

Análise da Viabilidade Econômica de sistemas fotovoltaicos para o bloco de Engenharia Elétrica da UFPI considerando a modalidade tarifária

Leonardo Bruno Verçoza de Macêdo Figueiredo *
 Ana Carolina Gomes Duarte **
 Vanessa dos Santos Conceição ***
 Bartolomeu Ferreira dos Santos Júnior ****
 Aryfrance Rocha Almeida †

* *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Piauí, PI, (e-mail: leonardobvercoza@gmail.com).*

** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Piauí, PI (e-mail: anaac.duarte@gmail.com)*

*** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Piauí, PI, (e-mail: vanessa04061997@gmail.com)*

**** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Piauí, PI, (e-mail: bartolomeuf@ufpi.edu.br)*

† *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Piauí, PI, (e-mail: aryfrance@ufpi.edu.br)*

Abstract: This article presents an analysis of the economic viability of an investment for the Electrical Engineering unit at the Federal University of Piauí (UFPI). This investment consists of installing a solar photovoltaic system, for which there are three alternatives: Grid-Connected Photovoltaic System, Off-Grid Photovoltaic System and Mixed Photovoltaic System. The article discusses the operation, dimensioning and budget of each photovoltaic system model mentioned. Finally, they will be analyzed using financial tools to determine which one has the most attractive financial return.

Resumo: Este artigo apresenta uma análise da viabilidade econômica de um investimento para o bloco de engenharia elétrica da universidade federal do Piauí (UFPI). O investimento consiste na instalação de um sistema solar fotovoltaico, considerando três alternativas, que são: Sistema Fotovoltaico conectado à Rede, Sistema Fotovoltaico Isolado com Backup e Sistema Fotovoltaico Misto. É discorrido sobre o funcionamento, dimensionamento e orçamento de cada modelo de sistema fotovoltaico citado. Por fim, eles serão analisados por meio de ferramentas financeiras para determinar qual dentre eles possui o retorno financeiro mais atrativo.

Keywords: Grid-Connected Photovoltaic System; Off-Grid Photovoltaic System; Mixed Photovoltaic System; Dimensioning; Economic Viability.

Palavras-chaves: Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede; Sistema Fotovoltaico Isolado de Backup; Sistema Fotovoltaico Misto; Dimensionamento; Viabilidade Econômica.

1. INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico Brasileiro é configurado de forma radial, ou seja, possui grandes centrais geradoras em uma das extremidades alimentando as cargas interligadas ao longo do sistema. Essas centrais geradoras, as quais definem a matriz elétrica brasileira, são em sua maioria compostas por fontes hídricas e por termelétricas, no entanto, as fontes renováveis, como solar e eólica, estão em constante crescimento. Ao contrário da configuração radial, a Geração Distribuída (GD) consiste na presença de geradores descentralizados instalados próximos aos consumidores (Villalva and Gazoli, 2012).

No ano de 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 a qual torna possível aos consumidores gerarem a própria energia por meio de fontes renováveis ou cogeração qualificada e permite ainda que o excedente gerado seja fornecido para a rede de distribuição (MOREIRA, 2012). Os incentivos governamentais e as inovações na legislação desse setor fomentam o crescimento da GD e a implementação das fontes renováveis na matriz elétrica do País. A geração de energia por usinas solares centralizadas, com geração acima de 5 MW, corresponde a 1,5% do total, são 2.687 MW gerados por fonte solar centralizada. A partir de 2017 houve um grande aumento da geração distribuída baseada em sistemas fotovoltaicos ocasionado

pelos incentivos governamentais e por vários benefícios, tanto econômicos como ambientais, trazidos por esse tipo de fonte energética, atualmente o Brasil possui 2.427,3 MW de energia gerada nesse modelo (MOREIRA, 2012) (ABSOLAR, 2020).

O artigo apresentará o dimensionamento de um sistema fotovoltaico para três configurações possíveis, sistema fotovoltaico isolado com backup, conectado à rede e misto, tendo como cenário o prédio e o estacionamento do bloco de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Piauí (UFPI), dentre as opções serão feitas análises econômicas por três métodos distintos, o *Payback* simples, o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR). Desse modo obtêm-se a atratividade do investimento e assim é possível escolher a configuração do sistema fotovoltaico que apresenta a viabilidade econômica mais atrativa.

2. TARIFAÇÃO

O fornecimento de energia elétrica é proporcionado pelas concessionárias de energia que realizam a distribuição desse produto aos consumidores, que como qualquer outro produto com ele é agregado um valor de custo, representado pela tarifa de energia elétrica. No Brasil, a tarifação de energia elétrica é definida pelo órgão regulador do setor elétrico, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) (ANEEL, 2020c).

O valor da tarifa é calculado levando em consideração diversos fatores como a infraestrutura envolvida, manutenção do serviço, e todos os custos envolvidos, além de fatores econômicos, de mercado e incentivos governamentais (ANEEL, 2020a). Outro ponto que deve ser abordado é em relação a modalidade tarifária. As modalidades tarifárias são tarifas que correspondem ao consumo e demanda de energia elétrica e são definidas através dos grupos tarifários. O grupo A corresponde aos consumidores de alta tensão (acima de 2,3kV) que possuem dois tipos de tarifas a horária azul e a verde, na azul é considerado consumo e demanda de potência nas horas do dia, já na verde é considerado apenas consumo nas horas do dia sendo uma tarifa fixa para demanda de potência. O outro grupo é o grupo B que engloba consumidores de baixa tensão (abaixo de 2,3kV), as tarifas para unidades consumidoras de baixa tensão são convencional monômnia que apresenta uma tarifa fixa de consumo em todas as horas de utilização do dia e a horária branca que são tarifas que englobam o consumo de acordo com as horas do dia (ANEEL, 2020b).

3. SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

O sistema de energia solar, é conhecido como um sistema que gera energia elétrica através da radiação, luz solar, diferente da solar térmica que usa a energia térmica do sol para finalidade de aquecimento por exemplo. A captação dessa radiação é feita pelas células solares que agrupadas formam os módulos, em maior parte elas são feitas a partir do material Silício. Os módulos solares podem ser instalados em residências, edifícios, nos telhados ou fachadas ou podem ser utilizados em mini usinas geradoras de energia. A corrente elétrica produzida é contínua e através de equipamentos, sendo o principal o

inversor, a corrente é convertida para alternada. A energia fotovoltaica é uma energia limpa, pois não ocorre a emissão de gases poluentes na sua geração e sua fonte de energia é inesgotável que é o sol, além disso não há elevados desperdícios de materiais no seu processo de instalação e utilização (Villalva, 1983).

Um fator de extrema importância é o rendimento das placas solares, seu valor depende de diversos fatores como o próprio ambiente que pode haver nuvens e o material com que a placa é fabricada, o valor do rendimento pode chegar até em 25% (Marangoni, 2012) (Silva, 2015). Uma excelente característica é em relação a vida útil das placas solares que é bastante elevada podendo chegar em média a 30 anos, o que conseqüentemente leva a um custo de manutenção reduzido visto que não é necessário trocas de equipamentos em um curto espaço de tempo (Fotovoltaica and Sistemas, 2015) (Figueira, 2014).

Os sistemas de geração de energia solar apresentam alguns componentes básicos que não necessariamente estão presentes em todos eles que são: placas solares, controladores de carga, baterias e inversores.

- (1) Placa solar: É o elemento principal da geração de energia elétrica, a placa solar é um dispositivo feito com material semicondutor que gera uma corrente elétrica ao sofrer processo de radiação eletromagnética, ou seja, quando há luz (Seguel, 2009).
- (2) Controladores de carga: Esses dispositivos são úteis nos sistemas que usam baterias. Eles evitam altas cargas ou descargas nos armazenadores de energia evitando assim que a vida útil das baterias reduza, isso proporciona que o sistema seja capaz de operar em alta eficiência (Seguel, 2009).
- (3) Baterias: São os dispositivos responsáveis por armazenar a energia que será utilizada quando não houver presença da luz solar, ou seja, quando não houver geração (Seguel, 2009).
- (4) Inversores: São os equipamentos responsáveis por realizar a conversão de corrente contínua para corrente alternada, com a finalidade de que esse energia gerada seja capaz de ser utilizada pelos consumidores e também ser introduzida na rede de distribuição (Seguel, 2009).

Há três tipos de sistemas de sistemas solares, são eles o sistema solar fotovoltaico conectado à rede (*on-grid*), sistema solar fotovoltaico isolado (*off-grid*) e sistema solar fotovoltaico misto, cada um deles apresenta características específicas que definem onde são mais propícios de serem utilizados, os três serão expostos nos itens abaixo.

3.1 Sistema solar fotovoltaico *on-grid*

Sistema solar fotovoltaico conectado à rede ou *on-grid* é o mais comum em áreas urbanas, ele não necessita de um sistema de armazenamento tendo seu excedente de energia gerada sendo injetado na rede, para que a corrente produzida seja compatível com a rede é necessário que o inversor converta a corrente de DC para AC, para o dimensionamento é levado em consideração a máxima produção possível de energia (Câmara, 2011) (Freitas, 2008). A Fig. 1 mostra o esquema desse tipo de sistema.

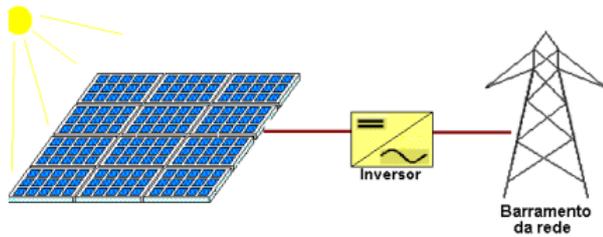


Figura 1. Sistema solar fotovoltaico *on-grid*

3.2 Sistema solar fotovoltaico *off-grid*

Sistema solar fotovoltaico *off-grid* ou isolado é bastante utilizado em áreas mais afastadas, para iluminação, bombeamento de água, esse sistema como o próprio nome sugere ele não é conectado à rede, a energia gerada é armazenada em um banco de baterias. Os componentes básicos que ele necessita são os painéis solares, o inversor, as baterias e o controlador de carga (Câmara, 2011) (Freitas, 2008). Abaixo é mostrado na Fig. 2 um esquema com cargas desse tipo de sistema.

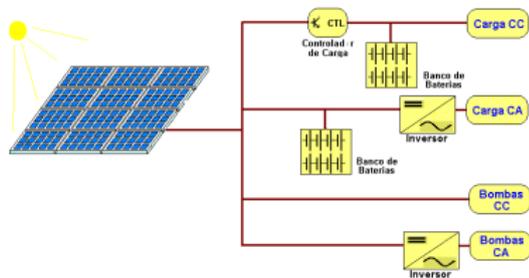


Figura 2. Sistema solar fotovoltaico *off-grid*

3.3 Sistema solar fotovoltaico misto

O sistema fotovoltaico misto une as características dos sistemas *on-grid* e *off-grid*. Ele é conectado na rede elétrica de distribuição, porém também apresenta um banco de baterias. A vantagem em relação aos outros é a maior capacidade de suprir uma demanda elevada de energia, além de também funcionar como um gerador, por fornecer energia elétrica quando não há fornecimento pela concessionária de energia (Câmara, 2011) (Freitas, 2008).

4. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Os dimensionamentos dos sistemas fotovoltaicos propostos para o bloco de Engenharia Elétrica da UFPI neste trabalho são descritos nesta seção. Para os dimensionamentos, deve-se considerar os fatores a seguir: levantamento do consumo de energia do bloco, determinar a área para a instalação, e por fim dimensionar cada sistema proposto (SFCR, SFBI, SFM).

Para o levantamento de cargas e cálculos de consumo do bloco, considerou-se 22 dias letivos mensais, com horário de funcionamento de 8:00h às 12:00h e de 14:00h às 22:00h, a potência dos equipamentos e o tempo de funcionamento foi utilizado para calcular o consumo de energia elétrica do prédio. O consumo total é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Consumo do bloco de Engenharia Elétrica da UFPI.

Dados	Consumo (KWh/mês)
Pavimento inferior	30.379,49
Pavimento superior	24.786,36
Total	55.168,85

A área escolhida para a instalação do sistema fotovoltaico foi o telhado e o estacionamento do bloco de engenharia elétrica. O local é ensolarado, sem sombras ou superfícies reflexivas próximas, com excelente incidência solar. A incidência em Teresina-PI é de 5,59h diárias em média anual (CRESESB, 2020), porém nas medições de irradiação na área determinada, verificou-se 8 horas do dia com incidência superior ao padrão de 1000 W/m^2 . A partir disso foram consideradas 8h de irradiação diária para o dimensionamento da energia gerada (OLIVEIRA, 2016). A Tabela 2 a seguir mostra a área disponível e a quantidade de placas que podem ser instaladas. Foram utilizadas para o dimensionamento placas de 335 W_p com as dimensões $1992 \text{ mm} \times 992 \text{ mm}$, ou seja, $1,976 \text{ m}^2$ de área.

Tabela 2. Área disponível para instalação e quantidade de módulos fotovoltaicos.

Local	Area disponível (m^2)	Nº de módulos
Estacionamento	560	283
Telhado	685,6	347
Sistema fotovoltaico	1245,6	630

Após explanar sobre o levantamento de consumo de energia e a área disponível para a instalação do sistema fotovoltaico, dimensionar-se-á cada sistema solar proposto.

4.1 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

Através da (1), foi calculada a energia mensal gerada pelo SFCR, tendo como base uma incidência solar diária local de 8h, taxa de desempenho global de 80% para as placas solares e utilizando toda a área disponível preenchida com os módulos fotovoltaicos.

$$E_g = P_p * N_{\text{modulos}} * H_{SP} * T_d * D \quad (1)$$

Onde:

E_g (KWh/mês) - Energia Produzida pelo Sistema;

P_p (W) - Potência de Pico do Modulo Fotovoltaico;

N_{modulos} - Número de Modulos;

H_{SP} (h/dia) - Horas de Sol pleno;

T_d (adimensional) - Taxa de Desempenho;

D - Número de dias de funcionamento do sistema;

Utilizando (2), calcula-se a autonomia desse sistema para o bloco de engenharia elétrica.

$$\text{Autonomia} = \frac{E_{gSFV}}{Cons_{\text{bloco}}} = \frac{47.462,4}{55.165,85} = 74,85\% \quad (2)$$

Onde:

E_{gSFV} (KWh/mês) - Energia gerada pelo Sistema Fotovoltaico;

$Cons_{bloco}$ (KWh) - Consumo mensal de energia;

Pode-se observar que esse sistema é capaz de suprir aproximadamente 75% do consumo mensal de energia atual.

A partir da quantidade de módulos fotovoltaicos pode-se dimensionar a quantidade de inversores. Utilizou-se inversores de 5KW de Potência e eficiência de 97,9%. Utilizando (3), tem-se que:

$$N^{\circ}_{inversores} = \frac{N^{\circ}_{modulos} * P_p}{P_{inversor} * \eta_{inversor}} = 44 \quad (3)$$

Sendo:

$N^{\circ}_{inversores}$ - Quantidade de inversores para o sistema;

$N^{\circ}_{modulos}$ - Número de Módulos;

P_p (W) - Potência de Pico do Módulo Fotovoltaico;

$P_{inversor}$ (W) - Potência do inversor;

$\eta_{inversor}$ (%) - Rendimento do Inversor;

A Tabela 3 apresenta o orçamento estratificado de cada componente e o investimento total necessário. Os valores de mão de obra de pedreiros, serralheiros, engenheiros e eletricitistas são calculados a partir de estimativa utilizada em empresas de sistemas fotovoltaicos, que é de 10% do valor total dos painéis somados com o valor do inversor (Oliveira et al., 2015). E para o custo de acessórios de conexões e estruturas, foram adicionados mais 2%, assim o valor de mão de obra, juntamente com conexões e estruturas é igual a 12% do valor total de painéis e inversores. Dessa forma, calcula-se o investimento inicial para a instalação de um SFCR .

Tabela 3. Orçamento para o Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede.

Componentes	Quantidade	Valor Unitário	Total(R\$)
Placa Solar 335W	642	R\$ 1.119,00	R\$ 718.398,00
Inversor 5k	44	R\$ 4.797,00	R\$ 219.076,00
Mão de obra, conexões e suporte	12% do valor total das placas + inversores		R\$112.496,88
Total	-	-	R\$ 1.049.970,88

Após o dimensionado do SFCR para a capacidade máxima de acordo com a área disponível, foi realizado o mesmo procedimento para outros casos pretendidos, os quais mostram o investimento e os componentes necessários para o prédio obter autonomia de geração de energia elétrica que varia de 10% a 100% em relação ao consumo total.

4.2 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico com Backup de Energia

O Bloco de Engenharia Elétrica da UFPI funciona por 12h diárias, com base nisso foram realizados dimensionamentos de sistemas fotovoltaicos isolados com backup de energia para que o prédio tenha de 1:00h até 12:00h de autonomia energética por dia.

A aplicação deste sistema visa principalmente utilizar a energia de backup para suprir a energia consumida no horário de ponta (17:30h às 20:30h), visto que a UFPI está enquadrada na modalidade tarifária verde do grupo

A, alimentada em 13.8KV. Nesta modalidade tarifária o preço do KWh no horário de ponta custa R\$ 1,519610 enquanto no horário fora ponta o valor é de apenas R\$ 0,353140 (Equatorial, 2020).

A estimativa de consumo médio para cada hora de funcionamento diário do bloco de engenharia elétrica da UFPI é de 209KWh, a partir de então dimensiona-se as baterias, os painéis, os controladores de cargas e os inversores. Para um dimensionamento satisfatório de banco de baterias, calcula-se a capacidade de fornecimento de energia levando em consideração a autonomia diária e a profundidade de descarga da bateria conforme (4). Foram utilizadas para esse dimensionamento baterias estacionárias de 240 Ah com tensão de 24V.

$$C = \frac{C_t * Aut}{V_{bat} * P_u} \quad (4)$$

Onde:

C (Ah) - Capacidade de fornecimento de energia do Sistema;

C_t (KWh/dia) - Consumo do bloco no período determinado;

Aut (dia) - Autonomia diária do Sistema;

V_{bat} (V) - Tensão da bateria;

P_u (%) - Profundidade de descarga;

Através da capacidade de fornecimento de energia, determina-se a quantidade de baterias.

$$N^{\circ}_{bat} = \frac{C}{C_{bat}} \quad (5)$$

Onde:

N°_{bat} - Número de baterias

C (Ah) - Capacidade de fornecimento de energia do sistema;

C_{bat} (Ah) - Capacidade de fornecimento de cada bateria;

Ao se relacionar (4)(capacidade de fornecimento de energia do SFIB) com a capacidade de condução de corrente de cada painel e as horas de sol pleno (quantidade de horas que a irradiação solar é maior ou igual a 1000 W/m²), pode-se determinar o número de painéis para o SFIB.

$$N^{\circ}_{painéis} = \frac{C}{I_p * H_{SP}} \quad (6)$$

Onde:

$N^{\circ}_{painéis}$ - Número de painéis solares;

C (Ah) - Capacidade de fornecimento de energia do sistema;

I_p (A) - Corrente de cada painel fotovoltaico;

H_{SP} (H) - Horas de Sol Pleno;

Segundo (OLIVEIRA, 2016) os controladores de carga são dimensionados em função da corrente dos módulos fotovoltaicos e da tensão de operação do sistema. Cada

módulo utilizado no sistema de backup estudado pode conduzir até 9,6 A com uma tensão de saída de 24V. Primeiramente é determinado o tipo de controlador que será utilizado verificando sua capacidade de corrente (60 A para o controlador utilizado neste estudo), e posteriormente a quantidade é definida pela corrente total de todos os módulos fotovoltaicos. Deve-se aumentar a capacidade de corrente em 25%, por questão de segurança, ou seja, multiplicando a corrente por um fator de 1,25 (Solar, 2010).

$$N^{\circ}_{cont} = \frac{N^{\circ}_{painéis} * I_p * 1,25}{I_{cont}} \quad (7)$$

Onde:

N°_{cont} - Número de controladores do Sistema;

$N^{\circ}_{painéis}$ - Número de painéis do Sistema;

I_p (A) - Corrente de operação de cada painel fotovoltaico;

I_{cont} (A) - Capacidade de corrente de cada controlador;

O inversor é definido pela tensão de trabalho na entrada dos painéis solares e pela tensão de saída. A capacidade do inversor deve superar a potência em Watts do maior consumo dos equipamentos, ou seja, ser maior que o produto da quantidade de painéis do sistema e a potência de pico de cada painel. Pode-se determinar a quantidade de inversores através de (8). Utilizou-se um inversor de 5KW e com eficiência de 97,9%.

$$N^{\circ}_{inversores} = \frac{N^{\circ}_{painéis} * P_p}{P_{inv} * \eta_{inv}} \quad (8)$$

Onde:

$N^{\circ}_{inversores}$ - Número de inversores do Sistema;

$N^{\circ}_{painéis}$ - Número de painéis do Sistema;

P_p (W) - Potência de pico dos painéis fotovoltaicos;

P_{inv} (W) - Potência de cada inversor;

η_{inv} (%) - Rendimento do inversor selecionado;

O investimento inicial deste sistema é orçado por meio do mesmo procedimento utilizado no SFCR.

4.3 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico Misto

Como terceira proposta foi realizado o dimensionamento para o sistema solar misto, ele surge da unificação do SFCR com o SFIB. No dimensionamento do SFM utiliza-se primeiramente o número de módulos fotovoltaicos correspondente a quantidade de horas de autonomia escolhida do SFIB, posteriormente o SFCR do sistema fotovoltaico misto é dimensionado com base na quantidade de módulos restantes para completar a área de instalação disponível, que corresponde a 630 painéis. Para melhor compreensão veja (9).

$$N^{\circ}_{painéisSFCR} = N^{\circ}_{maxpainéis} - N^{\circ}_{painéisSFIB} \quad (9)$$

Sendo:

$N^{\circ}_{painéisSFCR}$ - Número de painéis que compõe o SFCR;

$N^{\circ}_{maxpainéis}$ - Número de painéis do Sistema;

$N^{\circ}_{painéisSFIB}$ - Número de painéis utilizados no SFIB;

Tem-se assim no sistema misto, uma parte dos painéis destinadas somente ao carregamento do banco de baterias e o restante dos painéis conectados à rede elétrica da concessionária. O dimensionamento de ambos os sistemas, SFCR e o SFIB são idênticos aos já apresentados anteriormente.

Segundo (OLIVEIRA, 2016) para se determinar o sistema misto deve-se seguir os seguintes passos:

1. Determinar a autonomia desejada para o sistema de backup, e destinar então a quantidade de módulos fotovoltaicos necessários para o seu dimensionamento;
2. Dimensionar o sistema fotovoltaico conectado à rede com os módulos restantes;
3. Somar os valores das gerações de energia produzidas por cada sistema (backup e conectado à rede), obtendo-se assim a capacidade total de geração do sistema misto, bem como sua autonomia em relação ao consumo do bloco.

5. MÉTODO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Segundo (Carvalho, 2014), quando se promove o estudo de viabilidade econômica de um investimento, o ponto de partida é a reunião de elementos objetivos que proporcionem a menor margem de erro possível.

Uma análise econômica detalhada deve considerar estimativas de custos de operação e manutenção, vida útil do sistema, custos futuros e as trocas de equipamentos. De acordo com (OLIVEIRA, 2016), quanto mais indicadores para análise de viabilidade econômica constar no estudo, menor é a probabilidade de decisão equivocada na escolha do melhor projeto, devido aos indicadores sintetizar o fluxo de caixa, ou seja, representar os ganhos e déficits financeiros do projeto. Os indicadores utilizados são: valor de mão de obra (12% do investimento total), valor dos equipamentos, investimento total (equipamentos e mão de obra), custo anual de manutenção, custo e troca dos equipamentos, valor anual economizado e taxa de atratividade aplicada. A partir desses indicadores e seus respectivos valores, compõe-se os fluxos de caixa para os sistemas que serão analisados.

O investimento inicial do projeto para a instalação do SFV (Sistema Fotovoltaico) ocasiona um déficit financeiro, porém o valor anual economizado trará lucro em reais que é calculado em (10).

$$V_{anual_{eco}} = 12 * E_g * Tar_{energia} \quad (10)$$

Sendo:

$V_{anual_{eco}}$ (R\$) - Valor anual economizado;

E_g (KWh/mês) - Energia gerada pelo sistema;

$Tar_{energia}$ (R\$) - Valor da tarifa cobrada pela concessionária (Será utilizado tanto o valor da tarifa no horário de ponta quanto fora ponta);

Para o SFIB e o SFM o preço da tarifa no horário de ponta é aplicado para as três primeiras horas de autonomia, a

partir disto é necessário se encontrar o valor médio da tarifa. Do total de horas de autonomia é realizada uma proporção na qual a porcentagem de horas correspondente ao horário de ponta e fora de ponta é multiplicada pela sua respectiva tarifa.

De acordo com (Carvalho, 2014) os gastos realizados em manutenção anual correspondem a 0,25% do investimento total, os inversores precisam ser trocados a cada 13 anos, as baterias a aproximadamente 7 anos e os controladores de carga a cada 10 anos.

Como a instalação do SFV se trata de investimento de longo prazo e de alto valor monetário deve-se avaliar o custo de oportunidade. De acordo com (Carvalho, 2014) o custo de oportunidade é um termo usado em economia que se refere ao custo de algo em função de uma outra oportunidade renunciada, ou de maneira geral, corresponde ao que se deixa de ganhar em uma segunda alternativa por se escolher a primeira. Assim, o investimento almejado só é justificado caso ele tenha uma rentabilidade maior que o custo de oportunidade de capital. Para tal comparação utilizou-se o rendimento anual da poupança, que foi de 4,62% referente ao ano de 2019 (NUBANK, 2020). Logo, a taxa de atratividade adotada é de 4,62%. Isso quer dizer que a soma dos valores do retorno financeiro obtido pelo SFV deve ser maior que o valor do investimento incipiente aplicado a uma taxa de 4,62% durante a vida útil do projeto.

A ferramenta financeira utilizada para análise de viabilidade econômica foi o método do fluxo de caixa descontado. Ele consiste na estimação do valor total de todos os fluxos de caixa futuros, e, então, descontá-los por uma taxa para encontrar o valor presente deste fluxo. O objetivo de um fluxo de caixa descontado é estimar a quantidade total de dinheiro que um investimento pode retornar, e se esse montante for maior do que o valor investido, demonstra, geralmente, que vale a pena realizar o investimento (SILVA, 2015).

Foram realizadas projeções de fluxos de caixa para todos os tipos de sistemas fotovoltaicos. No ano 0, não há entradas de caixa, apenas saídas que representam o valor total do investimento. Do ano 1 ao 25 é representado como entrada o valor real economizado, como saída os indicadores que a correspondem são a manutenção e troca de equipamentos. O valor real economizado é o resultado da soma: entrada de caixa (valores positivos) + saída de caixa (valores negativos), tendo a possibilidade de assumir valor positivo, (se a entrada de caixa > saída de caixa) e valor negativo, (se a entrada de caixa < saída de caixa). Ao se ter o fluxo de caixa pronto, aplica-se o valor presente (VP) para cada fluxo anual (representado pelo valor real economizado), tendo como objetivo representar o valor de um fluxo de caixa futuro no momento presente, já que devido a inflação o dinheiro tem seu custo associado ao tempo.

$$VP = \frac{V_{real-anual-eco}}{(1+i)^{ano}} \quad (11)$$

Sendo:

VP (R\$) - Valor presente;

$V_{real-anual-eco}$ (R\$) - Valor real anual economizado;

i (%) - Taxa;

ano - Ano correspondente no fluxo de caixa;

A partir do VP total são utilizados índices econômicos para a análise e comparação dos SFV, que são o VPL, TIR e *payback*.

Segundo (Nakabayashi, 2014) para o modelo de fluxo de caixa, é necessário adotar uma projeção para as tarifas de energia elétrica para o horizonte de avaliação financeira do projeto.

A média dos reajustes tarifários adotados pela concessionária dos últimos 15 anos ultrapassa 10% (Equatorial, 2020). Porém, esse é um valor bem elevado para projeções de tarifas de energia elétrica ao longo dos próximos 25 anos. Adotou-se então, a menor taxa positiva de reajuste que é de 3,58% correspondente ao ano de 2007. Visando a escolha do SFV com maior rentabilidade, a utilização da taxa mais baixa é a melhor maneira de se retratar a viabilidade econômica do projeto. O método escolhido para análise de viabilidade econômica foi o VPL (Valor Presente Líquido), ele calcula a atratividade de um investimento. O seu cálculo se resume a quanto os futuros pagamentos somados aos custos iniciais estariam valendo hoje. Em (12) é exemplificado o que foi dito.

$$VPL = -I + VP_1 + VP_2 + VP_3 + \dots + VP_n \quad (12)$$

Sendo:

VPL (R\$) = Valor Presente Líquido;

I (R\$) = Investimento total;

VP_n = Valor Presente de todo o fluxo de caixa ao longo da vida útil do projeto;

Quando o $VPL \geq 0$ o investimento é economicamente viável. Para $VPL < 0$ o investimento é inviável.

Caso exista vários fluxos possíveis em relação ao mesmo capital de investimento, deve ser escolhido aquele que apresentar maior valor de VPL (Samanez, 2005).

Quanto ao *payback*, essa ferramenta é utilizada para mostrar em quanto tempo é recuperado o investimento realizado. Para se obter o período de retorno basta se analisar quantos ciclos são necessários para que a soma dos fluxos de caixa seja zero.

O TIR serve para indicar a rentabilidade de um investimento, ela é definida como a taxa de desconto que faz o VPL ser igual a zero. O TIR sempre é comparado com a TMA, que é a Taxa Mínima de Atratividade que um investimento gera para poder ser atraente, assim, sempre que a TIR for maior que TMA investimento é vantajoso.

Utilizou-se o software Excel para se realizar os cálculos de VPL, o *payback* simples e o TIR.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico Conectado à rede

Para o dimensionamento do SFCR, considerando a quantidade máxima de 630 painéis, foi obtida aproximadamente

75% de autonomia em relação ao consumo mensal do bloco de engenharia elétrica.

A tabela 4 apresenta os resultados para autônias que variam de 10% a 100% , porém para os estudos de viabilidade econômica foram considerados apenas os casos de 10% a 75%, como demonstra a área demarcada na tabela, pois estão conforme as delimitações propostas. Dentre esses subsistemas será escolhido o que obtiver os melhores índices de atratividade financeira.

Tabela 4. Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede.

Energia gerada (kWh/mês)	Autonomia	Módulos (335 Wp)	Inversor (5 kW)	Orçamento total (R\$)
5516.585	10%	86	6	140223.3716
11033.17	20%	172	12	280446.7431
16549.755	30%	257	18	420670.1147
22066.34	40%	343	23	560893.4863
27582.925	50%	429	29	701116.8578
33099.51	60%	515	35	841340.2294
38616.095	70%	600	41	981563.601
41293.44	75%	630	44	1049617.722
44132.68	80%	686	47	1121786.973
49649.265	90%	772	53	1262010.344
55165.85	100%	858	59	1402233.716

6.2 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico com Backup de Energia

Para o dimensionamento do SFIB foram utilizadas a estimativa de consumo médio para cada hora de funcionamento diário do prédio e as especificações das baterias, controladores de carga e inversores. A Tabela 5 apresenta os dimensionamentos para cada subsistema de acordo com a quantidade de horas de autonomia de energia, proporcionando até 7 horas de fornecimento ininterruptas por dia. Essa parcela de autonomia é limitada pela área disponível para a instalação dos painéis.

Tabela 5. Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico para Backup

Horas autonomia	Consumo (kWh/dia)	N painéis	N baterias	N controladores	N inversores
1	209	13	3	2	1
2	418	51	12	9	3
3	627	114	27	21	8
4	836	202	48	38	14
5	1045	316	76	59	22
6	1254	455	109	85	31
7	1463	619	148	116	42
8	1672	809	194	151	55
9	1881	1024	245	191	70
10	2090	1264	302	236	87
11	2299	1530	366	286	105
12	2508	1820	435	340	125

A Tabela 6 dispõe do orçamento total para cada subsistema, baseado no consumo médio do prédio por mês e mostra a capacidade de suprimento energético de acordo com as horas de autonomia do bloco. Para 7 horas de funcionamento do sistema é obtida 58,34% de autonomia mensal. Dentre os sete subsistemas que atendem à delimitação de área disponível para instalação será realizado o estudo de viabilidade econômica, a fim de selecionar aquele que apresentar a melhor atratividade financeira.

Tabela 6. Autonomia e Orçamento para o Sistema Fotovoltaico Isolado para Backup

Horas autonomia	Consumo (kWh/dia)	Consumo (kWh/mês)	Autonomia mensal	Orçamento total (R\$)
1	209	4598	8.335%	25898.44426
2	418	9196	16.670%	103593.777
3	627	13794	25.005%	233085.9983
4	836	18392	33.339%	414375.1081
5	1045	22990	41.674%	647461.1064
6	1254	27588	50.009%	932343.9932
7	1463	32186	58.344%	1269023.769
8	1672	36784	66.679%	1657500.432
9	1881	41382	75.014%	2097773.985
10	2090	45980	83.349%	2589844.426
11	2299	50578	91.684%	3133711.755
12	2508	55176	100.018%	3729375.973

6.3 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico Misto

A Tabela 7 apresenta o dimensionamento dos subsistemas baseados nas horas de autonomia do SFIB, todas as opções apresentam o número máximo de 630 painéis. Logo, o número de inversores é fixo, e o número de baterias e controladores mantêm-se os mesmo do SFIB.

Tabela 7. Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico Misto

Horas autonomia	SFIB	SFCR	N Total Módulos	N baterias	N controladores	N inversores
1	13	617	630	3	2	43
2	51	579	630	12	9	43
3	114	516	630	27	21	43
4	202	428	630	48	38	43
5	316	314	630	76	59	43
6	455	175	630	109	85	43
7	619	11	630	148	116	43
8	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-

A Tabela 8 dispõe dos valores de autônias mensais e dos orçamentos de cada subsistema dimensionado. A melhor configuração desse sistema é decidido pelo estudo da viabilidade econômica.

Tabela 8. Orçamento do Sistema Fotovoltaico Misto

Horas autonomia	Módulos SFIB	Módulos SFCR	Autonomia SFBI	Autonomia SFCR	Autonomia total	Orçamento total (R\$)
1	13	617	8.3%	52.8%	61.1%	1036000.4
2	51	579	16.7%	49.5%	66.2%	1051555.6
3	114	516	25%	44.1%	69.1%	1077650.8
4	202	428	33.3%	36.6%	69.9%	1114286.0
5	316	314	41.7%	26.9%	68.5%	1162284.0
6	455	175	50%	15%	65.0%	1219489.7
7	619	11	58.3%	0.9%	59.3%	1287235.3
8	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-

6.4 Análise econômica para os Sistemas Fotovoltaicos

Após o dimensionamento dos sistemas aplica-se o estudo da viabilidade econômica, escolhendo dentre os subsistemas aquele que possui maior atratividade financeira. A Tabela 9 apresenta as possibilidades mais rentáveis dentre os três tipos de configuração do Sistema fotovoltaico, dentre eles foram analisados os valores do VPL, do *Payback* Simples e do TIR.

Tabela 9. Comparação dos Índices Econômicos

Tipo de Sistema	Autonomia de Consumo Mensal	Autonomia em Horas	VPL(R\$)	Payback Simples (anos)	TIR(%)	Orçamento(R\$)
SFCR	70%	-	R\$ 3,419,902.43	6.32	18.88	R\$ 981,563.60
SFIB	50%	6	R\$ 5,257,668.26	3.47	34.17	R\$ 932,343.99
SFM	69.12%	3	R\$ 6,227,187.04	3.36	35.13	R\$ 1,077,650.85

O sistema que possui a melhor atratividade econômica é o Sistema Fotovoltaico Misto, onde apresenta capacidade de até 69,12% de autonomia de consumo mensal do bloco de engenharia elétrica, sendo capaz de suprir as 3 horas do horário de ponta do fornecimento de energia pela concessionária local, visto que neste horário a tarifa tem o preço mais elevado. Esse sistema possui o melhor valor de VPL e o retorno de investimento (*Payback*) mais rápido. Caso a modalidade tarifária não fosse levada em consideração, o SFM apresentaria uma atratividade reduzida.

7. CONCLUSÃO

Para investimento em energia como foi mostrado, é necessário ver não apenas a geração de energia elétrica, mas também a viabilidade econômica. O sistema fotovoltaico misto foi escolhido por ter se mostrado vantajoso tanto economicamente quanto em produção de energia por aliar as vantagens do sistema fotovoltaico isolado com backup e do conectado à rede, outro ponto que colaborou para a escolha foi o fato de haver a possibilidade de ser utilizado no horário de ponta, onde a tarifa é mais elevada, o banco de baterias e no fora ponta o sistema on-grid, colaborando assim para um maior retorno financeiro através de economia através dos valores de tarifas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem primeiramente a Deus pelo dom da vida, à UFPI e aos professores Dr. Bartolomeu F. dos Santos Júnior e Dr. Aryfrance R. Almeida pelo suporte técnico, científico e intelectual.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR (2020). Infografico absolar. Disponível em: <http://www.absolar.org.br/infografico-absolar.html>. Acesso em: 25 maio 2020.

ANEEL (2020a). Entendendo a tarifa. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/entendendo-a-tarifa>. Acesso em: 03 junho 2020.

ANEEL (2020b). Modalidades tarifárias. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/tarifas-consumidores/-/asset_publisher/zNaRBJCLDgBE/content/modalidade/654800. Acesso em: 04 junho 2020.

ANEEL (2020c). A tarifa de energia elétrica. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/tarifas>. Acesso em: 03 junho 2020.

Câmara, C.F. (2011). Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. *Universidade Federal de Lavras, UFLA, MG*.

Carvalho, N. (2014). Modelagem de processo de negócio de geração solar fotovoltaica ou eólica de pequeno porte no contexto da resolução normativa aneel n° 482/2012. *Master's thesis, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos (ITA)*.

CRESESB (2020). Solar potencial-sundata. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>.

Equatorial (2020). Tarifação. Disponível em: <https://www.equatorialpiaui.com.br/index.php/sua-conta/tarifas/>.

Figueira, F.F. (2014). Dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede para alimentar a sala de computação da escola municipal tenente antônio joão. *Rio de Janeiro: UFRJ*.

Fotovoltaica, E. and Sistemas, C. (2015). Energia fotovoltaica.

Freitas, S.S.A. (2008). *Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos*. Ph.D. thesis, Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão.

Marangoni, F. (2012). *Inversores monofásicos para conexão de sistemas fotovoltaicos à rede*. Master's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

MOREIRA, N.J.H. (2012). Resolução normativa n° 482, de 17 de abril de 2012.

Nakabayashi, R.K. (2014). *Microgeração fotovoltaica no Brasil: condições atuais e perspectivas futuras*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.

NUBANK (2020). Qual o rendimento da poupança em 2020? Disponível em: <https://blog.nubank.com.br/qual-o-rendimento-da-poupanca-em-2020/>.

OLIVEIRA, C.S. (2016). Análise de viabilidade econômica de alternativas de sistemas fotovoltaicos para atender o bloco de engenharia elétrica do centro de tecnologia da ufpi.

Oliveira, C., Marques, J., Santos Jr, B., Linard, F., and Almeida, A. (2015). Viabilidade da instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede considerando a readequação no consumo de energia elétrica: Estudo de caso do bloco de engenharia elétrica da ufpi.

Samanez, C. (2005). *Matemática Financeira*. Pearson.

Seguel, J.I.L. (2009). Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica mppt e controle digital.

Silva, E.J.d. (2015). Sistema de geração fotovoltaico de energia elétrica.

SILVA, G.T.M.M.d. (2015). Dimensionamento e análise de viabilidade econômica de usina fotovoltaica em nova iguaçu-rj. *Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica*.

Solar, M.C. (2010). Controladores de carga e descarga. Disponível em: <https://www.minhacasasolar.com.br/saiba-mais-controlador-de-carga>.

Villalva, M.G. (1983). *Energia Solar Fotovoltaica: guia del usuario*. Saraiva Educação SA.

Villalva, M.G. and Gazoli, J.R. (2012). Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. *São Paulo: Érica, 2*.