



XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído

XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído

JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

A APLICAÇÃO DE METAS NZEB A EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL NA ZONA BIOCLIMÁTICA BRASILEIRA Nº 2

Leno Porto Dutra (1); Isabel Tourinho Salamoni (2); Eduardo Grala da Cunha (3)

(1) Engenheiro Eletricista, Mestrando do Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, leno.dutra@hotmail.com, Universidade Federal de Pelotas, Rua Benjamin Constant, 1359 – Pelotas (RS), (53) 98111.7541

(2) Arquiteta e Urbanista, Doutora em Engenharia Civil, Professora do Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, isalamoni@gmail.com, Universidade Federal de Pelotas, Rua Benjamin Constant, 1359 – Pelotas (RS), (53) 3284.5511

(2) Arquiteto e Urbanista, Doutor em Arquitetura, Professor do Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, eduardogralacunha@yahoo.com.br, Universidade Federal de Pelotas, Rua Benjamin Constant, 1359 – Pelotas (RS), (53) 3284.5511

RESUMO

As edificações são grandes consumidoras de energia e podem, além de consumir de forma mais eficiente, gerar a energia que utilizam. Este artigo visa identificar se uma unidade habitacional típica brasileira é capaz de cumprir objetivos de baixo consumo energético estabelecidos para a Europa. O método utilizado nesta pesquisa é experimental, através de um estudo de caso com um modelo de residência unifamiliar representativo de habitações brasileiras de interesse social. Foi realizada simulação de consumo e geração de energia no programa *EnergyPlus*TM, para comparação com metas nZEB, isto é, de edificações com consumo líquido de energia próximo de zero, identificados pelo “n” minúsculo, de “*nearly*”, na sigla. Os resultados indicam que, mesmo sem um projeto que leve em conta a eficiência energética, ações de melhoria no isolamento da envoltória já são capazes de promover o cumprimento da maioria das metas estabelecidas para as diferentes zonas climáticas europeias. Concluiu-se que a geração no próprio local, através de fontes renováveis, é importante para que se possam atingir os objetivos de baixo consumo de energia, mas as ações de eficiência são imprescindíveis para esse fim.

Palavras-chave: eficiência energética, geração de energia elétrica, nZEB.

ABSTRACT

Buildings are significant consumers of energy and have potential to consume it more efficiently but also generate the energy they use. This article aims to identify if a typical Brazilian house is able to meet low energy consumption goals set for Europe. The method used in this research is experimental, through a case study with a model of single family residence representative of Brazilian low-income housing. Simulation of energy consumption and generation was performed in *EnergyPlus*TM, for comparison with nZEB targets, *i.e.* buildings that consume net energy nearly zero, identified by lower-case ‘n’. The results indicate that even if the design is not energetically efficient, an improvement in the isolation of the building envelope can make it comply with most of the goals considered for any European climatic zone. It was concluded that onsite renewable energy generation is important to achieve low energy consumption targets, but efficiency actions are essential for this purpose.

Keywords: energy efficiency, electric power generation, nZEB.

1. INTRODUÇÃO

Dentre as maiores riquezas que as nações possuem, estão seus recursos naturais. O Brasil, por suas dimensões continentais e sua grande biodiversidade, encontra-se em situação privilegiada a esse respeito. Tratando-se de fontes de energia, enquanto o mundo supre apenas 26% de suas necessidades a partir de fontes renováveis (REN21, 2019), o Brasil insere-se nesse contexto de forma bastante diversa, com 42,9% de sua oferta interna de energia a partir de fontes renováveis (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018). Apesar disso, não se pode afirmar que haja estabilidade nesta condição favorável ou viés de melhoria futura, tanto pela perspectiva de crescimento da demanda quanto pela inserção recente de usinas movidas a combustíveis fósseis na matriz energética nacional (PEREIRA *et al.*, 2017).

No que diz respeito à participação dos edifícios no consumo energético, o Balanço Energético Nacional indicou que o uso residencial, comercial e público de energia somou 50,8% do consumo de eletricidade e 14,6% da energia total no Brasil em 2017 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018), enquanto na União Europeia (UE), também se excluindo os prédios industriais, os edifícios consomem 40% da energia (COMISSÃO EUROPEIA, 2016; PARLAMENTO EUROPEU; CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA, 2010). Pela expressiva representatividade desse uso em relação à demanda energética total, é imprescindível que estas sociedades visem à redução do consumo líquido de energia nos edifícios.

Torcellini *et al.* (2006) classificaram as edificações de consumo energético líquido nulo (NZEB, cujo “N” maiúsculo identifica “*net*”, diferenciando-os dos nZEB) em quatro tipos, dentre os quais:

- *Net Zero Site Energy* (NZEB-site): produz toda a energia que necessita, em base anual, totalizada no local do consumo.

- *Net Zero Source Energy* (NZEB-source ou NZEB-PE): produz toda a energia que necessita, em base anual, totalizada na fonte, o que implica o uso de fatores de conversão (*site-to-source energy conversion factors*) para obtenção dos valores equivalentes em energia primária utilizada para gerar e entregar a energia que o edifício necessita e também a que ele injeta na rede pública.

A Diretiva Desempenho Energético de Edificações (PARLAMENTO EUROPEU; CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA, 2010) estabelece conceito e princípios para obtenção de consumo líquido próximo de zero (nZEB), em vez de nulo (NZEB). Adaptando a sigla de Torcellini *et al.* (2006), os padrões de referência para o desempenho energético de nZEB-PE situam-se em faixas de acordo com a zona climática¹, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Metas de energia primária por zona climática na Europa (COMISSÃO EUROPEIA, 2016).

Zona	Cidades	Energia (kWh/(m ² .ano))		
		Consumo total	Fontes renováveis locais	Consumo líquido
Mediterrâneo	Catânia, Atenas, Larnaca, Luga, Sevilha, Palermo	80-90	60	20-30
Oceânica	Paris, Amsterdam, Berlim, Bruxelas, Copenhague, Dublin, Londres, Macon, Nancy, Praga, Varsóvia	85-100	45	40-55
Continental	Budapeste, Bratislava, Liubliana, Milão, Viena	85-100	45	40-55
Nórdica	Estocolmo, Helsinque, Riga, Gdansk, Tovarene	85-100	30	55-70

É nesse contexto que o presente trabalho foi desenvolvido, a fim de avaliar as condições e a viabilidade técnica para aplicação de metas normativas europeias para uso de energia em uma edificação brasileira situada na Zona Bioclimática nº 2 (ZB2)². A escolha de uma zona brasileira deve-se à necessidade de optar por um arquivo climático para as simulações, e a ZB2 apresenta características de diversidades sazonais (estações bem definidas, com muito frio e muito calor), que a habilitam para um estudo abrangente. Já para as metas a serem verificadas, todas as zonas climáticas da Europa foram consideradas, também em

¹ As zonas climáticas europeias são relacionadas na Recomendação 2016/1318 (COMISSÃO EUROPEIA, 2016) como cinco grupos de cidades com semelhanças em radiação global, graus-dias para resfriamento e aquecimento, além do potencial de resfriamento por ventilação noturna.

² As zonas bioclimáticas brasileiras são definidas na NBR 15220-3:2005 (ABNT, 2005b) como grupos de cidades com características relativamente homogêneas quanto ao clima, a fim de estabelecer estratégias comuns para otimizar o desempenho térmico das edificações. A ZB2 é composta por 33 cidades localizadas nas regiões Sul e Sudeste, e se caracteriza principalmente pelos extremos climáticos no inverno e no verão.

nome da abrangência. Não há intenção, neste trabalho, de fazer comparações entre climas, estratégias de eficiência energética, e nem de verificar equivalências geográficas entre o local do estudo e a região detentora das metas utilizadas. Há intenção, conforme a seção 2 (Objetivo), de aferir a viabilidade de uma casa brasileira, situada em zona bioclimática complexa – com períodos sazonais bem frios e bem quentes, atender a metas de baixo consumo energético. Como tais metas ainda não estão regulamentadas no Brasil, os autores foram buscar, nas experiências e na regulação da UE, as metas a serem aplicadas para essa aferição.

Esse estudo se desenvolve por meio de simulações computacionais. Estas foram realizadas com um dos cinco modelos referenciais adotados por Tavares (2006), que representam as edificações residenciais típicas brasileiras, segundo aquele autor. A forma de geração local escolhida foi a conversão fotovoltaica (FV), pela farta disponibilidade da fonte energética no Brasil e pelas possibilidades de integração do sistema FV ao edifício. O Brasil tem alta disponibilidade de radiação solar, superando países com potência instalada em geração FV muito maior³, o que mostra o grande potencial de crescimento dessa fonte no país. A região que recebe a menor quantidade de radiação no Brasil supera a que recebe a maior quantidade na Alemanha. A Figura 1 mostra as regiões mencionadas. Convertendo-se o valor da menor faixa brasileira, de 3500 Wh/(m².dia) para soma anual, a fim de comparar com o dado alemão, tem-se 1277,5 kWh/(m².ano), superior portanto aos 1200 kWh/(m².ano) máximos daquele país.

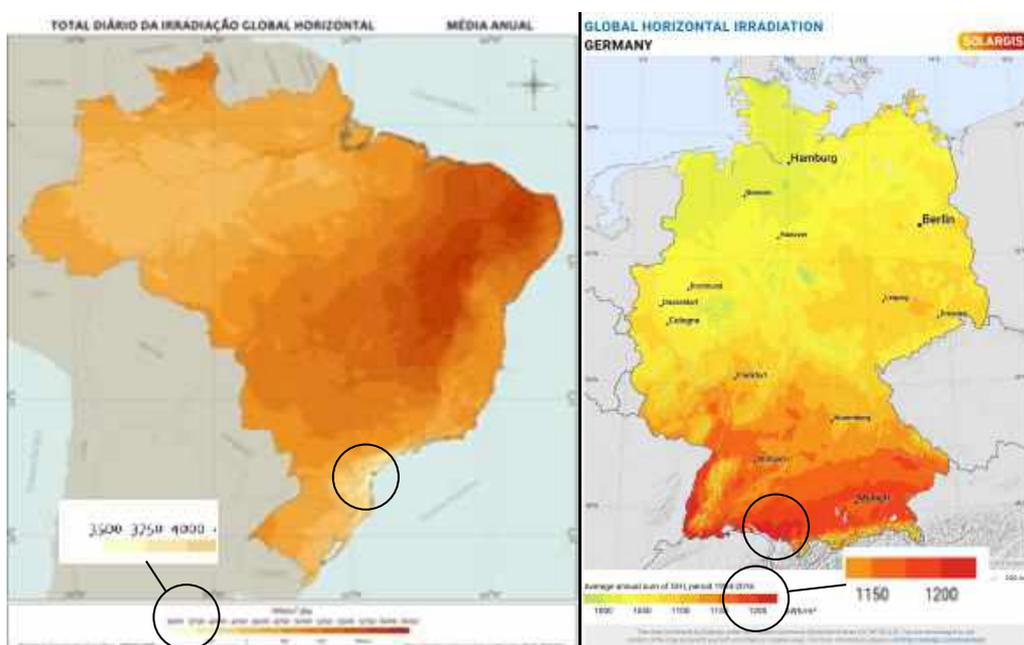


Figura 1 – Mapas do Brasil (E), com destaque para a região de menor média anual de irradiação solar, na faixa de 3500 Wh/(m².dia) (PEREIRA *et al.*, 2017), e da Alemanha (D), com destaque para a região de maior média (soma) anual de irradiação solar, na faixa de 1200 kWh/(m².ano) (SOLARGIS, 2019).

O comportamento térmico da edificação ventilada naturalmente não será discutido neste artigo. Em vez disto, foram estabelecidos, na seção 3 (Método), os limites de temperatura para o ambiente interno considerando a climatização artificial.

Também não faz parte do escopo deste trabalho a averiguação da viabilidade econômica das propostas de eficiência energética exploradas nas simulações.

2. OBJETIVO

Este trabalho visa identificar se uma edificação residencial típica de baixo padrão socioeconômico no Brasil, situada na ZB2, é capaz de atender às metas nZEB-PE estabelecidas pela UE. Com isso, os autores pretendem verificar se é viável, em uma zona bioclimática brasileira complexa, atingir níveis de eficiência energética que possam, no futuro, serem regulamentados no Brasil.

³ De acordo com o *Renewables 2019 Global Status Report*, em 2018 a potência instalada em geração FV no Brasil atingiu 2,3 GW e na Alemanha 45,3 GW (REN21, 2019).

3. MÉTODO

O trabalho utiliza a simulação computacional no *software EnergyPlus™* como estratégia avaliativa. O modelo escolhido foi adaptado e reproduzido no *software SketchUp©* com o *plugin Euclid©*. Após, foram feitas as configurações das simulações computacionais, incluindo os parâmetros do sistema solar FV. Por fim, foram realizadas as simulações e analisados os resultados obtidos.

O modelo sem geração de energia elétrica própria configura o caso-base estudado. Ao inserir a geração FV, busca-se verificar se é capaz de atingir metas nZEB-PE. Não atingidas as metas, uma melhoria no isolamento da envoltória do prédio é proposta. O fator de conversão *site-to-source* adotado foi de 1,6 (RUPP; LAMBERTS, 2017).

O método *Sandia Photovoltaic Array Performance Model (SAPM)* foi utilizado para o desempenho dos módulos FV e o método *Simple* para os inversores (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2018a).

3.1 Modelagem da edificação

O modelo em estudo foi obtido de Tavares (2006) e representa uma das unidades habitacionais residenciais típicas no Brasil. Especificamente, trata-se de uma casa unifamiliar de baixo padrão econômico. Foi adotada a orientação Norte/Sul para as maiores fachadas e desconsiderada a influência de prédios vizinhos ou outras barreiras e formas de sombreamento. A face Norte foi atribuída sem relação com a eficiência ou qualquer outro requisito, somente para configurar uma orientação genérica. A Figura 2 mostra a planta do modelo de casa estudado, e o Quadro 1 apresenta suas principais características físicas.

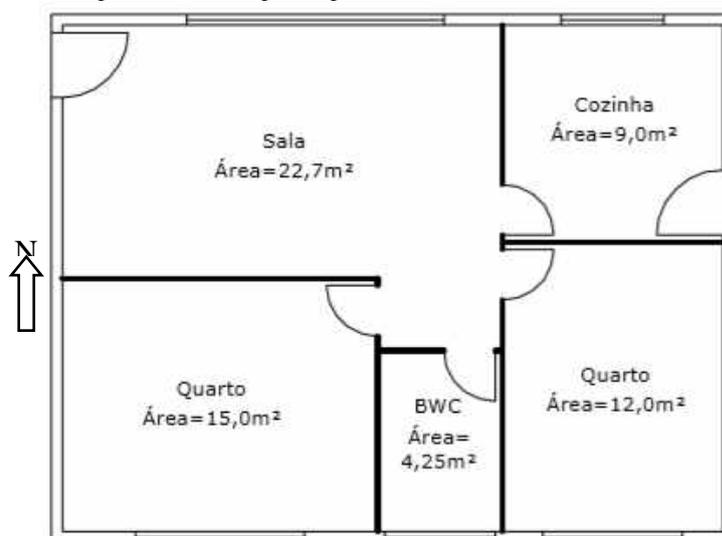


Figura 2 – Planta do modelo (TAVARES, 2006), com orientação geográfica atribuída pelos autores.

Área da unidade	63 m ²
Dimensões	Externas 7,0 x 9,0 m Área do terreno 98 m ²
Divisões internas	Pé direito 2,8 m Sala 21,0 m ² 2 Quartos 27,0 m ² Cozinha 9,0 m ² Banheiro 4,3 m ² Circulação 1,7 m ²
Estrutura	Concreto armado
Paredes	Blocos cerâmicos 8 furos (9 x 19 x 19),. Dimensões totais = 14 cm (9 bloco, 2,5 reb. Int., 2,5 reb. Ext.)
Acabamentos das Paredes	Reboco interno e externo, pintura em branco. Azulejos até 1,80 m na cozinha e banheiro.
Cobertura	Laje armada em blocos cerâmicos, vigotas em concreto armado. Espessura total 12 cm, rebocada. Recoberta com telhas de fibrocimento sobre estrutura de madeira.
Janelas	Esquadrias de ferro, vidros planos simples esp. 3mm. Área de esquadrias = 1/6 da área do piso
Portas	Portas em madeira: Ext. 0,9 x 2,10; int. 0,7 x 2,10
Pisos	Banheiro e cozinha em cerâmica comum nos demais cômodos em tacos de madeira.

Quadro 1 – Características físicas do modelo (TAVARES, 2006).

3.2 Principais parâmetros para simulação

Os parâmetros construtivos inseridos no *EnergyPlus* estão detalhados na Tabela 2 e no texto que se segue.

Para viabilizar o ingresso da camada de cerâmica homogênea equivalente ao conjunto heterogêneo do tijolo furado, foram utilizados o método de Ordenes *et al.* (2003) e os parâmetros do Anexo C da NBR 15220-2:2005 (ABNT, 2005a).

Como no caso dos fechamentos horizontais faz-se necessário escolher os parâmetros térmicos para simulação entre as opções de fluxo ascendente e descendente, as duas foram simuladas separadamente, a fim de verificar-se qual condição é majoritária ao longo do ano. Foram adotados os resultados da configuração para inverno (fluxo de calor ascendente), pois o consumo de energia elétrica para aquecimento predominou, com 64,61 kWh/(m².a), enquanto o consumo para refrigeração foi de 10 kWh/(m².a).

Tabela 2 – Parâmetros construtivos do modelo.

		Fechamentos opacos					
	Material	e m	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	c J/(kg. K)	U W/(m ² .K)	C (kJ/m ² .K)
Paredes externas e internas, exceto cozinha e banheiro	Argamassa reboco	0,025	1,15	2000	1000	2,71	162
	Cerâmica	0,0154	0,9	2188	920		
	Ar		Ver nota ⁴				
	Cerâmica	0,0154	0,9	2188	920		
Paredes da cozinha e banheiro	Argamassa reboco	0,025	1,15	2000	1000	2,71	162
	Cerâmica	0,0154	0,9	2188	920		
	Ar		Ver nota ⁵				
	Cerâmica	0,0154	0,9	2188	920		
Cobertura	Argamassa reboco	0,025	1,15	2000	1000	3,61	109
	Telha de fibrocimento	0,006	0,65	1700	840		
	Ar		Ver nota ⁶				
	Argamassa reboco	0,015	1,15	2000	1000		
	Cerâmica	0,00099	0,9	22015	920		
	Concreto	0,002	1,75	2200	1000		
	Ar		Ver nota ⁷				
	Concreto	0,002	1,75	2200	1000		
Portas externas	Madeira (0,9 x 2,1) m ²	0,03	0,29	800	1340		
	Madeira (0,7 x 2,1) m ²	0,03	0,29	800	1340		
Portas internas							
Pisos							
Banheiro e cozinha	Piso cerâmico	0,005	0,9	1600	920		
	Argamassa de assentamento	0,02	1,15	2000	1000		
	Laje de concreto	0,1	1,75	2200	1000		
Demais cômodos	Tacos de madeira	0,011	0,29	800	1340		
	Laje de concreto	0,1	1,75	2200	1000		

Onde: e = espessura da camada; λ = condutividade térmica; ρ = densidade de massa aparente; c = calor específico; U = transmitância térmica; C = capacidade térmica.

Para a absorvância das superfícies externas das paredes foi adotado o valor de 0,2, correspondente a uma pintura na cor branca (ABNT, 2005a). Para a cobertura de fibrocimento, a absorvância foi parametrizada em 0,593, correspondente a telha nova (SILVEIRA; MARINOSKI; LAMBERTS, 2012). O valor médio da absorvância de células FV é de 0,58 (ANDRADE, 2008), porém como esse valor é muito próximo do utilizado para as telhas, por simplicidade foi mantida a mesma absorvância de 0,593 para a cobertura, com ou sem módulos FV. A emissividade foi considerada no valor de 0,9 (ABNT, 2005a). As janelas foram configuradas com dados obtidos do banco internacional de dados óticos de produtos para envidraçamento (IGDB, na sigla em língua inglesa), acessada pelos autores através do programa WINDOW 7.6 (BERKELEY LAB, 2018).

3.2.1 Uso e ocupação

A agenda de ocupação adotada é a indicada pelo manual do Regulamento Técnico da Qualidade para Edificações Residenciais (RTQ-R) (INMETRO, 2012) para avaliação da envoltória da unidade habitacional por simulação computacional. A carga térmica originada por essa ocupação foi parametrizada com 108 W por pessoa nas salas e 81 W por pessoa nos dormitórios (INMETRO, 2012).

3.2.2 Configurações do sistema de iluminação

A densidade de potência de iluminação foi configurada em 5 W/m² para os dormitórios e 6 W/m² para os demais ambientes de permanência prolongada, de acordo com o manual do RTQ-R (INMETRO, 2012). A agenda de uso da iluminação segue o mesmo regulamento.

3.2.3 Carga de equipamentos

A densidade de carga de equipamentos, somente para as salas, foi parametrizada em 1,5 W/m², com dissipação ininterrupta (24 h/dia), conforme o manual do RTQ-R (INMETRO, 2012).

3.2.4 Sistema de climatização artificial

Para o condicionamento artificial dos ambientes, sendo refrigeração para salas e dormitórios e aquecimento para todos de permanência prolongada, foi adotado um sistema de expansão direta configurado através do objeto *HVACTemplate:Zone:Unitary* do *EnergyPlus*. O horário de disponibilidade do sistema foi considerado das 21h às 8h, com *setpoint* de temperatura de 22°C para aquecimento e 24°C para refrigeração.

A taxa de fluxo de ar por pessoa é de 0,00944 m³/s. O modo de operação do ventilador é contínuo. A eficiência do ventilador é de 0,7 e do motor de 0,9. Limite de horas não atendidas pelo sistema de 10%, e capacidade em *autosizing* (INMETRO, 2012). O *Coefficient of Performance* do sistema, tanto para refrigeração como para aquecimento, foi considerado no valor de 3,24, sendo este o patamar mínimo estabelecido pela Portaria INMETRO/MDIC nº 410 para obtenção da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia nível A (INMETRO, 2013).

A faixa de temperatura em que é considerada a condição de conforto térmico foi ajustada pelos limites mínimo e máximo estabelecidos pela NBR 16401-2:2008, que são de 21°C a 26°C, conforme a umidade relativa do ar (ABNT, 2008). A tolerância para aquecimento foi configurada em 1°C (22°C - 21°C) e para refrigeração em 2°C (26°C - 24°C).

3.2.5 Arquivos climáticos

Para realizar as simulações, foi utilizado o arquivo climático (LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES, 2018) da cidade escolhida. As informações geográficas principais estão relacionadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Informações geográficas de Pelotas (LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES, 2018).

Latitude	-32°
Longitude	-52°
Altitude	18 m

3.2.6 Configurações do sistema FV

O limite de ocupação da cobertura por módulos FV foi estabelecido através da relação entre áreas dos módulos e da face da cobertura utilizada. Como o trabalho que originou os modelos não especifica o desenho das coberturas mas estabelece o tipo de telha, fibrocimento, foi considerada uma única “água” com inclinação de 20° e face voltada para Norte, sem sombreamento. A área líquida disponível teve, além do desprezo dos avanços beirais, uma redução de 10% para levar em conta a provável impossibilidade de ocupar toda a face, devido a sobras fracionárias de espaço nos extremos dos arranjos FV. Dessa forma, os limites de ocupação estão indicados na Tabela 4.

Tabela 4 – Limites de área de cobertura a ocupar com os módulos FV.

Área de planta (a) m ²	Ângulo de elevação (b)	Área da face de telhado (c = a / cos [b]) m ²	Limite a ocupar (d = 90%.c) m ²
63	20°	67	60

A inserção dos módulos FV no *EnergyPlus* foi realizada através de uma superfície inclinada de sombreamento sobre a cobertura.

O modelo utilizado é BP Solar SX3200 e possui as características apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Dimensões e parâmetros elétricos do módulo FV (NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, 2017; US DEPARTMENT OF ENERGY, 2018b; VERDISENO INC., [s.d.]).

Parâmetros	Valores
Largura	0,838 m
Comprimento	1,679 m
Área	1,406 m ²
Potência nominal STC	200 W
Número de células em série	50
Número de células em paralelo	1
Corrente de curto-circuito	8,7 A
Tensão de circuito aberto	30,8 V
Corrente no ponto de máxima potência	8,2 A
Tensão no ponto de máxima potência	24,5 V
Fator de diodo	1,319
Corrente com 0,5.Voc (Ix0)	8,59 A
Corrente com 0,5.(Vmp+Voc) (Ixx0)	5,71 A

A Tabela 6 mostra o número máximo de módulos FV a instalar na cobertura, de acordo com os limites de área já definidos.

Tabela 6 – Número máximo de módulos FV.

Limite a ocupar conforme Tabela 4 (d) m ²	Área do módulo conforme Tabela 5 (e) m ²	Número máximo de módulos (f = d / e)
60	1,406	43

Os demais parâmetros SAPM foram obtidos dos bancos de dados dos programas *System Advisor Model* (NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, 2017) e *EnergyPlus* (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2018a), mediante consulta pelo modelo escolhido para os módulos FV.

O modelo do inversor adotado foi *Simple*, com valor de eficiência fixo em 97%, típico de inversores de fabricação recente (ZEB *et al.*, 2018).

A efetivação do número de módulos sobre a cobertura nos dados de entrada foi feita através do campo *Number of Modules in Series*, do grupo *Generator:Photovoltaic*.

3.2.7 Melhoria no isolamento da envoltória

Em não sendo possível atingir as metas nZEB-PE somente com a inserção da geração FV, as seguintes medidas de conservação de energia foram adotadas:

- substituídos os vidros claros 3 mm por vidros duplos, do tipo insulado composto por dois vidros laminados de 8 mm e 6 mm, respectivamente, e uma câmara de ar de 16 mm;
- incrementado em 4 cm o isolamento térmico da envoltória opaca, exceto pisos. O isolante térmico utilizado foi o poliestireno expandido moldado (EPS), com $\lambda = 0,04 \text{ W/(m.K)}$, $\rho = 35 \text{ kg/m}^3$ e $c = 1420 \text{ J/(kg.K)}$, aplicado nas paredes e sobre a laje da cobertura.

Na análise de resultados, este caso (base + FV + melhoria no isolamento) foi chamado de nZEB-PE.

4. RESULTADOS

A simulação resultou nos valores relacionados na Tabela 7, convertidos para energia primária.

Tabela 7 – Consumo e geração estimados pela simulação.

Caso	Consumo total kWh/(m ² .ano)	Geração FV kWh/(m ² .ano)	Consumo líquido kWh/(m ² .ano)
Base	149,7	-	149,7
Base com FV	140,2	59,4	80,8
nZEB-PE	98,1	59,4	38,7

O sombreamento do telhado pelos módulos FV fez aumentar o consumo para aquecimento e reduzir o consumo para resfriamento, com saldo positivo, ou seja, reduziu o consumo total do caso-base. A geração no próprio local reduziu o consumo líquido, porém o resultado para o caso-base ainda ficou muito distante das metas europeias. Não por falta de geração, já que seu valor praticamente igualou à meta de 60 kWh/(m².ano), mas porque o consumo total ainda é muito elevado em relação à faixa permitida para qualquer uma das zonas climáticas. O alto potencial de geração FV é característico do Brasil, como visto na seção 1 (Introdução).

Ao eficientizar o prédio somente com um maior isolamento já foi possível atingir os objetivos de consumo total das regiões climáticas referenciais, exceto a Mediterrânea. Como a geração ultrapassou as metas dessas mesmas regiões, o consumo líquido ficou mais baixo do que seus limites mínimos.

A Figura 3 mostra a distribuição dos consumos por tipo de uso final, onde se pode constatar o efeito do sombreamento do telhado sobre as cargas de aquecimento e resfriamento. A iluminação e os equipamentos são constantes em todas as configurações, pois não fez parte do escopo desta pesquisa tratar aspectos como, por exemplo, o uso de luz natural e a dimerização da iluminação.

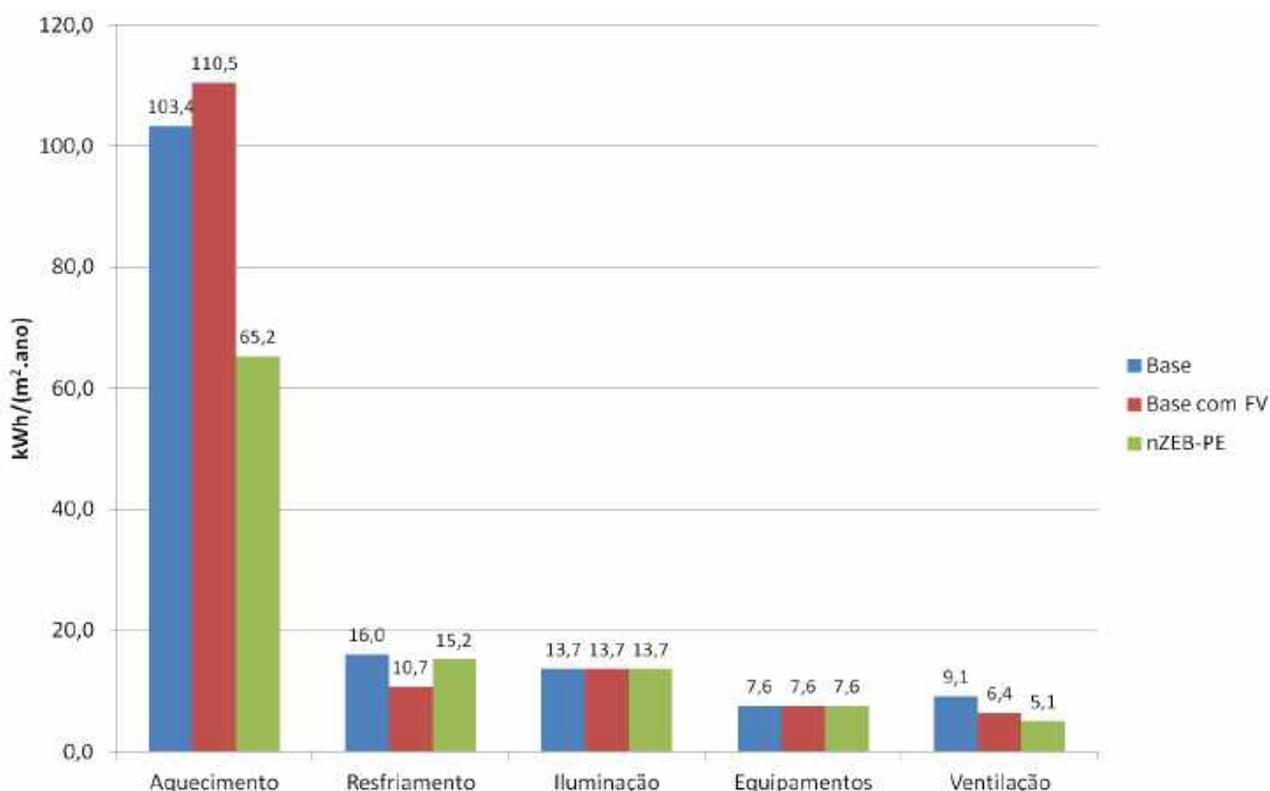
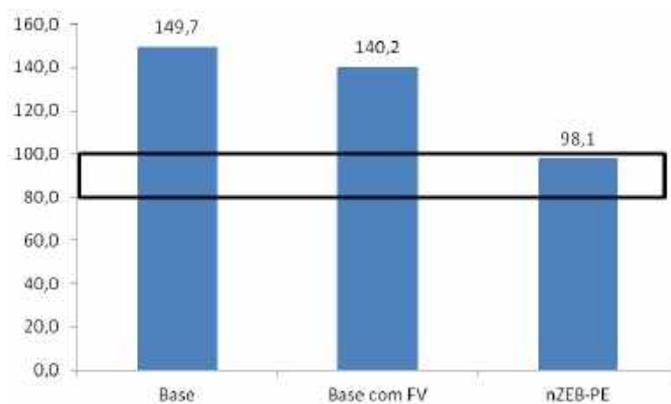


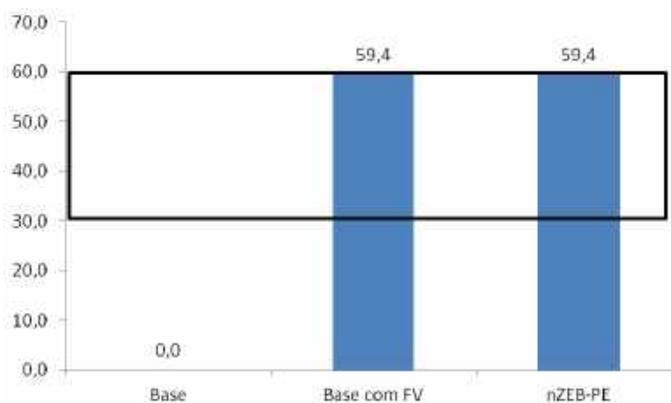
Figura 3 – Distribuição do consumo por tipo de uso final.

A Figura 4 compara os resultados atingidos com as metas das zonas climáticas europeias agrupadas, isto é, cada faixa de limites contendo o limite inferior da zona com faixa mais baixa e superior da zona com faixa mais elevada.

(A)



(B)



(C)

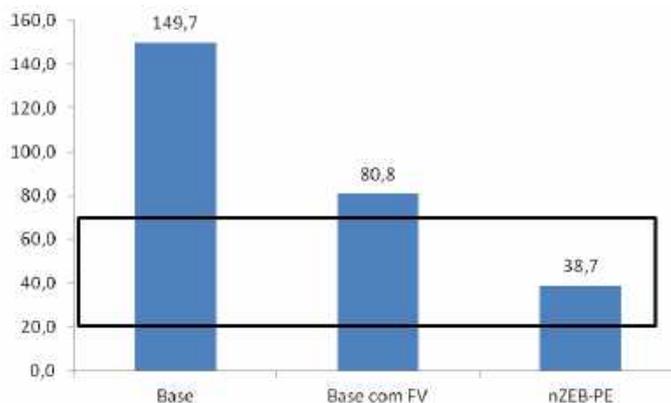


Figura 4 – Comparação dos resultados das simulações (barras) com as faixas de metas que agrupam todas as zonas climáticas europeias (retângulos vazados). (A) Consumo total [kWh/(m².ano)]. (B) Geração FV [kWh/(m².ano)]. (C) Consumo líquido [kWh/(m².ano)].

Tais resultados demonstram que os objetivos europeus de baixo consumo são facilmente alcançados na zona bioclimática brasileira utilizada nesta pesquisa. Sem nenhum esforço de projeto, foi possível chegar muito próximo de atingir as metas estabelecidas. Uma melhoria na qualidade do projeto, com a adequada escolha de materiais construtivos, o sombreamento das aberturas e outras medidas, provavelmente seria decisiva para o alcance dos objetivos.

5. CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos, os autores consideram que o objetivo desta pesquisa foi cumprido, pois apesar de o modelo de unidade habitacional residencial de baixo padrão não ter atingido as metas nZEB-PE com a instalação de geração FV, este mesmo modelo atingiu a maioria delas somente com uma melhoria no isolamento da envoltória.

Os resultados deste trabalho referendam a necessidade que uma edificação tem de gerar, ao menos em parte, a energia que consome, através de fontes renováveis. Mas, fundamentalmente, esses resultados indicam que a eficiência no uso da energia é decisiva para a obtenção de *status* nZEB-PE. Portanto, apesar

da grande disponibilidade do recurso solar, a simples estratégia de acrescentar geração própria a um projeto pouco eficiente no uso da energia não é suficiente para obter-se um nZEB-PE no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **NBR 15220-2**: desempenho térmico de edificações. Parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.
- ABNT. **NBR 15220-3**: desempenho térmico de edificações. Parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.
- ABNT. **NBR 16401-2**: instalações de ar-condicionado: sistemas centrais e unitários. Parte 2: parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- ANDRADE, A. C. **Análise e simulação da distribuição de temperaturas em módulos fotovoltaicos**. Orientador: Arno Krenzinger. 2008. 125 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2008.
- BERKELEY LAB. **WINDOW v. 7.6.04 database v. 62.1**. [S.l.]: Berkeley Lab, 2018. Disponível em: <https://windows.lbl.gov/software/igdb>. Acesso em: 9 set. 2018.
- COMISSÃO EUROPEIA. Recomendação (UE) 2016/1318 da Comissão. **Jornal Oficial da Comissão Europeia**. Bruxelas: 2016. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016H1318&from=EN>. Acesso em: 21 jul. 2018.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2018 ano base 2017**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2018. ISSN: 00311057. Disponível em: <http://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/IFES/BV/epe64.pdf>. Acesso em: 26 out. 2018.
- INMETRO. **Manual RTQ-R**. [S.l.: s.n.], 2012. Disponível em: http://www.pbgedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/residencial/downloads/Manual_de_aplicação_do_RTQ-R-v01.pdf. Acesso em: 17 nov. 2018.
- INMETRO. Portaria nº 410, de 16 de agosto de 2013. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 39, n. 160, 20 ago. 2013. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC000789.pdf>. Acesso em: 21 out. 2018.
- LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Arquivos climáticos INMET 2018**. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2018. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2018>. Acesso em: 2 mar. 2019.
- NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **Sandia PV module database - library editor of System Advisor Model (SAM)**. [S.l.]: NREL, 2017.
- ORDENES, M.; PEDRINI, A.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulações no VisualDOE-3.1 UFSC**. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2003. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/node/266>. Acesso em: 9 set. 2018.
- PARLAMENTO EUROPEU; CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação). **Jornal Oficial da União Europeia**. Strasbourg, France, 2010. DOI: 10.3000/17252601.L_2010.153.por. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/pt/TXT/?uri=CELEX:32010L0031>. Acesso em: 22 jul. 2018.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2a edição**. São José dos Campos: INPE, 2017. ISBN: 9788517000300. DOI: 978-85-17-00030-0. Disponível em: http://sonda.ccst.inpe.br/publicacoes/atlas_solar.html. Acesso em: 3 nov. 2017.
- REN21. **Renewables 2019 Global Status Report**. Paris: REN21. Disponível em: <https://www.ren21.net/gsr-2019>. Acesso em: 5 jul. 2019.
- RUPP, R. F.; LAMBERTS, R. **Fatores de conversão de energia elétrica e térmica em energia primária e em emissões de dióxido de carbono a serem usados na etiquetagem de nível de eficiência energética de edificações**. Florianópolis: UFSC/CB3E, 2017. Disponível em: http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/Relatório_Fatores_de_Conversão.pdf. Acesso em: 26 jul. 2018.
- SILVEIRA, R.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R. Avaliação da absorvância à radiação solar e temperatura superficial de telhas de edificações do campus da UFSC. In: XIV ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais** [...] Juiz de Fora: ANTAC, 2012. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/entac2014/2012/docs/1073.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2019.
- SOLARGIS. **Solar resource map © 2019 Solargis**. [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <https://solargis.com>. Acesso em: 1 jul. 2019.
- TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. Orientador: Roberto Lamberts. 2006. 225 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, UFSC, Florianópolis, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/89528>. Acesso em: 26 jul. 2018.
- TORCELLINI, P.; PLESS, S.; DERU, M.; CRAWLEY, D. Zero energy buildings: a critical look at the definition. In: ACEEE Summer Study. **Anais** [...] Pacific Grove, CA - USA: NREL, 2006. Disponível em: <http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39833.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2018.
- US DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus v.9.0.1**. [S.l.: s.n.], 2018a. Disponível em: <https://energyplus.net>. Acesso em: 20 out. 2018.
- US DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus Version 9.0.1 Documentation - Input Output Reference**. [S.l.: s.n.], 2018b.
- VERDISENO INC. **Solar Design Tool**. Disponível em: <http://www.solardesigntool.com/components/module-panel-solar/BP/9/SX3200B/specification-data-sheet.html>. Acesso em: 2 mar. 2019.
- ZEB, K.; UDDIN, W.; KHAN, M. A.; ALI, Z.; ALI, M. U.; CHRISTOFIDES, N.; KIM, H. J. A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 1120–1141, 2018. DOI 10.1016/j.rser.2018.06.053.