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

VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE TELHAS FOTOVOLTAICAS APLICADAS A UMA RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR EM BELO HORIZONTE-MG

Ricardo Augusto dos Santos Horta (1); Rodrigo de Mello Penna (2) Raquel Diniz Oliveira (3)
(1) Engenheiro de Produção Civil, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, ricardocivil92@gmail.com.
(2) Estudante, Graduando em Engenheira de Produção Civil, rodrigomoradopenna@gmail.com.
(3) PhD, Professora do Departamento de Engenharia Civil, raqueldiniz@cefetmg.br.
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil, Av. Amazonas, 7675. Prédio 12, sala 221. Belo Horizonte–MG, 30510-000, Tel.: (31) 3319 6810.

RESUMO
Um dos maiores desafios que envolvem a sociedade atual é a manutenção do ritmo de crescimento da economia sem gerar danos ao meio ambiente e à condição de vida dos habitantes. Neste cenário, considerando a importância do setor energético e a relevância da utilização das fontes renováveis de energia, destaca-se a produção de energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos. Dentre as tecnologias mais recentes que utilizam o efeito fotovoltaico, evidenciam-se as telhas fotovoltaicas. Neste contexto, realizou-se estudo de viabilidade técnica e econômica de sua aplicação em uma residência unifamiliar localizada em Belo Horizonte (MG), em comparação com a tecnologia de módulos fotovoltaicos, considerando-os conectados à rede elétrica da concessionária local. Os resultados indicaram que ambos os sistemas apresentam viabilidade técnica para o presente estudo de caso, uma vez que as tecnologias se mostraram capazes de atender a 100% da sua necessidade energética. Contudo, apenas os módulos fotovoltaicos se mostraram viáveis quando avaliados sob o viés econômico. Tal fato pode estar relacionado ao elevado custo das telhas fotovoltaicas e à falta de subsídios e programas governamentais para incentivar o uso das tecnologias solares, e, consequentemente, reduzir os custos iniciais de investimento e aumentar o saldo positivo dos fluxos de caixa. Este trabalho apresenta, portanto, contribuição para consolidação das telhas fotovoltaicas como alternativa sustentável para geração de energia limpa e redução das emissões de gases de efeito estufa além de contribuir para a diversificação da matriz energética brasileira.
Palavras-chave: Sistemas fotovoltaicos; telhas fotovoltaicas, habitação unifamiliar.

ABSTRACT
One of the biggest challenges in today's society is maintaining the pace of economic growth without damaging the environment and inhabitants living conditions. In this scenario, considering the renewable energy sources relevance and its importance on energy sector, we highlight the electricity generation through photovoltaic systems. Among the most recent technologies that use the photovoltaic effect, photovoltaic tiles can be evident. A technical and economic feasibility study of its application was carried out in a single-family residence located in Belo Horizonte (MG, Brazil), in comparison to photovoltaic panel technology, considering both system connected to the local grid. The results pointed out that both systems present technical feasibility to be applied in this case study, since the technologies were able to meet 100% of its energy needs. However, only photovoltaic panels were viable when evaluated under an economic bias. This may be due to the high photovoltaic tiles cost and also the lack of subsidies and government programs to encourage solar technologies adoption and, consequently, reduce initial investment costs as well as increase the positive cash flow balance. This work presents a contribution to foster photovoltaic tiles technology, as a sustainable option to generated green energy and also reduce greenhouse gas emissions through as well as contribute to Brazilian energy matrix diversification.
Keywords: Photovoltaic systems; photovoltaic tiles, single family dwelling.

1. INTRODUÇÃO

Conforme definição do Instituto para Desenvolvimento da Habitação Ecológica (IDHEA, 2015), a construção sustentável se caracteriza por ser um sistema construtivo capaz de proporcionar condições satisfatórias de conforto térmico, lumínico, acústico, entre outros aspectos recomendados para os usuários do espaço, juntamente com a preservação do meio ambiente, por meio de iniciativas que contribuam para a redução do consumo de energia, água e dos recursos naturais. Neste sentido, a utilização de materiais construtivos adequados às condições climáticas locais, associada ao uso de tecnologias e sistemas prediais eficientes podem contribuir para a melhoria da eficiência energética da edificação (LAMBERTS, 2014).

Segundo Costa e Prates (2005), o grande desafio da sociedade atual refere-se à concepção de novas tecnologias para diversificação da matriz energética mundial. O consumo descontrolado de fontes não renováveis de energia (petróleo, carvão, gás natural, etc.) têm acarretado na preocupação com o seu esgotamento, bem como na produção de danos crescentes ao meio ambiente por meio das emissões de gases de efeito estufa contribuindo para o aquecimento global e mudanças climáticas (AL GORE JUNIOR, 2006).

A crise do petróleo da década de 1970, reforçou a preocupação acerca da indisponibilidade dos recursos energéticos no âmbito mundial. Entretanto, nesta época, soluções alternativas para a geração de energia eram incipientes e pouco acessíveis (PLANTIER, 2013). Posteriormente, verificou-se gradativo aumento da participação das fontes renováveis de energia na matriz energética, especialmente nesta última década (NAKABAYASHI, 2014). Segundo o instituto de pesquisa *Bloomberg New Energy Finance* (BNEF), no ano de 2016, o volume mundial de investimentos em energia renovável foi, pela primeira vez, maior do que aqueles em fontes de energia de origem fóssil. Isto ocorreu porque, apesar dos preços mais baixos para as fontes de energia de origem fóssil, os investimentos em energia renovável, principalmente para sistemas fotovoltaicos e turbinas eólicas, tiveram um crescimento contínuo entre 2004 e 2015. Em termos quantitativos, os investimentos globais em energia renovável atingiram um montante de US$ 329 bilhões em 2015, ultrapassando o volume de investimentos em fontes de energia de origem fóssil, que atingiram o patamar de US$ 253 bilhões (PROCEL INFO, 2006a).

No Brasil, destaca-se o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), criado em 1985, para promover o uso eficiente da energia elétrica e combater o seu desperdício. Tendo sido posteriormente ampliada, tal iniciativa aplica-se à equipamentos, edificações, iluminação pública, entre outros. Assim, como resultado, de 1986 a 2017, a economia de energia obtida foi de 128,6 bilhões de kWh (PROCELINFO, 2006b). Contudo, iniciativas brasileiras para estimular a adoção de fontes alternativas de geração de energia ainda são escassas. O objetivo nº1169 de promover o uso de sistemas e tecnologias de geração de energia renovável na matriz energética brasileira do Plano Plurianual da União para o período de 2016 a 2019 foi vetado por ato presidencial (BRASIL, 2016). No ano de 2015, foi aprovado pela Comissão de Serviços de Infraestrutura (CI), o Projeto de Lei nº371 que permite o uso do Fundo de Garantia por Tempo de Serviço (FGTS) para a aquisição e instalação de equipamentos de geração elétrica a partir de fontes hidráulica, solar, eólica ou de biomassa, para residências. Esta medida poderá, se aprovada, estimular o uso de recursos energéticos renováveis nas residências brasileiras (PROCEL INFO, 2006c). Cumpre destacar que a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 referente a micro e mini geração, bem como, compensação de energia elétrica (ANEEL, 2012) definiu e possibilitou meios para a implantação dos sistemas fotovoltaicos em residências brasileiras.

Considerando a importância do setor energético para a promoção de fontes renováveis, destaca-se a produção da energia elétrica proveniente da energia solar por meio do efeito fotovoltaico. Neste sistema, os fótons, que são partículas carreadoras de energia presentes na luz solar, incidem sobre uma superfície composta de células fotovoltaicas (normalmente feitas de silício ou outro material semicondutor). Nos extremos do material semicondutor surge uma diferença de potencial elétrico, responsável por colocar em movimento os elétrons da estrutura, produzindo corrente elétrica (NASCIMENTO, 2004). Por meio do efeito fotovoltaico, células solares convertem diretamente a energia solar em energia elétrica de forma estática, silenciosa, não poluente e renovável (RÜTHER, 2004).

Dentre as tecnologias mais recentes que utilizam o efeito fotovoltaico destaca-se as telhas fotovoltaicas. Desenvolvida pelas empresas italianas Area Industrie Ceramiche e REM, com o nome de "*Tegola Solare*", tal sistema se propõe a substituir os pesados e espaçosos modelos dos módulos fotovoltaicos, e vêm adquirindo espaço no mercado internacional. Com o objetivo de intensificar os ganhos de eficiência e aprimorar o aspecto estético da edificação, a "*Tegola Solare*" é similar a uma telha cerâmica convencional, apresentando o diferencial de ser constituída de um conjunto de células fotovoltaicas (ECOD, [201-]).

No que tange as pesquisas correlacionadas destaca-se o estudo de Weiss (2013) que verificou, como principal benefício das telhas fotovoltaicas, a geração de eletricidade em edifício de escritórios em Yuma, no

Arizona (Estados Unidos). O autor não constatou redução no calor que flui para dentro da edificação gerada por este sistema de cobertura, porém, verificou economia nas despesas energéticas para a sua refrigeração. Huang (2014) indicou que o sistema fotovoltaico desenvolvido por meio de células solares à base de silício de cristal único laminado entre vidro temperado e telha cerâmica para aplicação em fachada de edifício em Taiwan, além de fornecer energia elétrica para o seu consumo foi capaz de resistir a tufões e ainda melhorou o ambiente térmico interno pela ventilação natural propiciada. Madessa (2015) apresentou, por meio de análise paramétrica, os benefícios econômicos e ambientais em relação ao rendimento de energia elétrica de diferentes módulos fotovoltaicos aplicados a um telhado plano de 100m^2 em uma residência em Oslo (Noruega), instalados com espaçamento e ângulo de inclinação variados. No cenário residencial brasileiro, a aplicação da telha fotovoltaica não foi retratada em pesquisas científicas de ampla divulgação. Verificam-se, de modo geral, estudos aplicados principalmente à adoção de módulos fotovoltaicos. Destaca-se, portanto, o estudo de viabilidade econômica de módulos fotovoltaicos instalados como alternativa energética autossuficiente em três edificações residenciais, localizadas em Santa Catarina, São Paulo e Pernambuco, desenvolvido por Torres (2012). As três residências possuem características construtivas similares e o mesmo consumo médio mensal de energia elétrica. A escolha de estados tão distantes entre si justificou-se devido às diferenças de irradiação solar, o que torna possível a análise do efeito dessa variável sobre a eficiência dos sistemas instalados. Conforme resultados encontrados, todas as três instalações obtiveram um *payback* simples inferior ao tempo de vida útil de 25 anos considerado para os equipamentos fotovoltaicos. Neste contexto verifica-se a relevância em se analisar a implantação de sistemas alternativos para geração de energia, tais como Telhas fotovoltaicas, para estudos aplicados a realidade brasileira.

2. OBJETIVO

O objetivo deste estudo consiste em verificar se a tecnologia das telhas fotovoltaicas apresenta viabilidade técnica e econômica para ser implantada em uma residência unifamiliar localizada em Belo Horizonte-MG.

3. MÉTODO

O presente trabalho consiste em uma pesquisa aplicada, destinada à investigação da viabilidade técnica e econômica de telhas fotovoltaicas, em comparação com módulo fotovoltaico convencional, aplicadas a uma edificação residencial para o atendimento integral da sua demanda de energia elétrica. Selecionou-se como estudo de caso simulado uma habitação unifamiliar, localizada em Belo Horizonte - MG. O método deste trabalho perpassou por sete etapas principais:

1. Definição e caracterização do estudo de caso;
2. Estimativa do consumo energético;
3. Cálculo de Horas de Sol Pleno;
4. Definição do modelo e quantidade das telhas e módulos fotovoltaicos para demanda energética;
5. Dimensionamento dos inversores dos respectivos sistemas fotovoltaicos
6. Análise de viabilidade técnica e econômica
7. Conclusões e recomendações

3.1. Definição e caracterização do estudo de caso

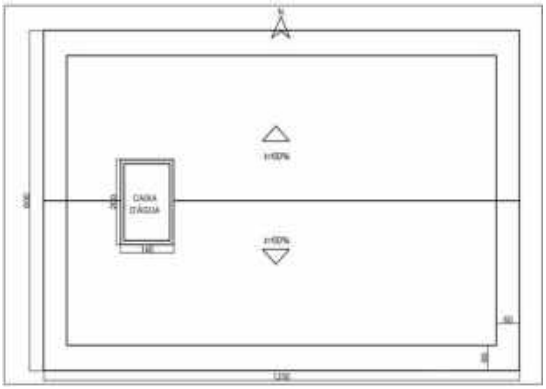
O estudo de caso simulado deste trabalho consiste em uma edificação residencial unifamiliar, composta por três membros, localizada em Belo Horizonte - MG. Para a seleção do número de membros adotou-se como base a média de moradores por domicílio no Brasil, que foi de 3,0, segundo o censo demográfico de 2015, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (VALOR ECONÔMICO, [201-]).

Quanto à dimensão da edificação, informações contidas planta baixa da edificação (Figura 1) indicaram uma área de 77m², composta por três quartos (sendo uma suíte para um casal, quarto de solteiro e escritório), dois banheiros, cozinha, sala de jantar, sala de estar, área de serviço e corredor. Na Figura 2 observa-se que a cobertura da edificação se constitui por um telhado, subdividido em duas águas para escoamento pluvial além de torre para abrigar o reservatório d'água. A área útil da cobertura foi de 97,2m², exclusa a área ocupada pela caixa d'água. Para localidades no hemisfério sul, a região norte se mostra, de modo geral, como a mais indicada para implantar o sistema fotovoltaico, devido à maior incidência da radiação solar durante o dia, o que possibilitaria maior geração de energia fotovoltaica (SOLARVOLT, 2015). Desta forma, a área útil orientada a norte foi metade da área útil (48,6m²). A área de cobertura destinada a implantação do sistema fotovoltaico não coincide com a sua área de projeção em planta, mas sim com a sua área inclinada obtida pelo ângulo de inclinação ou caimento das telhas. Para o cálculo da área útil

inclinada de cobertura voltada para o norte definido para a implantação do sistema fotovoltaico, tomou-se como base um caimento de 60%, capaz de promover o perfeito escoamento da água da chuva, o que equivale a um telhado de 27º de inclinação (Miranda Corrêa, [201-]). Desta forma a área útil inclinada a norte foi de 54,54m².



1



2

Figura 1 - Planta baixa da edificação. Figura 2 - Planta de cobertura da edificação.

Destaca-se que não foi necessária a realização do teste de carga sobre as ripas que promovem a sustentação dos equipamentos fotovoltaicos. Isto ocorre, pois, considerando a área equivalente das telhas coloniais em comparação com àquelas fotovoltaicas, o peso existente sobre a estrutura do telhado é maior no caso da instalação de telhas coloniais, o que atesta o fato da capacidade de carga da parte estrutural da cobertura ser suficiente, podendo os sistemas fotovoltaicos serem instalados com segurança.

3.2. Estimativa do consumo energético

O consumo energético mensal da edificação em estudo foi obtido por meio de estimativa utilizando o simulador de consumo residencial, disponibilizado no site da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Para o cálculo do consumo energético residencial, considerou-se uma rotina de funcionamento em que os três membros permanecem em casa somente durante o turno da noite, totalizando 12 horas por dia, durante 30 dias. As quantidades e os tipos de cada equipamento foram baseados nos eletrodomésticos constantes na planta baixa da edificação deste estudo.

Em relação aos tempos de uso, considerou-se que a geladeira e o freezer possuem ciclo de funcionamento do seu motor reduzido. Em pesquisa experimental, em um ciclo de 10 minutos, o funcionamento do motor de geladeira foi de 4 minutos sendo os 6 minutos restantes, em *stand by* (ECONOMIZANDO ENERGIA, 2011). Sendo assim, o consumo de energia é da ordem de 40% das horas em um dia (9 horas e 36 minutos). Para o chuveiro elétrico, a frequência e a duração do uso de chuveiros para banho estão associadas a aspectos comportamentais. Desta forma, a sua duração pode ser mais curta ou prolongada, variando de 5 a 15 minutos (LNEC; ISA, 2001). Neste contexto, Barreto (2008) considerou um valor médio de 8 minutos de duração ao passo que outros autores adotaram como referência um tempo de banho mais prolongado de 15 minutos (AOYAMA; SOUZA; FERRERO, 2007; SILVA; SOUZA, 2012).. Em relação aos demais equipamentos, foram considerados tempos de uso padrão, baseados na rotina de consumo informado por uma família com perfil semelhante ao estudo de caso.

3.3. Simulação dados do consumo energético

Após à simulação de consumo energético calculou-se o número de horas de sol pleno (HSP) do local, a partir da radiação solar considerada para Belo Horizonte-MG, obtida por meio do Atlas Solarimétrico do Brasil (2000). Para uma melhor coerência da eficiência do aproveitamento da radiação solar da região, considerou-se a inclinação ideal do sistema fotovoltaico igual a latitude do local (Roaf *et al*. 2009). A partir dos valores de irradiação calculou-se as horas de sol pleno (HSP) por meio da Equação 1 (PINHO *et al.* 2014).

$$\text{HSP} = \frac{I(kW/m^2)}{1(kW/m^2)} \qquad \text{Equação 1}$$

Sendo:
HSP, as Horas de Sol Pleno [horas/dia];
I, a Irradiação Média [kWh/m²/dia].

3.4. Definição do modelo e quantidade das telhas e módulos fotovoltaicos para demanda energética

Posteriormente a determinação do cenário da edificação, escolheu-se o sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR), para o sistema de telhas fotovoltaicas e módulos solares, pela possibilidade de injetar o excesso de energia produzida na rede pública, acumulando créditos energéticos (MARQUES *et al*., 2016), e por dispensar o uso de baterias, reduzindo, seu custo de implantação (RÜTHER, 2004). Para o dimensionamento dos SFCR, a escolha dos modelos da telha fotovoltaica teve como critério o menor valor na relação preço/watt-pico. Da mesma forma, foi utilizado esse critério para a escolha do módulo fotovoltaico, analisando-se modelos presentes nas lojas virtuais MINHA CASA SOLAR e NEOSOLAR[42]. A quantidade de módulos do sistema fotovoltaico foi definida para atender a demanda energética simulada neste trabalho. Dessa forma, utilizou-se da Equação 2 e Equação 3 (ZOMER, 2014), para encontrar a Equação 4 que relaciona a quantidade de módulos do sistema a ser analisado em função da quantidade de energia solar necessária a ser gerada para suprir a demanda energética simulada.

$$Pcc = n.Pnom \qquad \text{Equação 2}$$

Sendo:
Pcc, a Potência instalada em corrente contínua [kWp];
n, o Número de módulos fotovoltaicos a serem utilizados;
Pnom, a Potência nominal do módulo fotovoltaico escolhido [kWp];

A Equação 3 relaciona a geração solar fotovoltaica, mês a mês, pela potência instalada, HSP e pela Taxa de Desempenho de 0,75, valor que considera perdas típicas de inversores, circuitos elétricos e perdas no sistema por poluição (EPE, 2012).

$$E = HSP.Pcc.TD \qquad \text{Equação 3}$$

Sendo:
E, a Geração solar fotovoltaica diária [kWh];
HSP, as Horas de Sol Pleno [horas/dia];
Pcc, a Potência instalada em corrente contínua [kWp];
TD, a taxa de Desempenho do sistema (considera inversor e conexões).

Como a geração solar fotovoltaica diária deve-se igualar com a energia elétrica necessária teremos com a Equação 4:

$$n = \frac{G}{HSP.Pnom.TD} \qquad \text{Equação 4}$$

Sendo:
G, a Energia Elétrica demandada diária[kWh];
n, o Número de módulos fotovoltaicos a serem utilizados;
HSP, as Horas de Sol Pleno [horas/dia];
Pnom, a Potência nominal do módulo fotovoltaico escolhido [kWp];
TD, a taxa de Desempenho do sistema (considera inversor e conexões).

Destaca-se que fatores como correção do norte verdadeiro em relação ao magnético e o sombreamento da caixa d'água sobre a instalação fotovoltaica não foram levados em consideração e podem ter influência nos resultados.

3.5. Dimensionamento dos inversores dos respectivos sistemas fotovoltaicos

A escolha dos inversores para as telhas fotovoltaicas seguiu as recomendações do fornecedor encontradas no site da empresa[43]. Para o SFCR de placas solares, seguiu-se a metodologia sugerida por Pinho *et al.* (2014) para a escolha dos inversores, que realizam a conversão energética em corrente contínua, para o utilizando-se das equações 5, 6, 7, 8 e 9, considerando-se características elétricas do gerador para evitar um

[1]Maiores informações disponíveis em: www.neosolar.com.bre/ou www.minhacasasolar.com.br.
[2] http://www.umbelino.pt/client/documentos/downloads/guias_aplicacao/CATALOGOTECNICO_SOLESIA.pdf

superdimensionamento. Além disso, seguiu as recomendações de RÜTHER (2004), para a melhor configuração de *strings* para a potência instalada do sistema de telhas e de placas solares.

$$Pinv = FDI.Pcc \quad \text{Equação 6}$$

Sendo:
Pinv, a Potência nominal do inversor [kWp];
FDI, o Fator de Dimensionamento de inversores [adimensional];
Pcc, a Potência instalada dos módulos fotovoltaicos [kWp];

$$N < \frac{Vi\max}{Voc} \quad \text{Equação 7}$$

Sendo:
N, o Número máximo de módulos associados em série em uma mesma *string*;
Vimax, a Tensão máxima de entrada do inversor [V];
Voc, a Tensão de circuito aberto do módulo [V].

$$\frac{ViSPPM\min}{Vmp} < \mathrm{N} < \frac{ViSPPM\max}{Vmp} \quad \text{Equação 8}$$

Sendo:
N, o Número máximo de módulos associados em série em uma mesma *string*;
ViSPPMmin, a Tensão do Seguidor de Ponto de Potência - SPPM mínima [V];
ViSPPMmax, a Tensão SPPM máxima [V];
Vmp, a Tensão na potência máxima do módulo [V].

$$ns = \frac{\mathrm{Im}ax}{Isc} \quad \text{Equação 9}$$

Sendo:
ns, o Número de *strings* em paralelo admitido por um mesmo inversor ou uma mesma entrada de inversor;
Imax, a Corrente contínua máxima de entrada [A];
Isc, a Corrente de curto circuito do módulo [A];

$$Pinv = N.Vmp.\mathrm{Im}\,p.ns.ne.TD \quad \text{Equação 10}$$

Sendo:
Pinv, a Potência no inversor [W];
N, o Número de módulos em cada *string*;
Vmp, a Tensão do módulo fotovoltaico na potência máxima [V];
Imp, a Corrente do módulo fotovoltaico na potência máxima [A];
ns, o Número de *strings* em paralelo em um inversor;
ns, o Número de entradas do inversor;
TD, a Taxa de desempenho.

3.6. Análise de viabilidade técnica e econômica

O cálculo do investimento para a implementação do SFCR de telhas fotovoltaicas e de placas solares, contabilizaram a quantidade e modelos dos módulos, e seus respectivos inversores, como demonstrado na Equação 11. Os gastos com conexões, suportes e outros componentes da instalação do sistema, custo com a mão de obra de implantação, projetos envolvidos foram estimados na ordem de 31% do valor investido, baseado em estudo de mercado (IDEAL; AHKRJ, 2018). Além disso, para o cálculo do investimento inicial do SFCR de telhas fotovoltaicas, descontou-se o custo de serviço e insumo das telhas cerâmicas substituídas de acordo com o Índices da construção civil, código 94195 (SINAPI,2019)

$$I = 1{,}50.[(np.pp) + (ni.pi)] \quad \text{Equação 11}$$

Sendo:
I, o investimento inicial [R$];
np, a Quantidade de módulos necessários;
pp, o Preço orçado dos módulos [R$];
ni, a Quantidade de inversores necessários;
pi, o Preço orçado dos inversores [R$];

O investimento nos sistemas fotovoltaicos tem como contrapartida os gastos anuais com operação e manutenção, sendo que estes custos representam as saídas de capital no fluxo de caixa. Para as atividades de operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos, considera-se um gasto anual de 1% sobre o valor do sistema (NAKABAYASHI, 2015). Estes custos foram classificados como saídas de capital no cálculo do *payback* descontado dos sistemas fotovoltaicos instalados. No manual do fabricante de ambos os sistemas, telhas solares e módulos fotovoltaicos, consta que o equipamento opera com rendimento mínimo de 80% para até 25 anos de uso (SOLESIA, 2015; SOLARVOLT, 2015). Assim, considerou-se, para efeito de depreciação, a vida útil de 25 anos para os módulos e telhas fotovoltaicas. Por outro lado, os inversores apresentam vida útil de 10 anos e dessa forma o investimento inicial contabilizou a compra de duas vezes a quantidade de inversores necessária para atender o consumo energético mensal estipulado, para um cálculo mais preciso do fluxo de caixa de 25 anos.

Ademais, considerou-se neste estudo a tarifa aplicável a uma residência de padrão normal, conforme parâmetros estabelecidos pela CEMIG, localizada em área urbana. Nestas condições, existem quatro bandeiras tarifárias: verde, amarela, vermelha patamar 1 e vermelha patamar 2 (CEMIG, 2019). A variação das bandeiras tarifárias ocorre segundo as condições de geração de eletricidade, sendo o custo para a cor verde, o menor, para a amarela, intermediário e para a vermelha, o maior. Para efeito deste estudo utilizou-se a média das tarifas cobradas, equivalente a R$ 0,60934/KWh. Sendo assim, para as entradas de capital, ano a ano, possibilitadas pelo investimento nos sistemas fotovoltaicos instalados, considerou-se o valor obtido pela multiplicação do custo médio da tarifa pelo consumo mensal por 12 meses.

A avaliação da viabilidade econômica de ambos SFCR pautou-se na análise do Fluxo de Caixa gerados para o tempo de vida útil do sistema de 25 anos e dos respectivos índices financeiros: Valor Presente Líquido (VPL), *Payback* descontado e Taxa de Retorno Interno. Para esses cálculos dos índices, a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) considerada foi estipulada sobre o INCC (Índice Nacional da Construção Civil), sendo este o índice utilizado para aferir a evolução dos custos habitacionais no Brasil. Assim, considerando a variação nos últimos 12 meses (PORTAL BRASIL, 2019) estabeleceu-se um valor médio para a TMA de 3,9473% a.a.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da simulação de consumo energético estão desmontados na Tabela 1, em que se totalizou-se um consumo residencial de 350,365 KWh/mês. Complementarmente, a estimativa realizada pelo simulador, foi verificado a veracidade dos resultados, com os dados de uma conta de energia elétrica da CEMIG fornecida por uma família, com perfil de uma residência unifamiliar, de três membros, localizada em Belo Horizonte-MG, semelhante ao estudo de caso. Desta forma, verificou-se a adequação dos resultados gerados no simulador em comparação com a média do consumo real (347,17 KWh/mês) para 12 meses contados de março de 2017 até o mês de fevereiro de 2018.

Tabela 1 - Simulação do consumo residencial.

Equipamento	Quantidade	Potência	Dias de uso	Tempo de uso	Total KWh/mês
Carregador de celular	3	15 W	Dia/mês 30	4 Hr 0 min	5,4
Chuveiro	2	4400 W	Dia/mês 30	0 Hr e 22 min	96,8
Computador	1	200 W	Dia/mês 30	2 Hr e 0 min	12
Ferro de passar	1	1000 W	Dia/mês 30	0 Hr e 3 min	1,5
Fogão elétrico	1	1500 W	Dia/mês 30	0 Hr e 30 min	22,5
Freezer	1	170 W	Dia/mês 30	9 Hr e 36 min	48,96
Geladeira	1	190 W	Dia/mês 30	9 Hr e 36 min	54,72
Limpa Flu., 40W	12	40 W	Dia/mês 30	5 Hr e 0 min	72
Liquidificador	1	300 W	Dia/mês 30	0 Hr 5 min	0,75
Micro-ondas	1	1500 W	Dia/mês 30	0 Hr e 5 min	3,75
Sanduicheira	1	750 W	Dia/mês 30	0 Hr e 5 min	1,875
Secador de cabelo	1	1000 W	Dia/mês 30	0 Hr e 5 min	2,5
Televisão	2	150 W	Dia/mês 30	2 Hr 0 min	18
Ventilador	2	80 W	Dia/mês 30	Hr 2 e 0 min	9,6
Total					350,3675

A partir da radiação solar global diária, média anual de 4,44kWh/m², para a região de Belo Horizonte - MG de acordo com Atlas Solarimétrico do Brasil, (2000) encontrou-se um HSP de 4,44 horas/dia. O modelo de telha fotovoltaica escolhida foi da marca SOLESIA fabricada pela empresa Umbelino Monteiro de Portugal, pela ausência de fornecedores nacionais, custo benefício e garantia de 25 anos. Segundo o fornecedor, cada unidade apresenta uma potência nominal de 90W com um peso de 12 Kg, Já para o modelo dos módulos solares, escolheu-se o módulo solar fotovoltaico de 265W Canadian Solar - CS6K-265P com as

dimensões de (1662 x 996 x 8,5 mm), por apresentar menor relação custo por Watt (R$/W), potência nominal de 265W e eficiência de 16,1% de acordo com especificações do fabricante. Com tais especificações foi possível encontrar a quantidade de 38 telhas fotovoltaicas ou 13 módulos fotovoltaicos para suprir a demanda de consumo elétrico do apartamento. Dessa forma

Dando continuidade ao dimensionamento, para a quantidade de telhas fotovoltaicas calculada o fornecedor recomenda a instalação de 1 inversor Inversor SMA Sunny MiniCentral SMC 7000HV-11. Para as placas fotovoltaicas, sob as condições para o dimensionamento de inversores, escolheu-se a instalação de 1 inversor do modelo Grid-Tie 3,0kW (Sem Wi-fi) B&B Power - SF3000TL, com potência individual do equipamento de 2,968W.

Os módulos fotovoltaicos apresentaram viabilidade técnica para o presente estudo visto que a área necessária para suprir integralmente a demanda energética da residência foi de 21,10m², valor equivalente a 38,69% da área útil inclinada de cobertura voltada para o norte, que é de 54,54m². Se considerarmos todo o telhado, os módulos fotovoltaicos ocupam 21,27% de sua área útil. O sistema de telhas fotovoltaicas também apresentou viabilidade técnica, visto que a área necessária para suprir todo o consumo energético da habitação foi de 23,98m², valor equivalente a 43,97% da área útil inclinada de cobertura voltada para o norte. Assim, as telhas fotovoltaicas ocupam 24,67% da área total de cobertura, valor mais expressivo em comparação com àqueles obtidos para os módulos, podendo apresentar uma interferência maior no volume do telhado como um todo.

Contudo, cumpre destacar que as telhas solares se adaptam melhor à cobertura da edificação do que os módulos fotovoltaicos, pelo fato de serem mais leves, além de não apresentarem fiação aparente e não havendo a necessidade de suportes especiais para sua sustentação, características que facilitam a sua instalação.

Os valores para cálculo do investimento inicial para os dois SFCR dimensionados estão resumidos na Tabela 2 e 3, sendo que a área superficial modular das telhas fotovoltaicas dimensionada de 24,53 m^2, resultou em uma economia de R$600,59 por dispensar o telhamento com telha cerâmica de encaixe, tipo portuguesa para a área ocupada elas telhas fotovoltaicas. É importante ressaltar que para ambos os sistemas fotovoltaicos, desconsiderou-se o custo do frete e/ou importação.

Tabela 2 - Preço de telhas e inversores do SFCR de telhas fotovoltaicos

Descrição	**Preço Unitário (R$)**	**Preço Total (R$)**
TELHA SOLAR SOLESIA (38 un)	R$ 1.876,10[44]	R$ 71.291,80
Inversor SMA Sunny MiniCentral SMC 7000HV-11	R$ 14.390,00	R$ 28.780,00
Total	-	R$ 100.071,80

Tabela 3 - Preço de módulos e inversores do SFCR de telhas solares

Descrição	**Preço Unitário (R$)**	**Preço Total (R$)**
Placa Canadian CS6K-265P (13 un.)	R$ 589,00	R$ 7.657,00
Inversor Grid-Tie 3,0kW (SemWi-fi) B&B Power - SF3000TL (4 un. para o período considerado – 1 troca de inversor)	R$ 4.690,00	R$ 9.380,00
Total	-	R$ 17.037,00

A tabela 4 apresenta o Resultado dos índices financeiros de ambos sistemas fotovoltaicos. Observa-se que os índices de VPL e TIR para a implantação das telhas fotovoltaicas foram negativas, bem como um *payback* descontado acima do tempo útil do sistema. Já o módulo fotovoltaico apresentou os índices financeiros positivos com um *payback* de 9,4 anos.

Tabela 4 - Resultados dos Índices Financeiros

Índices Financeiros	**Telhas fotovoltaicas**	**Módulos fotovoltaicos**
VPL	-R$ 134.617,20	R$ 8.459,08
TIR	-11,60%	6,95%
Payback descontado	Acima de 25 anos	9,4 anos

5. CONCLUSÕES

Com base na metodologia empregada foi possível o cumprir com o objetivo proposto neste artigo. Os resultados do estudo de viabilidade técnica permitiram inferir os módulos fotovoltaicos apresentam potencial

[3]Com 1 EUR = 4,3308, conforme cotação do dia 08 de abril de 2019, apresentada pelo Banco Central para tal moeda. Maiores informações poderão ser acessadas em: <http://www4.bcb.gov.br/pec/conversao/conversao.asp>.

para serem implantados na residência unifamiliar (~77m²) diferentemente das telhas fotovoltaicas que não demonstrou viabilidade econômica, uma vez que foram capazes de atender 100% do seu consumo energético. Ambos os sistemas ocuparam áreas menores do que a área de cobertura norte da edificação, sendo possível a sua instalação e funcionamento em condições ideais de geração de energia, conforme recomendações técnicas dos fabricantes. Contudo, nota-se que as telhas fotovoltaicas se sobressam no aspecto estético, harmonizando mais facilmente a cobertura das edificações ao passo que os módulos fotovoltaicos se diferenciam quanto à sua potência e eficiência na conversão de energia.

Sob a perspectiva econômica, a implantação das telhas fotovoltaicas se mostrou inviável por não possuir retorno do investimento. Verifica-se, portanto, que este sistema ainda apresenta baixa atratividade econômica para ser implantado no Brasil, tendo em vista o alto custo inicial do seu investimento. Em relação aos módulos, o tempo de retorno foi de 9,4 anos, equivalente a 40% do tempo de vida útil do equipamento, considerando a ferramenta de *payback* descontado. No caso das telhas fotovoltaicas, o alto valor de investimento impossibilitou o cálculo do *payback* no tempo de vida útil do equipamento, que é de 25 anos.

Novas alternativas, sob a ótica política e da economia, envolvendo governo e empresas concessionárias de energia elétrica, poderiam contribuir para estimular o uso das telhas fotovoltaicas no mercado brasileiro. Por parte do governo poderiam ser realizadas, por exemplo, reduções das taxas de juros nos financiamentos para consumidores que queiram investir nesta tecnologia, além do fornecimento de subsídios para a sua implementação. A concessão de uso do FGTS para a compra de equipamentos fotovoltaicos, proposta em Projeto de Lei em tramitação, também poderia fomentar a adoção de soluções alternativas na geração de energia em edificações. Por parte das concessionárias, o aumento do preço pago pela energia injetada na rede elétrica pública, poderia contribuir para estimular a micro geração. Ademais foi possível, por meio deste trabalho, demonstrar quantitativamente os prós e contras referentes a implantação do sistema de telhas fotovoltaicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução normativa nº 482**, de 17 de abril de 2012. Brasília, 2012.

AOYAMA, Enrico Sablich; SOUZA, Igor A. S. de; FERRERO, Wagner Brasileiro. Análise de consumo e desperdício de água em atividades diárias por alunos da UNICAMP. Revista Ciências do Ambiente On-Line. Campinas, vol. 3, n. 2, ago. 2007.

BARRETO, Douglas Barreto. Perfil do consumo residencial e usos finais da água. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 23-40, abr./jun. 2008.

BRASIL. Presidência da República. **Mensagem nº 16.** Brasília: 13 jan. 2016.

CEMIG. Valores de tarifa e serviços. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores_de_tarifa_e_servicos.aspx>.Acesso em: 01 abr. 2019.

COSTA, R. C.; PRATES, C. P. T. **O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado**. BNDES Setorial: Rio de Janeiro, 2005.

ECONOMIZANDO ENERGIA. Hackeando a geladeira. São Paulo, 2011. Disponível em: <https://economizandoenergia.wordpress.com/about/>. Acesso em: 16 mar. 2018.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. Rio de Janeiro, EPE 2012.

_____. **Balanço Energético Nacional 2018**: ano base 2017. Rio de Janeiro: EPE, 2018.

_____. Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil - Condicionantes e Impactos. Rio de Janeiro, EPE 2014.

AL GORE JUNIOR, Albert Arnold. **An Inconvenient Truth:** the Planetary Emergency of Global Warming and what we can do about it. New York: Rodale Press, 2006.

HUANG, Yen-chieh. Energy Procedia: Development of Building Integrated Photovoltaic (BIPV) System with PV Ceramic Tile and its Application for Building Façade. In: International Conference on Applied Energy, ICAE 2014, 1, 2014. **Procedings…** Taiwan: CrossMark, 2014. v. 61, p. 1874 - 1878.

IDEAL - INSTITUTO PARA O DESENVOLVIMENTO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS NA AMÉRICA LATINA; AHKRJ - CÂMARA DE COMÉRCIO E INDÚSTRIA BRASIL-ALEMANHA DO RIO DE JANEIRO. O mercado brasileiro de geração distribuída fotovoltaica. Florianópolis/Rio de Janeiro: IDEAL/ AHK RJ, 2018.

IDHEA – INSTITUTO PARA O DESENVOLVIMENTO DA HABITAÇÃO ECOLÓGICA. **A moderna construção sustentável.** São Paulo, 2015.

ECOD – Portal do Instituto EcoDesenvolvimento. Mercado aposta em telhas solares capazes de substituir painéis fotovoltaicos. Salvador, [201-]. Disponível em: <http://www.ecodesenvolvimento.org/posts/2014/mercado-aposta-em-telhas-solares-capazes-de>. Acesso em: 11 abr. 2016.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura.** São Paulo: PW Editores, 1997. Atualizado em 2014.

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil; ISA - Instituto Superior de Agronomia. Programa nacional para o uso eficiente da água. LNEC/ISA: Lisboa, 2001.

MADESSA, H. Performance Analysis of Roof-mounted Photovoltaic Systems – The Case of a Norwegian Residential Building. **Energy Procedia**. 2015, Vol. 83.

MARQUES, J. J. A.; OLIVEIRA, C. S.; DOS SANTOS JÚNIOR, B. F. Instalação de um Sistema Fotovoltaico Misto Considerando a Readequação no Consumo de Energia Elétrica. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), 2016, Natal. **Anais...** Natal: SBSE, 2016.

MINHA CASA SOLAR. **Painel Solar de 260W Globo Brasil - GBR-260P.** São Paulo, [201-]. Disponível em: <http://www.mct.go.br/upd_blob/0012/12425.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2017.

MIRANDA CORRÊA. **Informações técnicas**. [201-]). Disponível em: <https://www.mirandacorrea.com.br/faq-questions-top>. Acesso em 11 maio 2017.

NAKABAYASHI, R. **Micro geração fotovoltaica no Brasil: condições atuais e perspectivas futuras.** Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 2014.

NASCIMENTO, C. **Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica.** Lavras,MG, 2004. Disponível em:<https://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf >. Acesso em: 04 abr. 2017.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel-Cresesb, 2014.

PLANTIER, R. **As Crises do Petróleo da Década de 1970.** São Paulo, 2013. Disponível em: <http://meioambiente.culturamix.com/recursos-naturais/as-crises-do-petroleo-da-decada-de-1970>. Acesso em: 09 abr. 2016.

PORTAL BRASIL. Índice Nacional de custo da construção do mercado – INCC/DI. Brasília, 2019. Disponível em: <https://www.portalbrasil.net/incc_di.htm>. Acesso em: 08 abr. 2019.

PORTAL ENERGIA. Telhas solares fotovoltaicas uma aposta no futuro. Guarda, [201-]**.** Disponível em: <http://www.portal-energia.com/telhas-solares-fotovoltaicas-uma-aposta-no-futuro/>. Acesso em: 28 abr. 2016.

PORTAL SOLAR. Painel Solar - Condições Padrão de Teste (STC). Lisboa, [201-]. Disponível em: <http://www.portalsolar.com.br/folha-de-dados-do-painel-solar---o-que-voce-precisa-saber.html>. Acesso em: 03 abr. 2017.

PROCEL INFO - Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética. Intersolar Europe: Energia renovável avança no mundo inteiro. Rio de Janeiro, 2006a. Disponível em: < http://www.procelinfo.com.br/main.asp?ViewID=%7BF5EAADD6-CCB0-4E29-A0C4-482D3D66BB65%7D&params=itemID=%7BB61B9CB1-D7AF-4E37-ADD2-114D1CFFDBA8%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D>. Acesso em: 07 jun. 2016.

_____. O Programa. Rio de Janeiro, 2006b. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?TeamID={921E566A-536B-4582-AEAF-7D6CD1DF1AFD}>. Acesso em 10 mar 2019.

_____. Senado aprova uso do FGTS para compra de equipamentos de micro geração. Rio de Janeiro, 2006c. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?ViewID=%7BF5EAADD6-CCB0-4E29-A0C4-482D3D66BB65%7D&params=itemID=%7B71AD6849-C9B4-4731-B412-D3DDB9CECCBB%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D>. Acesso em: 18 abr. 2016.

ROAF, S; FUENTES, M; THOMAS, S. **Ecohouse: A casa ambientalmente sustentável.** Tradução Alexandre Salvaterra – 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

RUTHER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil.** Florianópolis: Editora Ifsc/labsolar, 2004.

SEMANEZ, Carlos Patrício. **Matemática Financeira - Aplicações à análise de investimentos**. Editora Pearson Education - Br, 2007.

SILVA, Cristiano Augusto Cunha; SOUZA, Teófilo Mighel De. Desenvolvimento de sistema para dimensionamento do aquecedor solar popular de água. Revista Sodebras, Fortaleza, volume 7, n. 73 – jan. 2012.

SINAPI – Índices da Construção Civil. Disponível em: <http://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-a-partir-jul-2009-mg/SINAPI_ref_Insumos_Composicoes_MG_022019_Desonerado_retific.zip>. Acesso em 02 fev.2019.

SOLARVOLT. **Painéis fotovoltaicos.** São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.solarvoltenergia.com.br/voce-sabe-qual-e-a-vida-util-dos-equipamentos-do-sistema-de-energia-fotovoltaica/>. Acesso em: 13 mar. 2018.

SOLESIA. **Telhas Solares - Informação Técnica.** São Paulo,2010. Disponível em: <http://www.renovarotelhadopoupaenergia.com/downloads/UM10.PDF.CATALOGOTECNICO_SOLESIA.PT.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2017.

VALOR ECONÔMICO. Em dez anos, cai pela metade proporção de residências superlotadas. São Paulo, Rio de Janeiro, Brasília, [201-]. Disponível em: <https://www.valor.com.br/brasil/4794551/em-dez-anos-cai-pela-metade-proporcao-de-residencias-superlotadas>. Acesso em: 15 mar. 2018.

TORRES, R. C. **Energia solar fotovoltaica como fonte de geração de energia elétrica em edificações residenciais**. São Carlos: USP, 2012.

WEISS, Ban. Electricity production and cooling energy savings from installation of a building-integrated photovoltaic roof on an office building. **Energy and Buildings**, v.56, 2013. p. 210-220.

ZOMER, C. D. Método de estimativa da influência do sombreamento parcial na geração energética de sistemas solares fotovoltaicos integrados em edificações. 2014. Tese (doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CEFETMG pelo auxílio ao desenvolvimento deste trabalho bem como às empresas NER – Naturocoberturas e Energias renováveis e Minha Casa Solar, pelo fornecimento de informações técnicas e orçamento referentes aos sistemas de telhas e painéis fotovoltaicos.