Metodologia de dimensionamento de um sistema PV/T para edificações residenciais

Souza, R.Z * **Fiorotti, R** ** **Riguetti, R.S** *** **Amorim, A. E. A** ****

* *Coordenadoria de Engenharia Elétrica, IFES, ES, (e-mail: rhaister@gmail.com).*
** *Coordenadoria de Engenharia Elétrica, IFES, ES (e-mail: rodrigo.fiorotti@ifes.edu.br)*
*** *Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, ES (e-mail: ruanschultz.r@gmail.com)*
**** *Coordenadoria de Engenharia Elétrica, IFES, ES (e-mail: arthur.amorim@ifes.edu.br)*

Abstract: Solar photovoltaic (PV) energy is an important source of renewable energy, but it faces challenges related to the increase in temperature of operating solar panels, resulting in efficiency losses over time. A promising approach to mitigate these challenges is the adoption of photovoltaic-thermal (PV/T) hybrid systems, which integrate thermal collectors to harness the residual heat generated by the solar panels. This article proposes a methodology for the efficient sizing of residential PV/T systems, considering both electrical and thermal aspects. This methodology uses parameters from PV/T system construction modeling and residential data to compare the efficiency of a PV/T hybrid system with a common PV system.

Resumo: A energia solar fotovoltaica (PV) é uma importante fonte de energia renovável, porém enfrenta desafios relacionados à elevação da temperatura dos painéis solares em operação, resultando em perdas de eficiência ao longo do tempo. Uma abordagem promissora para mitigar esses desafios é a adoção de sistemas híbridos fotovoltaicos térmicos (PV/T), que integram coletores térmicos para aproveitar o calor residual gerado pelos painéis solares. Este artigo propõe uma metodologia para o dimensionamento eficiente de sistemas PV/T residenciais, considerando tanto os aspectos elétricos quanto os térmicos. Essa metodologia utiliza parâmetros de modelagem construtiva de sistemas PV/T e dados residenciais coletados a fim de comparar a eficiência de um sistema híbrido PV/T com um sistema PV comum.

Keywords: Solar photovoltaic energy; Renewable energy; photovoltaic-thermal systems; energy efficiency; hybrid systems.

Palavras-chaves: Energia solar fotovoltaica; Energia renovável; Sistemas fotovoltaico-térmicos; Eficiência energética; Sistemas híbridos.

1. INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica (PV) emergiu como uma das principais fontes de energia renovável, impulsionando a transição global para um futuro energético sustentável. A energia solar é tão intensa que em apenas 90 minutos, o sol fornece energia suficiente à Terra para suprir a demanda energética global de um ano inteiro (Yu et al., 2022). Sua crescente adoção é justificada pela abundância e disponibilidade universal da radiação solar, aliada à redução significativa dos custos de produção das células fotovoltaicas. No entanto, o desempenho dos sistemas fotovoltaicos convencionais é desafiado pela elevação da temperatura dos painéis solares em operação, o que resulta em perdas de eficiência e degradação ao longo do tempo (Dida et al., 2021).

A eficiência de um sistema PV normalmente varia de 15% a 20% (Mallal et al., 2021) e depende de vários fatores, como acúmulo de poeira nos painéis solares PV, sombreamento, velocidade do vento, irradiância solar, temperatura ambiente e temperatura superficial dos painéis solares PV (Al-Ezzi and Ansari, 2022). A elevação da temperatura nos painéis fotovoltaicos induz uma redução na eficiência de conversão da luz solar em eletricidade, conforme indicado pelas curvas de desempenho fornecidas pelos fabricantes. Além disso, a irradiação solar excessiva pode gerar calor desperdiçado, aquecendo o painel e elevando sua temperatura superficial (Dwivedi et al., 2020).

Os testes de eficiência dos painéis solares são comumente realizados em condições controladas de laboratório, onde a temperatura é mantida constante, o que não reflete precisamente as condições encontradas em ambientes externos sob a luz solar direta. Essa variação de temperatura impacta negativamente na eficiência de conversão dos painéis solares PV, que normalmente operam a uma temperatura padrão de 25°C (Kant et al., 2016). Em regiões quentes e áridas, no entanto, os painéis podem aquecer até 75°C,

reduzindo assim sua eficiência em até 25% (Dida et al., 2021).

Uma das principais vantagens dos sistemas PV/T é sua capacidade de substituir cargas convencionais de energia, como o chuveiro elétrico residencial, reduzindo significativamente o consumo de eletricidade e as despesas associadas. Ao integrar a geração de eletricidade e calor em um único sistema, os sistemas PV/T oferecem uma solução econômica e eficiente para as necessidades energéticas residenciais, proporcionando uma fonte de energia limpa e renovável para aquecimento de água e outras aplicações térmicas (Ibrahim et al., 2011).

Apesar da existência de métodos estabelecidos para o dimensionamento de sistemas híbridos fotovoltaicos convencionais (Ribeiro, 2020) e normas para a parte térmica (Associação Brasileira de Normas Técnicas(ABNT), 2008), ainda não existe uma metodologia consolidada para o dimensionamento de sistemas PV/T residenciais. Enquanto softwares de dimensionamento para sistemas fotovoltaicos e metodologias estabelecidas estão disponíveis, a integração dos aspectos térmicos adiciona uma complexidade que demanda uma abordagem específica.

Este artigo propõe uma metodologia que visa preencher essa lacuna, oferecendo uma estrutura para dimensionar adequadamente os sistemas PV/T híbridos residenciais. Integrando os princípios dos métodos existentes para sistemas fotovoltaicos convencionais juntamente com as normas aplicáveis à parte térmica, a metodologia apresentada visa oferecer uma solução abrangente para o dimensionamento eficiente e econômico dos sistemas PV/T híbridos.

2. METODOLOGIA

2.1 Funcionamento do PV e PV/T

Os módulos fotovoltaicos (PV) são dispositivos sólidos que convertem a radiação solar diretamente em eletricidade, dispensando a necessidade de motores térmicos ou equipamentos rotativos. Este sistema, caracterizado por não possuir partes móveis, demanda manutenção mínima, tem uma longa vida útil e opera sem emissões de gases do efeito estufa. A flexibilidade modular permite construir sistemas de qualquer tamanho, de miliwatts a megawatts, sendo altamente confiáveis e de baixa necessidade de manutenção. Além disso, podem ser configurados como sistemas autônomos (Kalogirou, 2016).

Os paineis PV convertem a energia do sol em energia elétrica com uma eficiência inferior a 20%. Mais de 80% da energia solar incidente é dissipada no ambiente após ser convertida em energia elétrica (Ibrahim et al., 2011). Uma abordagem promissora para mitigar a perda de calor e otimizar a eficiência energética global dos sistemas fotovoltaicos é a adoção dos sistemas híbridos fotovoltaicos térmicos (PV/T). O sistema PV/T é capaz de gerar eletricidade enquanto absorve calor, utilizando um meio de resfriamento, sendo os mais comuns o ar e a água. Isso possibilita atender simultaneamente a demanda por eletricidade e energia térmica de alta qualidade e evita a redução da eficiência elétrica causada pelo aumento da temperatura dos módulos PV. O aproveitamento de calor residual pode ser utilizado para aquecer ambientes internos, fornecer água quente e podendo também ser aplicado na desumidificação e purificação do ar interno (Cao et al., 2023).

Após compreendido o funcionamento dos sistemas fotovoltaicos (PV) e fotovoltaicos térmicos (PV/T), é fundamental destacar que serão realizados cálculos específicos para cada um desses sistemas separadamente. Os cálculos para os sistemas PV levarão em consideração a eficiência da conversão fotovoltaica, a orientação e inclinação dos painéis solares, a intensidade da radiação solar e outros parâmetros relevantes para determinar a capacidade de geração elétrica do sistema. Por outro lado, os cálculos para os sistemas PV/T incluirão não apenas os aspectos elétricos, mas também os aspectos térmicos, considerando a eficiência da coleta de calor, a capacidade de armazenamento térmico e a demanda de energia térmica do sistema. Assim, cada tipo de sistema será dimensionado de acordo com suas características específicas para garantir o melhor desempenho e eficiência energética.

2.2 Dimensionamento de um sistema PV

A determinação da capacidade e dimensionamento de um sistema fotovoltaico (PV) é um processo que visa otimizar a eficiência e a viabilidade econômica da instalação. Essa determinação é baseada em cálculos que consideram diversos parâmetros, incluindo o consumo energético do local de instalação, a taxa de desempenho do sistema, a disponibilidade de radiação solar e a capacidade de geração dos painéis solares.

O Consumo Médio Anual (CMA) representa a média da energia consumida ao longo de um ano, refletindo a demanda energética do local. O Consumo Mensal Fixo (CMF) é o valor mínimo cobrado mensalmente na conta de energia. Para evitar o superdimensionamento do sistema, é necessário subtrair o CMF anual do CMA antes de calcular a Energia Consumida Diária (ECD), dividindo o resultado pelo número de dias do ano (365). Essa análise diária permite compreender os padrões de consumo de energia, informando o dimensionamento do sistema de forma precisa.

$$\text{ECD}_{=}\frac{\text{CMA} - (12 \times \text{CMF})}{365}(kWh/dia) \tag{1}$$

Com a definição do ECD é necessário verificar a geração de energia dos painéis fotovoltaicos, visto que cada painel possui uma eficiência dependendo do seu material construtivo. Outra variável importante que influenciará nos resultados são as Horas de Sol Pleno (HSP) que incide sobre os painéis que pode variar de acordo com o posicionamento geográfico. Como a latitude e longitude do local analisado eram de 18.68°S e 39.86°O, de acordo com os dados retirado do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (s.d.) o valor do HPS para a região é de 5kWh.m²/dia. Para esse caso foi considerado que a temperatura ambiente (T_{amb}) seria igual à temperatura de testes das placas solares (T_{testes}), que neste caso é de 25°C, além disso as placas solares analisadas possuem uma eficiência de 21,5% (η_{nominal}) conforme o *datasheet* do fabricante (Canadian Solar, s.d.).

$$\text{HSP} = 5kWh.m/dia \tag{2}$$
$$T_{\text{testes}} = T_{\text{amb}} = 25°C \tag{3}$$
$$\eta_{\text{nominal}} = 21,5\% \tag{4}$$

Considerando que o aumento da temperatura afetará o rendimento do PV, nesse caso deve-se calcular o real rendimento do painel. A primeira variável a se calcular é a temperatura de operação ($T_{\text{operação}}$) que é definida como a soma da T_{amb} com a relação do HSP pela taxa de desempenho do sistema (*performance ratio*) de 80% (Pereira et al., 2017).Com esses dados definidos, utilizaremos as equações abaixo para calcular a eficiência real das placas solares,

$$T_{\text{operação}} = T_{\text{amb}} + \frac{HSP}{0,8} \tag{5}$$
$$\Delta T = T_{\text{operação}} - T_{\text{testes}} \tag{6}$$
$$Perdas = \Delta T \times 0,05\%/°C \tag{7}$$
$$\eta_{\text{real}} = \eta_{\text{nominal}} - Perdas \tag{8}$$

Observa-se que o valor de 0,05%/°C utilizados na equação (7) aumenta de acordo com a diferença de temperatura do módulo exposto ao sol com os dados do fabricante (Canadian Solar, s.d.). Calcula-se então o rendimento corrigido dos módulos solares e aplica-se a equação do cálculo de geração de energia elétrica por placa solar (Ger_{placa}), considerando assim a influência da temperatura sobre sistema.

$$Ger_{\text{placa}} = \text{A}_{\text{placa}} \times \text{HSP} \times \eta_{\text{real}} \times 0,8 \tag{9}$$

Assim pode-se definir a quantidade de placas e a potência total gerada pelo sistema, a partir do ECD e da geração mensal de energia elétrica corrigida (Ger_{total}) , como mostra as equações abaixo:

$$Qnt_{\text{placas}} = \frac{\text{ECD}}{Ger_{\text{placa}}} \tag{10}$$

$$Ger_{\text{total}} = Ger_{\text{placa}} \times 30 \times Qnt_{\text{placas}} \tag{11}$$

A partir desses dados é possível dimensionar o real funcionamento de um sistema PV para uma residência considerando as perdas elétricas devido ao aumento significativo de temperatura.

2.3 Dimensionamento de um sistema Térmico

A energia solar térmica envolve a utilização do calor proveniente do sol, captado por meio de painéis solares térmicos conhecidos como coletores térmicos. Esses coletores convertem a energia solar em calor, que é então utilizado para aquecer fluidos, como água, óleo ou ar, dependendo do tipo de painel e do propósito específico. O fluido aquecido pode ser armazenado em um reservatório térmico para uso posterior. Em aplicações prediais comuns, essa energia térmica é empregada para aquecimento de água destinada a chuveiros, piscinas, ambientes, entre outras finalidades (Ribeiro, 2016).

Nesse contexto temos o aproveitamento da energia térmica para o aquecimento de um fluido, os coletores térmicos são compostos por elementos que absorvem muito o calor emitido pelo sol em relação ao uma célula de energia solar. Para os cálculos de um sistema térmico foram utilizados as equações da NBR 15569 (Associação Brasileira de Normas Técnicas(ABNT), 2008).

O primeiro passo para o dimensionamento de um sistema térmico é determinar o volume de água quente necessário para a aplicação específica. No contexto deste estudo, consideramos apenas água aquecida para banho. O volume consumido (V_{banho}) em L é calculado pela multiplicação da vazão do chuveiro (Q_{pu}) em L/min pelo tempo de banho diário (T_{u}) medido em min, e então pelo número de vezes que o aparelho é utilizado por dia (frequência de uso). A expressão para esse cálculo é apresentada abaixo:

$$V_{\text{banho}} = \sum_{i=1}^{n} (Q_{\text{pu}} \times T_{\text{u}} \times \text{frequência de uso}) \tag{12}$$

Onde:

- n é a quantidade de dias que se utiliza banhos quentes, e para este caso vamos considera $n = 1$.

Com o volume de água quente gasto conhecido, é necessário determinar o tamanho do reservatório (*boiler*). A temperatura média do banho (T_{banho}) é de aproximadamente 40°C (Riguetti, 2022), enquanto a temperatura ambiente (T_{amb}) é cerca de 25°C (Kant et al., 2016). O volume total do reservatório (V_{boiler}) é calculado multiplicando o volume consumido no banho (V_{banho}) pela variação de temperatura entre (T_{banho}) e (T_{amb}) e dividindo pela variação de temperatura entre (T_{boiler}) e (T_{banho}),conforme equação abaixo:

$$V_{\text{boiler}} = \frac{V_{\text{banho}} \times (T_{\text{banho}} - T_{\text{amb}})}{(T_{\text{boiler}} - T_{\text{banho}})} \tag{13}$$

Com o valor V_{boiler} é possível determinar a Energia Útil ($E_{\text{útil}}$) do sistema térmico, essa energia representa a quantidade de energia que pode ser disponibilizada para uso após o aquecimento da água no reservatório. Considerando que um mês possui, em média, 30 dias, seu cálculo é expresso na equação abaixo:

$$E_{\text{útil}} = V_{\text{boiler}} \times \Delta_T \times K \times 30dias \tag{14}$$

Onde:

- $E_{\text{útil}}$ é a energia útil em quilowatts hora por mês;
- Δ_T é diferença entre T_{boiler} e T_{amb} em graus Celsius (°C);
- K é uma constante definida como $\frac{\rho \times C_p}{3600}$, onde:
  - ρ é a massa específica da água = 1kg/L;
  - C_p é o calor específico da água = 4,18kJ/kg.°C;
  - 3600 é o fator de conversão de quilojoules (kJ) para quilowatts (kW).

O Fator de Correção (FC_{instal}) é utilizado para normalizar o ângulo de inclinação do coletor em relação a sua latitude, logo é utilizado a equação abaixo:

$$FC_{\text{instal}} = \frac{1}{1 - [1,2 \times 10^{-4} \times W + 3,5 \times 10^{-5} \times \gamma^2]} \tag{15}$$

Onde:

- W é uma constante equivalente à correcão da inclinação do local com a inclinação ótima do coletor $(\beta - \beta_{\text{ótimo}})^2$, expressa em graus (°);
- γ é o ângulo de orientação.

A partir das equações (2.3), (15) podemos cálcular qual é a área necessária para a coletora térmica(A_{coletora}). Além desses dois valores é necessário conhecer a Irradiação global média anual diária (IG) que varia de acordo com a região e a Produção Média Mensal de Energia Específica do coletor solar ($PMEE$) que é característica física do coletor térmico. Logo a área total é dada pela fórmula abaixo:

$$A_{\text{coletora}} = \frac{(E_{\text{útil}} - E_{\text{perdas}}) \times FC_{\text{instal}} \times 4,89}{\text{PMEE} \times I_{\text{G}}} \tag{16}$$

Onde:

- $4,89$ é o valor-padrão para determinar a PMEE do coletor solar de acordo com a regulamentação do INMETRO (Associação Brasileira de Normas Técnicas(ABNT), 2008);
- E_{perdas} é calculado pela equação abaixo:

$$E_{\text{perdas}} = 0.15 \times E_{\text{útil}}$$

A instalação de um sistema térmico (T) é justificada pela necessidade de aprimorar a eficiência energética em ambientes residenciais e comerciais, principalmente para suprir a demanda por aquecimento de água.

2.4 Dimensionamento de um sistema PV/T

Na metodologia de dimensionamento de sistemas PV/T, o primeiro passo consiste em realizar uma análise do perfil de consumo de energia da residência ou edifício-alvo, seguindo uma abordagem análoga à utilizada para os sistemas PV convencionais. Todavia, nos sistemas híbridos, deve-se considerar o gasto elétrico destinado ao aquecimento de água, como é o caso do chuveiro elétrico, e subtraí-lo do consumo total de energia. Tal procedimento se deve ao fato de que essa demanda energética será suprida pela parcela térmica do PV/T. Para mensurar o consumo elétrico específico do chuveiro, instalou-se um analisador de energia no circuito dedicado ao aparelho, monitorando sua tensão e corrente e coletando dados em intervalos de cinco segundos.

Ao longo de uma semana de monitoramento, o analisador de energia registrou informações, viabilizando a identificação de períodos específicos de uso do chuveiro e a determinação do tempo médio de banho. Tais dados proporcionaram dados acerca do consumo efetivo de água quente durante os banhos, contribuindo, assim, para uma análise real do perfil de consumo e, consequentemente, para o dimensionamento do sistema PV/T.

Na residência analisada, habitada por dois moradores, os banhos ocorrem principalmente à noite e, ocasionalmente, pela manhã. O período de banho é importante, pois nos dois períodos analisados o sistema de armazenamento está em *défict* calórico, logo o volume de água utilizada do *boiler* para banho é maior. Durante o período de sete dias de monitoramento, registrou-se um total de 19 banhos, resultando em uma média diária de aproximadamente 2,7 banhos, com duração média de 4,18 minutos cada. Duração essa abaixo da média para a região sudeste que equivale a 8,93 minutos (Riguetti, 2022).

A partir dos dados fornecidos pelo analisador e do número de banhos registrados, juntamente com sua duração, é possível calcular o consumo elétrico semanal. Essa estimativa é obtida somando-se a energia (em kJ) consumida durante o período monitorado. Esse períoco corresponde a um padrão de comportamento semanal, logo considerando que em nenhum desses dias houve algo anormal, basta multiplicar o valor energético encontrado por quatro (quantidade de semanas em um mês) e obter o valor eléctrico consumido pelo chuveiro. A conversão desse valor para kWh proporciona uma estimativa do consumo mensal do equipamento, conforme expresso na equação a seguir:

$$Consumo_{\text{chuveiro}} = 22,36kWh.\text{mês} \tag{17}$$

A vazão do chuveiro utilizado para os banhos naquela residência foi medida em 6L/min e a partir desse dado e do tempo de banho, torna-se possível calcular o volume necessário do *boiler* para suprir a demanda térmica daquela residência é de $68,14L$.

Esse valor de volume utilizado considera uma temperatura ideal de banho de aproximadamente 42°C conforme (Associação Brasileira de Normas Técnicas(ABNT), 2008), considerando que o sistema PV/T atinja temperaturas próximas a 50°C (Riguetti, 2022) será necessário ocorrer uma mistura mecânica de fluidos para a adequação dessa temperatura do banho, sendo assim, o valor do volume necessário do *boiler* passa a ser igual a $46,25L$.

Com base no volume de água quente calculado para o *boiler*, podemos determinar a $E_{\text{útil}}$ levando em consideração as temperaturas do boiler e do ambiente, definidas como 50°C e 25°C, respectivamente. Esse cálculo é avalia a capacidade do sistema em fornecer energia térmica, levando em conta as condições ambientais e as demandas de uso. Pssibilitando uma estimativa da energia disponível para utilização, contribuindo para o dimensionamento eficiente do sistema PV/T. A $E_{\text{útil}}$ nesse estudo de caso é igual a $1,34kWh/$mês e, consequentemente, o E_{perdas} igual a $0,20kWh/$mês.

Para o cáculo do FC_{instal} é o mesmo utilizado nos sistemas T, pois a variável em questão é o psicionamento global da região avaliada, principalmente da latitude de onde se encontra o sistema, dessa maneira temos que:

- $\beta = 16$;
- $\beta_{\text{ótimo}} = 18,70$;
- $\gamma = 18,70$.

Portanto, o FC_{instal} terá valor igual a $1,013$

$$FC_{\text{instal}} = 1,013 \tag{18}$$

A principal alteração do sistema PV/T para o sistema T é em relação ao PMEE, visto que são materiais diferentes e com capacidades distintas de funcionamento. No caso do PV/T, é calculado o PMEE com base nas propriedades térmicas das camadas, sendo a transmissividade-absortância do vidro utilizada como coeficiente de ganho do coletor térmico. Esses parâmetros incluem a massa e a espessura de diferentes componentes, como vidro, trocador de calor, isolante do módulo, TEDLAR, EVA, isopor no tanque e plástico do tanque. Além disso, são fornecidos valores para o calor específico e a condutividade térmica de cada material, bem como números de Reynolds e Nusselt para diferentes regimes de escoamento. Esses dados são

essenciais para modelar e simular o desempenho térmico do sistema PV/T em diversas condições operacionais de acordo com o (Riguetti, 2022). Dessa maneira o PMEE possui valor de $3,30kWh/\text{mês}.m^2$ que será utilizado para o cálculo da A_{coletora}, além disso o valor de I_{G} para a região analisada é de $5,90kWh/m^2$. Logo:

$$A_{\text{coletora}} = 0,40m^2 \tag{19}$$

Para essa residência uma área menor que 1m² e um reservatório de aproximadamente 50L será suficiente para suprir a sua demanda térmica. Basta realizar o dimensionamento da geração de energia elétrica, considerando a exclusão do consumo do chuveiro elétrico. Os cálculos de geração elétrica serão os mesmos, porém o cálculo do ECD irá mudar para o exemplo abaixo:

$$\text{ECD}_{\text{PV/T}} = \frac{\text{CMA} - [12 \times (\text{CMF} + Consumo_{\text{chuveiro}})]}{365} \tag{20}$$

3. RESULTADOS

O consumo elétrico médio mensal da residência avaliada totalizou 357,75 kWh, no entanto, a análise foca especificamente no consumo atribuído ao chuveiro elétrico, que não exerceu um impacto expressivo na fatura de energia conforme os dados abaixo:

$$\text{ECD}_{\text{PV/T}} = 300,90kWh/\text{mês} \tag{21}$$

Enquanto para um sistema PV o ECD seria de:

$$\text{ECD} = 323,26kWh/\text{mês} \tag{22}$$

Podemos dizer que o sistema PV/T, para essa residência, é aproximadamente 7% menor que um sistema PV simples. A quantidade de placas solares para os dois casos acaba sendo a mesma pela proximidade das potêcias elétricas. Com o intuito de verificar outros tipos de residências, foi simulado alguns estudos de caso comparando os sistemas PV/T e PV com modelos de consumos diferentes.

A Tabela 1 e a Tabela 2 representam residências que possuem rede monofásica e que consomem em média 20kWh e 50kWh com gasto em chuveiro elétrico, respectivamente. Os valores de PV/T(kWh) e PV(kWh) são referentes a demanda de energia elétrica necessária que o sistema fotovoltaico deverá suporir, em todos os casos o sistema PV/T se torna mais compacto, utilizando assim menos placas solares para um mesmo propósito. A diferença de potência está diretamente associada a quantidade de banhos e/ou seu tempo, nesse caso, quem consome 20kWh tem um tempo médio de banho de 4min e quem consome 50kWh possui o dobro do tempo.

Tabela 1. Comparação entre PV/T e PV - consumo de 20kWh/monofásico

Consumo (kWh)	PV/T (kWh)	PV (kWh)	%(PVT/PV)
100	49,04	69,04	29%
150	98,35	118,35	17%
200	147,67	167,67	12%
250	196,98	216,98	9%
300	246,30	266,30	8%

Tabela 2. Comparação entre PV/T e PV - consumo de 50kWh/monofásico

Consumo (kWh)	PV/T (kWh)	PV (kWh)	%(PVT/PV)
100	19,04	69,04	72%
150	68,36	118,36	42%
200	117,67	167,67	30%
250	166,98	216,98	23%
300	216,30	266,30	19%

Para residências que possuem rede bifásica a diferença chega a ser maior com o mesmo tempo de banho, isso ocorre devido ao aumento do valor tarifário da demanda mínima. A Tabela 3 e a Tabela 2 mostram que, caso o consumo térmico seja $\frac{1}{3}$ do consumo elétrico o sistema PV/T será, em média, 50% menor que um sistema PV normal.

Tabela 3. Comparação entre PV/T e PV - consumo de 50kWh/bifásico

Consumo (kWh)	PV/T (kWh)	PV (kWh)	%(PVT/PV)
100	0	50	100%
150	48,63	98,63	51%
200	97,94	147,94	34%
250	147,26	197,26	25%
300	196,57	246,57	20%

4. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que um sistema PV/T é mais compacto do que um sistema PV, entretanto quanto mais consumo térmico for necessário, mais eficiente será o PV/T, devido ao aumento das placas e do reservatório, aumentando a área de coletor térmico. O tamanho do *boiler* também aumentará conforme a demanda de banhos o que pode se tornar um limitante no processo de aquecimento de água. Além disso, a metodologia desenvolvida considera não apenas a geração de energia elétrica, mas também a produção de energia térmica, considerando uma placa solar como coletora térmica.

Outro ponto importante é que a metodologia leva em consideração as características específicas do local de instalação, como a irradiação solar, o clima e a demanda de energia, garantindo um dimensionamento adequado do sistema para atender às necessidades energéticas locais. Isso resulta em um sistema otimizado e customizado para cada aplicação, proporcionando maior eficiência e economia de recursos, sendo capaz de integrar novas tecnologias fotovoltaicas e térmicas de forma sinérgica para maximizar o aproveitamento da energia solar disponível e atender às demandas energéticas de forma sustentável e econômica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro e institucional do IFES e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo – FAPES (projeto FAPES-2021-5N0G8).

REFERÊNCIAS

Al-Ezzi, A.S. and Ansari, M.N.M. (2022). Photovoltaic solar cells: A review. *Applied System Innovation*, 5(4). doi:10.3390/asi5040067. URL `https://www.mdpi.com/2571-5577/5/4/67`.

Associação Brasileira de Normas Técnicas(ABNT) (2008). *NBR 15569: Sistema de Aquecimento Solar de Água em Circuito Direto - Projeto e Instalação*. Brasil.

Canadian Solar (s.d.). Cs datasheet - hiku6 cs6w-ms. URL https://static.csisolar.com/wp-content/uploads/sites/2/2024/05/14150509/CS-Datasheet-HiKu6_CS6W-MS_v2.811.pdf.

Cao, X., Li, N., Li, Y., Che, L., Yu, B., and Liu, H. (2023). A review of photovoltaic/thermal (pv/t) technology applied in building environment control. *Energy and Built Environment*. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.12.003. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666123323001174.

Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (s.d.). Potencial solar - sundata. http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&. Acesso em: maio 2024.

Dida, M., Boughali, S., Bechki, D., and Bouguettaia, H. (2021). Experimental investigation of a passive cooling system for photovoltaic modules efficiency improvement in hot and arid regions. *Energy Conversion and Management*, 243, 114328. doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114328. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890421005045.

Dwivedi, P., Sudhakar, K., Soni, A., Solomin, E., and Kirpichnikova, I. (2020). Advanced cooling techniques of p.v. modules: A state of art. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21, 100674. doi:https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100674. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X19305416.

Ibrahim, A., Othman, M.Y., Ruslan, M.H., Mat, S., and Sopian, K. (2011). Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (pv/t) solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 352–365. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.024. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110003114.

Kalogirou, S.A. (2016). *Engenharia de energia solar: processos e sistemas*. Elsevier, Rio de Janeiro, 2 edition.

Kant, K., Shukla, A., Sharma, A., and Biwole, P.H. (2016). Thermal response of poly-crystalline silicon photovoltaic panels: Numerical simulation and experimental study. *Solar Energy*, 134, 147–155. doi:https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.002. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X16300822.

Mallal, Y., Sharma, D.K., El Bahir, L., and Hassboun, T. (2021). Temperature prediction-based realistic performance analysis of various electrical configurations of solar pv panels. *Solar Energy*, 228, 612–624. doi:https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.09.084. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X21008471.

Pereira, E.B., Martins, F.R., Gonçalves, A.R., Costa, R.S., Lima, F.J.L., Rüther, R., Abreu, S.L., Tiepolo, G.M., Pereira, S.V., and Souza, J.G. (2017). *Atlas Brasileiro de Energia Solar – 2ª Edição*. INPE, São José dos Campos.

Ribeiro, N.C.C. (2016). Análise de sistema híbrido solar: fotovoltaico e térmico.

Ribeiro, V.D.A.P. (2020). Dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico das áreas comuns de um condomínio multifamiliar.

Riguetti, R.S. (2022). Desenvolvimento de um método para dimensionamento de pv/t conforme perfil de consumo energético de uma edificação residencial.

Yu, J., Tang, Y.M., Chau, K.Y., Nazar, R., Ali, S., and Iqbal, W. (2022). Role of solar-based renewable energy in mitigating co_2 emissions: evidence from quantile-on-quantile estimation. *Renewable Energy*, 182, 216–226.