DISCUSSÃO DO BALANÇO ENERGÉTICO NULO PARA UM EDIFÍCIO DE ESCRITÓRIOS EM TRÊS GRUPOS CLIMÁTICOS BRASILEIROS

Ludimila Mallmann Schmalfuss (1); Roseana Bonotto Ruivo (2); Isabel Tourinho Salamoni (3); Celina Maria Britto Correa (4); Eduardo Grala da Cunha (5)
(1) Mestranda, Engenheira Civil, ludimila.engcivil@hotmail.com*
(2) Mestranda, Arquiteta e Urbanista, roseanabonotto@hotmail.com*
(3) Doutora, Arquiteta e Urbanista, isalamoni@gmail.com*
(4) Doutora, Arquiteta e Urbanista, celinab.sul@terra.com.br*
(5) Doutor, Arquiteto e Urbanista, eduardogralacunha@yahoo.com.br*
*Universidade Federal de Pelotas, Rua Benjamim Constant 1359, Pelotas, CEP 96010-020, (53) 3284-5500

RESUMO
As edificações são grandes responsáveis pelo elevado consumo de energia elétrica, entretanto, possuem grande potencial de geração de energia solar fotovoltaica (FV). Assim, a implantação de sistemas fotovoltaicos (SFV) em edifícios, principalmente comerciais, tem se mostrado adequada. Essa combinação é um fator relevante para um futuro mais sustentável, por meio de edifícios com balanço energético nulo. Assim, o objetivo deste trabalho é de investigar a possibilidade de um edifício de escritórios atingir o balanço energético nulo, a partir de diferentes níveis de eficiência energética considerando três grupos climáticos brasileiros, segundo a INI-C (Instrução Normativa do Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas). Deste modo, a metodologia adotada foi a simulação computacional, por meio do *software EnergyPlus* e o cálculo de geração de energia FV através do programa Radiasol. Os resultados demonstraram que o objeto de estudo teve uma classificação A em eficiência energética, para todos os grupos climáticos analisados, sendo possível a determinação de casos de referência com classificação B, C e D. Assim, foram aplicados SFV tanto na cobertura quanto nas áreas opacas das fachadas como forma de compensar o consumo de energia nas diferentes classes energéticas. Verificou-se a possibilidade do balanço energético nulo em alguns dos casos analisados.
Palavras-chave: eficiência energética, balanço energético nulo, BIPV, edifícios de escritórios, simulação computacional.

ABSTRACT
Buildings are largely responsible for a high electric energy consumption; however, they have great potential for generating photovoltaic (PV) solar energy. Consequently, the implementation of photovoltaic (PV) systems in buildings, mainly commercial, has shown to be adequate. This combination is a relevant factor for a more sustainable future, through buildings with zero energy balance. Thus, the objective of this work is to investigate the possibility of an office building achieving zero energy balance from different levels of energy efficiency, considering three Brazilian climate groups, according to INI-C (Inmetro Normative Instruction for the Energy Efficiency Class of Commercial, Services and Public Buildings). Computer simulation was conducted though the EnergyPlus software, as well as the calculation of PV energy generation through the Radiasol program. Results showed that the object of study had a classification A in energy efficiency, for all climate groups analyzed, making it possible to determine reference cases with classification B, C and D. Hence, PV systems were applied both in the roof and in the opaque areas of facades as a way of compensating energy consumption in different energy classes. The possibility of zero energy balance was verified in some of the cases analyzed.
Keywords: energy efficiency, zero energy balance, BIPV, office buildings, computer simulation.

1. INTRODUÇÃO

Segundo dados da Agência Internacional de Energia (2020), os setores de construção civil e edifícios são responsáveis por 36% do consumo final global de energia e quase 40% do total de emissões de CO2. Já na perspectiva brasileira, cerca de 42,3% da energia elétrica é consumida pelo setor de edificações, sendo que 16,9% pelos edifícios comerciais (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019).

No contexto brasileiro, a fim de promover a redução do consumo de energia elétrica das edificações comerciais, em 2009, foi publicado o Regulamento Técnico da Qualidade para o nível de eficiência energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), (BRASIL, 2013). Porém, o método de avaliação da eficiência energética de edificações comerciais passou por revisão e em fevereiro de 2021 teve publicação da sua versão final, através da INI-C – Instrução Normativa do Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas, que define uma nova metodologia para classificar o nível de eficiência energética dos edifícios comerciais (BRASIL, 2021).

A difusão de edifícios de balanço energético nulo, capazes de contribuir para a redução do seu consumo energético, através de fontes renováveis de energia (FRE), tem se mostrado uma importante estratégia para alcance de benefícios sociais, econômicos e ambientais da sociedade, assim, dentre as formas possíveis de se obter essas edificações, se destaca o uso da energia FV, a qual vem crescendo exponencialmente quando comparada a outras FRE. Devido às diversas possibilidades de aplicação e integração com a envoltória da edificação, pode ser aplicada tanto nas áreas de cobertura, nas áreas opacas das fachadas, em elementos de proteção solar, quanto em janelas e/ou vidros (DIDONÉ, 2014).

Outro fator relevante para a utilização dos SFV se deve à grande disponibilidade de radiação solar no Brasil, que supera países que possuem potência instalada e investimentos muito maiores, o que demonstra ser um grande potencial de crescimento dessa fonte no país.

A implantação da tecnologia FV em edifícios comerciais tem se mostrado adequada, tendo em vista que o período de ocupação e consequentemente o maior consumo de energia ocorrem durante o dia, período em que os módulos FV produzem eletricidade. Em períodos de excesso de energia gerada pelo SFV, a energia pode ser transferida à rede elétrica local.

Sendo assim, este trabalho busca compreender e avaliar qual o nível de eficiência energética mínimo a ser alcançado, de modo a se obter um edifício comercial horizontal de balanço energético nulo, localizado em três diferentes grupos climáticos brasileiros.

2. OBJETIVO

O principal objetivo do trabalho é verificar a possibilidade de um edifício horizontal de escritórios atingir o balanço energético nulo, a partir de diferentes níveis de eficiência energética considerando em três grupos climáticos brasileiros, segundo a INI-C, sendo eles: GCL-01-B, GCL-05 e GCL-24.

3. MÉTODO

O estudo em questão adotou a simulação computacional dinâmica. Os softwares utilizados foram o *SketchUp Make 17*, com *plugin Euclid* versão 0.9.3 para modelagem e simulação, no *software EnergyPlus* 8.7.0. O cálculo de geração de energia FV utilizou o programa Radiasol (LABSOL UFRGS, 2019), através do banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et. al*., 2017).

O trabalho foi desenvolvido em um processo de 3 (três) etapas principais: i) definição e caracterização do estudo de caso (Caso Base); ii) aplicação do método de simulação da INI-C em três Grupos Climáticos (GCL-01-B, GCL-05 e GCL-24); iii) verificação da possibilidade de transformação de todos os casos com balanço energético nulo.

3.1. Definição e caracterização do estudo de caso (Caso Base)

Foi definido como objeto de estudo uma edificação horizontal de escritórios, de três pavimentos de planta livre, com uma unidade consumidora, sem edificações em seu entorno imediato.

A edificação que possui área total de 1.881,28m², com fachada principal orientada a -41º no sentido noroeste, serviu como Caso Base para as simulações computacionais de desempenho termoenergético. Para essas, foram utilizados arquivos climáticos do INMET, LABEEE (2021), disponível para cada uma das cidades analisadas. Definidas 20 zonas térmicas, separadas em 10 de uso transitório (circulações, área de escada e banheiros) e 10 de uso permanentes (escritórios). O modelo tridimensional do Caso Base é apresentado na Figura 01. Os mesmos foram avaliados em três cidades brasileiras, localizadas nos grupos climáticos distintos: Florianópolis-SC (GCL-01B) escolhida por ser a zona bioclimática mais fria e de maior

amplitude térmica; Pelotas-RS (GCL-05), zona de maior amplitude térmica e Cuiabá-MT (GCL-24), zona mais quente e de maior amplitude térmica.

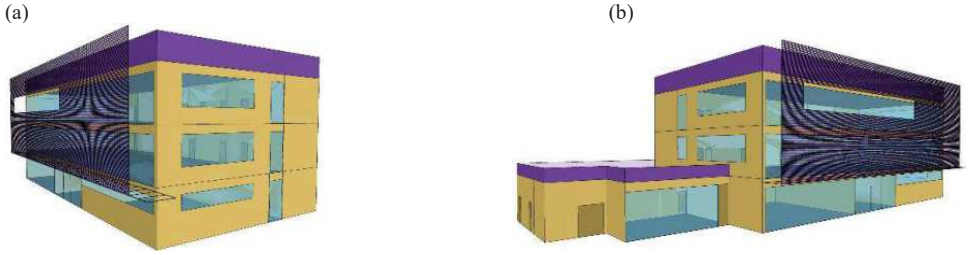


Figura 01 – (a) e (b) Modelo tridimensional do Caso Base – *SketchUp* e *Plugin Euclid.*
Fonte: Autores.

3.1.1. Configuração do envelope construtivo

A edificação apresenta pé-direito de 2,90 m, composta por estrutura metálica e laje de concreto armado, com paredes em *steel frame,* sendo as internas de duas camadas de gesso, montante metálico com lã de rocha e duas camadas de gesso. Já as paredes externas do pavimento térreo possuem camadas de ACM, OSB, montante metálico com lã de rocha e duas camadas de gesso, sendo as paredes externas do segundo e terceiro pavimento iguais às do térreo, porém ao invés da camada de ACM, apresenta *Miniwave*. O piso do térreo é composto por radier, contrapiso, poliestireno e carpete. Apresenta, ainda, forro de gesso com isolamento. O percentual de abertura de fachada (PAF) é igual a 34,20%, com elemento de proteção solar do tipo brise de alumínio em sua fachada principal. Na configuração no *EnergyPlus*, foram necessárias informações quanto às propriedades térmicas dos materiais construtivos, exibidos na Tabela 1.

Tabela 1 –Propriedades térmicas dos materiais construtivos do Caso Base.

	Material	**e (m)**	**λ W/(m.K)**	**ρ kg/m3**	**c J/(kg.K)**	**U W/(m².K)**
Paredes	ACM	0,004	230	2700	880	1,01
	Miniwave	0,004	230	2700	880	
	OBS	0,011	0,17	650	2300	
	Montante metálico	0,090				
	Lã de rocha	0,050	0,045	100	750	
	Gesso	0,013	0,350	750	840	
	Tijolo cerâmico	0,250	1,000	423	920	
	Azulejo cerâmico	0,005	0,900	1600	920	
Cobertura	Telha de alumínio	0,004	230	2700	880	1,719
	Ar	ver nota[1]				
	Laje de concreto	0,100	1,75	2200	1000	
	Lã de vidro	0,100	0,045	50	7000	
	Gesso	0,013	0,35	750	840	
Portas Externas	Caixilhos de alumínio Vidro reflexivo cinza	ver tabela 2				5,733
Portas Internas	Compensado 5mm	0,005	0,120	300	1340	
	Ar	ver nota[2]				
	Compensado 5mm	0,005	0,120	300	1340	
Janelas	Caixilhos de alumínio Vidro reflexivo cinza 8mm	ver tabela 2				5,733
Pisos Tipo 1	Piso de carpete	0,005	0,07	200	400	2,876
	Poliestireno (EPS)	0,030	0,04	25	1,42	
	Laje de concreto	0,150	1,75	2200	1000	
Pisos Tipo 2	Piso cerâmico	0,005	0,900	1600	920	3,455
	Argamassa de assentamento	0,010	1,15	2000	1000	
	Poliestireno (EPS)	0,030	0,04	25	1,42	
	Laje de concreto	0,150	1,75	2200	1000	

* e – espessura (m)
* λ – condutividade térmica (W/mK)
* ρ – peso específico aparente (kg/m³)
* c – calor específico (J/kgK)
* U – transmitância térmica total (W/m²K)
* C – capacidade térmica total (kJ/m²K)

Nota 1: Resistência térmica do ar (R_{ar}) com direção do fluxo de calor descendente = 0,21
Nota 2: Resistência térmica do ar (R_{ar}) com direção do fluxo de calor horizontal = 0,16
Fonte: adaptação da ABNT NBR 15220 (NBR, 2005).

Tabela 2 - Parâmetros óticos do vidro reflexivo cinza utilizado nas janelas do caso base.

Espessura (mm)	8,00	Refletância à radiação visível na face 2	0,51
Transmitância à radiação solar (incidência normal)	0,24	Emissividade em ondas longas na face 1	0,84
Refletância à radiação solar na face 1	0,17	Emissividade em ondas longas na face 2	0,84
Refletância à radiação solar na face 2	0,17	Condutividade (W/m.K)	1,00
Transmitância à radiação solar no espectro visível	0,20	Transmitância térmica (W/m²)	5,7
Refletância à radiação visível na face 1	0,21	Fator Solar	0,39

Fonte: CB3E; ABIVIDRO (2015).

3.1.2. Configuração do sistema de iluminação, padrão de ocupação, equipamentos e sistema de climatização

A agenda de funcionamento do edifício foi estabelecida durante os dias da semana das 8h às 12h e das 13h30min às 18h e aos sábados, das 8h às 12h. Como fração radiante do sistema de iluminação, foi utilizado o valor de 0,42, conforme o *Manual Input/Output Reference* (USDOE, 2020). Para configuração das cargas internas foram utilizados os valores de 8,10 W/m² para a iluminação artificial, conforme projeto de iluminação. Já para carga interna referente a ocupação e equipamentos, configurou-se com os valores de 10 m²/pessoa e 15,00 W/m², respectivamente, conforme INI-C. O sistema de climatização, foi configurado do tipo VRF (*Variable Refrigerant Flow*), com capacidade maior que 70 kW, e valores de coeficiente de performance de 3,33 e 3,40 para resfriamento e aquecimento respectivamente e temperaturas de controle para aquecimento e resfriamento iguais a 21ºC e 24ºC, respectivamente.

3.2. Aplicação da INI-C no Caso Base

Nesta etapa foi realizada a análise e aplicação da INI-C no Caso Base, nos três Grupos Climáticos (GCL-01-B, GCL-05 e GCL-24). Para a obtenção da classe de eficiência do edifício, pelo método de simulação, além da elaboração de um modelo representativo da edificação real (Caso Base), também foi necessária a criação de um modelo representativo da condição de referência (Classe D), utilizando característica da tipologia de escritórios, apresentadas na Tabela 4 (BRASIL, 2021).

3.2.1. Elaboração do Modelo na Condição de Referência

O modelo que representa a condição de referência foi configurado e simulado, de acordo com as Tabelas A.1 e A.9 do Anexo A da INI-C.

3.2.2. Determinação da classe de eficiência energética geral do caso base

A partir das simulações, foi possível obter o consumo final por uso dos sistemas individuais em energia elétrica. Esses resultados foram utilizados para calcular o consumo de energia primária (CEP) do Caso Base, condição real e do modelo de referência. Dessa maneira, o procedimento de cálculo e avaliação ocorreram conforme informações apresentadas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Equações para determinação da classe de eficiência energética.

(i)	CEP_{REAL} ou $CEP_{REF} = (CTE_E.fcE)$	(iv)	$FF = Aenv/Vtot$
(ii)	$CTE_E = CIL + CCA_E + CEQ$	(v)	$i = (CEP_{REF}.CRCEP_{D-A})/3$
(iii)	$PRCEP_{REAL-D} = 1-(CEP/CEP_{REF})*100$		

Fonte: Adaptado (BRASIL, 2021).

Tabela 41 - Intervalos relativos a cada uma das classes de eficiência energética.

Classe de eficiência	A	B	C	D	E
Limite superior	-	> CEP_{REF} - 3i	> CEP_{REF} - 2i	> CEP_{REF} - i	> CEP_{REF}
Limite inferior	< CEP_{REF} - 3i	≤ CEP_{REF} - 2i	≤ CEP_{REF} - i	≤ CEP_{REF}	-

Fonte: Adaptado (BRASIL, 2021).

Na sequência, foram comparados os consumos de energia primária da edificação (CEP_{REAL-D}), encontrados por meio dos limites da Tabela 6, assim identificando a classe de eficiência da edificação.

Bem como, a partir da identificação da classificação energética do Caso Base e do modelo de referência (classe D), foram definidos modelos para todas as outras classificações de eficiência energética, através dos consumos de energia primária em cada intervalo, relativo às classes de eficiência apresentadas na Tabela 6.

3.3. Verificação da possibilidade de transformação dos casos com balanço energético nulo

A partir dos dados de consumo e classificação de eficiência energética, foram aplicados SFV em todos os casos A, B, C e D para o alcance do balanço energético nulo no final do período de um ano. A definição dos

SFV para cada um dos casos ocorreu da seguinte forma: avaliação da necessidade de potência a ser instalada, definição das áreas disponíveis para a instalação do sistema e dimensionamento do sistema.

Os SFV adotados em cada caso (A, B, C e D) variaram de acordo com a necessidade de geração de energia própria. Essa variável foi analisada através da quantidade de módulos necessários para aplicação na área de cobertura disponível, com faces voltadas para orientação -41° (noroeste) e -131°(sudoeste), inclinação de 3º (indicada em projeto) e considerando que não houve sombreamento nos módulos. Nos casos em que a área de cobertura disponível (408,00m²) não foi suficiente para gerar a energia solar necessária para um edifício de balanço nulo, foram utilizadas as partes opacas das fachadas do edifício para a aplicação de módulos FV, em substituição aos revestimentos do tipo *miniwave* (segundo e terceiro pavimento) e ACM (pavimento térreo). Para realização dos cálculos da necessidade de geração FV, foi utilizada a Equação 01 e inseridos dados de irradiação solar para cada cidade avaliada, disponibilizados no Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et. al.,* 2017).

$$PFV = E.G/Htot.R \quad \text{(Equação 01)}$$

PFV = potência FV instalada (kWp). E = energia consumida ou gerada (kWh). G = irradiância na condição STC (1000W/m²). Htot = irradiação média diária (kWh/m²/dia). R = rendimento do sistema conectado (inversor e conexões).

A escolha do tipo de módulo se deu em função de sua eficiência igual a 21,48% e por possuir classificação A em eficiência energética. O modelo utilizado foi o JKM410M-6RL3 (JINKO SOLAR, 2021), composto por 132 células de silício monocristalino, de dimensões de 1855x1029x30mm e potência nominal de 410 Wp.

4. RESULTADOS

4.1. Análise de desempenho energético do Caso Base

Observou-se que, o consumo total do Caso Base para as cidades de Florianópolis-SC (GCL 01-B), Pelotas-RS (GCL-05) e Cuiabá-MT (GCL-24), foram de 105.165,55 kWh/ano, 106.634,41 kWh/ano e 146.634,93 kWh/ano, respectivamente (Tabela 5). A principal diferença no consumo energético das três cidades analisadas se deveu principalmente ao consumo para climatização artificial, pelas diferentes condições climáticas locais.

O consumo para iluminação artificial e equipamentos se manteve constante, 33.216,63 kWh/ano e 51.944,18 kWh/ano por apresentar a mesma configuração, não sofrendo influência das condições climáticas locais. Juntos corresponderam a um consumo de 80,98%, 79,86% e 58,08% do total de energia consumida, para os grupos climáticos GCL01-B, GCL-05 e GCL-24, respectivamente.

Tabela 5 - Consumos de energia elétrica e primária do Caso Base e de referência para as três cidades analisadas.

Consumo (kWh/ano)	FLORIANÓPOLIS-SC		PELOTAS-RS		CUIABÁ-MT	
	EDIFÍCIO REAL	EDIFÍCIO REFERÊNCIA	EDIFÍCIO REAL	EDIFÍCIO REFERÊNCIA	EDIFÍCIO REAL	EDIFÍCIO REFERÊNCIA
Aquecimento	571,15	213,62	4.316,53	2.556,77	17,03	2,78
Resfriamento	19.433,60	45.418,58	17.157,07	40.759,59	61.457,10	113.421,34
Iluminação	33.216,63	67.514,17	33.216,63	67.514,70	33.216,63	67.514,17
Equipamentos	51.944,18	51.944,18	51.944,18	51.944,18	51.944,18	51.944,18
Total	**105.165,55**	**165.090,55**	**106.634,41**	**162.775,4**	**146.634,93**	**232.882,46**
Fator de conversão de energia elétrica em energia primária = 1,6 (INI-C)						
Total (Energia Primária)	**176.977,07**	**264.144,88**	**174.495,06**	**260.440,38**	**257.634,93**	**372.611,94**

Fonte: Autores.

As cidades de Florianópolis-SC e Pelotas-RS apresentaram consumo energético semelhante, com 1.468,86 kWh/ano de diferença, ao passo que a cidade de Cuiabá-MT apresentou consumo superior, principalmente no que diz respeito às cargas térmicas para resfriamento da edificação, uma vez que está localizada em uma região que apresenta perfil climático de altas temperaturas. Por outro lado, Pelotas-RS apresentou o maior consumo para aquecimento 4.316,53 kWh/ano por estar localizada numa região de clima mais ameno e baixas temperaturas no inverno. Na comparação entre os resultados do Caso base e do Caso de referência, conforme Tabela 5, observa-se que o Caso Base apresentou um consumo total de energia de 105.165,55 kWh/ano, enquanto o Caso de Referência 165.090,55 kWh/ano para a cidade de Florianópolis-SC, com um aumento no consumo de aproximadamente 57%. Em Pelotas-RS esse aumento foi de 52,65% (consumo do Caso Base de 106.634,41 kWh/ano e do Caso de Referência 162.775,40 kWh/ano), enquanto, para Cuiabá-MT o aumento foi de 58,82%, com consumo de 146.634,93 kWh/ano e 232.882,46 kWh/ano para o Caso Base e Caso de Referência respectivamente.

Quanto à climatização artificial o aumento no consumo aponta a influência dos componentes construtivos no desempenho energético do edifício. Em relação as paredes o Caso de Referência foi

configurado com transmitância térmica de 2,39 W/m²K, ou seja, um acréscimo de 2,36 vezes o valor médio das paredes do Caso Base (1,01 W/m²K). Do mesmo modo, a cobertura foi configurada com transmitância térmica de 2,06 W/m²K, aumentando, em 1,20 vezes, o valor do Caso Base (1,719 W/m²K). Tais resultados confirmam que a redução da transmitância térmica, diminui o consumo energético por resfriamento. Outro fator que contribuiu para o consumo de resfriamento foram os vidros, responsáveis por grandes trocas térmicas na envoltória, já que foram configurados com vidros simples incolor 6mm de alto fator solar (0,82) no Caso de Referência, valor significativamente superior ao do Caso Base, configurado do tipo reflexivo cinza de 8mm e fator solar igual a 0,39. Essa propriedade interferiu diretamente na parcela de radiação solar absorvida, refletida ou transmitida para o interior do edifício, acarretando aumento da carga térmica interna do edifício e consequentemente o elevado consumo de energia para resfriamento. Destaca-se que o único decréscimo de consumo no Caso de Referência quando comparado ao Caso Base foi no consumo de aquecimento, com redução de 62,60%, 40,77%, e 83,68% nas cidades de Florianópolis-SC, Pelotas-RS e Cuiabá-MT, respectivamente, possivelmente em função do aumento do PAF que também acresceu em 15,8%.

4.2. Aplicação da INI-C no Caso Base

Foram realizados os cálculos para identificação dos intervalos relativos a cada uma das classes de eficiência energética, apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Intervalos relativos a cada uma das classes de eficiência energética.

Classe de Eficiência Energética		A	B	C	D
Limite inferior Energia Primária (kWh/ano)	GCL-01B	< 176.977,07	≤ 206.977,07	≤ 235.088,94	≤ 264.144,88
	GCL-05	< 174.495,06	≤ 203.143,50	≤ 231.791,94	≤ 260.440,38
	GCL-24	< 257.102,24	≤ 295.605,47	≤ 334.108,70	≤ 372.611,94

Fonte: Autores com base nas definições da INI-C.

Com o valor calculado de CEP_{REAL} igual a 168.264,88 kWh/ano, referente ao Caso Base para a cidade de Florianópolis-SC, o mesmo, sendo inferior do que o limite da classe A (176.977,07 kWh/ano), verificou-se que o Caso Base apresentou uma classe de eficiência energética A, segundo a INI-C. O mesmo aconteceu para a cidade de Pelotas-RS em que o Caso Base apresentou CEP_{REAL} igual a 170.615,06 kWh/ano, enquanto o limite foi de 174.495,06 kWh/ano e para a cidade de Cuiabá-MT com CEP_{REAL} de 234.615,89 kWh/ano e limite de 257.102,24 kWh/ano. Assim, a partir das análises foi possível identificar que o objeto de estudo obteve classificação A em todos os grupos climáticos estudados.

Desse modo, a partir da identificação da classificação energética A do Caso Base, e ainda, considerando que o Caso de Referência possui classificação igual a D, foram definidos casos de referência B e C, de acordo com os consumos de energia primária de cada intervalo relativo as classes de eficiência energética (Tabela 6), obtendo-se assim, casos de todas as classes de eficiência energética para comparação entre os mesmos.

Os consumos de energia elétrica de cada caso são exibidos na Tabela 7. Quando analisados o impacto do consumo dos casos B, C e D, em comparação com A, para a cidade de Florianópolis-SC foi observado um acréscimo de 22,45%, 39,71% e 56,98%, assim como para Pelotas-RS, o aumento se deu na ordem de 19,06%, 35,85% e 52,65% e em Cuiabá-MT igual a 26%, 42,41%, 58,82%, respectivamente.

Tabela 7 – Valores de consumo de energia elétrica para casos com diferentes classes de eficiência energética.

Classe de Eficiência Energética		A	B	C	D
Consumo Energia Elétrica (kWh/ano)	GCL-01B	Caso Base 105.165,55	(206.033,01/1,6) 128.770,63	(235.088,04/1,6) 146.930,59	(264.144,88/1,6) 165.090,55
	GCL-05	Caso Base 106.634,41	(203.143,50/1,6) 126.964,69	(231.791,94/1,6) 144.869,96	(260.440,38/1,6) 162.775,24
	GCL-24	Caso Base 146.634,93	(295.605,47/1,6) 184.753,42	(334.108,70/1,6) 208.817,94	(372.611,94/1,6) 232.882,46

Fonte: Autores com base nas definições da INI-C.

4.3. Verificação da possibilidade de transformação dos casos com balanço energético nulo

De posse dos valores de consumos de energia elétrica para cada caso em estudo, apresentados na Tabela 7, foi efetuado o dimensionamento dos SFV para cada um dos grupos climáticos analisados. O número máximo de módulos FV que puderam ser instalados na cobertura foram 141, sendo 90 deles na orientação noroeste e 51 na posição sudoeste. Os mesmos foram arranjados conforme Figura 03 para as três as cidades estudadas. Os módulos FV foram aplicados nas duas águas da cobertura: (a) -41°N e (b) 139°N, com inclinação de 3° e

que esta situação foi chamada de real, enquanto a situação ideal seria a orientação norte e a inclinação da latitude local. A aplicação do SFV na inclinação de 3º, promoveu uma redução pouco significativa na quantidade de radiação solar nessas superfícies, em torno de 1,72%, 2,83% e 2,75% de decréscimo em relação a situação ideal para as cidades de Florianópolis-SC, Pelotas-RS e Cuiabá-MT. Os dados de irradiância média nos planos da cobertura e fachadas, que possibilitaram identificar a diferença nos valores de radiação solar devido às diferentes inclinações dos módulos para os três grupos climáticos analisados, são apresentados nas Figuras 02.

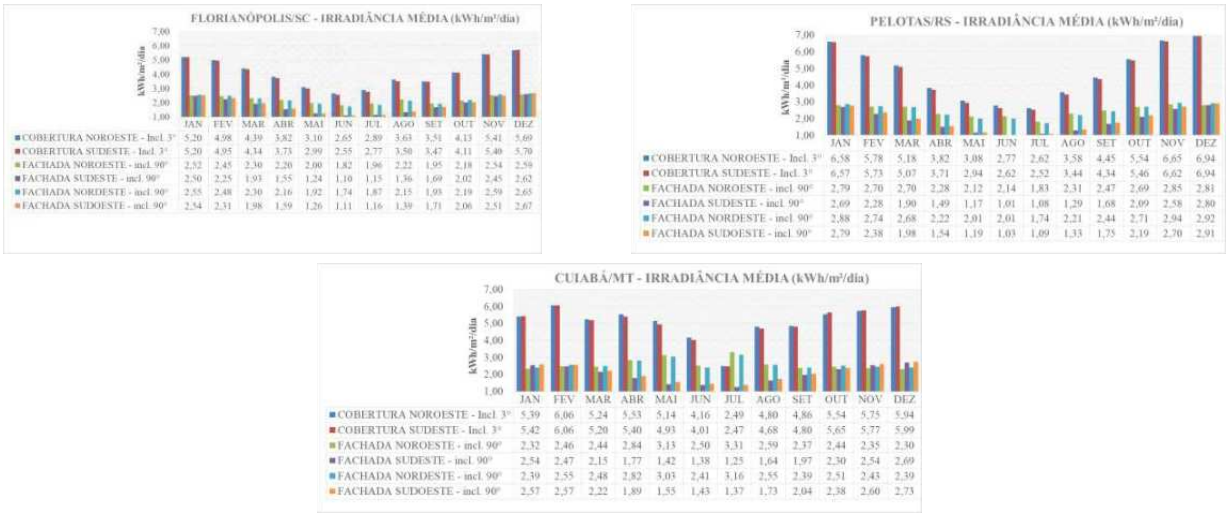


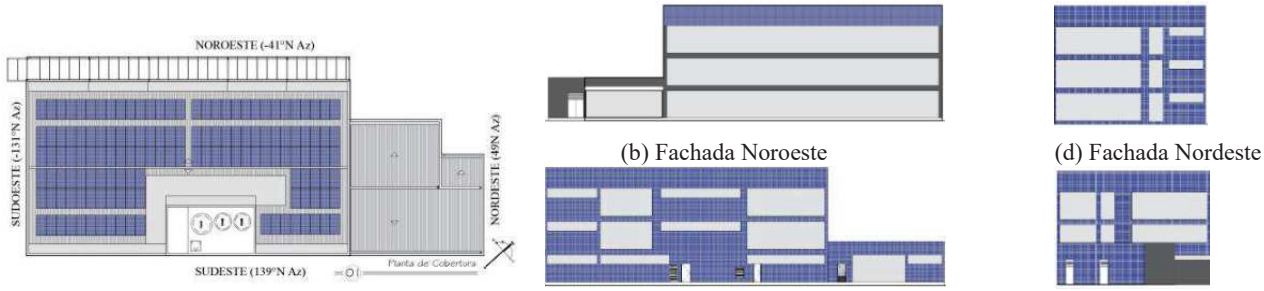
Figura 02 - Irradiância média diária nos planos da cobertura e fachadas nas cidades de Florianópolis-SC, Pelotas-RS e Cuiabá-MT.
Fonte: Autores com base nos dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et. al.*, 2017).

Com relação ao potencial de geração de energia pelas coberturas, o maior potencial se deu na cidade de Cuiabá-MT, seguido de Pelotas-RS e Florianópolis-SC, com variação de uniformidade de geração de energia iguais a 33%, 55% e 64%, respectivamente, nos períodos de verão e inverno. Quando analisado o potencial para geração de energia através das fachadas, as de maiores potenciais foram as noroeste e nordeste para as cidades de Florianópolis-SC e Pelotas-RS, com variações de valores de radiação solar de 36% a 41% ao longo do ano, respectivamente. Já para a cidade de Cuiabá-MT, as sudeste e sudoeste foram as de maior potencial de geração, apresentando variação de 115% e 100% durante o ano. Ainda, observou-se que a maior produção de energia FV através das fachadas foi para a cidade de Pelotas-RS, seguido de Cuiabá-MT e Florianópolis-SC. Observou-se, também, que as fachadas que possuem maior uniformidade de distribuição de radiação solar ao longo do ano, para Florianópolis-SC e Pelotas-RS são as fachadas noroeste e nordeste, visto que no período de inverno, apresentaram até 41% mais irradiância em relação as fachadas sudeste e sudoeste. Quando comparados os potenciais de geração de energia das coberturas em relação as fachadas, mesmo na fachada com maior potencial de geração para a cidade de Pelotas-RS (fachada nordeste), houve uma redução de 58% em relação ao potencial de geração nas coberturas. Nesse sentido, esgotando a possibilidade de implantação de SFV na cobertura, foram exploradas as áreas de fachada opaca do edifício. Deste modo, para a definição da disposição dos módulos FV nas fachadas, foram exploradas as áreas em destaque na cor azul na Figura 03. Essa proposta impactou na linguagem original do projeto, confirmando assim a importância das soluções arquitetônicas concebidas desde o início do processo projetual, uma vez que as decisões tomadas pelo arquiteto, no início do projeto, acarretam impactos significativos no desempenho ambiental do edifício. Tendo em vista que o caso A apresenta um PAF igual a 34,20%, a área de fachadas opacas disponíveis para essa situação é maior do que a do caso D (50%). Dessa forma, não havendo o valor de PAF para os casos B e C, foi considerada a pior situação e adotado o mesmo valor do caso D, conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Áreas disponíveis para aplicação de SFV.

	Área do módulo (m²)	Área disponível PAF 34,44%	Quantidade de módulos	Área disponível PAF 50%	Quantidade de módulos
Fachada Noroeste	1,91	282,40	142,00	79,52	41,00
Fachada Nordeste	1,91	128,45	64,00	74,82	39,00
Fachada Sudeste	1,91	238,42	120,00	312,81	163,00
Fachada Sudoeste	1,91	161,90	84,00	95,96	50,00

Fonte: Autores.



(a) Cobertura (b) Fachada Noroeste (c) Fachada Sudeste (d) Fachada Nordeste (e) Fachada Sudoeste

Figura 03 – Áreas disponíveis da cobertura e fachadas para aplicação de SFV (PAF igual a 50%).
Fonte: Autores.

Considerando que em todos os casos a disponibilidade de geração de energia FV através da cobertura não foi suficiente para se obter um balanço energético nulo, visto que a potência máxima calculada atingiu o valor de 56,4 kWp, foi necessária a inclusão FV nas áreas de fachadas disponíveis. Para o cálculo da potência foi utilizada Equação 01. Destaca-se aqui que o valor de irradiação diária (Wh/m²/dia) foi calculado a partir da média de irradiações dos planos necessários para cada caso (coberturas e fachadas). Os resultados do dimensionamento dos SFV, para cada caso em estudo, são apresentados na Figura 04, sendo destacado em vermelho os casos em que foi atingido o limite máximo de módulos, não sendo possível nestas situações atingir o balanço energético nulo.

Consumo de energia (kWh/ano)	Florianópolis/SC (GCL 01-B)				Pelotas/RS (GCL-05)				Cuiabá/MT (GCL-24)			
	Caso Base		Referência		Caso Base		Referência		Caso Base		Referência	
Aquecimento	571,15		213,62		4.316,53		2.556,77		17,03		2,78	
Resfriamento	19.433,60		45.418,58		17.157,07		4.759,59		61.457,10		113.421,34	
Iluminação	33.216,63		67.514,58		33.216,63		67.514,17		33.216,63		67.514,17	
Equipamentos	51.944,18		51.944,18		51.944,18		3351.944,18		51.944,18		51.944,18	
Outros	664,51		1.4383,72		534,975		1.043,13		1.632,50		2.591,39	
Total	**105.830,06**		**165.090,55**		**106.634,41**		**162.775,40**		**146.634,93**		**232.882,46**	
	A	**B**	**C**	**D**	**A**	**B**	**C**	**D**	**A**	**B**	**C**	**D**
Consumo de energia (kWh/ano)	105.165,55	128.770,63	146.930,59	165.090,55	106.634,41	126.964,69	144.869,96	162.775,40	146.634,93	184.753,42	208.817,9	232.882,46
Potência do módulo FV (Wp)	410,00				410,00				410,00			
nº módulos cobertura -41°	90,00				90,00				90,00			
nº módulos cobertura -131°	51,00				51,00				51,00			
SFV Cobertura (kWp)	**57,81**				**57,81**				**57,81**			
SFV Cobertura (nº módulos)	**141,00**				**141,00**				**141,00**			
Fachada Noroeste (kWp)	-	16,81	16,81	16,81	-	15,58	16,81	16,81	20,50	16,81	16,81	16,81
nº de módulos	-	41,00	41,00	41,00	-	38,00	41,00	41,00	50,00	41,00	41,00	41,00
Fachada Sudeste (kWp)	-	66,83	66,83	66,83	50,02	66,83	66,83	66,83	-	66,83	66,83	66,83
nº de módulos	-	163,00	163,00	163,00	122,00	163,00	163,00	163,00	-	163,00	163,00	163,00
Fachada Nordeste (kWp)	27,47	15,99	15,99	15,99			15,99	15,99	27,47	15,99	15,99	15,99
nº de módulos	67,00	39,00	39,00	39,00			39,00	39,00	67,00	39,00	39,00	39,00
Fachada Sudoeste (kWp)	33,62	4,51	20,50	20,50	-		9,84	20,50	34,44	20,50	20,50	20,50
nº de módulos	82,00	11,00	50,00	50,00	-	-	24,00	50,00	84,00	50,00	50,00	50,00
SFV Fachadas (kWp)	**61,09**	**104,14**	**120,13**	**120,13**	**50,02**	**82,41**	**109,47**	**120,13**	**82,41**	**120,13**	**120,13**	**120,13**
SFV Fachadas (nº módulos)	**149,00**	**254,00**	**293,00**	**293,00**	**122,00**	**201,00**	**267,00**	**293,00**	**201,00**	**293,00**	**293,00**	**293,00**
SFV (Cob.+Fach.) (kWp)	**118,90**	**161,9**	**147,20**	**147,20**	**107,83**	**140,22**	**167,28**	**176,53**	**140,22**	**147,20**	**147,20**	**147,20**
SFV (Cob.+Fach.) (nº mód.)	**290,00**	**395,00**	**288,00**	**288,00**	**263,00**	**342,00**	**408,00**	**434,00**	**342,00**	**227,00**	**227,00**	**227,00**

Figura 04 - Dimensionamentos dos SFV para os casos em estudo.
Fonte: Autores.

A partir dos resultados obtidos, identificou-se a necessidade de utilização da área de cobertura com total de 141 módulos FV em todos os casos analisados. Quanto às fachadas, para a cidade de Florianópolis-SC, para o Caso A foi necessária a implantação de 149 módulos nas fachadas do edifício, conforme Figura 04. No Caso B foram necessárias 254 unidades e para os casos C e D não foi possível atingir o balanço energético nulo devido a área indisponível para implantação de SFV e a disponibilidade de irradiação. Neste caso, a compensação máxima atingida foi de 137.350,10 kWh/ano, o que possibilitou apenas com que os casos A e B atingissem o balanço nulo. Em relação a distribuição dos módulos nas fachadas na cidade de Pelotas-RS, foram necessários 122, 201 e 267 módulos nos Casos A, B e C, respectivamente. O Caso D não conseguiu alcançar o balanço energético nulo, uma vez que o consumo máximo compensado foi de

150.884,40 kWh/ano. Ainda, no que diz respeito a cidade de Cuiabá-MT foi preciso a implantação de 201 módulos nas fachadas no Caso A, sendo possível compensar em 166.047,02 kWh/ano o consumo do edifício, o que impossibilitou o alcance do balanço nulo nos casos B, C e D.

Em todas as cidades houve acréscimo no número de módulos FV nos Casos B, C e D, quando comparados com o Caso A. Para Florianópolis-SC foi na ordem de 36,20% no caso B, Pelotas-RS apresentou 30%, 55,13% para os casos B e C respectivamente, enquanto para Cuiabá-MT somente o Caso A atingiu o balanço energético nulo. Esse fato demonstra a importância de considerar soluções energeticamente mais eficientes para os edifícios ainda em fase de projeto, visto que quanto menor a classe de eficiência, maior o número de módulos FV na edificação para se alcançar o balanço energético nulo. Assim, aplicados os módulos FV na edificação foi possível observar a possibilidade do alcance do balanço energético nulo nos casos A e B para a cidade de Florianópolis-SC, nos casos A, B e C para a cidade de Pelotas-RS e somente no caso A para a cidade de Cuiabá-MT. Além disso, os resultados apontaram que quanto mais alta a classificação de eficiência energética de um edifício maior a facilidade de alcance do balanço nulo. Em contrapartida em todos os casos analisados, as edificações com classe D não foram capazes de equilibrar o consumo e a geração de energia FV, demonstrando a importância de se buscar soluções construtivas mais eficientes energeticamente, quando se almeja compensar o consumo energético. Dentre os grupos climáticos analisados a cidade de Pelotas-RS foi a que apresentou o maior número de casos com balanço nulo, A, B e C, pois apresentou baixo consumo energético, além de possuir a segunda maior irradiância média incidente na cobertura e fachadas, dentre as cidades analisadas. Em Cuiabá-MT, somente o Caso A compensou o consumo do edifício, num balaço nulo. Isso se deveu ao elevado consumo energético do edifício necessário para resfriar a edificação. O edifício com a mesma classe de eficiência energética, A, sofreu um acréscimo no consumo total de 37,5% quando comparado a Pelotas-RS e 39,43% comparado a Florianópolis-SC. Quando comparados os resultados entre as diferentes cidades analisadas percebe-se que, embora Florianópolis-SC e Pelotas-RS apresentem dados de consumo bastante próximos, em Florianópolis-SC é possível atingir o balanço nulo apenas nos edifícios com classe A e B, enquanto para Pelotas-RS o caso C ainda consegue zerar o consumo através da geração FV, fato que se deve a distribuição da irradiação solar nos diferentes municípios. A maior irradiância média na cidade de Pelotas-RS favorece a geração de energia FV, que necessita de uma potência instalada inferior para compensar um consumo bastante próximo.

Além disso, é importante observar que casos com a mesma classificação de eficiência energética pertencentes a grupos climáticos diferentes, devido às diferentes irradiações disponíveis em cada local, precisaram de quantidades distintas de módulos FV instalados para atingir o balanço energético nulo. Essa situação pode ser comprovada quando comparados os resultados para as cidades de Pelotas-RS e Florianópolis-SC, em que ambos os casos com classe A e B de eficiência energética alcançaram o balanço nulo, entretanto, Florianópolis-SC precisou de 9,31% e 13,42% a mais de módulos para os casos A e B, respectivamente, quando comparada com Pelotas-RS, o que demonstra que para uma mesma classe de eficiência energética, em diferentes contextos climáticos é necessário um investimento maior para o alcance do balanço nulo.

5. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou as possibilidades de um edifício horizontal de escritórios alcançar o balanço energético nulo, a partir de diferentes níveis de eficiência energética em três grupos climáticos brasileiros da INI-C, sendo eles: GCL-01-B, GCL-05 e GCL-24. O método utilizado foi a avaliação do consumo energético através de simulação computacional no *software EnergyPlus* e cálculos de geração FV com auxílio do programa Radiasol.

Os resultados apontaram que o objeto de estudo obteve uma classificação A em eficiência energética, segundo a INI-C, nos três contextos climáticos analisados, sendo possível a partir dele realizar a identificação dos casos de referência iguais a B, C e D. Em todos os casos foram instalados módulos FV na cobertura e em áreas opacas das fachadas, com o intuito de alcançar o balanço energético nulo.

Verificou-se que, mesmo um edifício horizontal com nível "A" em eficiência energética, não conseguiu obter o balanço energético nulo somente com aplicação de SFV na área de cobertura disponível, sendo necessária a exploração de partes opacas das fachadas como produtoras de energia em todos os casos em estudo.

Observou-se que quanto mais alto o nível de eficiência energética, maior a possibilidade do balanço nulo. Em nenhuma das cidades analisadas o edifício com classe D conseguiu compensar o consumo do edifício através da geração FV, uma vez que não havia área suficiente disponível para atender a potência necessária a ser instalada quando o consumo do edifício foi muito elevado, considerado o contexto climático onde o mesmo está inserido. Esse fato demostra a importância de se aplicar soluções construtivas que

minimizem o consumo energético da edificação. Além disso, decisões que possam impactar no desempenho do edifício devem ser tomadas preferencialmente ainda na etapa de projeto, uma vez que quando não considerada antecipadamente, a aplicação de tecnologias FV pode comprometer a estética desejada para o edifício. Por outro lado, soluções projetuais podem sombrear áreas potenciais para a aplicação de FV.

Além disso, foi possível perceber que edificações com mesma classe de eficiência energética, em contextos climáticos distintos, podem necessitar de um maior investimento em tecnologias FV para chegar ao balanço nulo. A maior irradiação solar significa maior potencial de geração FV, entretanto também pode representar maior carga térmica ao edifício e, portanto, maior consumo para resfriamento.

Assim, os resultados desse trabalho permitiram concluir que para um edifício comercial horizontal quanto mais alto o nível de eficiência energética maior o potencial de alcance do balanço energético nulo, ao passo que em edificações menos eficientes não é viável compensar o consumo do edifício através da geração FV. Observou-se a importância da conscientização do projeto de edificações eficientes, na busca pelo balanço energético nulo. Pretende-se para trabalhos futuros estender esta pesquisa a outros grupos climáticos da INI-C, além de analisar a viabilidade econômica do alcance do balanço nulo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo de transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, RJ, 2005a.

CB3E; ABIVIDRO. **Catálogo de propriedades térmicas e óticas de vidros comercializados no Brasil**. Centro tecnológico. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, mar. 2015. Disponível em: http://www.pbeedifica.com.br/etiquetagem/residencial/planilhas-catalogos. Acesso em: 19 mai. 2020.

DIDONÉ, E. L. **Parametric study for net zero energy building strategies in Brazil considering semi-transparent PV windows**. Doctoral Thesis (Doctorate in Architecture) - Department of Architecture, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2019**: ano base 2018. Brasília, DF: EPE, 2019. Disponível em: http://www.epe.gov.br/sitespt/ publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN 2019 Completo WEB.pdf. Acesso em: 11 fev. 2021.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Inmetro. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas - Anexo da Portaria nº 372, de 17 de setembro de 2010, com alterações das portarias nº 17 de 2012 e nº 299 de 2013**. PBE Edifica, Rio de Janeiro, 2013. Rio de Janeiro, RJ: INMETRO, 2013. Disponível em: http://www.pbeedifica.com.br. Acesso em: 15 mar. 2019.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Inmetro. **Portaria n° 42, de 24 de fevereiro de2021. Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C)**. Diário Oficial da União, Brasília - DF, 2021. http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002707.pdf.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Energy & CO2 Status Report 2019.** Disponível em: https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019. Acesso em: 20 mar. 2021.

JINKO SOLAR. **Catálogo - Módulo Fotovoltaico**: JKM410M-6RL3. Jinko Solar, China, 2021. Disponível em: https://www.jinkosolar.com/uploads/JKM390-410M-6RL3-(V)-F1-EN.pdf. Acesso em: 10 fev. 2021.

LABSOL UFRGS. **Radiasol**. Solar UFRGS, Porto Alegre, 2019. Disponível em: http://www.solar.ufrgs.br. Acesso em: 15 out. 2020.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES - LabEEE. **Arquivos climáticos**. LabEEE, Florianópolis, SC, 2018. Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2018. Acesso em: 12 fev. 2021.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: http://sonda.ccst.inpe.br/publicacoes/atlas_solar.html. Acesso em: 3 mar. 2020.

USDOE. DEPARTMENT OF ENERGY USA. **EnergyPlus Version 8.7 Documentation**: Input Output Reference - The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output. San Francisco, CA: NREL, 2019b. Disponível em: https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/pdfs/pdfs_v8.7.0/InputOutputReference.pdf. Acesso em: 20 abr. 2020.