



## XVII CONBRAVA - CONGRESSO BRASILEIRO DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO, AQUECIMENTO E TRATAMENTO DO AR

São Paulo Expo – 23 a 25 de novembro de 2021

# ANÁLISE ECOENERGÉTICA DE SISTEMAS DE AR CONDICIONADO FOTOVOLTAICOS

## PAPER 43

### RESUMO

Os ar condicionados são equipamentos responsáveis pelo consumo energético de até 70% em um prédio comercial, devido a isto, fontes alternativas e renováveis precisam se tornar uma opção viável para estes equipamentos dentro de alguns anos. Já existem algumas opções com utilização de energia fotovoltaica, porém ainda não é viável. A história da energia fotovoltaica é de muita evolução, diminuindo seu custo e aumentando sua eficiência. Os equipamentos de ar condicionado também sofreram grandes evoluções, diminuindo custos, dimensões e impactos no meio ambiente recorrente da utilização de gases refrigerantes. Com um dos menores impactos ambientais para produção energética, a energia fotovoltaica no ar condicionado traz benefícios para o meio ambiente e para o custo do proprietário. Este trabalho relaciona a utilização destes dois equipamentos de uma nova forma e mais eficiente, diminuindo as perdas envolvidas no processo com uma montagem direta. Já foram desenvolvidos equipamentos VRF (Variable Refrigerant Flow) e Chillers Centrífugos alimentados por energia fotovoltaica sendo a energia em CC (corrente contínua) é diretamente aplicada ao compressor do equipamento, alimentado em CC, sem utilizar um inversor de corrente que pode diminuir em 10% a eficiência do sistema. A finalidade deste trabalho é comparar entre o sistema on-grid com alimentação direta em CC para o compressor com os sistemas off-grid possuindo alimentação em corrente alternada e alimentado com 5% da energia da concessionária, além de mensurar o TEWI (Total equivalent warming impact) e o TWI (Total Water Impact) em ambas as opções, o qual o sistema fotovoltaico mostrou-se vantajoso.

**Palavras-chave:** Fotovoltaico. VRF. CFC's. Ar condicionados.

### ABSTRACT

Air conditioners are equipment responsible for the energy consumption of up to 70% in a commercial building, due to this, alternative and renewable sources need to become a viable option for this equipment within a few years. There are already options with the use of photovoltaic energy, but it is far from being viable. The history of photovoltaic energy is of great evolution, decreasing its cost and increasing its efficiency. Air conditioning equipment has also undergone major changes, involving reduced costs, dimensions and impacts on the environment due to the use of refrigerant gases. With one of the lowest environmental impacts for energy production, photovoltaic energy in use with air conditioning brings benefits to the environment and to the cost of the owner. This work relates the use of these two equipment's in a new and more efficient way, reducing the losses involved in the process with a direct assembly. VRF (Variable Refrigerant Flow) equipment and Centrifugal Chillers have already been developed, which are supplied by photovoltaic energy so that the direct current (DC) energy is directly applied to the equipment compressor, which can be powered by direct current, without the use of an inverter. which can decrease system efficiency by 10%. The purpose of this work is to compare the system called on-grid with direct DC power to the

compressor with the off-grid systems with AC power and powered primarily with the utility's power and measuring the TEWI and TWI in both options, which the photovoltaic system proved to be advantageous.

**Keywords:** Photovoltaic. VRF. CFC's. Air conditioner.

## 1 INTRODUÇÃO

Uma das maiores promessas em relação às energias renováveis é a tecnologia fotovoltaica, que se mostra em seu setor crescendo a uma taxa composta média anual superior a 35% [Wilson et al, 2020]. No entanto, foi somente a partir do início da segunda metade do século 20, com o estudo de Daryl Chapin, Calvin Fuller e Gerald Pearson, que eles melhoraram a célula solar, mudando de selênio para silício e alcançando seus objetivos de eficiência de conversão de 6% (Perlin, 2004). A partir de então, o avanço da tecnologia foi focado principalmente na redução de custos enquanto melhora a eficiência de conversão, isso foi rapidamente visto com a Hoffman Electronics, apenas seis anos após a invenção da célula de silício, melhorou de 6% para 14% a eficiência de conversão (Fraas, 2015).

Ao mesmo tempo, os cientistas estavam em um processo de descoberta do espaço e uma corrida entre os EUA e a URSS elevou o conhecimento da energia fotovoltaica ao limite da época e ajudou a NASA a lançar a primeira espaçonave com painéis solares que rastreiam o sol para obter mais energia dele, um avanço ainda usado em muitos dos satélites de hoje (NASA, 2021). Isso aconteceu em 1964, alguns anos antes de uma grande crise que afetou as indústrias de energia, a crise do petróleo, evento que acelerou o desenvolvimento dos modernos painéis solares, fazendo com que grandes empresas de gás e petróleo mudassem seu interesse por esta tecnologia. Enquanto esta incrível expansão da tecnologia solar estava acontecendo, países de todo o mundo começaram a experimentar e estudar também, empresas da Austrália, Alemanha e Japão ajudaram a indústria fotovoltaica a ir mais além e em 1983 a produção mundial estava excedendo 21,3 MW (EERE, 2021). No início da década de 90, as considerações ecológicas começaram a ser associadas ao problema do aquecimento global derivado da emissão de CO<sub>2</sub>, o que levou os cientistas a começarem a olhar ainda mais para o desenvolvimento da energia fotovoltaica (SHAH, 1993). No final do século, a produção energética mundial de módulos fotovoltaicos era de 950 MW e alcançou uma redução de custo para apenas 3,5 dólares por watt. Esses números foram alcançados a partir do conhecimento adquirido sobre as células policristalinas e de película fina (Hamon, 2000). Hoje em dia, como reflexo de mais de setenta anos de desenvolvimento, os módulos solares fotovoltaicos não custam mais do que 0,19 USD por Watts (Statista, 2014).

Paralelamente ao crescimento da energia fotovoltaica, os sistemas de ar condicionado ao longo de toda a sua história têm cumprido com sucesso o objetivo de melhorar a sua eficiência e reduzir os seus custos, embora alterando os objetivos de desenvolvimento, de eficiência e redução de custos para menos agressivos ao meio ambiente, mas não excluindo o primeiro. A primeira máquina moderna capaz de controlar a temperatura e a umidade foi inventada por Willis Carrier em 1903 (Kim, 2007). Quase 27 anos depois, deu-

se início à viabilização do primeiro sistema capaz de ser instalado em casa, devido ao avanço das tecnologias de refrigeração. Em 1947, Henry Galson criou uma versão mais compacta do ar condicionado de janela e conseguiu colocá-lo no mercado sem ter um preço tão elevado (Energy, 2021). Reduzir tamanho e custos e aumentar a eficiência foram os objetivos principais de quase um século de vida do ar condicionado até 1987, quando o Protocolo de Montreal foi assinado, ele estabeleceu uma cooperação internacional entre 140 países para reduzir a emissão de clorofluorcarbonetos (CFCs) e interromper a destruição da camada de ozônio (Protocolo, 1987).

Estudos (IEA, 2021) mostraram que o crescimento das unidades de ar condicionado (AC) quase quadruplicou entre 1990 e 2016. Além dessa grande expansão, o consumo de energia também está crescendo, já que as unidades de AC exigem muito para seu desempenho, embora o avanço tecnológico busque aumentar a eficiência. Por mais que o consumo de energia seja maior quando está mais quente com mais radiação solar, com os painéis solares a conversão de energia também é maior neste caso. Tal como o avanço da tecnologia com a indústria fotovoltaica, os sistemas de ar condicionado parecem ter um futuro muito claro, onde o seu principal objetivo é ser acessível aos países de baixa renda, através da redução de custos e melhor eficiência energética e outro objetivo é a utilização de energias renováveis dentro do sistema (IEA, 2021). Com isso em mente, este artigo tem como objetivo correlacionar o desenvolvimento da energia fotovoltaica e do sistema de ar condicionado através do estudo da implantação de um sistema VRF com condensadores fotovoltaicos híbridos com o objetivo principal de mostrar a redução de custos de energia elétrica e geração de energia limpa, renovável e energia sustentável, sem emissão de poluentes e reduzindo as perdas com transmissão e distribuição e também comparar com indicadores como eficiência energética, TEWI e TWI.

## **2 O SISTEMA DE AR CONDICIONADO FOTOVOLTAICO**

Em edifícios comerciais, um sistema de AVAC-R (Aquecimento, Ventilação, Ar condicionado e Refrigeração) é o maior consumidor de energia, sendo responsável por cerca de 70% (A. K., 2016), por isso mesmo, um sistema híbrido de ar condicionado que utiliza energia renovável como os painéis fotovoltaicos podem ajudar a reduzir essa dependência do sistema elétrico convencional. Existem duas formas de fornecer energia fotovoltaica a um sistema de ar condicionado, a primeira é utilizando o sistema convencional e fotovoltaico separado e a outra é utilizando um sistema híbrido com sistema fotovoltaico incorporado no equipamento de ar condicionado. Normalmente, um sistema fotovoltaico funciona transformando a energia solar em uma energia elétrica com CC e usando um conversor, ele muda a CC para corrente alternada (CA) e alimenta o sistema de ar condicionado. Como o principal componente alimentado por energia é um compressor, que pode operar em CC, mas normalmente não o faz, porque as redes nacionais fornecem apenas CA, uma grande marca de ar condicionado desenvolveu o primeiro ar condicionado alimentado por energia solar sem conversor.

Analisando os equipamentos desenvolvidos, o objetivo deste estudo é comparar os dois sistemas e definir uma metodologia para medi-los. O

equipamento fotovoltaico de corrente contínua direta funciona da seguinte forma: Os componentes fotovoltaicos recebem a energia solar onde esta gera uma corrente contínua que passa por uma caixa fotovoltaica de proteção contra raios e entra em um sistema de gerenciamento inteligente que possui um conversor de corrente unitário e um barramento que conecta o compressor. Este sistema de gerenciamento é capaz de monitorar o sistema e fornecer energia da rede elétrica, pois usa um conversor para isso. Todo o excedente gerado pelo sistema fotovoltaico é devolvido ao sistema de rede. Este sistema pode operar em diferentes condições, dependendo da disponibilidade de energia solar e da demanda do ar condicionado. Ele pode operar em cinco modos:

1. Sendo totalmente abastecido pela rede elétrica;
2. Sendo suprido integralmente por energia solar, quando a potência fotovoltaica gerada for igual à demanda de consumo do condicionador de ar;
3. Sendo fornecido integralmente pela rede elétrica e pela energia solar, conhecida como modo híbrido;
4. Sendo gerador de energia elétrica, quando o ar condicionado é desligado durante a recepção de energia solar no sistema fotovoltaico;
5. Sendo gerador de energia elétrica com o sistema ainda ligado, só ocorre quando a demanda de consumo é inferior à energia fotovoltaica gerada.

Com estas possibilidades, o sistema de ar condicionado consegue trabalhar em todas as épocas do ano, até mesmo havendo uma baixa incidência solar.

### **3 Materiais e métodos**

#### **3.1 Selecionamento da simulação**

Para simular a carga térmica foi considerado uma área climatizada de 110 m<sup>2</sup> e utilizando o software CoolPack da Universidade da Dinamarca, encontrou-se uma necessidade média anual de extração de calor de 22,5 kW o qual será utilizado nos cálculos.

O modelo escolhido para o sistema VRF será um modelo comercial de 8 HP o qual já possui adaptação para o sistema fotovoltaico com a alimentação direto em CC, a sua potência de alimentação é de 5,7 kW e uma capacidade de resfriamento de 22,4 kW. Para simplificar, será utilizado os valores nominais em suas condições especificadas pelo fabricante, já que a intenção deste trabalho é apenas mensurar a alimentação até o compressor e qualquer condição aversa do equipamento durante o ciclo de refrigeração apenas impactará o consumo do compressor e não o sistema fotovoltaico.

#### **3.2 Dimensionamento do sistema fotovoltaico**

O selecionamento do sistema fotovoltaico foi feito utilizando painéis comerciais com as características conforme a tabela abaixo:

Tabela 1 – Características do sistema fotovoltaico

Características do painel	
Tipo	Células de silício policristalino
Células por painel	72 (6x12)
Potência Nominal, em Watt-Pico (Wp)	330 Wp
Tensão máxima de operação (Vmpp)	37,2 V
Tensão de circuito aberto (Voc)	45,6 V
Eficiência do painel	16,97%
Coefficiente de temperatura de circuito aberto (B)	-0,31%/°C
Temperatura máxima de operação (Tmax)	65 °C
Temperatura mínima de operação (Tmin)	0° C
Dimensão (CxLxA)	1960 x 992 x 35mm
Peso	22,4 kg

Fonte: Catalogo do fabricante.

Os módulos serão dispostos lado a lado e fixados devem possuir inclinação de 15° e o afastamento mínimo entre fileiras será de 50 cm, para minimizar o sombreamento de uma fileira sobre outra e permitir a circulação entre elas em caso de limpeza e de manutenção.

### 3.2.1 Cálculo da quantidade de strings

Para a capacidade de simulação será utilizado um módulo condensador de 8HP (22,4kW), sendo que esse módulo condensador possui um inversor de frequência de 12,5 kW e 2 strings de conexão. A equação para determinar o número de strings é (Fabricante, 2018):

$$\frac{U_{DCmpp\ min}}{V_{mpp} \cdot (1+B \cdot (T_{max}-25))} \leq Q \leq \frac{U_{DCmpp\ min}}{V_{mpp} \cdot (1+B \cdot (T_{min}-25))} \quad (1)$$

Sendo que:

- Q = Quantidade de painéis;
- $U_{DCmpp\ min}$  é a tensão de MPPT (Maximum Power Point Tracking) do inversor.

As especificações do inversor são (Fabricante, 2018):

Tabela 2 – Especificações do inversor

Especificações	Potência inversor 12,5 kW
Máxima Tensão de circuito aberto	1000 V
Tensão de operação ideal	730 A

Máxima corrente de entrada	28 A
Faixa de operação MPPT ( $U_{DCmpp\ min\sim\max}$ )	510~850 Vcc
Tensão de entrada AC mínima	323 Vcc
Frequência	59~61 Hz
Eficiência	97,60%

Fonte: Guia rápido do fabricante.

Substituindo os valores da tabela 2 e utilizando a equação (1), tem-se que a quantidade mínima e máxima de painéis é de:

$$16 \leq Q \leq 21 \quad (2)$$

Considerando a potência máxima do inversor de 12,5 kW, a potência nominal dos painéis de 330 Wp e 2 strings, é relacionada a quantidade máxima de painéis sendo:

$$\frac{12500\text{ W}}{330\text{ Wp} \cdot 2\text{ strings}} = 18,9\text{ painéis} \quad (3)$$

Sendo assim, a quantidade de painéis recomendado para que não ultrapasse os limites calculados acima é de 18 painéis por string. Então, multiplicando este número pela quantidade de string, tem-se um total de 36 painéis fotovoltaicos de 330 Wp cada.

### 3.2.2 Energia solar em Curitiba

Segundo o Mapa Solar da Copel no Paraná, obtêm-se os valores de radiação solar em um determinado ponto dentro do estado, em kWh/m<sup>2</sup>. Escolhendo um ponto no centro de Curitiba, o valor anual de radiação solar anual é de 50,70 kWh/m<sup>2</sup>. Portanto, o sistema com 36 painéis somados utilizará 11,88 kWp, a área necessária será de aproximadamente 75 m<sup>2</sup> e com estes dados do Mapa Solar, associado a calculadora solar da Copel e a eficiência das placas, a produção anual para este sistema será de 13.492,80 kWh/ano.

### 3.3 EER e IEER

Na indústria de AVAC-R, os termos EER (Energy Efficiency Ratio) e IEER (Integrated Energy Efficiency Ratio) são usados para indicar o nível de eficiência energética de um sistema, a diferença básica entre as duas siglas é que uma é a proporção integrada e a outra não.

Porém, antes de falar de IEER se faz necessário entender o EER. Ele é a relação entre a capacidade de refrigeração de um equipamento de ar-condicionado em kW e o consumo de energia elétrica total em kW e indica a eficiência de um sistema em capacidade de carga de pico (ou seja, em carga de 100%) nas condições de referência da ISO 5151. No entanto, uma carga total representa apenas cerca de 2% das horas de operação de um determinado equipamento em uma aplicação de resfriamento de conforto normal. Devido a essa limitação foi desenvolvido o IEER para abordar a

eficiência real de equipamentos de ar-condicionado que operam em diferentes níveis de carga, como é o caso do VRF. Esse índice leva em consideração as eficiências de carga totais e parciais com a ponderação dos valores de EER em diferentes cargas de capacidades (100%, 75%, 50% e 25%) e também com diferentes temperaturas externa de bulbo seco (35°C, 27,5°C, 20°C e 18,3°C respectivamente) de acordo com a AHRI Standard 1230:2014. Os pesos do IEER, em W/W, na fórmula abaixo demonstrada são baseados no número aproximado de horas que uma unidade gasta em cada ponto de carga ao longo de sua vida.

$$IEER=(0,02\cdot A)+(0,617\cdot B)+(0,238\cdot C)+(0,125\cdot D) \quad (4)$$

Onde:

- A = EER em 100% de carga e temperatura externa de 35°C;
- B = EER em 75% de carga e temperatura externa de 27,5°C;
- C = EER em 50% de carga e temperatura externa de 20°C;
- D = EER em 25% de carga e temperatura externa de 18,3°C;

Porém, no Brasil ainda não há programa de etiquetagem de equipamentos VRF com a obrigatoriedade de informar os índices IEER, sendo assim é muito difícil obter com os fabricantes estes números e ainda mais difícil conseguir os índices EER em cargas parciais para podermos fazer o cálculo do IEER, neste caso será utilizado conforme dito anteriormente uma carga térmica de 22,5 kW e conforme indicado na ASHRAE 90.1-2019 um sistema VRF para esta carga térmica tem o IEER igual a 4,54 kW/kW e conforme estipulado na portaria 234 de 2020, a Consumo de Energia Anual é calculado conforme a norma ISO 16358-1:2013 e leva em consideração o Índice de Desempenho de Resfriamento Sazonal (IDRS) e leva em consideração a distribuição bin de temperatura, conforme a tabela abaixo:

Tabela 3 – Distribuição dos bins de temperatura

Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Total
Temp. ext (°C)	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	-
Horas (h)	130	167	231	271	253	226	189	149	128	111	84	60	38	22	12	5	3	1	2080

Fonte: Portaria Nº 234 de 2020.

É adotado 2080 horas de funcionamento do equipamento. Este valor de horas ativas é o aproveitamento do IDRS e pode variar em cada cidade. O equacionamento do consumo anual é dado pela seguinte forma:

$$\text{Consumo anual} = \frac{\text{Média anual de carga térmica}}{IEER} * \text{Horas funcionamento anual} \quad (5)$$

Sendo:

- Consumo Anual em kW/ano;
- Média anual de carga térmica, em kW;
- IEER, conforme citado acima, em W/W;

- Horas de funcionamento anual, em hora/ano.

Substituindo com os valores mencionados acima, têm-se um consumo anual sendo de 10308,37 kWh/ano. Em termos de comparação se fosse fazer esse exemplo para um equipamento que operasse em plena carga em todos os momentos, ou seja, com EER em 100% da carga com um valor conforme a ASHRAE 90.1-2019 é de 3,28 kW/kW, tem-se:

$$\text{Consumo anual} = \frac{\text{Média anual de carga térmica}}{\text{EER em 100\% da carga}} \cdot \text{Horas de funcionamento Anual} \quad (6)$$

Consumo Anual =  $(22,5 \text{ kW} / 3,28 \text{ kW/kW}) \times 2080 \text{ h/ano} = 14268,3 \text{ kWh/ano}$   
 Esses números demonstram duas importantes conclusões, a primeira é que comprova que um sistema VRF com variação de velocidade é cerca de 40% mais eficiente que um sistema VRF fixo sem variação de velocidade e a segunda é que o IEER o índice mais indicado para poder medir sistemas de AVAC-R com variação de velocidade, visto que é um erro analisar somente o EER já que o mesmo não leva em consideração as variações de cargas durante a operação do equipamento.

Sabendo que a estimativa do sistema fotovoltaico é de 13.492,80 kWh/ano, pode-se dizer que o sistema fotovoltaico com os 75 m<sup>2</sup> de placas gerará quase 95% da energia necessária por ano.

### 3.4 TEWI

O Total Equivalent Warming Impact (TEWI) é o coeficiente que indica o impacto das emissões gasosas de um equipamento em relação ao seu Global Warming Potential (GWP) que varia conforme o gás refrigerante utilizado. O TEWI pode ser calculado pela seguinte equação (Santos et al, 2021):

$$\text{TEWI} = \text{GWP (emissão direta, vazamento de gás incluindo o fim da vida)} + \text{GWP (emissão indireta, operação)} \quad (7)$$

A equação acima é a soma de duas partes, onde a primeira equivale as emissões diretas de gás, conforme o funcionamento do equipamento e a dispersão no fim da vida, já a segunda parte equivale a emissão indireta, correlacionando o impacto das emissões de CO<sub>2</sub> referente a geração de energia elétrica através de combustíveis fósseis. De uma forma mais direta pode ser equacionada na seguinte forma:

$$\text{TEWI} = (\text{GWP} \cdot V_{\text{anual}} \cdot n) + \text{GWP} \cdot C \cdot (1 - \alpha) + (E_{\text{anual}} \cdot \beta \cdot n) \quad (8)$$

Sendo que:

- GWP = Global Warming Potencial do gás refrigerante, em relação ao CO<sub>2</sub>, considerado em 2088 para R410A;
- V<sub>anual</sub> = Vazamento anual de gás, em kg, considerado em 0,125 kg;
- n = tempo de operação do sistema, em anos, assumindo 15 anos;
- C = Carga de gás refrigerante, em kg, sendo 9 kg;
- α = Fator de reciclagem, de 0 a 1, considerado em 0,7;
- E<sub>anual</sub> = Consumo energético por ano, em kWh;

- $\beta$  = Fator de emissão indireta, em kg CO<sub>2</sub>/kWh, no Brasil é de 0,088 kg CO<sub>2</sub>/kWh.

### 3.4.1 o TEWI para o sistema sem alimentação fotovoltaica

Conforme calculado na equação (6) o consumo energético anual é de 14268,3 kWh/ano. Com isto e os outros valores acima mencionados, calcula-se o TEWI direto e indireto:

- Direto  
Direto =  $(2088 \cdot 0,125 \cdot 9 \cdot 15) + (9 \cdot 0,3 \cdot 2088) = 40872,6$  kg CO<sub>2</sub> em 15 anos (9)

- Indireto  
Indireto =  $(14268,3 \cdot 15 \cdot 0,088) = 18834,16$  kg CO<sub>2</sub> em 15 anos (10)

Com isto, temos que o TEWI para o sistema sem energia solar é de 59706,76 kg CO<sub>2</sub> em 15 anos.

### 3.4.2 o TEWI para o sistema fotovoltaico

Como 95% de toda a energia para alimentar o sistema será proveniente do sol, apenas 5% será fornecido pela concessionária, sendo então igual a 775,5 kWh/ano. Então:

- Direto  
Direto =  $(2088 \cdot 0,125 \cdot 9 \cdot 15) + (9 \cdot 0,3 \cdot 2088) = 40872,6$  kg CO<sub>2</sub> em 15 anos (11)

- Indireto  
Indireto =  $(775,5 \cdot 15 \cdot 0,088) = 1023,66$  kg CO<sub>2</sub> em 15 anos (12)

Logo, o TEWI direto do sistema solar e não solar não tem diferença. Mas no total o solar tem um TEWI de 41896,26 kg CO<sub>2</sub> em 15 anos.

### 3.5 TWI

O *Total Water Impact* é a quantidade de água necessária durante todo o período de vida útil do equipamento de ar condicionado, de forma holística, devido à análise do consumo de água da torre de arrefecimento e o consumo de água para a energia dispendida na alimentação de energia elétrica (Santos et al, 2020). O TWI é equacionado conforme abaixo:

$$TWI = (ATL \cdot NPLV \cdot ELS \cdot RRW) + (ATL \cdot ELS \cdot WUTR) \quad (13)$$

Sendo:

- TWI = Total Water impact, em m<sup>3</sup>;
- ATL = Carga térmica anual, em TR/ano;
- NPLV = eficiência de carga não padrão, em kW/TR, considerada 0,775 kW/TR conforme trabalho referenciado;
- ELS = Vida útil do equipamento, em ano;
- RRW = Relação entre o volume de água por kW, em m<sup>3</sup>/kW;
- WUTR = Água usada por TR, em m<sup>3</sup>/h.

Sendo que a segunda parte desta equação (ATL·ELS·WUTR) apenas existe quando o sistema possui condensação a ar, o qual não é o caso deste estudo.

O resultado será todo o impacto gerado pelo uso de água de uma forma holística durante o período de vida útil do sistema.

### 3.5.1 o TWI para o sistema sem alimentação fotovoltaica

O RRW para o sistema sem alimentação fotovoltaica é (Santos et al, 2020) de 11 litros/kWh, devido ao Brasil ser majoritariamente produtor de energia via hidrelétrica. Com isto, o TWI será:

$$TWI = 13310,58 \cdot 0,775 \cdot 15 \cdot 11 = 1702090,42 \text{ litros a cada 15 anos.} \quad (14)$$

### 3.5.2 o TWI para o sistema de ar condicionado fotovoltaico

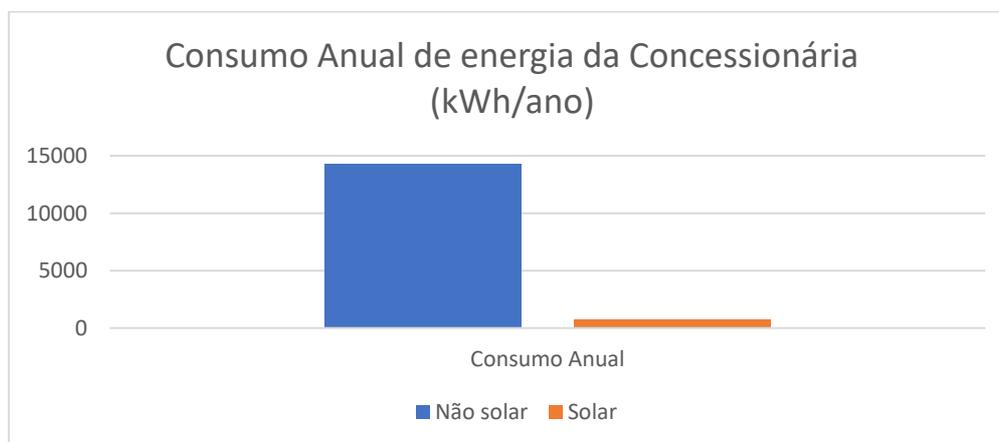
Como apenas 5% da energia do sistema será da concessionária, o RRW é reduzido na mesma proporção, ficando em 0,59 litros/kWh. Então, o TWI para o sistema com energia solar será de:

$$TWI = 13310,58 \cdot 0,775 \cdot 15 \cdot 0,59 = 91293,94 \text{ litros a cada 15 anos.} \quad (15)$$

## 4 ANÁLISE E RESULTADOS

Comparando os dois sistemas: O sistema de ar condicionado alimentado por painéis fotovoltaicos e o sistema alimentado normalmente via energia da concessionária, a primeira diferença é o consumo anual destes dois sistemas:

Gráfico 1 – Diferença entre os consumos dos sistemas

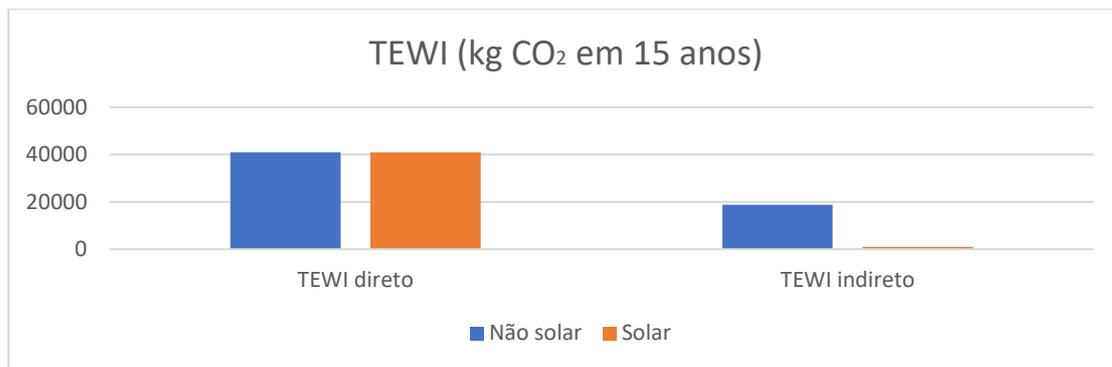


Fonte: Elaborado pelos autores.

Considerando a tarifa da Copel (Copel, 2021) que precifica o na modalidade tarifária convencional em 0,51761 R\$/kWh, a utilização do sistema fotovoltaico renderia uma economia de R\$ 6984,01 ao ano.

Em relação aos impactos ambientais, a utilização da energia renovável e limpa é superior, conforme mostrado no gráfico abaixo:

Gráfico 2 – TEWI dos dois sistemas

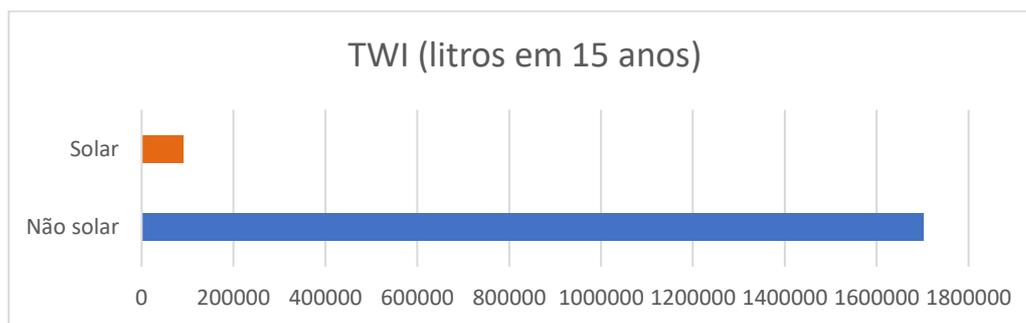


Fonte: Elaborado pelos autores.

O TEWI direto é igual para ambos sistemas, pois apenas considera o dimensionamento e escolha do fluido refrigerante do sistema, o que não é alterado pela escolha de uma fonte de energia sustentável e renovável, porém no indireto do solar há uma expressiva diferença, sendo 5,43% do valor do TEWI indireto para o sistema não solar.

Em relação ao TWI, a energia solar se mostra mais sustentável de acordo com o gráfico abaixo:

Gráfico 3 – TWI dos dois sistemas



Fonte: Elaborado pelos autores.

Estes valores são conforme a matriz energética brasileira, a qual possui um grande número de usinas hidrelétricas. A diferença entre o sistema fotovoltaico e não fotovoltaico é uma economia de cerca de 1.610.796,48 litros em 15 anos de utilização do equipamento.

## 5 CONCLUSÃO

Quando se trata de ar-condicionado, fala-se do equipamento que consome em média 70% de energia elétrica em um prédio comercial, com isto, a utilização de energias limpas, renováveis e sustentáveis, no sistema de ar condicionado impactará de forma muito positiva para o meio ambiente. Uma das fontes que mais vêm se desenvolvendo e se tornando viável é a energia solar, proveniente dos raios do sol, onde sua utilização com o ar condicionado é extremamente benéfica, já que quando há maior consumo do sistema, é no momento de maior incidência solar. A vantagem de utilizar especificamente com o ar condicionado é que o equipamento que gera a energia solar pode alimentar todo o sistema de resfriamento num mesmo tipo de corrente, não necessitando do uso de inversores o que ocasiona numa melhor eficiência do sistema.

Os principais indicadores de sustentabilidade como o TEWI e o TWI, mostram que a diferença no impacto ambiental é até 18 vezes menor quando utilizada a energia solar, diminuindo problemas como o efeito estufa de uma maneira muito mais acelerada. Já com os indicadores de sustentabilidade para a água, no qual é um ativo de extrema importância e necessita de uma conscientização para diminuir o desperdício, também se mostra muito vantajoso com o uso dos painéis fotovoltaicos.

Apesar de ser um sistema com muitos benefícios, ainda não é muito empregada, devido ao seu custo inicial, que possui um retorno relativamente rápido, porém, com um maior avanço da preocupação do meio ambiente e os seus recursos, como a água, acontecerá uma maior procura para esta fonte de energia que é tão saudável para o meio ambiente.

## REFERÊNCIAS

- A. K. V.S.K.V. Harishn, "A review on modeling and simulation of building energy systems," Elsevier, 2016.
- AHRI Standard 1230:2014 - Performance Rating of Variable Refrigerant Flow (VRF) Multi-split Air conditioning and Heat Pump Equipment.
- Copel. Tarifa Copel. <https://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Ftarifas%2Fpagcopel2.nsf%2Fverdocatual%2F23BF37E67261209C03257488005939EB> Acessado em 22/05/2021.
- Copel. Mapa solar do Estado do Paraná. <https://solar.copel.com/solar/> Acessado em 21/05/2021.
- EERE. The History of Solar. Available at [https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar\\_timeline.pdf](https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf). Accessed on 24/02/2021.
- ENERGY. History of Air Conditioning. Available at <https://www.energy.gov/articles/history-air-conditioning>. Accessed on 08/03/2021.
- FRAAS, M. Louis (2015). Low-cost Solar Electric Power. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-07530-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-07530-3_1).
- HARMON, Christopher (2000). Experience Curves of Photovoltaic Technology. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. The Future of Cooling. Opportunities for energy-efficient air conditioning. 2021.
- ISO 5151 - Non-ducted air conditioners and heat pumps - Testing and rating for performance
- KIM, Tanzer, Rafael L. (2007). The green braid: towards an architecture of ecology, economy and equity.
- NASA. Nimbus: NASA Remembers First Earth Observations. Available at <https://www.nasa.gov/content/goddard/nimbus-nasa-remembers-first-earth-observations> Accessed on 24/02/2021.
- Perlín, John (2004). The Silicon Solar Cell Turns 50, National Renewable Energy Laboratory.
- Protocol, M. (1987). Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer. Washington, DC: US Government Printing Office, 26, 128-136.
- Santos, A.F.; Gaspar, P.D.; de Souza, H.J.L. Ecoenergetic Comparison of HVAC Systems in Data Centers. Climate 2021, 9, 42. <https://doi.org/10.3390/cli9030042>
- Santos, A.F.; Gaspar, P.D.; de Souza, H.J.L. New HVAC Sustainability Index – TWI (Total Water Impact). Energies 2020.
- SHAH, Arvind, et al (1999). Photovoltaic Technology: The Case for Thin-Film Solar Cells. Published in Science 285, issue 5428, 692-698, 1999.
- STATISTA. Quarterly prices of solar photovoltaic multi modules in the United States. Available at <https://www.statista.com/statistics/216791/price-for-photovoltaic-cells-and-modules/>. Accessed on 01/03/2021.
- WILSON, M. Gregory, et al (2020). Journal of Physics D: Applied Physics. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab9c6a>.