

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

São Paulo Expo - 10 a 13 de setembro de 2019

ANÁLISE TÉCNICA E FINANCEIRA DE SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO ALIMENTADOS ATRAVÉS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: UMA CARACTERIZAÇÃO DAS REGIÕES BRASILEIRAS

Gustavo de Novaes Pires Leite; Alvaro Antonio Villa Ochoa; Franciele Weschenfelder; Alex Maurício Araújo;

RESUMO

A variabilidade nos custos de eletricidade impõe incertezas no fluxo de caixa futuro das empresas. Os sistemas de climatização são as maiores demandas de energia no setor residencial e comercial, principalmente em regiões tropicais com elevadas temperaturas ao longo de todo ano. A fim de mitigar essa variabilidade, este trabalho vem apresentar uma análise técnica e financeira de um sistema de climatização conectado à rede elétrica, utilizando energia solar fotovoltaica. O estudo é feito em cidades das cinco regiões do Brasil e levando em consideração parâmetros técnicos e ambientais, como: temperatura média anual, eficiência dos sistemas de climatização e níveis de irradiação solar. Dois sistemas de ar condicionado foram utilizados, VRF e chillers. Um modelo matemático, baseado no método de Monte Carlo, foi desenvolvido para, a partir das variáveis de entrada, estimar os indicadores de viabilidade financeiros como valor presente líquido, taxa interna de retorno e período de payback, considerando os dois tipos de sistemas de climatização e as cinco cidades. Os resultados indicam que há viabilidade técnica e econômica em todos os casos estudados e que a utilização do modelo matemático desenvolvido é uma ferramenta importante para auxiliar os gestores na toma de decisões para o investimento nesses sistemas.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica. Eficiência energética. VRF. Chiller. Análise financeira.

ABSTRACT

The variability in electricity costs imposes uncertainties on the future cash flow of companies. Air conditioning systems are the most substantial energy demands in residential and commercial sectors, especially in tropical regions with high temperatures throughout the year. In order to mitigate this variability, this work presents a technical and financial analysis of air conditioning systems connected to the electric grid fed with photovoltaic solar energy. The study is carried out in cities of the five regions of Brazil and considers technical and environmental parameters, such as annual average temperature, the efficiency of air conditioning systems and solar irradiation levels. Two types of air conditioning systems (VRF and chillers) were used in the study. A mathematical model, based on the Monte Carlo method, was developed to estimate financial viability indicators, such as net present value, internal rate of return and payback period, considering the two types of air conditioning systems and the five cities. The results indicate that there is technical and economic feasibility in all the cases studied and that the use of the developed mathematical model is a valuable tool to assist the managers in the decision-making process for the investment in these systems.

Keywords: Photovoltaic solar energy. Energy efficiency. VRF. Chiller. Financial analysis

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de climatização são extremamente necessários para a vida moderna (JASON M.Y. TSE; PHILLIP JONES, 2019). O que era antes um sinônimo de luxo, atualmente representa um meio de promoção da qualidade do ar interior dos ambientes (GONÇALVES et al., 2018; WEI; RAMALHO; MANDIN, 2015). Fato esse em acordo com a legislação vigente no Brasil, mas também representa um instrumento de melhoria de performance das empresas, já que o desempenho das pessoas está intimamente ligado à percepção do conforto que elas sentem (KELLY; FUSSELL, 2019; SANT'ANNA et al., 2018). Neste contexto, SANT'ANNA et al. (2018) apresentaram um estudo comparativo da percepção do usuário em função da qualidade do ar interno e sua influência com a satisfação corporativa em edificações.

Esses sistemas representam também as maiores demandas energéticas nas edificações residenciais e comerciais (OCHOA et al., 2016; SILVA et al., 2019). No estudo apresentado por Pérez-Lombard, Ortiz e Pout (2008) foi mostrado que o consumo dos sistemas de climatização atinge índices superiores a 40% para escritórios, hotéis e lojas de departamento, e a 30% em hospitais. Esse nível elevado exige um maior gerenciamento do consumo de energia referente à operação desses equipamentos.

Uma tendência atual é a busca por edificações Net-Zero (ARROYO et al., 2016; GOOD; ANDRESEN; HESTNES, 2015; MARSZAL et al., 2011). Esse é um importante conceito que vem sendo investigado e implementado a fim de se reduzir a emissão de gases que contribuem para o efeito estufa. Nesse tipo de edificações, tudo que é consumido é gerado na própria edificação ao longo do tempo. Nesse âmbito, a energia solar fotovoltaica tem papel fundamental nos centros urbanos (RÜTHER, RICARDO; SALAMONI, 2011).

A energia solar fotovoltaica representa uma fonte abundante de energia em todo mundo, mas sobretudo em países de clima temperado, como o Brasil (DUCK et al., 2018; LIMA et al., 2015). Entretanto, devido a sua dimensão continental, é necessário investigar a viabilidade técnica e econômica da utilização dessa importante fonte em regiões com diferentes características (ASSOULINE; MOHAJERI; SCARTEZZINI, 2017).

Dessa forma, com relação ao fornecimento de energia aos edifícios, uma possível opção viável é a utilização de energia solar fotovoltaica para o acionamento de sistemas de climatização (NOVAES PIRES LEITE et al., 2019) e inclusive para a geração de eletricidade e produção de água quente (CAVALCANTE; DOS SANTOS; OCHOA, 2017).

Esse artigo visa investigar a viabilidade técnica e econômica da utilização de sistemas de geração de energia solar fotovoltaica, fornecendo energia para sistemas de climatização em cinco diferentes cidades do Brasil. As diferentes condições são avaliadas, sobretudo, através de duas grandezas, a primeira com relação à temperatura média local, que tem impacto sobre o desempenho dos sistemas de climatização e também sobre os sistemas de

energia fotovoltaica. A segunda com relação aos índices de irradiação, fontes de energia dos sistemas de energia solar.

2 LEVANTAMENTO DE DADOS E MÉTODOS

Essa seção apresenta os dados utilizados no presente estudo, assim como os métodos empregados para análise. Inicialmente são apresentados o recurso solar brasileiro e os valores utilizados para as cidades escolhidas para o presente estudo e, em seguida, os sistemas de climatização empregados.

2.10 recurso solar

O Brasil é um dos países no mundo com maiores índices de radiação solar, por se localizar próximo à linha do Equador. A energia solar vem ocupando posição de destaque nos últimos anos em função da atenção que o setor elétrico vem dando a fonte. No ano de 2017 o país instalou 0,9 GW de potência solar fotovoltaica e ocupa a 10° posição entre os países que mais instalaram energia solar no ano de 2017.

A Figura 1 apresenta o atlas solar brasileiro (CHIGUERU; FRAIDENRAICH, 2000) com um marcador indicando as cidades estudadas no presente trabalho: Belém, Recife, São Paulo, Goiânia e Porto Alegre.

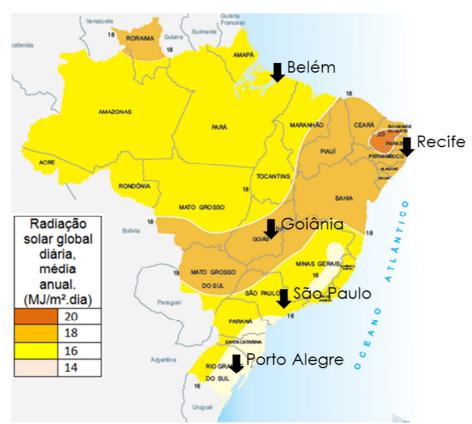


Figura 1 – Atlas solar brasileiro

Fonte: Adaptado de (CHIGUERU; FRAIDENRAICH, 2000)

O Quadro 1 apresenta as características de temperatura, radiação solar e

dos sistemas fotovoltaicos projetados para alimentar 100% da energia requerida pelos sistemas de climatização ao longo do ano.

Quadro 1 – Características de temperatura, radiação solar e dos sistemas de geração solar fotovoltaica nas cinco cidades estudadas no presente estudo

	Recife	São Paulo	Porto Alegre	Belém	Goiânia
Temperatura média [°C]	27,2	20,0	20,2	26,9	22,6
Radiação global [kW/m².ano]	1994,6	1442,9	1667,0	1845,3	1909,0
Módulo fotovoltaico	Canadian Solar, 380 W, silício monocristalino				
Inversor	ABB, 10 kW				
Inclinação do sistema [°]	8	24	30	5	15

Fonte: O autor.

2.2 Os sistemas de climatização

Dois diferentes tipos de sistemas centrais de climatização foram utilizados no presente trabalho: variable refrigerant flow (VRF) e chiller. O objetivo de se utilizar dois sistemas foi justamente comparar a combinação de variáveis mais importantes para as diferentes condições ambientais presentes nas cinco cidades ora estudadas. O Quadro 2 apresenta as características consideradas para os sistemas de climatização.

Quadro 2 – Características dos sistemas de climatização e energéticas

	Recife	São Paulo	Porto Alegre	Belém	Goiânia
Caso	01	03	05	07	09
Tipo de sistema	VRF	VRF	VRF	VRF	VRF
kW/TR	1,20	1,10	1,10	1,20	1,15
Número de painéis	176	208	180	192	165
Custo de instalação – sistema solar	R\$ 218.152	R\$ 257.815	R\$ 223.109	R\$ 237.983	R\$ 204.517
Custo de instalação – sistema de climatização	R\$ 500.000	R\$ 500.000	R\$ 500.000	R\$ 500.000	R\$ 500.000
Caso	02	04	06	08	10
Tipo de sistema	Chiller	Chiller	Chiller	Chiller	Chiller
kW/TR	0,95	0,85	0,85	0,95	0,90
Número de painéis	144	160	135	154	128
Custo de instalação – sistema solar	R\$ 178.488	R\$ 198.320	R\$ 167.332	R\$ 190.882	R\$ 158.655
Custo de instalação – sistema de climatização	R\$ 800.000	R\$ 800.000	R\$ 800.000	R\$ 800.000	R\$ 800.000

Fonte: O autor

2.3 O sistema de Net Metering no Brasil

A resolução 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regulamentou no Brasil a opção de os consumidores produzirem sua própria

energia sob o regime conhecido como *net metering*. Nesse regime, no final do período de contabilização do consumo, a energia consumida é abatida do que foi gerado no mesmo período e o consumidor paga apenas a diferença entre o que foi gerado e o que foi consumido. Em países como a Alemanha os consumidores são incentivados a produzirem mais do que consumem e quando isso acontece, são remunerados. A Figura 2 apresenta um esquema do regime *net metering*. Esse foi o regime adotado para a modelagem do presente estudo.

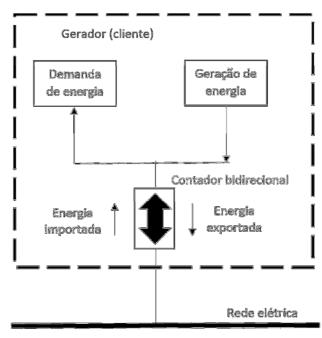


Figura 2 – Esquema do regime net metering

Fonte: (NOVAES PIRES LEITE et al., 2019)

3 MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático ora proposto é representado pelo fluxo de caixa formado pela economia gerada pela utilização de um sistema de geração solar fotovoltaica para suprir energia para um sistema de climatização de 50TR.

A Figura 3 apresenta o modelo matemático utilizado no presente trabalho. Inicialmente é definida a localização do sistema de climatização. Foram consideradas cinco cidades com diferentes características conforme apresentado no Quadro 1. Em seguida, definido o tamanho do sistema de climatização, que no presente trabalho foi sempre considerado fixo em 50TR, é calculado o consumo de energia de cada sistema de climatização, no presente caso VRF e Chiller, sem o sistema de energia solar. Paralelamente, é dimensionado o sistema solar, para cada tipo de sistema e em cada cidade, e verificado a relação geração-consumo para cada caso estudado. Finalmente, os dois cenários são então comparados e, a partir do fluxo de caixa gerado, são calculados os índices financeiros taxa interna de retorno (TIR), valor presente líquido (VPL) e período de payback.

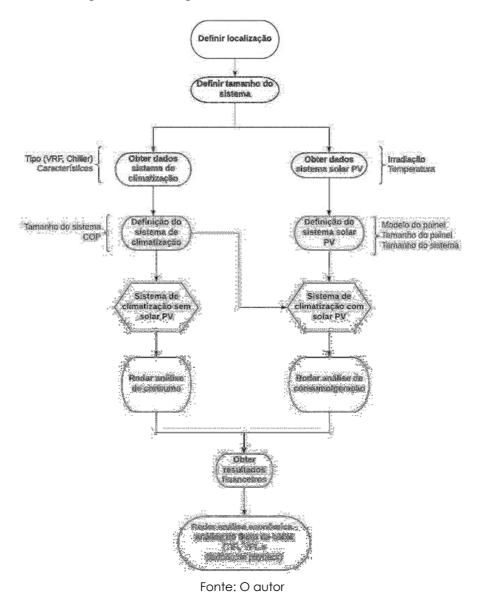


Figura 3 – Fluxograma do modelo matemático

O cálculo da energia consumida pelo sistema de climatização é feito através da equação (1).

$$E_{HVAC} = C_{HVAC} \frac{1}{COP} \text{ UI h}$$
 (1)

onde C_{HVAC} é a potência do sistema de climatização em [TR], COP representa o coeficiente de potência em $\left[\frac{TR}{kW}\right]$, UI é o fator de utilização, 70% no presente estudo, que representa o percentual de tempo que o sistema de climatização funciona em um determinado número de horas, h, no presente estudo, 2640 horas/ano.

Para o dimensionamento do sistema solar fotovoltaico para cada caso estudado foi utilizado o software PVSyst¹. Para o cálculo da energia gerada pelo sistema solar fotovoltaico é utilizada a equação (2).

$$E_{PV} = I_p \, \eta_{mod} \, \eta_{sist} \, A \, N_{mod} \, degrad$$
 (2)

onde I_p representa o nível de radiação no painel em $\left[\frac{kWh}{m^2.year}\right]$, η_{mod} e η_{sist} representam a eficiência do módulo e do sistema, 19,5% e 80%, respectivamente. A, representa a área do módulo, 2 m², N_{mod} o número de módulos e degrad a degradação anual do módulo, que no presente caso foi considerado em 0,7%.

Finalmente, o fluxo de caixa é calculado é encontrado através da equação (3).

$$FC_{i} = (CI_{i} + CO_{i} + CE_{i})_{semPV} - (CI_{i} + CO_{i} + CE_{i})_{comPV}$$
(3)

onde FC_i representa o fluxo de caixa para o ano i, CI, CO, CE, representam, respectivamente, o custo de instalação, o custo de operação e manutenção e os custos de energia para cada ano, i, e para o sistema sem sistema solar e com sistema solar.

A fim de não fazer um estudo apenas estático para os premissas das variáveis de entrada conforme Quadro 1 e Quadro 2, foi utilizado o método de Monte Carlo² para a escolha aleatória das variáveis que não são constantes, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 – Faixa de variação das variáveis de entrada

Variável de entrada	Faixa de variação
Eficiência do Sistema de climatização	[-20%, +20%]
Radiação solar	[-15%, +15%]
Eficiência do painel solar	[-15%, +15%]
Tarifa de energia	[-15%, +15%]
Ajuste anual da tarifa de energia	[-15%, +15%]
Custo de instalação do Sistema de climatização	[-15%, +15%]
Custo de instalação do Sistema solar	[-15%, +15%]
Custo de operação e manutenção do sistema de climatização	[-15%, +15%]
Custo de operação e manutenção do sistema solar	[-15%, +15%]

Fonte: O autor

Dessa forma, para cada um dos dez casos, foram sorteados 550.000 valores dentro da faixa de cada variável, e, assim, são computados 555.000 fluxos de caixa e, consequemente os valores de TIR, VPL e período de payback.

¹http://www.pvsyst.com/. Accessado em 21 de abril de 2019.

² https://en.wikipedia.org/wiki/Monte Carlo method. Acessado em 22 de abril de 2019.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Quadro 4 apresenta um resumo dos resultados para a taxa interna de retorno para os 555.000 cenários para cada caso estudado. Com relação a TIR é possível se verificar que 15,3% foi a menor taxa encontrada, o que certamente se encontra em patamares bem atrativos para um investimento no Brasil. Apenas como referência, o investimento atual no Tesouro Direto³ prefixado 2025 renderia 8,72%. No quadro é possível verificar-se ainda que as cidades que apresentam as melhores taxas de retorno são as cidades com as temperaturas mais elevadas.

Quadro 4 – Resultados TIR

	Recife	São Paulo	Porto Alegre	Belém	Goiânia
Caso	01	03	05	07	09
Mínimo	19,8%	16,0%	19,0%	22,2%	21,1%
Médio	30,5%	24,4%	28,9%	33,9%	32,5%
Máximo	45,1%	35,1%	42,4%	49,6%	47,9%
Caso	02	04	06	08	10
Mínimo	19,6%	15,3%	18,0%	21,7%	20,7%
Médio	29,9%	23,8%	28,1%	33,3%	31,6%
Máximo	44,6%	34,7%	41,7%	49,5%	46,7%

Fonte: O autor

O Quadro 5 apresenta os resultados para os casos para o índice valor presente líquido. Considerando-se a relação VPL/valor investido tem-se valores desde 3,29 para o caso 04 e 5,69 para o caso 07. No presente caso, o valor investido representa o custo de instalação do sistema solar fotovoltaico, e pode-se observar com o índices que pelo menos três vezes o valor do investimento retorna como VPL.

Quadro 5 – Resultados VPL

	Recife	São Paulo	Porto Alegre	Belém	Goiânia
Caso	01	03	05	07	09
Mínimo	R\$ 522.562	R\$ 397.917	R\$ 488.433	R\$ 692.869	R\$ 559.507
Médio	R\$ 1.067.580	R\$ 872.889	R\$ 1.003.000	R\$ 1.355.210	R\$ 1.101.483
Máximo	R\$ 1.805.744	R\$ 1.531.171	R\$ 1.718.284	R\$ 2.236.550	R\$ 1.848.860
Caso	02	04	06	08	10
Mínimo	R\$ 424.083	R\$ 276.020	R\$ 341.077	R\$ 545.724	R\$ 415.173
Médio	R\$ 858.596	R\$ 652.891	R\$ 732.722	R\$ 1.072.482	R\$ 836.481
Máximo	R\$ 1.480.714	R\$ 1.170.454	R\$ 1.260.113	R\$ 1.808.908	R\$ 1.417.814

Fonte: O autor

³ http://www.tesouro.fazenda.gov.br/tesouro-direto-calculadora . Acessado em 22 de abril de 2019.

O Quadro 6 apresenta o sumário dos resultados para o período de payback para os casos estudados. Pode-se observar que, na situação mais desfavorável, na média, o período encontrado foi de 5,38 anos, para o caso 04, enquanto que, na situação mais viável encontra-se 3,87 anos.

Quadro 6 – Resultados período de payback (em anos)

	Recife	São Paulo	Porto Alegre	Belém	Goiânia
Caso	01	03	05	07	09
Mínimo	2,57	3,38	2,76	2,30	2,38
Médio	4,01	5,18	4,27	3,55	3,73
Máximo	6,25	7,97	6,59	5,46	5,83
Caso	02	04	06	08	10
Mínimo	2,61	3,48	2,82	2,32	2,47
Médio	4,12	5,38	4,44	3,63	3,87
Máximo	6,41	8,44	7,03	5,63	6,03

Fonte: O autor

Os Quadro 4, Quadro 5 e Quadro 6 apontam claramente para a viabilidade tecnico-econômica de todos os casos ora estudados. A Figura 4 apresenta graficamente um resumo de todos os resultados médios encontrados, conforme apresentados nos Quadro 4, Quadro 5 e Quadro 6. No gráfico, a barra em laranja apresenta o VPL médio para os casos estudados, a linha tracejada em vermelho apresenta a TIR e a linha tracejada-pontilhada em cinza apresenta o período de payback.

Pode ser observado claramente que todos os casos apresentam viabilidade econômica para a utilização de energia solar fotovoltaica para fornecimento da energia demanda por sistemas de climatização, uma vez que o VPL é bastante positivo, a TIR, acima de 23% está bem acima dos retornos dos investimentos encontrados no mercado financeiro e o período de payback médio de no máximo 5,4 anos é bastante atrativo para o investimento em um bem durável, como uma planta de geração solar fotovoltaica.

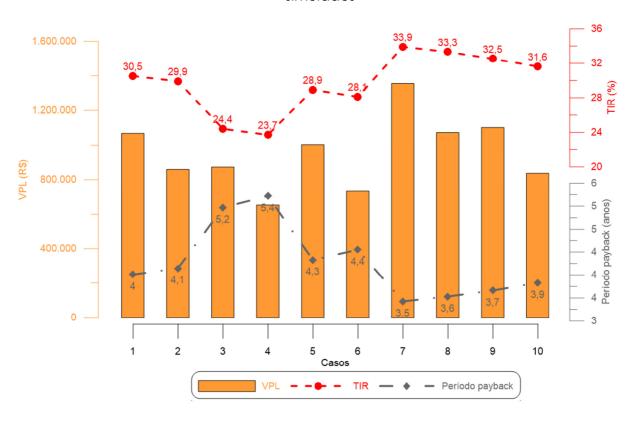


Figura 4 – Resultados das simulações. TIR, VPL e período payback para os 10 casos simulados

Fonte: O autor

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho um modelo matemático, baseado no método de Monte Carlo, foi desenvolvido para, a partir das variáveis de entrada, estimar os indicadores de viabilidade financeiros como valor presente líquido, taxa interna de retorno e período de payback, considerando os dois tipos de sistemas de climatização e cinco cidades nas difrentes regiões do Brasil.

Foram encontradas TIR médias variando de 23,7% a 33,9%, enquanto para o VPL médio foram encontrados valores entre R\$ 652.891 e R\$ 1.355.210 e para o período de payback médio, valores entre 3,5 e 5,4. Com relação as cidades estudadas os melhores índices foram encontrados para a cidade de Belém, seguida de Goiania, Recife, Porto Alegre e São Paulo.

Os resultados indicam que há viabilidade técnica e econômica em todos os casos estudados e que a utilização do modelo matemático desenvolvido é

CONBRAVA 2019 – São Paulo Expo, 10 a 13 de Setembro de 2019 - São Paulo, Brasil

uma ferramenta importante para auxiliar os gestores na toma de decisões para o investimento nesses sistemas.

REFERÊNCIAS

ARROYO, P. et al. Choosing by advantages: A case study for selecting an HVAC system for a net zero energy museum. **Energy and Buildings**, v. 111, p. 26–36, 2016.

ASSOULINE, D.; MOHAJERI, N.; SCARTEZZINI, J. L. Quantifying rooftop photovoltaic solar energy potential: A machine learning approach. **Solar Energy**, v. 141, p. 278–296, 2017.

CAVALCANTE, A. W. A.; DOS SANTOS, C. A. C.; OCHOA, A. A. V. Thermodynamic Analysis of An Energy High Performance Systems. **IEEE Latin America Transactions**, v. 15, n. 3, 2017.

CHIGUERU, T.; FRAIDENRAICH, N. Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétrcos. [s.l: s.n.].

DUCK, B. C. et al. Determining the value of cooling in photovoltaics for enhanced energy yield. **Solar Energy**, v. 159, n. November 2017, p. 337–345, 2018.

GONÇALVES, J. C. S. et al. Revealing the thermal environmental quality of the high-density residential tall building from the Brazilian bioclimatic modernism: The case-study of Copan building. **Energy and Buildings**, v. 175, p. 17–29, 2018.

GOOD, C.; ANDRESEN, I.; HESTNES, A. G. Solar energy for net zero energy buildings - A comparison between solar thermal, PV and photovoltaic-thermal (PV/T) systems. **Solar Energy**, v. 122, n. 2015, p. 986–996, 2015.

JASON M.Y. TSE; PHILLIP JONES. Evaluation of thermal comfort in building transitional spaces - Field studies in Cardiff, UK. **Building and Environment**, 2019.

KELLY, F. J.; FUSSELL, J. C. Improving indoor air quality, health and performance within environments where people live, travel, learn and work. **Atmospheric Environment**, v. 200, n. August 2018, p. 90–109, 2019.

LIMA, T. P. et al. Solar water heating for a hospital laundry: A case study. **Solar Energy**, v. 122, 2015.

MARSZAL, A. J. et al. Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 4, p. 971–979, 2011.

NOVAES PIRES LEITE, G. DE et al. An economic analysis of the integration between air-conditioning and solar photovoltaic systems. **Energy Conversion and Management**, v. 185, p. 836–849, abr. 2019.

OCHOA, A. A. et al.

Stechno-economic and Exergoeconomic Analysis of a micro cogeneration system for a residential use. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 38, n. 3, p. 327, 2016.

PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; POUT, C. A review on buildings energy consumption information. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 3, p. 394–398, 2008.

REN21. Ren21: Renewables 2018 global status report. [s.l: s.n.].

CONBRAVA 2019 - São Paulo Expo, 10 a 13 de Setembro de 2019 - São Paulo, Brasil

RÜTHER, RICARDO; SALAMONI, I. O POTENCIAL DOS SETORES URBANOS BRASILEIROS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA DE FORMA INTEGRADA ÀS EDIFICAÇÕES. **Fórum Patrimônio**, n. 1, p. 84–94, 2011.

SANT'ANNA, D. O. et al. Indoor environmental quality perception and users' satisfaction of conventional and green buildings in Brazil. **Sustainable Cities and Society**, v. 43, p. 95–110, 2018.

SILVA, H. C. N. et al. Modeling and simulation of cogeneration systems for buildings on a university campus in Northeast Brazil – A case study. **Energy Conversion and Management**, v. 186, n. September 2018, p. 334–348, 2019.

WEI, W.; RAMALHO, O.; MANDIN, C. Indoor air quality requirements in green building certifications. **Building and Environment**, v. 92, p. 10–19, 2015.