

ANÁLISE DO POTENCIAL DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA USANDO METODOLOGIA BUILDING INFORMATION MODELING

Breno Bezerra Freitas– brenobf93@gmail.com

Paulo Cesar Marques de Carvalho– carvalho@dee.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

Antonio Paulo de Hollanda Cavalcante– apaulo@det.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Integração Acadêmica e Tecnológica

Douglas Aurélio Carvalho Costa– douglas.aurelio84@gmail.com

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. O presente artigo analisa o potencial de geração de sistemas fotovoltaicos (FV) em três edifícios da Universidade Federal do Ceará (UFC), utilizando Building Information Modeling (BIM). A pesquisa apresenta análise construtiva e sustentabilidade, envolvendo detalhes técnicos, cálculos de dimensionamento FV, estudo de sombreamento e de atratividade financeira e comparação com uma moeda energética relacionada com créditos de carbono. O software Revit é utilizado na modelagem volumétrica dos edifícios e para os estudos de sombreamento, onde o efeito das sombras é simulado durante três momentos do dia e em quatro meses do ano igualmente espaçados. A metodologia proposta representa um novo nível na integração de projetos de engenharia, criando uma plataforma para o desenvolvimento simultâneo de detalhes construtivos e financeiros. O software RETScreen é utilizado para medir o investimento para cada edifício, o valor economizado e em quanto tempo o investimento é compensado. Assim, observa-se a possibilidade de implantar 3.612 módulos FV no Instituto de Cultura e Arte (ICA), 758 no Centro de Convivência e 1.596 no Restaurante Universitário (RU). Como resultado, as unidades podem gerar 401,65 MWh, 1.913,94 MWh e 845,69 MWh respectivamente. Estima-se um retorno do investimento em seis anos: R\$ 5.036.354,00 para o ICA, de R\$ 1.058.318,00 para o Centro de Convivência e de R\$ 2.211.902,00 para o RU. Também é realizada uma análise de crédito de carbono, resultando em 293 toneladas de CO₂ não libertadas na atmosfera.

Palavras-chave: Fotovoltaica, Geração Distribuída, BIM

1. INTRODUÇÃO

Frente ao considerável crescimento e à valorização do uso de fontes alternativas para geração de energia elétrica, a geração fotovoltaica (FV) tem ganhado destaque pela sua grande expansão nos últimos anos em que passou de 583,87 GW em 2019 para 709,674 GW em 2020 de potência instalada (IRENA, 2021). No Brasil, a capacidade instalada FV em 2019 era de 4,613 GW, em 2020 passou para 7,879 GW (IRENA, 2021) e chegando a 12,192 GW em dezembro de 2021, sendo 7,622 GW de Geração Distribuída (GD) e 4,570 GW de Geração Centralizada (GC) (ABSOLAR, 2021). A integração da FV com a rede elétrica de distribuição vem apresentando um expressivo crescimento no Brasil após as regulamentações legais, servindo como molde para o atual modelo de micro e minigeração. Assim, a Resolução Normativa (REN) nº 482/2012 da ANEEL passou a oferecer as condições gerais para acesso aos sistemas de distribuição de energia, além de criar o sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2012). A partir disso, foram criadas as Resoluções Normativas Nº 687/2015 e Nº 786/2017, que passaram a definir como microgeração distribuída as centrais de geração de energia elétrica com potência menor ou igual a 75 kW (ANEEL, 2015) e minigeração distribuída as centrais com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW (ANEEL, 2017).

Atrelado à necessidade de produzir ambientes mais eficientes nas mais diversas vertentes das engenharias, surge a metodologia BIM (*Building Information Modeling*, ou MIC, Modelagem da Informação da Construção), que representa um modelo de integração entre as informações de uma construção durante todo o seu ciclo de vida. Com isso, projetos ganham novos níveis de eficiência, visto que as vertentes de engenharia podem trabalhar simultaneamente em seus projetos e que os programas que fazem uso do BIM tem a capacidade de disponibilizar as ferramentas necessárias para cada tipo de projeto (CBIM, 2018).

A metodologia BIM possibilita a criação de uma representação virtual do que será construído. Esse modelo representa precisamente a geometria da edificação, além de possuir informações relevantes que poderão ser utilizadas no auxílio à documentação, projeto, pré-fabricação e execução do empreendimento. Como estrutura base da metodologia, o BIM 7D é dividido em: 3D – construtiva tridimensional; 4D – ciclo de vida da construção; 5D – andamento das atividades e custo; 6D – análise de consumo energético; e 7D – manutenção (SDS EDUCA, 2019).

Em 1974, Charles M. Eastman, professor na *Georgia Institute of Technology* lançou o conceito *Building Description System* (BDS) por meio de uma publicação relativa a uma pesquisa desenvolvida pela Universidade Carnegie-Mellon em Pittsburgh, intitulada “Um esboço do sistema de descrição do edifício”, que foi o predecessor da

metodologia atual. A primeira utilização oficial do termo BIM foi em 1992, em que G.A. van Nederveen e F.P. Tolman publicaram um artigo tratando as múltiplas visões de modelagem da construção e a ideia de que a modelagem das informações da construção é essencial para fundamentar a estrutura de um modelo de construção, baseado nos diferentes pontos de vista dos participantes do projeto (SAEPRO, 2013).

Partindo desta motivação, o presente artigo tem como principal objetivo um estudo de viabilidade de implantação de módulos FV em blocos no Campus Pici da Universidade Federal do Ceará (UFC), em conjunto a um projeto de eficiência energética utilizando metodologia BIM, além da apresentação de uma moeda energética com créditos de carbono. O artigo está dividido em 7 seções: a introdução apresentada na seção I; na seção II é apresentada a metodologia aplicada na modelagem 3D da região estudada; na seção III é realizado um estudo sobre o potencial FV com dimensionamento de módulos e inversores; na seção IV é desenvolvida uma análise financeira sobre o consumo de energia elétrica nos blocos e do custo de investimento nos blocos avaliados; na seção V é apresentado o equivalente em créditos de carbono gerados pelo sistema; e na seção VI são apresentadas as conclusões.

2. MODELAGEM 3D

2.1 Metodologia da modelagem

Visando uma modelagem mais consistente, o presente artigo segue os passos apresentados no fluxograma da Fig. 1. O fluxograma trata da obtenção das plantas com o setor de infraestrutura da UFC, da aferição das dimensões apresentadas e da modelagem com BIM, do indicativo das áreas a serem estudadas e dos locais não aproveitados por conta do sombreamento e da definição da área efetiva para o estudo.

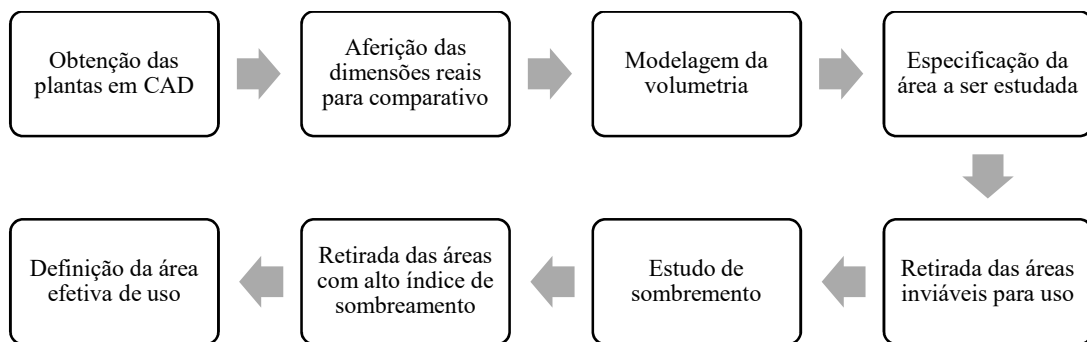


Figura 1 – Fluxograma da metodologia.

2.2 Modelagem em Revit

Dentre os softwares com recursos BIM, o Revit, comercializado pela Autodesk, é um dos mais tradicionais e mais utilizados no mercado. O programa inclui recursos para projetos arquitetônicos e de engenharia como elétrica, hidráulica, estrutural, sistemas mecânicos e de sistemas de telecomunicação. Devido à precisão e, principalmente, pela integração da metodologia comportada pelo programa, optou-se pelo Revit no presente artigo visando uma modelagem mais moderna e com a possibilidade de uma análise sustentável do ponto de vista energético (AUTODESK, 2021). Como auxílio para a modelagem, foram utilizados os arquivos das plantas baixas dos blocos do Campus Pici da UFC em 2D disponibilizados pelo setor de infraestrutura (UFC INFRA) em AutoCAD e o programa Google Earth Pro. Dessa forma, a Fig. 2 apresenta imagens de satélite de 2012 de blocos do campus analisados na pesquisa.



Figura 2 – ICA, RU e Centro de Convivência da UFC vistos pelo Google Earth Pro.

Como o foco do presente artigo é uma análise energética, não foi feito um detalhamento acerca da composição da estrutura dos ambientes. Dessa forma, a modelagem dos blocos foi centrada no espaço disponível para a inserção dos módulos FV.

2.3 Área disponível por bloco

Com a modelagem realizada para cada bloco, confirmou-se uma área útil para aproveitamento FV de 1.954 m² para o Centro de Convivência, 6.683 m² para o ICA e 3.328 m² para o RU. Devido à uniformidade do espaço superior, cada uma das construções aproveita praticamente toda a extensão da sua cobertura para o trabalho proposto. Com o auxílio do programa Paint, disponível gratuitamente no sistema Windows, fez-se o contorno em azul da área disponível para o estudo de sombreamento e, conseqüentemente, para a inserção dos módulos FV, e em vermelho foram destacados os locais em que os módulos não devem ser instalados por questões estruturais, conforme Fig. 3, 4 e 5.

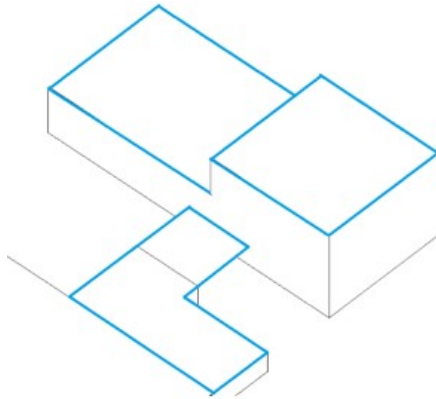


Figura 3 –Área do Centro de Convivência disponível para inserção dos módulos FV.

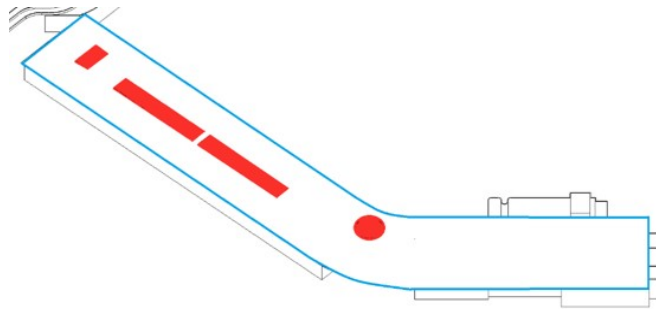


Figura 4 –Área do ICA disponível para inserção dos módulos FV.

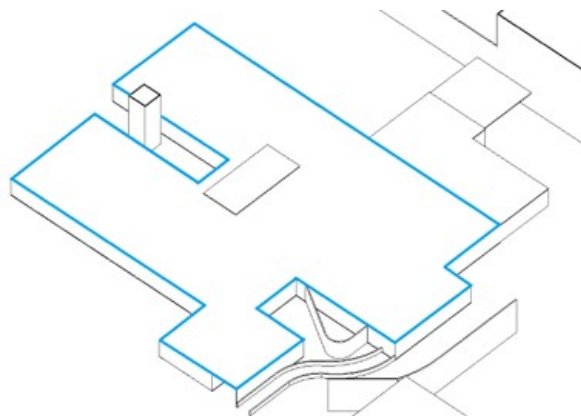


Figura 5 –Área do RU disponível para inserção dos módulos FV.

2.4 Estudo de sombreamento

O estudo de sombreamento torna-se indispensável visando uma análise de geração FV mais precisa. Nesse sentido, o Revit tem a capacidade de viabilizar esse estudo, pois possui a funcionalidade de simular o posicionamento

solar de acordo com dados inseridos previamente, assim como mostra a Fig. 6. Nessa etapa do projeto, o desenhista e/ou calculista tem a possibilidade de determinar a localização geográfica da construção, assim como definir hora, dia, mês e ano que deseja analisar, podendo ter uma previsão do sombreamento com alta precisão. Como exemplo, a Fig. 7 apresenta as simulações do comportamento do sombreamento para o RU no mês de agosto para os 6h, 12h e 17h.

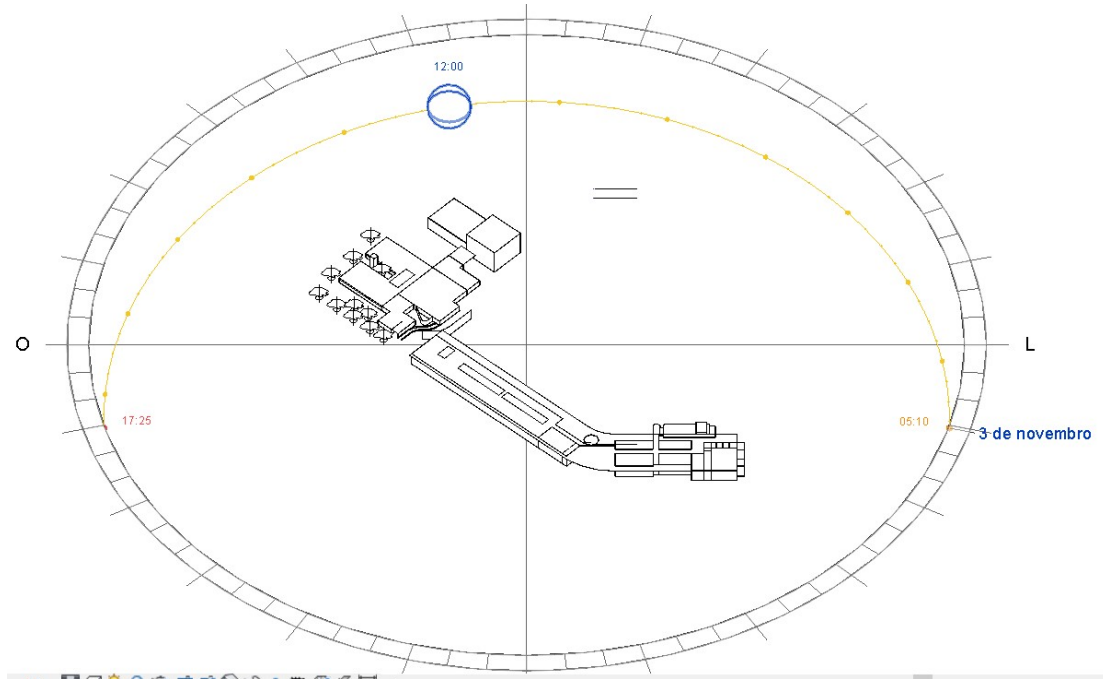


Figura 6 –Aba de simulação de sombreamento do Revit.

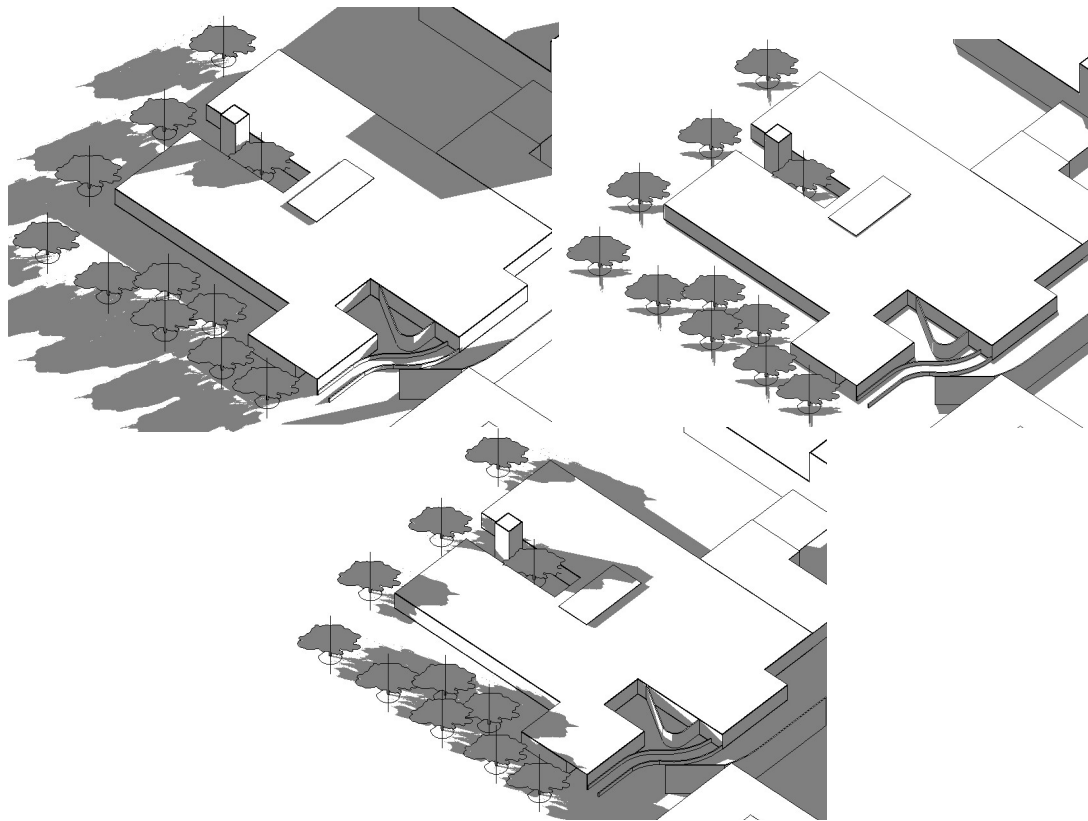


Figura 7 – Representação do sombreamento do RU em Revit no mês de agosto para 06h, 12h e 17h.

De acordo com (Rocha Filho, 2016), ao analisar as condições encontradas em Fortaleza ao longo do ano para horários anteriores a 6 horas e posteriores a 17 horas, os níveis de irradiância apresentam valores inferiores a 100 W/m^2 ; assim, o período de estudo entre 6 e 17 horas é o mais indicado para o local do estudo. Para analisar os efeitos do

posicionamento do Sol ao longo do ano, foram escolhidos os meses de fevereiro, maio, agosto e novembro de 2021 para a representação.

O estudo de sombreamento se baseou na influência do Sol sob as construções para os horários:

- Em que efetivamente os módulos começam a produzir energia elétrica (seis horas);
- Com o sol em zênite (doze horas);
- No momento em que os níveis de produção caem significativamente (dezessete horas).

Após as simulações, pode-se observar que não há sombreamento relevante para o ICA, visto que a caixa d'água existente passa a sombrear os módulos FV apenas em parte do ano e unicamente ao final do dia. Para o caso do Centro de Convivência há sombreamento durante uma parte da manhã para uma considerável área. Para o RU, o sombreamento aparece no turno da tarde e é devido às árvores ao redor do prédio. Analisando os sombreamentos para os três horários diferentes e com intervalos de três meses para cada simulação, pode-se definir a área efetiva de uso para a implantação dos módulos FV nos três blocos a partir da área total subtraída da área afetada pelo sombreamento: ICA → 6.683 m²; Centro de Convivência → 1.404 m²; RU → 2.935 m².

A partir desse cálculo, pode-se fazer o dimensionamento da geração FV e definir quanto o sistema em cada construção pode gerar de energia elétrica.

3. DIMENSIONAMENTO DA PLANTA FV

3.1 Dimensionamento do número de módulos

Considerando que o Campus do Pici da UFC tem apenas um ponto de medição de consumo de energia elétrica, não há como saber com total precisão o quanto cada bloco está consumindo. Devido a esse fato, o presente dimensionamento se baseia na quantidade de eletricidade que cada construção consegue gerar a partir dos módulos FV instalados em seus telhados. Para encontrar tal valor, faz-se necessário o uso do Fator de Capacidade (FC), que é a relação entre a produção efetiva de energia elétrica num dado período de tempo e a geração nominal dos módulos neste mesmo intervalo de tempo.

Na presente pesquisa são utilizados dados de geração FV medidos no Laboratório de Energias Alternativas (LEA) da UFC. O LEA tem foco na pesquisa em fontes alternativas de geração de energia elétrica, notadamente a solar FV, buscando a descentralização e diversificação da matriz energética (Chaves, 2019). A Tab. 1 apresenta os valores medidos de FC a partir da planta do LEA em 2019, que são os mais indicados visto que os blocos analisados estão a poucos metros do laboratório (Silva, 2021).

Tabela 1 – Fator de capacidade da planta FV do LEA-UFC.

Mês	FC (%)
Jan/19	16,11
Fev/19	14,38
Mar/19	15,31
Abr/19	15,65
Mai/19	17,66
Jun/19	18,55
Jul/19	17,20
Ago/19	22,84
Set/19	23,01
Out/19	22,15
Nov/19	19,90
Dez/19	17,62
Média	18,36

A Tab. 2 caracteriza o módulo FV a ser aplicado no presente estudo, com valores obtidos para as condições padrões de testes. Este módulo foi escolhido por ser do mesmo modelo dos módulos existentes no LEA (Canadian Solar, 2020).

Tabela 2 – Dados do módulo FV utilizado.

Parâmetros	Modelo Hiku 330P
Potência Nominal	330Wp
Tensão Nominal	32,2 V
Corrente Nominal	10,24 A
Tensão de Circuito Aberto	39,2 V
Corrente de Curto Circuito	10,82 A
Dimensões	1765 x 1048 x 40 mm

O cálculo do dimensionamento dos módulos FV realizado foi proposto por (Carvalho, 2016), baseado no consumo de energia elétrica do local estudado, no FC e na potência FV. Inicialmente, é obtida a área de cada módulo a partir da Eq. (1):

$$\text{área do módulo} = 1,765 * 1,048 \approx 1,85 \text{ m}^2 \quad (1)$$

A partir da Eq. (2), pode-se estimar quantos módulos podem ser instalados no ambiente de acordo com a área efetiva de uso definida e com a área ocupada por cada módulo:

$$N^{\circ}_{\text{módulos}} = \frac{\text{área efetiva de uso}}{\text{área do módulo}} \quad (2)$$

Para o caso de valores não inteiros, utiliza-se o inteiro menor mais próximo do valor obtido. Em seguida, calcula-se a potência nominal do sistema FV a partir do número de módulos encontrados e da potência nominal de cada módulo, conforme Eq. (3):

$$P_{\text{sistema}} = P_{\text{módulo}} * N^{\circ}_{\text{módulos}} \quad (3)$$

A partir da potência do sistema FV e da quantidade de horas em um ano, 8760 h, é calculada a energia elétrica gerada nominal, expressa em MWh, conforme Eq. (4):

$$E_{\text{nominal}} = P_{\text{sistema}} * 8760 \quad (4)$$

Ao relacionar a energia gerada nominal obtida com a Eq. (4) e o FC medido no LEA, pode-se mensurar a energia elétrica que pode ser gerada por cada bloco estudado. A Eq. (5) apresenta a formulação:

$$E_{\text{gerada}} = FC * E_{\text{nominal}} \quad (5)$$

Aplicada a metodologia para os três blocos do Campus do Pici, são obtidos os resultados listados na Tab. 3.

Tabela 3 – Resultados dos dimensionamentos dos módulos para os blocos avaliados.

Blocos	Eletricidade Gerada (MWh/ano)	Potência Nominal do Sistema FV (KWp)	Quantidade de Módulos FV
Centro de Convivência	401,65	250,14	758
ICA	1.913,94	1.191,96	3.612
RU	845,69	526,68	1.596

3.2 Dimensionamento dos inversores

Após definidos os parâmetros relacionados ao módulo FV, necessita-se escolher qual inversor será utilizado em conjunto com os módulos para converter a energia elétrica gerada pelos módulos de Corrente Contínua (CC) para Corrente Alternada (CA). O inversor selecionado é da marca PHB Solar, especificamente PHB5000D-NS, pois é o mesmo utilizado no LEA, assim como os módulos do presente artigo, e possui as seguintes características (PHB Solar, 2017): Máxima Potência FV = 6500 W; Máxima Tensão = 580 V; Máxima Corrente = 22,8 A; N° de strings = 2.

De acordo com o catálogo, o inversor selecionado suporta até duas *strings* em paralelo, em que uma *string* é formada por um conjunto de módulos FV conectados em série. Como o presente estudo usa apenas um tipo de módulo, então as *strings* são iguais e, com isso, pode-se calcular a tensão presente em cada uma a partir da Eq. (6):

$$V_{\text{string}} = N_{\text{painéis}} * V_{\text{painel}} \quad (6)$$

Onde V_{string} é a tensão da *string*, $N_{painéis}$ é o número de módulos conectados em série e V_{painel} é a tensão de circuito aberto do módulo. Para definir o número de inversores a serem utilizados, bem como a quantidade de módulos por inversor, a Eq. (7) define que:

$$N_{inversores}^{o} = \frac{P_{nominal\ FV}}{P_{MAX\ inversorCC}} \quad (7)$$

Onde $N_{inversores}$ é a quantidade de inversores utilizados, $P_{nominal\ FV}$ é a potência nominal do sistema FV e $P_{MAX\ inversorCC}$ é a potência máxima do inversor. Em seguida, pode-se encontrar a quantidade de módulos FV a serem alocados para cada inversor, conforme Eq. (8):

$$módulos\ por\ inversor = \frac{P_{nominal\ FV}}{P_{MAX\ inversorCC}} \quad (8)$$

Ao aplicar a metodologia para os três blocos estudados, obtêm-se os resultados listados na Tab. 4.

Tabela 4 – Resultados dos dimensionamentos dos inversores para os blocos avaliados.

Blocos	Nº de Módulos	Nº de Inversores	Nº de Módulos por Inversor
Centro de Convivência	758	30	26
ICA	3.612	139	26
RU	1.596	62	26

4. ANÁLISE FINANCEIRA

4.1 Impacto na fatura de energia elétrica do campus

Considerando os valores obtidos, pode-se fazer uma análise do quanto os módulos FV instalados podem compensar no consumo de energia elétrica do campus Pici. A Tab. 5 mostra o consumo mensal do campus.

Tabela 5 – Consumo de energia elétrica do campus Pici de janeiro de 2019 a novembro de 2021 (KWh).

	2019	2020	2021
Janeiro	1.124.000	896.500	352.589
Fevereiro	869.548	953.541	769.354
Março	1.125.364	1.066.723	715.784
Abril	1.040.364	639.160	618.695
Mai	1.090.364	575.122	639.250
Junho	1.254.364	637.221	709.717
Julho	1.261.364	596.433	729.373
Agosto	960.364	722.513	774.496
Setembro	944.785	752.261	817.049
Outubro	1.293.604	905.770	779.922
Novembro	1.367.625	731.618	864.809
Dezembro	1.359.068	819.660	-
MÉDIA	1.130.685	774.710	706.458

Considerando o somatório da geração dos três blocos, a Eq. (9) indica o valor total ao mês:

$$G_{total} = G_{CC} + G_{ICA} + G_{RU} \quad (9)$$

$$G_{total} = 263,44\ MWh\ ao\ mês$$

Assim, caso o sistema FV já estivesse em operação, os módulos estariam economizando mensalmente nas faturas de 2019, 2020 e 2021 uma média, de acordo com a Eq. (10), de:

$$\text{Redução} = \frac{G_{total}}{m\u00e9dia} \quad (10)$$

$$\text{Redu\u00e7\u00e3o}_{2019} = \frac{263,44 * 10^6}{1.130,685 * 10^6} \approx 0,23,30 = 23,30 \%$$

$$\text{Redu\u00e7\u00e3o}_{2020} = \frac{263,44 * 10^6}{774,710 * 10^6} \approx 0,3400 = 34,00 \%$$

$$\text{Redu\u00e7\u00e3o}_{2021} = \frac{263,44 * 10^6}{706,458 * 10^6} \approx 0,3729 = 37,29 \%$$

Com isso, a redu\u00e7\u00e3o no consumo de eletricidade para os 3 anos poderia ser de 23,3%, 34% e 37,29% do valor total consumido no Campus do Pici, apenas instalando os m\u00f3dulos FV no Centro de Conviv\u00eancia, no ICA e no RU.

4.2 Payback fotovoltaico

Para a presente an\u00e1lise financeira, decidiu-se utilizar o RETScreen, um software lan\u00e7ado no ano de 1998, desenvolvido pelo governo do Canad\u00e1 e que possui reconhecimento internacional. O programa aux\u00edlia na an\u00e1lise de viabilidade t\u00e9cnica e financeira quando se trata de projetos que lidam com energias renov\u00e1veis (RETScreen, 2021). O uso do programa inicia-se com a inser\u00e7\u00e3o dos dados de geolocaliza\u00e7\u00e3o e aloca\u00e7\u00e3o da base de dados de acordo com a localiza\u00e7\u00e3o escolhida. Com isso, s\u00e3o definidos dados geogr\u00e1ficos, clim\u00e1ticos e n\u00edveis de irradia\u00e7\u00e3o solar di\u00e1ria m\u00e9dia para cada m\u00eas do ano.

Em seguida, define-se a tecnologia utilizada para os m\u00f3dulos FV, suas respectivas caracter\u00edsticas e os dados de dimensionamento tanto dos m\u00f3dulos como dos inversores para cada local estudado. Para os tr\u00eas blocos da UFC analisados, foi padronizado um sistema de posicionamento solar fixo, inclina\u00e7\u00e3o de 15\u00b0 e azimut de 180\u00b0. Ap\u00f3s os dados serem inseridos, RETScreen retorna os valores de gera\u00e7\u00e3o anual de 401,96 MWh para o Centro de Conviv\u00eancia, 1.914,26 MWh para o ICA e 846,07 MWh para o Restaurante Universit\u00e1rio, o que confirma os valores encontrados via dimensionamento proposto por (Carvalho, 2016), conforme apresentado na Tab.3.

Com isso, faz-se necess\u00e1rio entrar com os dados relativos ao custo do projeto envolvendo todas as etapas. O valor usado na presente pesquisa foi obtido atrav\u00e9s da edi\u00e7\u00e3o de 2019 do estudo “O Mercado Brasileiro de Gera\u00e7\u00e3o Distribuída Fotovoltaica” do Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na Am\u00e9rica Latina (IDEAL), que apresenta a rela\u00e7\u00e3o entre o pre\u00e7o m\u00e9dio e o kWp instalado (IDEAL, 2019).

Como o presente estudo foca na produ\u00e7\u00e3o de energia el\u00e9trica, os custos envolvidos no estudo de viabilidade, nos processos de engenharia e no balan\u00e7o do sistema foram desconsiderados e como o Centro de Conviv\u00eancia, ICA e RU apresentam pot\u00eancia maior que 100 kW, o pre\u00e7o m\u00e9dio aplicado a todos os blocos \u00e9 de R\$ 3.080,00/kWp. O valor total de investimento para os tr\u00eas casos \u00e9 dado na Tab. 6.

Tabela 6 – Investimento total por bloco

Centro de Conviv\u00eancia	R\$ 1.058.318,00
ICA	R\$ 5.036.354,00
RU	R\$ 2.211.902,00

Para a etapa da an\u00e1lise financeira, o RETScreen requer algumas taxas: infla\u00e7\u00e3o para 2021 \u00e9 de 10,25 % a.a. (IBGE, 2021) e a taxa de desconto \u00e9 de 11% a.a. (NAKABAYASHI, 2014), pois \u00e9 equivalente \u00e0 taxa de juros para t\u00edtulos p\u00fablicos. Al\u00e9m disso, definiu-se o tempo de vida \u00fatil do projeto para 25 anos. Dessa forma, o RETScreen apresenta um *payback* de 5,6 anos, ou seja, 6 anos para o investimento se pagar.

5. EQUIVAL\u00caNCIA EM CR\u00c9DITOS DE CARBONO

A equival\u00eancia da redu\u00e7\u00e3o de emiss\u00f5es de CO₂ com a gera\u00e7\u00e3o distribu\u00edda FV (E_{CO_2}) \u00e9 dada pela quantidade evitada de CO₂ na atmosfera em quilogramas com a utiliza\u00e7\u00e3o da gera\u00e7\u00e3o distribu\u00edda FV para gera\u00e7\u00e3o de eletricidade em kWh. A Eq. (11) apresenta o c\u00e1lculo, sendo o fator de emiss\u00e3o de CO₂ m\u00e9dio anual para o Brasil de 0,0927 kg CO₂/kWh no ano de 2017 (MCTIC, 2018). Devido \u00e0 forte presen\u00e7a da fonte h\u00eddrica na matriz energ\u00e9tica brasileira, esse fator tem valor abaixo da m\u00e9dia mundial.

$$E_{CO_2} = 0,0927 * G_{FV} \quad (11)$$

Analisando para o caso do Centro de Conviv\u00eancia, ICA e RU, respectivamente:

$$E_{CO_2} = 0,0927 * G_{CC} = 0,0927 * 401,65 * 10^6 \approx 37,23 \text{ toneladas} \quad (12)$$

$$E_{CO_2} = 0,0927 * G_{ICA} = 0,0927 * 1.913,94 * 10^6 \approx 177,42 \text{ toneladas} \quad (13)$$

$$E_{CO_2} = 0,0927 * G_{RU} = 0,0927 * 845,69 * 10^6 \approx 78,40 \text{ toneladas} \quad (14)$$

Assim, o total de CO₂ reduzido por ano é:

$$E_{CO_2total} = 37,23 + 177,42 + 78,4 \approx 293 \text{ toneladas} \quad (15)$$

Considerando a equivalência de uma tonelada reduzida na emissão de CO₂ para cada crédito de carbono dada na Eq. (16), então:

$$\frac{1 \text{ crédito}}{1 \text{ tonelada}} = \frac{293}{x} \rightarrow x = 293 \text{ créditos de carbono} \quad (16)$$

Assim, o projeto proposto tem a capacidade de gerar 293 créditos de carbono por ano.

6. CONCLUSÕES

Com o uso do Revit, a análise de sombreamento pode ser integrada diretamente à modelagem das construções. A disponibilidade de correções na modelagem enquanto o simulador de sombreamento estava ativo facilitou um estudo preciso sobre o impacto de árvores e outras construções nos blocos estudados, o que garantiu a qualidade da análise. Para o caso do ICA, não houve sombreamento a ser considerado, visto que a caixa d'água existente produzia sombra numa ínfima parte do telhado em poucas horas ao dia e por apenas poucos meses ao ano. Para o Centro de Convivência, o sombreamento se deu devido à parte da construção mais elevada influenciar na menos elevada. Para o caso do RU, o sombreamento foi causado pela existência de muitas árvores de grande porte ao redor.

Pela análise de sombreamento, obteve-se uma área efetiva de uso de 6.683 m² para o ICA, 1.404 m² para o Centro de Convivência e 2.935 m² para o RU, pois, nos espaços desconsiderados, os níveis de geração são muito reduzidos. Após as áreas efetivas de uso definidas, calculou-se a quantidade de módulos FV a serem instalados em cada construção: 3.612 módulos FV para o ICA, 758 para o Centro de Convivência e 1.596 para o RU, sendo, respectivamente, 139, 30 e 62 inversores a serem instalados em cada bloco. Isto significa um total de 5.966 módulos FV e 231 inversores instalados. O dimensionamento FV apresentou uma capacidade instalada de 1.191,96 kWp para o ICA, 250,14 kWp para o Centro de Convivência e 526,68 kWp para o RU, acarretando numa geração ao ano de 1.913,94 MWh, 401,65 MWh e 845,69 MWh, respectivamente. Isto representa 3.161,28 MWh gerados ao ano nas três construções.

Considerando que a média das faturas de 2019 é de 1.130.685 kWh, a de 2020 é 774.710 kWh e a de 2021 é 706.485 kWh, a redução média de consumo em cada ano seria de 23,3% para 2019, 34% para 2020 e 37,29% para 2021, justificado pelo período de uso reduzido causado pela pandemia. Ao utilizar o RETScreen, pode-se fazer a validação dos cálculos desenvolvidos, visto que os valores obtidos foram 1.914,26 MWh para o ICA, 401,96 MWh para o Centro de Convivência e 846,07 MWh para o RU, validando a metodologia de cálculo anterior.

Também de acordo com o RETScreen, encontrou-se o valor que deve ser investido para a implantação do sistema FV em cada um dos blocos: R\$ 1.058.318,00 para o Centro de Convivência, R\$ 5.036.354,00 para o ICA e R\$ 2.211.902,00 para o RU; para os três casos, o tempo de retorno do investimento é de seis anos. Além disso, com uso da metodologia BIM, foi realizada uma valoração usando como referência créditos de carbono, obtendo-se um total de 293 créditos de carbono ao ano.

Agradecimentos

À FUNCAP pela bolsa de mestrado fornecida ao primeiro autor. Ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa 2 para o segundo autor. À UFC por disponibilizar os dados das faturas de energia elétrica do Campus em estudo.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. Energia Fotovoltaica no Brasil: Infográfico N° 38. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar-.html>>

- ANEEL. Resolução Normativa N° 482, de 17 de Abril de 2012. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2012
- ANEEL. Resolução Normativa N° 687, de 24 de Novembro de 2015. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2015
- ANEEL. Resolução Normativa N° 786, de 17 de Outubro de 2017. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2017
- AUTODESK. Vantagens da BIM. Disponível em: <<https://www.autodesk.com.br/solutions/bim/benefits-of-bim>>
- Carvalho, P. C. M. Dimensionamento de planta FV conectada à rede elétrica. Fortaleza: UFC, 2016. 18 slides, color.
- CBIM. Câmara Brasileira de BIM, 2018. Disponível em: <<http://cbim.com.br/>>.
- Chaves, M. P., Dupont, I. M., Carvalho, P. C. M., Araujo, D. N.. Estudo sobre sombreamento em planta fotovoltaica localizada em zona urbana de Fortaleza-CE. REVISTA TECNOLOGIA (UNIFOR), v. 40, p. 1-21, 2019, DOI: 10.5020/23180730.2019.8898
- Costa, D. A. C. Estimativa do Potencial de Geração Fotovoltaica do Campus do Pici da UFC. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, 2018.
- IBGE. Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo, 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticasnovoportal/economicas/precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-ao-consumidoramplo.html?=&t=resultados>>.
- IDEAL. O Mercado Brasileiro de Geração Distribuída Fotovoltaica – Edição 2019, 2019. Disponível em: <<http://institutoideal.org/o-mercado-brasileiro-de-geracao-distribuida-fotovoltaica-edicao-2019/>>.
- IRENA. Solar Energy Data. Disponível em: <<https://www.irena.org/solar>>
- NAKABAYASHI, R. K. Microgeração Fotovoltaica no Brasil: condições atuais e perspectivas futuras. Dissertação – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, 2014.
- Protocolo de Kyoto. Protocolo de Kyoto. Available: <<http://protocolo-de-kyoto.info/>>
- PHB Solar. Catálogo Inversor Solar Fotovoltaico, 2017. Disponível em: <<https://www.energiasolarphb.com.br/pdf/catalogo-inversores-monofasicos-linha-nf.pdf>>.
- RETScreen. Disponível em: <<http://www.gruposage.com.br/index.php/treinamentos/sobre-o-retscreen>>.
- Rocha Filho, J. I. C.; Sistema de Seguimento Solar de um Eixo com Diferentes Estratégias de Seguimento para Módulos Fotovoltaicos. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, 2016
- SAEPRO. Breve Histórico do BIM, 2018. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/saepr/saepr-2/conheca-o-projeto/breve-historico-do-bim/>>
- SDS EDUCA. As Dimensões do BIM. Disponível em: <<https://sdseduca.com.br/as-dimensoes-do-bim/>>
- Silva, F. E. C., Carneiro, T. C., Carvalho, P. C. M. Análise Estatística da Geração de Eletricidade de Plantas Fotovoltaicas do Laboratório de Energias Alternativas da Universidade Federal Do Ceará (LEA-UFC). Fortaleza-CE. I CONNIP. Congresso Internacional Virtual de Pesquisa, Pós-graduação e Inovação do Instituto Federal do Ceará, Fortaleza.
- Yingli. Catálogo Módulo Fotovoltaico, 2016. Disponível em: <http://www.yinglisolar.com/static/assets/uploads/products/downloads/DS_YGE60CELL%20SERIES%20%20BS-29b_35mm_US_EN_20170821_V04.pdf>.

ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC GENERATION POTENTIAL USING BUILDING INFORMATION MODELING METHODOLOGY

Abstract. *This paper analyzes the potential of photovoltaic (PV) systems in three buildings of the Federal University of Ceará (UFC), using Building Information Modeling (BIM). The research presents constructive and sustainability analysis, involving technical details, PV sizing calculations, shading and financial attractiveness study, and comparison with an energy currency related to carbon credits. Revit software is used for the volumetric modeling of the buildings and for the shading studies, where the effect of shading is simulated during three times of the day and in four equally spaced months of the year. The proposed methodology represents a new level in the integration of engineering projects, creating a platform for the simultaneous development of construction and financial details. RETScreen software is used to measure the investment for each building, the amount saved, and in how long the investment pays off. Thus, it is observed the possibility to implement 3.612 PV modules in the Instituto de Cultura e Arte (ICA), 758 in the Centro de Convivência and 1.596 in the Restaurante Universitário (RU). As a result, the units can generate 401,65 MWh, 1.913,94 MWh and 845,69 MWh respectively. A return on investment is estimated in six years: R\$ 5,036,354.00 for the ICA, R\$ 1,058,318.00 for the Centro de Convivência and R\$ 2,211,902.00 for the RU. A carbon credit analysis is also carried out, resulting in 293 tons of CO₂ not being released into the atmosphere.*

Key words: Photovoltaic, Distributed Generation, BIM.