projeto a ser simulado, representado nas Figura 5, é, portanto, uma casa pré-fabricada térrea, de três quartos, cuja modulação da estrutura e dos elementos construtivos é de 1,2x1,2 m.

As janelas contam com uma moldura que faz as vezes de um *brise soleil*. Como uma mesma casa pode ser montada em vários terrenos diferentes e, consequentemente, diversas orientações solares, as proteções das janelas são tanto verticais quanto horizontais, e contam também com painel de venezianas de alumínio que permitem a ventilação noturna e maior segurança dos panos de vidro. A casa é elevada em 25 cm do solo para abrigar a passagem das tubulações. O sistema construtivo e estrutural ideal para a casa será definido a partir das simulações, que têm por objetivo definir qual combinação de materiais de parede e cobertura gera os melhores índices de conforto térmico a seus moradores com a menor necessidade de condicionamento artificial do ar.

Foram modeladas três composições de paredes e duas composições de coberturas que representam os materiais e sistemas construtivos mais representativos utilizados em edifícios pré-fabricados no Brasil (SUDBRACK, 2017).

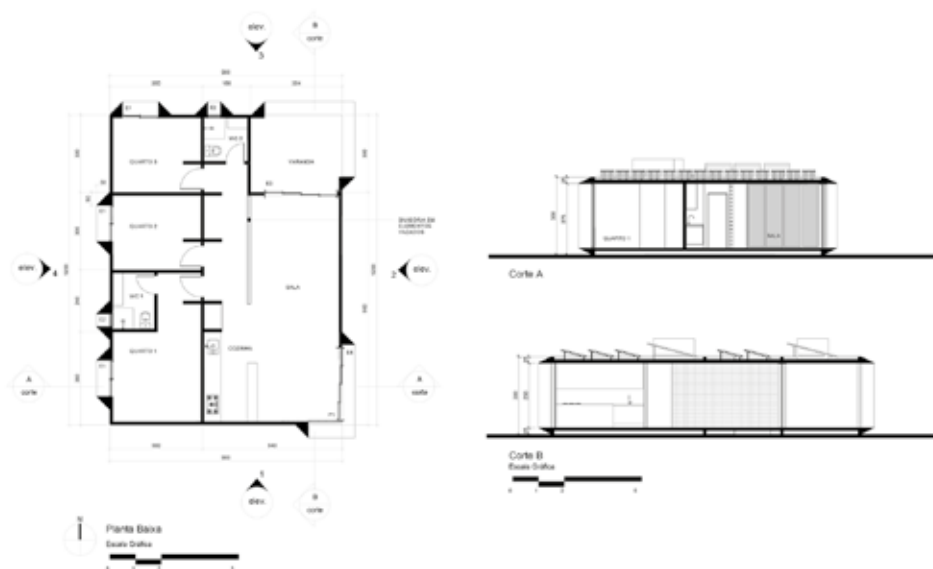
As características de coberturas e paredes simuladas estão descritas nas tabelas 3 e 4.

Figura 4: Vista exterior da casa



Fonte: Sudbrack (2017, p. 91).

Figura 5: Planta baixa e Cortes da residência



Fonte: Adaptado de Sudbrack (2017).

Tabela 3: Características térmicas das coberturas

Descrição	Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)	Densidade (kg/m³)	Absortância	Transmitância (W/m².K)
Placa de CLT (<i>Gross Laminated Timber</i>) com 200 mm de espessura, e aplicação de manta impermeabilizante aluminizada (3 mm) na face externa.	Manta aluminizada	0,003	0,23	1460	1000	0,05	0,59
	CLT	0,20	0,13	2100	550	-	
	Núcleo em EPS	0,0907	0,032	1420	40	-	
	Chapa metálica interna	0,00043	55	460	7800	-	
	Concreto	0,04	1,75	1000	2200	-	
	EPS	0,09	0,032	1420	40	-	
	Concreto	0,03	1,75	1000	2200	-	
	Chapa metálica externa	0,00050	55	460	7800	0,2	
Isotelha PUR, telha metálica tipo sanduíche com preenchimento em PUR (poliuretano), com 100 mm de espessura, e pintura branca nas duas faces, tanto interna quanto externa.	Núcleo em PUR	0,0907	0,02	1420	40	-	0,21
	Chapa metálica interna	0,00043	55	460	7800	-	
	Ar	0,02	0,023	1012	1,20	-	
	Água	0,05	0,6	4190	1000	-	
	Manta impermeabilizante	0,003	0,23	1460	1000	-	
	CLT	0,20	0,13	2100	550	-	

Fonte: Sudbrack (2017, p. 105).

Tabela 4: Características térmicas das paredes

Descrição	Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)	Densidade (kg/m ³)	Absortância	Transmitância (W/m ² .K)	
Placa de CLT (<i>Cross Laminated Timber</i>) com 200 mm de espessura, e aplicação de pintura branca nas faces interna e externa.	CLT	0,20	0,13	2100	550	0,2	0,58	
	Sistema de paredes secas (<i>dry wall</i>), composto por placa cimentícia nas faces externas, núcleo de lâ de rocha, e placa de gesso acartonado nas faces internas, com 120mm de espessura total, e pintura branca nas duas faces, tanto interna quanto externa.	Placa fibrocimento	0,01	0,95	840	2200	0,2	2,08
		Núcleo em lâ de rocha	0,092	0,033	750	90	-	
		Placa de gesso acartonado	0,018	0,35	840	750	0,2	
		Chapa metálica interna	0,0065	55	460	7800	-	
Painel de tijolos cerâmicos e argamassa armada, com 140mm de espessura, e pintura branca nas duas faces, tanto interna quanto externa.	Argamassa armada e pintura branca	0,025	1,15	1000	2100	0,2	1,65	
	Bloco cerâmico	0,01	0,9	920	1300	-		
		0,03	0,023	1012	1,20	-		
	Bloco cerâmico	0,01	0,9	920	1300	-		
		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		

Fonte: Sudbrack (2017, p. 106).

As seis diferentes combinações de materiais de envoltória a serem simuladas e comparadas entre si serão descritas a seguir, bem como os demais parâmetros fixos considerados para a simulação.

4.2 Características consideradas para as simulações de casas ZEB pré-fabricadas

Para Lamberts, Dutra e Pereira (2014), o arquiteto pode racionalizar o uso da energia em um edifício, se reduzir o consumo em iluminação, condicionamento do ar e aquecimento de água. Para tanto, existem três formas: usar sistemas naturais de iluminação e condicionamento do ar; usar sistemas artificiais de maior eficiência; e integrar estes dois sistemas (natural e artificial). O potencial de redução desse setor é expressivo.

O conforto ambiental, neste caso mais especificamente conforto térmico e luminoso, depende diretamente das características arquitetônicas e dos materiais utilizados na construção do edifício. Algumas características construtivas e arquitetônicas podem influenciar no consumo energético dos edifícios, como, por exemplo, a cobertura (cores e materiais, forma, inclinação, área); as paredes internas e externas (cores e materiais); o percentual de aberturas nas fachadas; o tipo de vidro; a orientação solar; a proteção solar de aberturas; a forma e a compactidade da edificação; e a porosidade da edificação (ventilação natural). A compreensão do comportamento e da influência de cada uma dessas características é de extrema importância para que o projeto de um edifício possa ser definido, pois dizem respeito às características da envoltória do edifício.

Para este capítulo, teremos algumas das características arquitetônicas e os dados de consumo energético (densidades de potência instalada para os sistemas de ar-condicionado, iluminação artificial e equipamentos em geral) fixos e isolados. Os materiais de paredes e cobertura serão as variáveis que tornarão possível saber como e quanto a escolha desses materiais influencia no consumo energético

da casa pré-fabricada. Desse modo, as estratégias a serem traçadas como resultado deste capítulo serão, em sua maior parte, relacionadas às estratégias passivas para eficiência energética, ou seja, estratégias de eficiência energética relacionadas ao edifício em si, e não apenas aos sistemas a ele acoplados.

4.3 Parâmetros considerados nas simulações

A casa conta com 108 m² de área coberta. Para a orientação solar da casa a ser simulada, será levada em consideração a pior orientação possível (Figura 5). Pelo fato de esta ser uma casa pré-fabricada, que pode ser montada em qualquer terreno e orientação, a opção de considerar a pior orientação garante que, no caso de outras possíveis orientações solares, a casa funcionará ainda melhor do ponto de vista térmico. O percentual de aberturas nas fachadas foi calculado levando-se em conta a orientação solar proposta anteriormente.

Tabela 5: Percentual de aberturas envidraçadas nas fachadas

Orientação	Área de fachada	Área de abertura	% de abertura
Norte	27m ²	11,75	43,5%
Leste	36m ²	7m ²	19%
Sul	27m ²	0m ²	0%
Oeste	36m ²	8,25m ²	23%

Fonte: Sudbrack (2017, p. 101).

O tipo de vidro utilizado no modelo será vidro comum liso 4 mm, fator solar 0,87. As aberturas envidraçadas da casa têm ângulos de sombreamento horizontal e vertical, que variam de acordo com as dimensões das janelas, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6: Ângulos de sombreamento das aberturas envidraçadas

Esquadria	Ângulo vertical de sombreamento	Ângulo horizontal de sombreamento
E1 (1,40x2,50m)	Esquerda: 20° / Direita: 20°	11°
E2 (0,50x2,50m)	Esquerda: 45° / Direita: 45°	11°
E3 (2,80x2,50m)	Esquerda: 50° / Direita: 10°	54°
E4 (2,80x2,50m)	Esquerda: 10° / Direita: 0°	11°

Fonte: Sudbrack (2017, p. 102).

Quanto à porosidade da edificação, no que diz respeito à ventilação natural, temos a área de piso da casa, de 108 m², e a área de ventilação, de 17,2 m², que representam, portanto, 16% da área do piso.

Tabela 7: Áreas de ventilação

Esquadria	Área de abertura	Área de ventilação	Qtde.	Área total de ventilação
1	1,40 x 2,50 = 3,5m ²	50% = 1,75m ²	3	5,25m ²
2	0,50 x 2,50 = 1,45m ²	50% = 0,725m ²	2	1,45m ²
3	2,80 x 2,50 = 7m ²	75% = 5,25m ²	1	5,25m ²
4	2,80 x 2,50 = 7m ²	75% = 5,25m ²	1	5,25m ²
Total			8	17,2m²

Fonte: Sudbrack (2017, p. 102).

Os materiais de cobertura e de paredes serão variáveis nas simulações, o que permitirá definir quais os materiais disponíveis na indústria brasileira que mais se adequam às residências de balanço energético nulo para a cidade de Brasília. A escolha dos materiais a serem testados nas simulações se deu a partir da avaliação de características térmicas de painéis pré-fabricados oferecidos pela indústria brasileira, de acordo com Sudbrack (2017).

4.4 Simulações do desempenho térmico e energético

Para as simulações de desempenho térmico e energético, foi utilizado o *software* DesignBuilder, versão 2.4.0.1, que segue os algoritmos de cálculo do *software* EnergyPlus (SILVA, 2014).

Foram modelados diferentes materiais para compor a envoltória da casa, e as simulações permitiram comparar quais são as combinações de materiais com melhor e pior desempenho termoenergético. Para a análise de desempenho térmico, foram utilizados os dados de temperatura operativa das zonas térmicas da casa, por meio dos quais foi possível calcular o percentual de horas do ano em que a casa se encontra na zona de conforto e analisar se a necessidade de uso de ar-condicionado ou não. Para a análise energética, foram utilizados os dados de consumo energético da casa com e sem o uso de ar condicionado, permitindo-se, assim, comparar a variável materiais x consumo energético.

As simulações foram realizadas com o arquivo climático EPW – EnergyPlus Weather File (INMET, 2016) para a cidade de Brasília (Latitude 15° 46’ 48” Sul, Longitude 47° 55’ 45” Oeste). Os arquivos climáticos contêm informações sobre as características de cada região geográfica do Brasil e representam um ano típico de uma série de 10 anos (GOULART; LAMBERTS; FIRMINO, 1998). Os dados dos arquivos são horários e apresentam cada uma das 8.760 horas do ano, o que possibilita uma avaliação horária precisa das simulações.

As propriedades termofísicas dos materiais, a forma arquitetônica, a orientação das paredes e aberturas são determinantes no desempenho térmico interno de uma edificação em relação ao ambiente externo em que se insere. Os componentes da envoltória (paredes, cobertura, aberturas e piso) das edificações que separam o ambiente interno do externo são essenciais para a determinação dos ganhos e perdas de calor de um meio para outro.

Neste capítulo, os componentes piso e aberturas são isolados como variáveis fixas. Foi utilizado um mesmo valor de propriedades termofísicas para os vidros e para o piso. No caso dos vidros, foi considerado um vidro transparente simples de 4mm de espessura, transmitância térmica de $5,385 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, transmitância visível de 0,89 e fator solar 0,87. Para o piso, foi modelada uma única composição, composta por uma camada de piso cerâmico de 10 mm, argamassa de nivelamento de 20 mm, e laje armada de 100 mm. A transmitância térmica total do conjunto é de $0,25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

Foram modeladas as três composições de paredes e as duas composições de coberturas, cujas características térmicas foram descritas nas tabelas 3 e 4. Os dois tipos de cobertura e os três tipos de paredes modelados foram combinados entre si, gerando seis diferentes combinações de materiais de envoltória a serem simulados e comparados entre si, como mostra a Tabela 8. As simulações de desempenho térmico permitirão verificar quais materiais têm melhor desempenho para a envoltória da casa.

Tabela 8: Combinações de cobertura e parede avaliadas

Material de cobertura	Material de parede
CLT+manta	CLT
CLT+manta	Dry Wall
CLT+manta	Painel Tijolo
Isotelha PUR	CLT
Isotelha PUR	Dry Wall
Isotelha PUR	Painel Tijolo

Fonte: Adaptado de Sudbrack (2017).

O padrão de ocupação (Figura 6) representa uma família de quatro moradores e ocorre de acordo com o estabelecido por Sudbrack (2017).

Figura 6: Padrão de ocupação da casa



Fonte: Sudbrack (2017, p. 109).

O padrão de iluminação da residência (Figura 7) está vinculado ao padrão de ocupação (SUDBRACK, 2017).

Figura 7: Padrão de uso da iluminação artificial da casa



Fonte: Sudbrack (2017, p. 109).

Com base nas atividades exercidas em cada ambiente da casa, foram estabelecidas as taxas metabólicas para cada atividade. Tem-se, portanto, o valor de 81W/pessoa nos dormitórios e 171W/pessoa na sala e cozinha. A fração radiante considerada referente à carga térmica das pessoas é de 0,3.

Nos dormitórios, sala de estar e cozinha, considerou-se uma densidade de potência de iluminação artificial de $5,0\text{W}/\text{m}^2$. A definição da baixa densidade de potência de iluminação artificial deve-se ao uso de lâmpadas LED, de acordo com o projeto da casa, em todos os ambientes.

Para a previsão de consumo energético da casa, foram considerados equipamentos eficientes, bem como o adequado uso destes. Para o aquecimento da água foi considerado sistema de aquecimento solar.

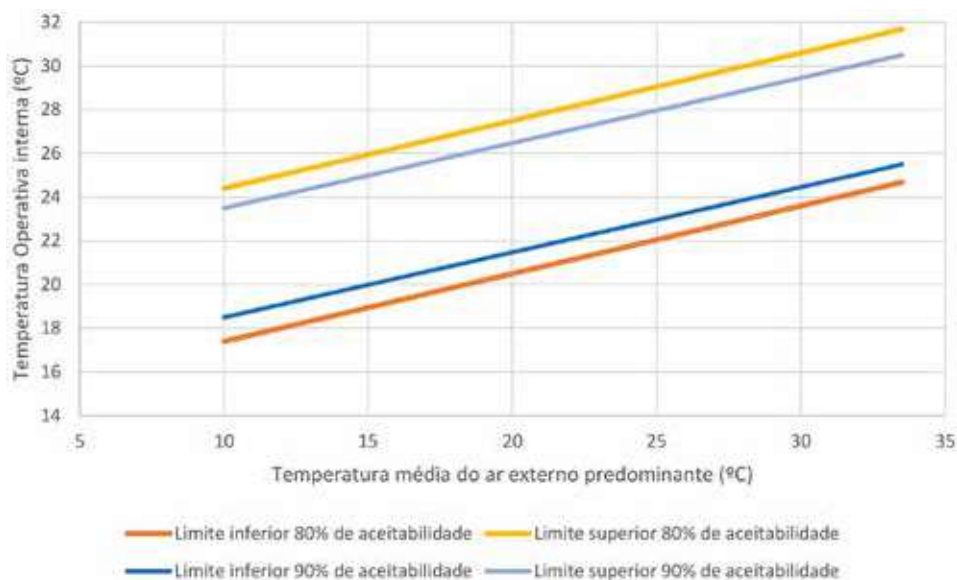
Os valores de consumo mensal são considerados fixos, pois independem do desempenho térmico da envoltória. Como parâmetro fixo para as simulações, utilizou-se o consumo energético por metro quadrado, calculado por Sudbrack (2017), equivalente a $45,35\text{ kwh}/\text{m}^2/\text{ano}$.

Apesar das altas taxas de renovação do ar permitidas pelo dimensionamento das janelas da residência, foram consideradas, para as simulações, 15 trocas de ar por hora, o que representa um valor suficiente para a ventilação estrutural ou seletiva, que considera refrescar ou aquecer o interior utilizando a diferença de temperatura externa e interna e varia de 10 a 20 renovações por hora (SILVA, 2014).

4.5 Avaliação das condições de conforto e aceitabilidade dos usuários de acordo com a norma ASHRAE 55-2013

A determinação das condições de conforto térmico e aceitabilidade dos usuários da ASHRAE Standard 55-2013 em espaços ventilados naturalmente é realizada a partir do gráfico da Figura 8, a seguir, que fixa os valores aceitáveis de temperatura operativa interna do ambiente para um limite de 80% de satisfação dos usuários em função da temperatura média do ar externo predominante. O limite de 90% é de caráter informativo, e não será considerado para este capítulo. O gráfico já considera os efeitos de desconforto térmico localizado, roupa, atividade metabólica, umidade e velocidade do ar; portanto, essas variáveis não precisam ser analisadas isoladamente (ASHRAE, 2013).

Figura 8: Faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente ventilados



Fonte: ASHRAE (2013, p. 12) (adaptada com tradução para o português).

As equações a seguir indicam os limites de temperatura operativa apresentados no gráfico (ASHRAE, 2013):

Limite superior de 80% de aceitabilidade (°C) = $0,31 \times tpma(out) + 21,3$;

Limite inferior de 80 % de aceitabilidade (°C) = $0,31 \times tpma(out) + 14,3$; em que $tpma(out)$ é a temperatura média do ar externo predominante.

Neste capítulo, considerou-se o limite de 80% para a avaliação do conforto dos usuários na edificação. A temperatura média do ar externo predominante é calculada a partir da média aritmética simples de todas as temperaturas médias do ar externo, considerando não menos que os sete dias e não mais que os 20 dias anteriores em relação ao dia de referência. A temperatura média do ar externo deve ser obtida por meio de uma média aritmética simples de todas as medições de temperatura externa de bulbo seco para as 24 horas do dia (ASHRAE, 2013).

Neste capítulo, os valores de temperatura média do ar externo predominante foram calculados a partir da média aritmética das temperaturas externas dos últimos sete dias em relação ao dia de referência. As temperaturas de bulbo seco horárias foram extraídas do arquivo climático EPW do INMET (2016) para a cidade de Brasília.

A norma prevê, ainda, um aumento do limite superior de aceitabilidade do gráfico da Figura 9, caso a temperatura operativa seja maior que 25°C e a velocidade do ar seja maior que 0,3 m/s. Os valores do aumento devem estar de acordo com a Tabela 9 (ASHRAE, 2013).

Tabela 9: Aumento nos limites de temperatura operativa aceitável em ambientes naturalmente condicionados

Velocidade do ar até 0,6 m/s	Velocidade do ar até 0,9 m/s	Velocidade do ar até 1,2 m/s
1,2°C	1,8°C	2,2°C

Fonte: ASHRAE (2013, p. 13) (adaptada com tradução para o português).

Para este capítulo, foi desconsiderado o aumento dos limites superiores de conforto do gráfico da Tabela 9 para velocidades do ar interno maiores que 0,3m/s e para temperatura operativa acima de 25°C.

Para avaliar a edificação de acordo com a ASHRAE Standard 55-2013, foi necessário realizar uma simulação computacional da edificação no programa DesignBuilder, que apresentou as temperaturas operativas horárias internas dos ambientes de permanência prolongada durante o período de um ano. Os ambientes de permanência prolongada considerados foram os quartos e a sala/cozinha. Esses valores alimentaram o gráfico, que indica os limites da faixa de temperatura operativa aceitável e, a partir disso, foi possível calcular o percentual de horas totais do ano nas quais cada ambiente encontrava-se em conforto e desconforto térmico.

De acordo com a seção 7.4.2.2.1 da ASHRAE 55-2013, as horas que excedem os limites superior e inferior devem ser atribuídas a valores “0” (zero), para aquelas que se encontram dentro dos limites, ou “1” (um), para as que estão fora dos limites; a soma dessas horas resultará no número total de horas de desconforto do ano. Além disso,

é possível multiplicar esses valores (0 e 1) pela diferença entre a média da temperatura externa usada como parâmetro de avaliação e a temperatura operativa interna, e verificar a quantidade de graus hora excedentes para frio ou para calor no ano.

4.6 Dimensionamento do sistema de condicionamento artificial de ar

Após a análise do percentual de horas de conforto para cada combinação de materiais de parede e coberturas, foram identificadas as horas que excedem os limites superiores e inferiores, que podem também ser chamadas de horas de desconforto para cada modelo. Para as combinações em que todos os ambientes obtiverem no mínimo 80% das horas dentro da zona de conforto, caso ocorra, será desconsiderado o uso de equipamentos para condicionamento artificial do ar.

No caso de desconforto por frio, até o limite mínimo de 18°C para a temperatura operativa no interior da edificação, considerou-se que o usuário se aclimata às condições do ambiente, ajustando a vestimenta para evitar o desconforto por frio (DE VECCHI *et al.*, 2014). Caso os resultados apresentem temperaturas operativas abaixo de 18°C, deve ser considerado o uso de aquecimento artificial do ar.¹

Com os dados de horas de desconforto por calor, e o cálculo do consumo de eletricidade necessários para o condicionamento do ar, será possível avaliar quais as combinações de materiais têm os maiores e os menores consumos de energia elétrica. Através do simulador de capacidade para aparelhos, foram definidas as potências de cada aparelho a ser utilizado por ambiente.

Com os resultados de horas excedentes do limite superior de conforto ao ano para cada combinação de material, calcula-se a potência anual destinada aos aparelhos condicionadores de ar para cada ambiente.

¹ Outras propostas de sistemas de condicionamento do ar poderiam ser utilizadas, como ventilação mecânica, resfriamento evaporativo, dentre outros. No entanto, para este capítulo optou-se por considerar o ar-condicionado tipo *split*, pelo fato de este sistema representar o pior cenário do ponto de vista do consumo energético.

Tabela 10: Estimativa da potência dos aparelhos de ar-condicionado por ambiente

Ambiente	Área (m ²)	Iluminação	Orientação solar	Número de pessoas	Equipamento	Cap. do aparelho (BTU)	Pot. do aparelho (W)
Sala	47,75	Led	Leste	4	Televisor e refrigerador	2x18.000	2x1600
Quarto 1	15,75	Led	Oeste	2	Televisor	18.000	1600
Quarto 2	9,85	Led	Oeste	1	Televisor	9.000	815
Quarto 3	9,85	Led	Norte/Oeste	1	Televisor e computador	9.000	815

Fonte: Sudbrack (2017, p. 117).

4.7 Simulações da estimativa de geração de energia

Para a produção de energia local, a produção de energia é voltada para o aquecimento solar da água e para eletricidade de fonte fotovoltaica. A área considerada disponível para instalação de módulos fotovoltaicos é de 44 m². A orientação dos módulos fotovoltaicos é norte, e eles são inclinadas 30° em relação à superfície plana do telhado. O *software* utilizado para estimar a geração local de eletricidade do sistema fotovoltaico é o PVSyst v.6.6.1 (PVSyst, 2016). A base de dados para os valores sintéticos de irradiação global horizontal e difusa, e temperatura média mensal do ar é do MeteoNorm 7.1 (1991-2010). Os fatores de perda adotados nas simulações do sistema fotovoltaico no programa PVSyst constam na Tabela 11.

Tabela 11: Fatores de perda adotados na simulação

Detalhes das perdas	Valores
Fator de perda térmica	20 W/m ² . K
Perda óhmica na fiação	1,5%
Perda na qualidade do módulo	2,5%
Perda <i>mismatch</i> do módulo	0,8%
Efeito do ângulo de incidência	0,05
Fator de degradação	0,4%
ISC dispersion RMS	0,4%
<i>Voc dispersion</i> RMS	0,4%
Fator de perda por sujeira	3,0%

Fonte: Adaptado de PVSyst (2016).

5. Apresentação e análise dos resultados

5.1 Simulações térmicas e análise de conforto térmico

Após a modelagem da casa no *software* DesignBuilder, de acordo com os parâmetros descritos anteriormente, foram alternados os materiais de paredes internas e externas e de cobertura para gerar os resultados das simulações, os quais foram gerados para cada uma das quatro zonas térmicas (sala/cozinha, quarto 1, quarto 2, quarto 3), que representam os ambientes de longa permanência. Para a análise, foram utilizados os dados de temperatura operativa e temperatura do ar externa (bulbo seco). De acordo com a metodologia da ASHRAE-55-2013 para avaliação do conforto térmico em ambientes naturalmente ventilados, as temperaturas operativas foram analisadas considerando-se a média da temperatura externa dos sete dias anteriores, para as 8.760 horas do ano.

Determinadas as temperaturas máximas e mínimas de aceitação para 80% dos usuários, avaliou-se o percentual de horas que se encontravam dentro e fora da zona de conforto. Para as horas que se encontram fora da zona de conforto (horas excedentes), foi calculado em quantos graus estas temperaturas excedem o limite máximo (calor) e mínimo (frio).

Para permitir uma comparação com os mesmos parâmetros (orientação, área de cobertura, área de aberturas), os resultados foram agrupados por ambiente. Os dados estão classificados de acordo com os graus hora excedidos por calor em ordem crescente.

Comparando os ambientes “quartos” entre si, nota-se que a orientação solar se reflete no número de graus hora excedidos por calor, já que o quarto 3 é o que tem abertura envidraçada protegida voltada para o Norte e paredes externa voltada para o Oeste. No entanto, apresenta resultados similares ao quarto 2, que tem abertura envidraçada protegida voltada para Oeste. Já o quarto 1 é o ambiente que apresenta menores valores de graus hora excedidos por calor: a abertura envidraçada protegida está voltada para Oeste, e a parede externa exposta, para o Sul.

Percebe-se que o ambiente sala é o que apresenta os maiores valores de graus hora que excedem os limites superiores de temperatura, ou seja, que representam desconforto por calor aos usuários. Isso ocorre devido ao fato de que este é o ambiente com maior área de piso, e conseqüentemente com maior área de cobertura. Portanto, recebe radiação direta através da cobertura durante várias horas do dia, e uma vez que essa radiação é absorvida pelo material de cobertura, é transformada em carga térmica no interior do ambiente. Além disso, o fato de que boa parte das aberturas envidraçadas desse ambiente estão voltadas para Leste significa que o ambiente começa a receber carga térmica desde as primeiras horas do dia, e apesar de não receber insolação direta no período da tarde nas fachadas, recebe sol em toda a área de cobertura, como mencionado anteriormente. A sala é também o ambiente que mais possui temperatura radiante, tanto dos usuários quanto dos equipamentos. Uma vez que a temperatura operativa interna leva a fração radiante dos equipamentos e dos usuários em conta, este é certamente um fator que influencia na alta quantidade de graus horas excedentes por calor no ambiente.

O quarto 1, cujos resultados encontram-se na Figura 10, não recebe insolação direta na fachada voltada para o Sul durante os meses de inverno, com temperaturas mais baixas. No entanto, tem maior área de cobertura (se comparada à dos outros quartos), e, portanto, recebe maior carga térmica pela cobertura que os quartos 2 e 3. O quarto 1 também tem sua abertura envidraçada voltada para Oeste, recebendo a carga térmica dos horários mais quentes durante toda a tarde. Esses fatores fazem com que o balanço térmico no interior do ambiente seja equilibrado, apresentando os menores valores de graus hora excedentes quando comparados aos outros ambientes. Da avaliação dos grupos formados pelos resultados mais próximos, tem-se uma combinação que ultrapassa os 1.000 graus hora de desconforto por calor, compostos por cobertura em Isotelha PUR e paredes Drywall. Essa é também a combinação que apresenta valores de grau/hora mais elevados em relação aos limites para o frio neste ambiente.

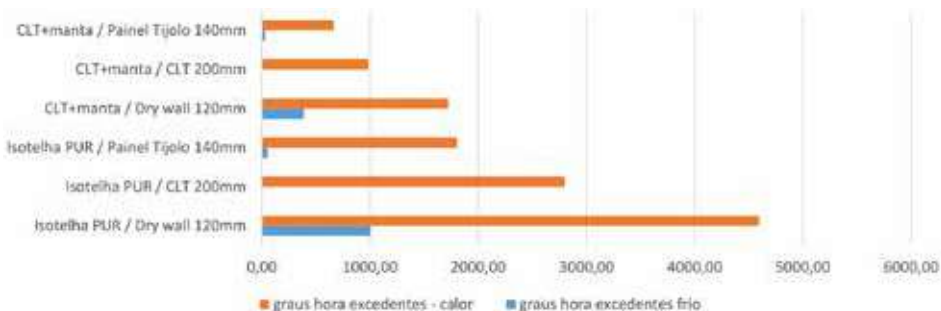
O ambiente quarto 2 é a única zona térmica analisada que possui apenas uma parede externa, as outras três são chamadas paredes internas, por dividirem dois

ambientes internos e por não terem contato com o ar no exterior da casa. A área de cobertura do ambiente é igual à do quarto 3, e a abertura envidraçada neste ambiente fica voltada para Oeste, como no quarto 1. Novamente, o gráfico da Figura 11 mostra que, no caso do quarto 2, nota-se uma combinação que excede os 1.000 graus hora por calor, representados pelas combinações de telhas Isotelha PUR e paredes Drywall. Essa combinação também apresenta maior quantidade de graus hora excedentes por frio.

Na zona térmica do quarto 3 (Figura 12), notam-se picos de percentuais de graus hora excedentes pelo frio, apesar de este ser o ambiente com paredes expostas voltadas para a orientação Norte e Oeste. Os maiores valores de graus hora excedentes resultam do uso de materiais isolantes para as paredes, como o Drywall (que tem isolamento térmico em lã de rocha). O fato de este ser o único ambiente com abertura envidraçada voltada para a orientação norte mostra que esta zona térmica demora mais a ser aquecida, pois, apesar de receber insolação direta durante todo o dia, nos meses de inverno as temperaturas demoram mais a se elevar, atingindo seus picos apenas no período da tarde.

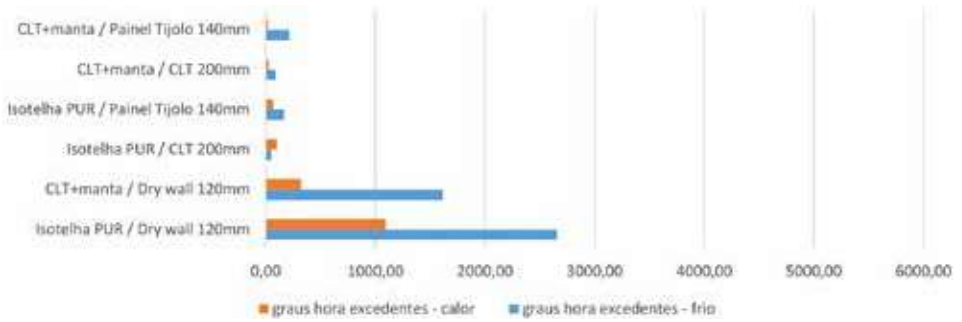
Portanto, para materiais de baixa inércia térmica, as baixas temperaturas da madrugada resfriam o ambiente de tal modo que ele só vai começar a se reaquecer no período da tarde. Este resultado demonstra também que as aberturas envidraçadas estão bem protegidas do sol; caso contrário, os resultados deste ambiente demonstrariam nos altos valores de graus hora excedentes por calor quando comparados aos do ambiente quarto 2, por exemplo.

Figura 9: Graus hora excedentes no ambiente “Sala”.



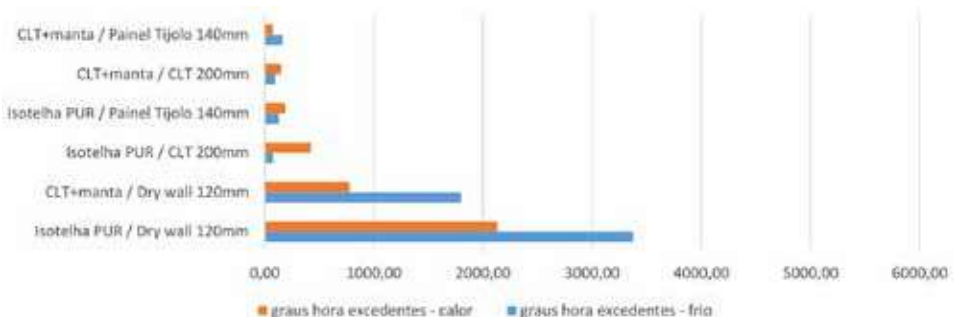
Fonte: Adaptada de Sudbrack (2017, p. 124)

Figura 10: Graus hora excedentes no ambiente “Quarto 1”



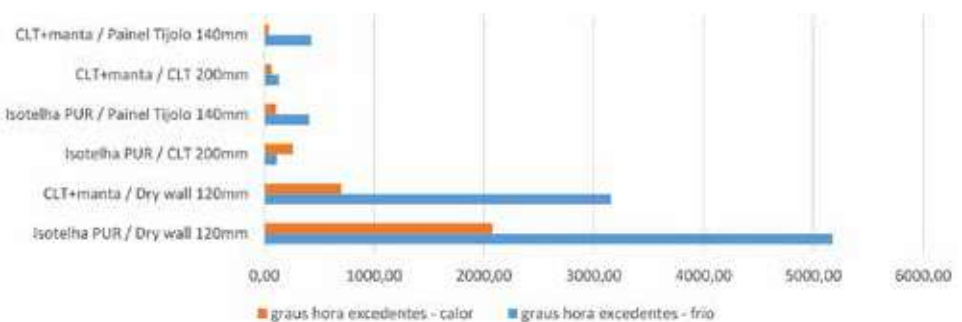
Fonte: Adaptado de Sudbrack (2017, p. 125).

Figura 11: Graus hora excedentes no ambiente “Quarto 2”



Fonte: Adaptada de Sudbrack (2017, p. 126).

Figura 12: Graus hora excedentes no ambiente “Quarto 3”



Fonte: Adaptada de Sudbrack (2017, p. 127).

Analisando-se os melhores resultados para os quatro ambientes, a partir dos menores valores de graus hora excedentes para os limites superiores da zona de conforto, percebe-se que a combinação de cobertura em “CLT+manta” e paredes em “Painel de tijolos 140 mm” confere os melhores resultados para todos os ambientes. Já quando se analisam os piores resultados de todos os ambientes, ou seja, aqueles com o maior número de graus hora excedentes por calor, a combinação formada por materiais isolantes tanto na cobertura quanto nas paredes, cobertura Isotelha PUR e parede Drywall, foi a que causou maior desconforto por calor.

Para os graus hora de desconforto para o frio, nota-se que o material de parede Drywall apresenta em todos os ambientes os piores graus de desconforto. Isso se dá pela baixa inércia térmica do material, ao ser exposto a temperaturas mais baixas durante a noite faz com que o calor interno se dissipe. A combinação de cobertura Isotelha PUR e parede Drywall é a que apresenta os piores resultados para o frio.

5.2 Uso final de eletricidade da residência

Para a previsão de consumo energético da casa foram considerados equipamentos eficientes e hábitos adequados de uso desses equipamentos. A eficiência e o uso consciente da energia elétrica pelos seus usuários são partes importantes do balanço energético nulo.

5.2.1 Consumo energético fixo da residência

O conceito de *balanço energético* nulo adotado neste capítulo baseia-se em cálculos anuais de consumo e produção de energia elétrica. Considera-se consumo fixo aquele estimado para os equipamentos eletrodomésticos e eletrônicos e o sistema de iluminação artificial da casa.

Portanto, para o cálculo da previsão de consumo mensal de equipamentos por 12 meses da casa foram considerados os parâmetros de uso e potência de equipamentos

descritos por Sudbrack (2017). O consumo mensal por equipamentos considerado fixo da residência foi 333,9 kWh, e o consumo anual por equipamentos, 4006,8 kWh.

Para o cálculo de consumo do sistema de iluminação artificial, foram considerados o padrão de uso da iluminação artificial e as áreas de cada ambiente (SUDBRACK, 2017). O consumo mensal relativo ao sistema de iluminação artificial é, portanto, de 74,27 kWh, ou seja 891,24 kWh anuais.

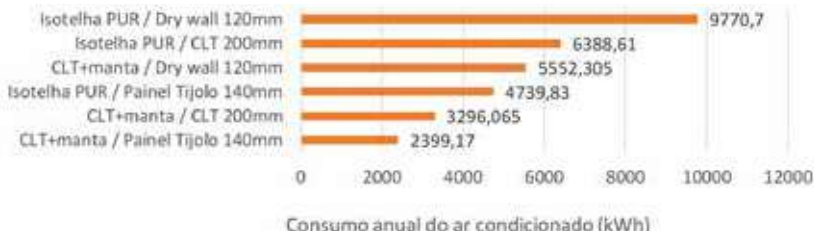
As somas dos valores acima totalizam 408,17 kWh mensais. O consumo anual, portanto, é de 4898,04 kWh, e, considerando a área da residência de 108 m², tem-se 45,35 kWh/m²/ano. Considera-se, ainda, o consumo mensal por pessoa de 102 kWh.

5.2.2 Consumo energético do sistema de climatização artificial

Como visto no item das simulações térmicas e análise de conforto térmico dos usuários, de acordo com os parâmetros da norma ASHRAE 55-2013 para o conforto adaptativo para ambientes naturalmente ventilados controlados pelo usuário, nenhuma das combinações de parede e cobertura se encaixou na zona de conforto aceitável para 80% dos usuários para todas as horas do ano. Para garantir o conforto térmico dos usuários, foi necessário, portanto, estimar o consumo de energia elétrica resultante do sistema de condicionamento artificial de ar para resfriamento das temperaturas internas quando estas ultrapassassem o limite superior de aceitabilidade proposto pela norma.

Para esta estimativa, foi considerada a potência de cada aparelho, determinada anteriormente de acordo com as características e área do ambiente, e levando-se em conta a quantidade de horas do ano em que cada ambiente apresentou temperaturas operativas acima dos limites superiores de conforto, ou seja, desconforto por calor. Os resultados são apresentados para cada combinação, com as cargas separadas por ambiente (SUDBRACK, 2017), e em seguida, os valores são somados, gerando um valor de consumo anual para a casa toda. A Figura 13 apresenta um resumo do consumo energético (kWh) por ar-condicionado ao longo do ano para cada combinação de materiais, em ordem crescente em relação ao consumo.

Figura 13: Estimativa simplificada do consumo de energia elétrica do ar-condicionado para cada combinação de cobertura e parede analisadas



Fonte: Adaptada de Sudbrack (2017, p. 132).

5.2.3 Consumo energético total

Somando-se os valores de consumo de energia elétrica por equipamentos e iluminação (valores fixos) e os valores de consumo de energia elétrica dispensados na climatização artificial da casa (variável de acordo com o desempenho de conforto térmico para cada combinação de materiais), tem-se um panorama mais completo dos dados de consumo da casa. Pode-se então comparar caso a caso e identificar os percentuais de consumo energético atribuídos a cada uso.

A Figura 14 traz esse comparativo, mostrando em amarelo o consumo energético gerado pelo uso de equipamentos eletrodomésticos e eletrônicos, e, em azul, o consumo energético gerado pelo uso do sistema de iluminação artificial. Esses dois valores de consumo são os mesmos para todas as combinações de materiais. Em laranja, apresenta-se a variação no consumo de energia elétrica gerado pelo condicionamento artificial da casa, que varia para cada combinação em função da diferença de horas de desconforto por calor que cada uma apresentou nas simulações térmicas dos ambientes.

A combinação de materiais de parede e cobertura que se mostrou mais eficiente foi a de cobertura em placa de CLT (*Cross Laminated Timber*) com 200 mm de espessura e paredes em Painel de Tijolos Cerâmicos de 140 mm de espessura. Para essa combinação, a casa apresentou um consumo anual de 7297 kWh, ou seja, 67,56 kWh/m² ao ano.

A combinação que se mostrou menos eficiente foi a de cobertura em Isotelha PUR de 100 mm de espessura e paredes em Drywall de 120 mm de espessura. Para essa combinação, a mesma casa apresentou um consumo anual de 14668,74 kWh, equivalentes a 135,82 kWh/m² ao ano.

Figura 14: Consumo energético total para cada combinação simulada



Fonte: Adaptada de Sudbrack (2017, p. 134).

Tabela 12: Percentuais de consumo energético

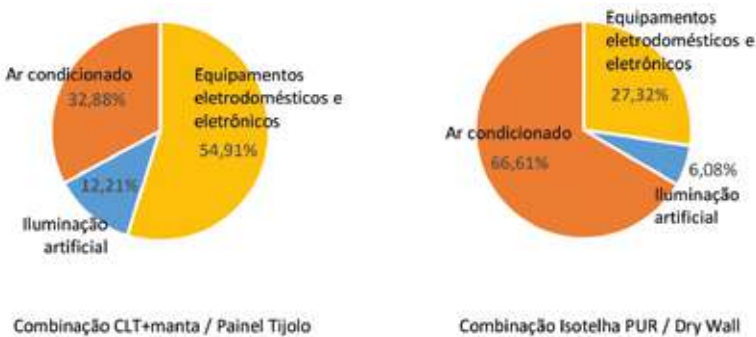
Combinação material de cobertura/material de parede	Percentual equipamentos	Percentual iluminação	Percentual ar-condicionado
CLT+manta / Pannel Tijolo	54,91%	12,21%	32,88%
CLT+manta / CLT	48,90%	10,88%	40,22%
Isotelha PUR / Pannel Tijolo	41,57%	9,25%	49,18%
CLT+manta / Dry Wall	38,34%	8,53%	53,13%
Isotelha PUR / CLT	35,50%	7,90%	56,60%
Isotelha PUR / Dry Wall	27,32%	6,08%	66,61%

Fonte: Adaptada de Sudbrack (2017, p. 135).

A diferença entre o menor e o maior consumo total vai de 7.297 kWh anuais até 14.668,74 kWh anuais. Quando analisados os consumos caso a caso, o percentual de consumo energético relativo ao condicionamento artificial do ar varia entre 32,88% e 66,61%, conforme a Tabela 12. Ou seja, o consumo energético total chega a ser maior em mais que o dobro em função da especificação dos materiais opacos para a envoltória.

Comparando os percentuais de consumo relativos ao ar-condicionado entre o valor mais baixo e o valor mais alto, a Figura 15 mostra o quanto a especificação de materiais de construção pode influenciar na variação do consumo de energia elétrica da casa pré-fabricada analisada.

Figura 15: Comparação entre percentuais de consumo de energia elétrica nas combinações CLT+manta / Painel Tijolo e Isotelha PUR / Drywall



Fonte: Adaptada de Sudbrack (2017, p. 136).

5.3 Dimensionamento do sistema fotovoltaico

Os resultados obtidos através da simulação com o *software* PVsyst versão 6.2.1 mostram a potência produzida pelo sistema de módulos fotovoltaicos ao dia em cada mês, e os totais mensais. Os totais mensais de produção do sistema são representados na Figura 16. É possível verificar no gráfico que os valores de radiação solar são mais altos nos meses de junho a setembro, e isso se reflete na maior produção de energia nesses meses. O total anual de energia produzida é de 11,463kWh.

Figura 16: Dados de saída do sistema de produção mensal



Fonte: Adaptado de PVsyst (2016).

6. Resultados e discussão

A compreensão do comportamento e influência de cada uma das decisões de projeto é de extrema importância para o desempenho térmico e conforto do usuário nos ambientes internos de uma edificação. Sendo algumas variáveis de projeto fixas (orientação, porosidade, percentual de aberturas, proteção de aberturas, fator solar dos vidros), foi possível identificar como e quanto cada uma das variáveis relacionadas aos materiais de paredes e coberturas influenciam nos índices de conforto adaptativo e no consumo energético da casa pré-fabricada analisada.

A avaliação de conforto térmico baseou-se na norma ASHRAE 55-2013 por ser uma norma que se aplica a ambientes naturalmente ventilados e que trata do conceito de conforto adaptativo. Para o projeto avaliado, nenhuma das combinações de materiais satisfaz o limite normativo de 80% dos usuários satisfeitos. No entanto, é importante lembrar que, por se tratar de casas pré-fabricadas que podem ser construídas em vários terrenos e várias orientações solares diferentes, a casa considerada para as simulações térmicas foi posicionada de modo a ter as fachadas com maior percentual de aberturas envidraçadas para Norte e Oeste, podendo ser considerada como a pior situação de orientação. O conceito de grau hora excedente, tanto para resfriamento quanto para aquecimento, é um parâmetro interessante que permite comparar as várias combinações. No entanto, esta avaliação só é válida quando se comparam os mesmos ambientes, de modo que tenham variáveis fixas como a

orientação solar, área de piso e de cobertura, percentual de aberturas na fachada, porosidade quanto à ventilação, entre outros fatores.

Nota-se um número de horas expressivo de desconforto por frio. Estas horas ocorrem principalmente nas madrugadas, e nos ambientes com vedações opacas voltadas para o Sul. Estes resultados comprovam a importância da estratégia de inércia térmica para o clima de Brasília, que principalmente no período da seca (inverno), contribui para que as temperaturas internas tenham amplitude menor que as externas. Percebe-se que as aberturas voltadas para Norte (quarto 3) estão bem sombreadas, mas isso faz com que as horas de frio sejam prolongadas no período do inverno, o que requer o uso de materiais isolantes nas paredes. Já as aberturas voltadas para oeste (quartos 1 e 2) não estão tão bem sombreadas, mas fazem com que o conforto térmico no inverno seja melhor.

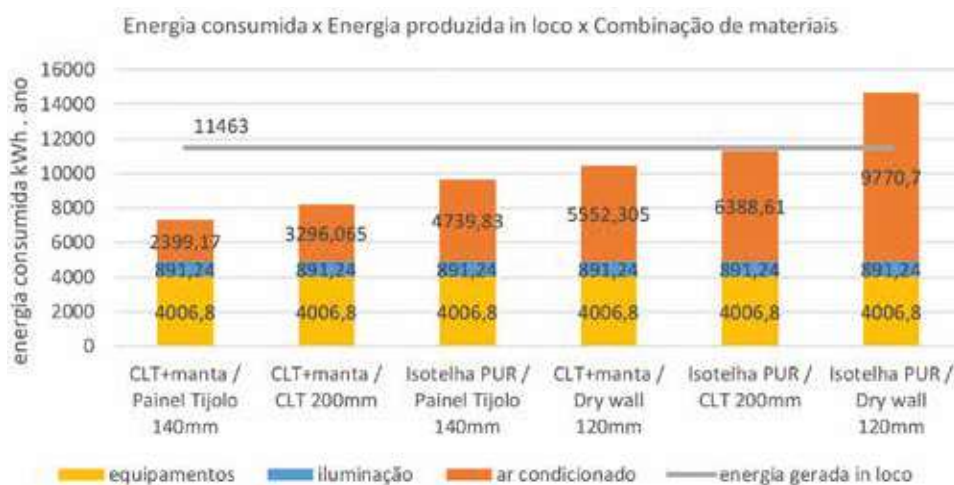
Da análise do consumo energético por uso final da residência, percebe-se que o ar-condicionado representa 40% a mais da energia consumida com os demais equipamentos eletrodomésticos e eletrônicos da casa.

De modo geral, percebe-se que para cada material utilizado as estratégias em relação às aberturas podem ser diferentes, de maneira a gerar balanços térmicos diferentes. Para materiais isolantes ou com baixa inércia térmica, deve-se posicionar as aberturas envidraçadas para Leste, de modo a esquentar o quanto antes o ambiente e elevar as temperaturas internas no inverno. Assim, durante a tarde, as paredes opacas isolantes isolam o calor externo. Para materiais com maior inércia térmica, as aberturas devem ser protegidas de modo a não deixar o sol entrar nas horas mais quentes, ou o calor não sairá.

Tem-se, por fim, o resultado de energia elétrica produzida pelos módulos fotovoltaicos ao longo do ano. Ao se analisar uma comparação entre a energia elétrica produzida na casa e a energia elétrica consumida em cada uma das combinações de materiais de parede e cobertura, pode-se verificar qual dessas combinações poderia resultar em uma casa de balanço energético nulo, e em quais delas não seria possível alcançar esse resultado.

A Figura 17 apresenta esse comparativo, mostrando, em amarelo, o consumo energético gerado pelo uso de equipamentos eletrodomésticos e equipamentos eletrônicos, e, em azul, o consumo energético gerado pelo uso do sistema de iluminação artificial. Esses dois valores de consumos são os mesmos para todas as combinações de materiais. Em laranja, mostra-se a variação no consumo de energia elétrica gerado pelo condicionamento artificial da casa, que varia para cada combinação em função da diferença de horas de desconforto por calor que cada uma apresentou nas simulações térmicas dos ambientes. A linha cinza, por sua vez, representa a produção de energia elétrica *in loco* através do sistema de módulos fotovoltaicos. Esse dado também é constante para todas as alternativas de combinações de materiais.

Figura 17: Comparativo dos totais anuais entre energia elétrica consumida em cada combinação de materiais e a energia produzida por módulos fotovoltaicos



Fonte: Adaptada de Sudbrack (2017, p. 140).

A Figura 17 mostra que para as combinações que ultrapassam a linha cinza, que é a constante do valor de energia elétrica produzida, não foi possível alcançar o balanço energético nulo. De um total de seis combinações de materiais, apenas uma não pode ser considerada adequada para alcançar resultados de consumo energético inferiores aos da produção de eletricidade pelos dos painéis fotovoltaicos para o clima de Brasília.

7. Considerações finais

Os resultados obtidos na simulação de produção de energia elétrica fotovoltaica mostram que em cinco das seis combinações é possível atender à demanda de eletricidade da residência unifamiliar estudada, com um sistema de módulos fotovoltaicos instalado em parte da cobertura da edificação. Atualmente, as Resoluções Normativas nº 482 e nº 687 (ANEEL, 2012; 2015) não permitem a comercialização da energia elétrica excedente produzida *in loco*, mas, para essas combinações de materiais em que a produção fotovoltaica excede os valores de consumo, seria possível também que a energia gerada fosse utilizada para outras finalidades, como para a recarga de carros elétricos ou para a iluminação pública.

Das seis combinações de materiais abordadas neste capítulo, uma não atingiu o balanço energético nulo. Uma delas apresentou valores de consumo energético muito próximos do valor simulado para geração de energia, podendo, portanto, ser considerada casa de balanço energético nulo. As demais quatro combinações apresentaram um número menor de horas excedentes por calor, resultando em um consumo energético mais baixo. Estas podem ser consideradas casas de balanço energético positivo, pois produzem mais energia do que consomem durante o período de um ano. Duas das seis combinações se destacaram por apresentar consumo ainda mais baixo, podendo ser consideradas as combinações mais adequadas às casas pré-fabricadas de balanço energético positivo para a cidade de Brasília: Cobertura em painel CLT, parede em painel de tijolos cerâmicos e parede em painel CLT, que combinados entre si representam os melhores resultados considerando-se o consumo energético final da casa.

Analisando-se os resultados de consumo de energia elétrica relacionados ao conforto térmico dos usuários para o clima de Brasília, viu-se que as definições de projeto têm impacto direto aos percentuais de horas de conforto nos ambientes, e conseqüentemente, impactam também no consumo energético final da casa. A combinação de materiais de parede e cobertura que se mostrou mais eficiente foi a de

cobertura em placa de CLT (*Cross Laminated Timber*) com 200 mm de espessura e paredes em Pannel de Tijolos Cerâmicos de 140 mm de espessura. Para esta combinação a casa apresentou um consumo anual de 7297 kWh, ou seja, 67,56 kWh/m² ao ano, e pode ser comparado a valores de consumo em casas ZEB com valores semelhantes no cenário internacional. Já a combinação que se mostrou menos eficiente foi a de cobertura em Isotelha PUR de 100 mm de espessura e paredes em *Drywall* de 120 mm de espessura. Para essa combinação, a mesma casa apresentou um consumo anual de 14668,74 kWh, equivalentes a 135,82 kWh/m² ao ano, valor mais distante das médias de casas ZEB citadas anteriormente.

Por fim, levando-se em consideração o clima de Brasília, os resultados deste capítulo mostram que não foi possível proporcionar, por meio do projeto proposto por Sudbrack (2017), uma solução em que os ambientes internos se encontrassem totalmente dentro da zona de conforto de acordo com os parâmetros de avaliação da ASHRAE 55-2013. Porém, os resultados das simulações de geração de energia são mais do que suficientes para abastecer 83% das combinações de materiais de cobertura e paredes propostos, considerando-se a instalação de painéis em uma área inferior à metade da área de cobertura da casa. Logo, conclui-se que é possível projetar casas pré-fabricadas de balanço energético nulo para o clima de Brasília, e que também é possível, para este clima, projetar casas pré-fabricadas que produzem mais energia elétrica do que consomem.

A pesquisa apresenta também algumas limitações, como, por exemplo, a simulação energética dos modelos para a obtenção de resultados de consumo relativos à climatização dos ambientes. O *software* oferece sistemas complexos de condicionamento de ar em sua aba HVAC, mas o dimensionamento e a calibragem do modelo para garantir que os resultados sejam corretos são complexos e demandam conhecimento específico sobre o assunto. Além disso, as modelagens dos sistemas de condicionamento de ar pedem uma temperatura máxima, para que, a partir do momento em que a temperatura operativa atingir esse limite, seja considerado o acionamento do sistema artificial. No entanto, este estudo avaliou justamente os limites

adaptativos de temperaturas máximas suportadas pelos usuários, e seria contraditório adotar uma mesma temperatura para simular o ano todo. Outra limitação foi o acesso às informações técnicas dos materiais utilizados nas simulações, principalmente no que diz respeito às propriedades térmicas. Muitos dos fabricantes não possuem catálogos técnicos oficiais, e outros trazem em seus catálogos informações incompletas, ou apenas a menção de que o desempenho térmico do material foi aprovado pela NBR 15575 – 2013, mas sem mencionar para que localidade, por exemplo.

Conclui-se, assim, que este estudo tem potencialidades de desenvolvimento em futuras pesquisas em diversas frentes. Uma possibilidade é utilizar os materiais mais apropriados encontrados neste capítulo e aplicar a metodologia utilizada variando outros fatores de projeto, como a porosidade da casa; os percentuais de aberturas envidraçadas e tipos de vidro; as proteções solares; a orientação solar; enfim, analisar o impacto de cada alteração de projeto na análise conforto térmico para edificações ventiladas naturalmente.

Pode-se afirmar também que outra possibilidade de desenvolvimento do tema é avaliar a melhora do conforto térmico partindo de soluções mais simples, como aumentar a velocidade do ar por ventilação mecânica ou introduzir outros tipos de sistemas de condicionamento de ar menos impactantes que o ar-condicionado, o que permitiria verificar, de forma mais gradual, o aumento no consumo de energia através de soluções mais simples, e muitas vezes menos onerosas. Isso poderia ser avaliado mediante a construção de um protótipo, em que seriam feitas medições e comparações aos resultados das simulações. O estudo pode, ainda, ser realizado para diferentes cidades do país, uma vez que uma mesma casa pré-fabricada pode ser construída em localidades diversas, e apontar quais as combinações de materiais seriam mais adequadas para o clima de cada cidade.

Pode-se ainda realizar um levantamento de custos de investimento e de custos ambientais e ciclo de vida dos diferentes materiais. Uma análise mais aprofundada, considerando-se a viabilidade econômica e o custo ambiental, poderia resultar em um cálculo de *payback*, em que se verificaria se a solução proposta é viável.

Por fim, pode ser realizado um estudo no âmbito do planejamento urbano, em que se proponha que o excedente de energia elétrica gerado por áreas residenciais possa suprir a necessidade de áreas comerciais ou industriais, por exemplo.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa n° 482, de 17 de Abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*. Brasília, 19 set. 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>. Acesso em: 6 jul. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa n° 687, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa n° 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos procedimentos de distribuição – PRODIST. *Diário Oficial da União*, Brasília, 2 dez. 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 6 jul. 2016.

ALVIM, Leila Guedes. *Avaliação do desempenho e do conforto térmico de uma edificação ventilada naturalmente seguindo as normas brasileiras de desempenho térmico e a ASHRAE 55*. 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

ASHRAE. ASHRAE - 55 2013: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineersw, Inc. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações*. Rio de Janeiro, 2005.

CLARK, Joe. *Energy simulation in building design*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE BRASÍLIA (CEB). *Dados primários fornecidos para fins acadêmicos*. Brasília, fevereiro de 2016.

DE DEAR, Richard. J.; BRAGER, Gail. S. Thermal Comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, v. 34, n. 6, p. 549-561, 2002.

DE VECCHI, Renata *et al.* ASHRAE 55 Adaptive model application in hot and humid climates: the Brazilian case. *Architectural Science Review*, v. 58, n.1, p. 93-101, 2014.

DOE. Building Energy Software Tools Directory. United States Department of Energy. Disponível em: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/. Acesso em: 20 maio 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Avaliação da Eficiência energética para os próximos 10 anos (2012-2021)*. Rio de Janeiro, 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Demanda de energia 2050*. Rio de Janeiro, 2014.

GOULART, Solange; LAMBERTS, Roberto; FIRMINO, Samanta. *Dados Climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras*. PW ed., São Paulo, dez. 1997.

HENSEN, Jan. L. M.; LAMBERTS, Roberto. *Building performance simulation for design and operation*. Oxon: Spon Press, 2011.

IEA. Solution sets and net zero energy buildings: a review of 30 net ZEBs case studies worldwide. Excerpt from: IEA Task 40 / Annex 52 towards net zero energy solar buildings. Paris, France: International Energy Agency, 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Arquivos climáticos 2016*. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016>. Acesso em: 20 jan. 2017.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. *Eficiência energética na arquitetura*. Rio de Janeiro: Eletrobras/PROCEL, 2014.

LAMBERTS, Roberto *et al.* *Towards a Brazilian standard on thermal comfort*. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da UFSC, 2013.

OLESEN, Bjarne W. The philosophy behind EN15251: Indoor environmental criteria for design and calculation of energy performance of buildings. *Energy and Buildings*, v. 39, n. 7, p. 740-749, 2007.

PVSYST. Software for the Study and Simulation of Photovoltaic Systems, 2016.

ROMERO, Marcelo de Andrade; REIS, Lineu Belico dos. *Eficiência energética em edifícios*. [S.l: s.n.], 2012.

SORGATO, Márcio José. *A influência do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético de edificações residenciais*. 2015. 258 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2015.

SILVA, Caio Frederico e. *Tecnologias ambientais: uso da simulação computacional na reabilitação sustentável*. Reabilita - curso de pós-graduação *lato sensu* em reabilitação ambiental sustentável arquitetônica e urbanística, 2014.

SUDBRACK, Larissa Olivier. *Casa zero: diretrizes de projeto para casas pré-fabricadas de balanço energético nulo em Brasília*. 2017. 214 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

TORCELLINI, Paul *et al.* *Zero energy buildings: a critical look at the definition*. California: ACEEE Summer Study, 2006.

VOSS, Karsten; MUSALL, Eike. *Net Zero Energy Buildings: International projects of carbon neutrality in buildings*. Munique: Green Books, 2013.

Simulação, Ambiente e Energia no Espaço Construído

Este livro aborda conceitos, tecnologias e métodos relacionados aos aspectos energético, higrotérmico e lumínico, apresentando como pano de fundo o uso de programas de simulação computacional, diagramas e ferramentas simplificadas para estudos analíticos, aplicados ao espaço construído em diferentes climas. Na primeira parte do livro, “*Inputs* – conforto, vento e luz”, o Capítulo 1 apresenta a ferramenta alemã de simulação computacional ENVI-met e o seu potencial na análise do microclima urbano; o Capítulo 2 mostra as variáveis climáticas e os arquivos climáticos utilizados nas simulações higrotérmica; o Capítulo 3 aborda os programas de simulação aplicados à ventilação natural; e o Capítulo 4 trata da complexidade dos estudos de iluminação e a necessidade de avaliar várias dimensões, simultaneamente. Na segunda parte, “*Outputs* – ambiente construído e energia”, o Capítulo 5 ensina a identificar o potencial de aproveitamento das envoltórias para integrar sistemas de geração de energia; o Capítulo 6 traz a análise de uma casa pré-fabricada de balanço energético nulo; e o Capítulo 7 insere, à guisa de conclusão, uma visão sistêmica sobre o uso da energia elétrica no país. O livro dialoga com diversos perfis profissionais, pois contempla temas atuais e inovadores para estudantes e profissionais de Arquitetura, Engenharia, Geografia, Planejamento Urbano e áreas relacionadas com a qualidade e sustentabilidade do ambiente construído.



EDITORA



UnB