

TEMAS EMERGENTES EM PESQUISAS SOBRE SISTEMAS *BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAIC THERMAL* (BIPVT)

Lúcio de Souza Campos Neto, lucioscn@hotmail.com¹
Rudolf Huebner, rudolf@ufmg.br¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627. Pampulha. CEP 31270-901 - Belo Horizonte - MG,

Resumo. Ampliando a necessidade de construções sustentáveis para melhor utilização de energia renovável, tem-se como objetivo desse artigo ampliar os estudos e trazer as pesquisas mais influentes sobre construções integradas ao sistema fotovoltaico térmico BIPVT, que utiliza de forma mais eficiente a captação de energia solar e a converte em eletricidade e aquecimento de água ou ar. Pôde-se verificar que este sistema tem sido projetado e testado em diversos documentos onde foi verificado que a redução de custo na construção com uso desse sistema BIPVT e a eficiência do módulo PVT auxiliam no desenvolvimento de projeto sustentáveis e com melhores custos.

Palavras chave: BIPVT. Construção integrada. Fotovoltaico Térmico. PVT

Abstract. Expanding the need for sustainable buildings for better use of renewable energy, the objective of this article is to expand the studies and bring the most influential research on buildings integrated photovoltaic thermal BIPVT system, which uses solar energy capture more efficiently and converts it to electricity and water or air heating. It was possible to verify that this system has been designed and tested in several documents where it was verified that the cost reduction in the construction with the use of this BIPVT system and the efficiency of the PVT module help in the development of sustainable projects and with better costs.

Keywords: BIPVT. Building Integrated. Photovoltaic Thermal. PVT)

1. INTRODUÇÃO

O uso de energias renováveis nas construções, tem desenvolvido projetos de inovação visando melhorar os recursos disponíveis para geração de energias alternativas às fontes fósseis, que são limitadas. Um dos projetos inovadores é o uso de Módulos Fotovoltaico Térmico (PVT), que possuem a capacidade de geração de energia, através da radiação solar, e ao mesmo tempo que possibilita o aquecimento de um fluido, como a água ou o ar, podendo ser instalados em edifícios residenciais ou comerciais. O setor da construção tem delineado projetos que sejam desenvolvidos através de processos mais eficientes e eficazes com o uso do *Building Integrated Photovoltaic Thermal* (BIPVT) e dentro desse processo possibilita utilizarem estas energias renováveis para projetar construções energeticamente mais eficientes e limpas e com menos custos.

O consumo final de energia elétrica no Brasil nos últimos 5 anos (2015-2019), teve uma redução de 0,03% em média, apesar do aumento de 2018 para 2019 em 0,77%, em contrapartida o consumo de energia nas residências nos últimos 5 anos teve um crescimento médio anual de 1,69% (Energética, 2020). Esses dados de consumo residencial representam uma média anual de 10,53% nos últimos 5 anos, do total consumido de energia elétrica no Brasil entre os anos de 2015 e 2019. Adicionando à isso o fato do consumo de eletricidade por habitante no país ter se expandido, passando de 0,642 MWh/hab em 2015 para 0,676 MWh/hab em 2019, um aumento de 5,3% segundo Energética (2020). Esse aumento pode ser justificado pelo fato da ampliação do uso de equipamentos tecnológicos nas residências o que demanda constantemente eletricidade para se manterem funcionando, nas residências ao consumo de eletricidade adicionasse também o uso de água aquecida. Que pode ser fornecida seja na forma de eletricidade recebida pela empresa responsável pela geração de energia da região ou por Centrais Elétricas Autoprodutoras (APE) de energia solar, como os sistemas fotovoltaicos (Khan, Mishra, and Haque 2020). Há também um crescimento no uso de coletores solares fotovoltaicos térmicos (PVT), integrado à construção (Agrawal and Tiwari, 2010a; Chow, 2010; Dupeyrat, Ménéz, and Fortuin, 2014).

O PVT (Photo Voltaic Thermal) ou sistema fotovoltaico térmico, tem sido estudado desde o final dos anos 70, (Florschuetz, 1979; Wolf, 1976), é um sistema que combina a capacidade de geração de eletricidade pelo módulo fotovoltaico (PV) e energia térmica (T) pela troca de calor simultânea, o que possibilita o uso de energia solar tanto para geração de eletricidade quanto para aquecimento de um fluido, ar ou água (Zondag, 2008). A geração retirada de calor reduz a temperatura de operação do módulo PV, que permite um aumento na eficiência energética (Chow, Ji, and He,

2007; Ferreira et al., 2015), além de também obter uma melhor performance ao ser aplicado em uma construção residencial, comercial ou industrial, segundo Dupeyrat, Ménezo e Fortuin (2014).

O sistema BIPVT (*Building Integrated Photovoltaic/ Thermal*) ou Construção Integrada ao Sistema Fotovoltaico Térmico foi examinado e apresentado no estudo de (Anderson et al., 2009) onde foi proposto que o sistema estava diretamente integrado ao telhado de um edifício que utiliza materiais de alta condutividade térmica usados na cobertura para formar o coletor BIPVT e onde passagens são adicionadas à calha para o resfriamento térmico. Os mesmos autores fizeram uma análise teórica com base no modelo Hottel - Whillier modificado e validaram com dados experimentais para testes em um sistema protótipo de BIPVT. O desempenho dos sistemas BIPVT é composto pela eficiência elétrica e eficiência térmica, assim o total de ambas as eficiências, conhecido como eficiência PVT, é usado para avaliar o desempenho geral do sistema, que segundo Ibrahim et al. (2014) estas eficiências adquiridas em testes do sistema BIPVT variam a partir de 44% até 51% para eficiência térmica, e de 55 a 62% para a eficiência elétrica.

Buscando entender as pesquisas de aplicação de sistemas coletores solares integrados aos edifícios, como forma de utilizar a sustentabilidade energética na difusão de um ambiente mais limpo para a presentes e futuras gerações, entende-se que é necessário ampliar ainda mais as pesquisas com o uso de energias renováveis, como o PVT em projetos de construção integrado, sendo o objetivo deste artigo investigar as tendências de pesquisa relacionadas ao PVT integrado às construções, através do BIPVT, para que sirva de continuidade à estudos futuros de utilização desses conceitos.

2. MÉTODOS

Foi utilizado análise bibliométrica para o desenvolvimento do artigo, e para realizar essa análise primeiro foi realizada uma pesquisa em 07 de dezembro de 2020, por palavras chave na base de dados da *Web of Science*, escolhido por ser reconhecidamente uma das melhores base de dados de citação com alta qualidade e para pesquisa multidisciplinar, foi utilizado as seguintes expressões na busca em títulos, resumos e palavras chave: (i) "*Photo* voltaic* Thermal*"; (ii) "*PV* Thermal*"; (iii) "*PVT*"; "*Photovoltaic Thermal*"; e (iv) "*Building integrat**", – o asterisco é usado como curinga para ampliar as variações das palavras, como exemplo *integrat** pode ser considerado *integration* ou *integrated* – para o período de 1945 à 2019, visando encontrar o ano de origem do tema e finalizando no ano anterior da realização dessa pesquisa. Essa pesquisa resultou em 237 artigos, sendo artigos publicados em *journals* e conferências, todos eles foram utilizados para a análise bibliométrica para desenvolver a pesquisa em temas emergentes de sistemas BIPVT. Pesquisas anteriores de revisão de literatura foram realizadas por outros autores de Sistemas Fotovoltaicos Térmicos (Ibrahim et al., 2011; Lamnatou and Chemisana, 2017) também foi realizada revisão bibliográfica sobre BIPVT (Lamnatou et al., 2020), o que justifica a relevância de continuidade de pesquisa e ampliação de análise de tendências para o tema em questão.

3. ANÁLISE DOS DADOS

Para auxiliar na análise bibliométrica, foi utilizado o software VOSviewer (www.vosviewer.com), versão 1.6.16, que desenvolve a bibliometria através do uso da criação de mapas, assim foram produzidos mapas de palavras-chave, os quais termos fortemente relacionados estão localizados próximos uns dos outros e quanto mais fraca a relação entre os termos, maior é a distância entre eles, fornecendo visões gerais para identificar a estrutura de um tópico (van Eck and Waltman, 2010).

A análise bibliométrica demonstra que apesar de uma queda no número de publicações anual, ainda tem-se uma busca pelo tema, principalmente após 2013 que vai apenas 7 artigos para 36 em quatro anos, um aumento de cinco vezes, conforme demonstrado na Fig.1. Interessante notar também que apenas 8,9% dos 237 artigos foram publicados antes de 2010, que significa que os últimos anos foram muito produtivos.

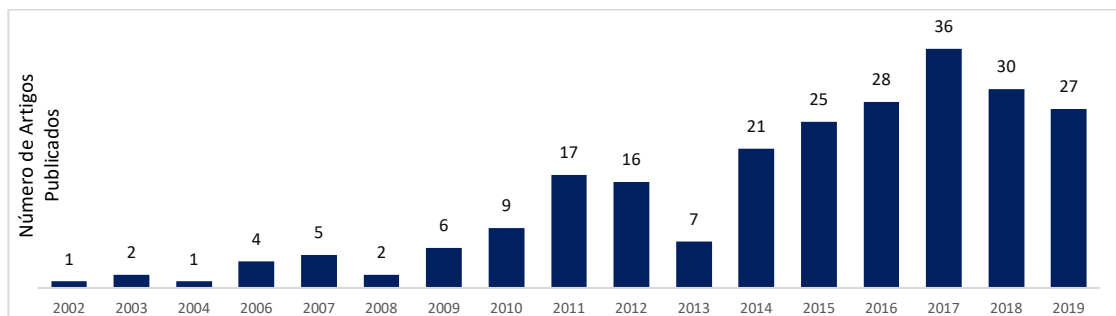


Figura 1. Artigos publicados por ano (Elaborado pelo autor)

A partir dos resultados é possível saber quais foram as principais fontes de publicação, a revista *Solar Energy* – fator de impacto 4.608 em 2019 – obteve o maior número, com 35 artigos sobre o tema BIPVT, seguido da *Energy And Buildings* – fator de impacto 4.867 em 2019 - (21), *Renewable Sustainable Energy Reviews* – fator de impacto 12.11 em

2019 - (18) e Renewable Energy – fator de impacto 6.274 em 2019 - (15). A Figura 2, de um total de 87, apresenta 9 fontes de publicação com um filtro de cinco artigos publicados no mínimo, a partir daí é possível verificar a relação entre as principais fontes, através da proximidade dos títulos e das linhas, que são as conexões, infere-se também quais são as fontes que tem publicações mais recentes que estão em amarelo, sendo as tendências mais recentes de publicações sobre o tema nestas revistas, no caso, entre as apresentadas na figura a Energy (fator de impacto 6.082 em 2019) possui a maior média de artigos publicados, sobre o tema de pesquisa, mais recentes.

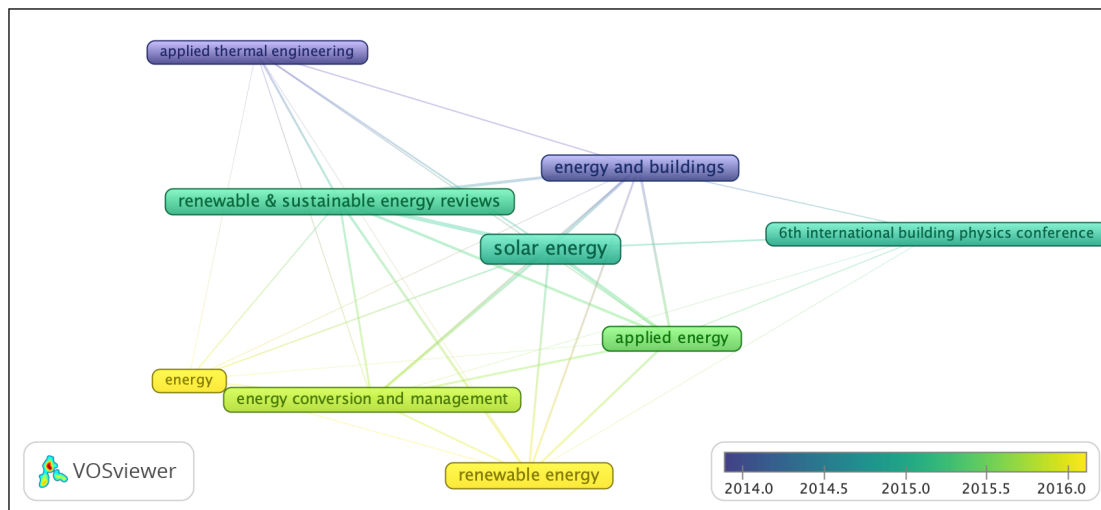


Figura 2. Relação entre as fontes de publicações (Elaborado pelo autor)

A partir dos dados analisados por categorias de temas do *Web of Science*, pode-se averiguar na Fig.3 que a categoria com maior número de registros é *Energy Fuels*, que se refere a fontes de energia como combustível, o que representa mais de 80% dos registros de publicação o que é correto, uma vez que a energia gerada pelo coletor PVT é um combustível para ser consumida na forma de energia sustentável. Interessante analisar também a relação entre os temas PVT e BIPVT como categorias uma vez que aparecem áreas como Engenharia Civil, voltado para construção, o que seria o *Building* do BIPVT, e também a relação com a Engenharia Mecânica, sendo pelo sistema Fotovoltaico térmico (PVT) do BIPVT, mostrando a relevância na integração dos temas.

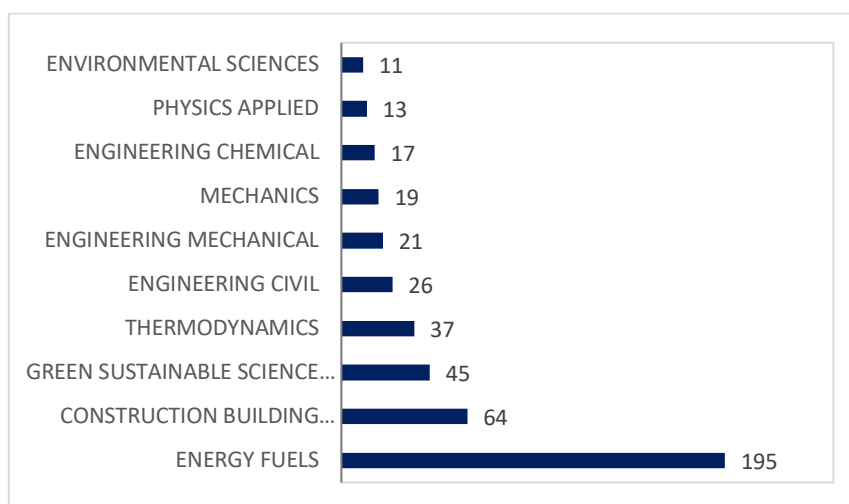


Figura 3. Categorias do *Web of Science* (Elaborado pelo autor)

Do resultado da pesquisa extraído, obteve-se um número de 45 países diferentes relacionados às origens dos artigos, e suas relações de citação, a Fig.4 demonstra os 9 principais países que tiveram pelo menos 10 citações, e suas relações de citação com outros países. Pode-se observar algumas relações próximas de temas entre EUA, Canada, Espanha e Itália, agrupados em um *cluster* de similaridades em verde, em vermelho um segundo *cluster* entre demais países.

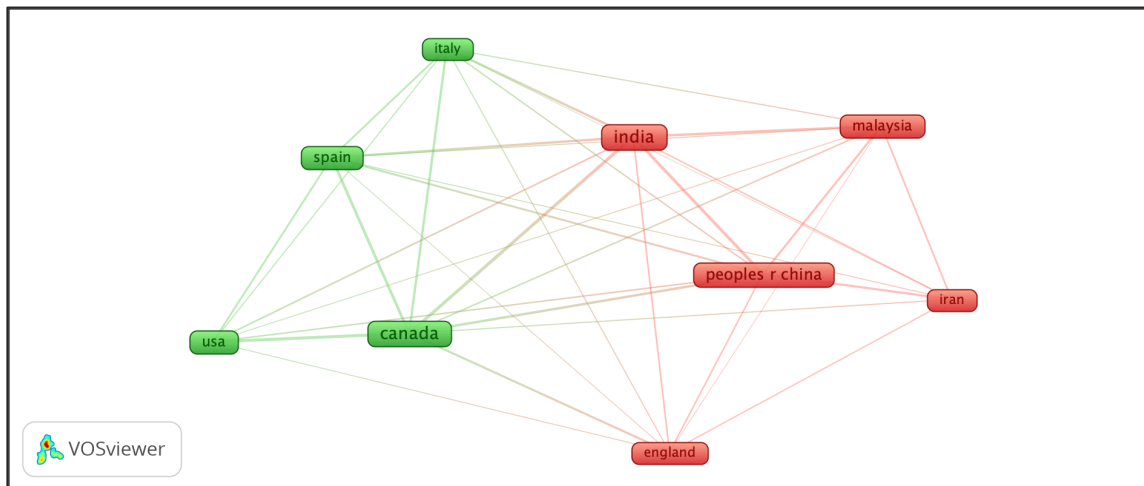


Figura 4. Artigos por Países (Elaborado pelo autor)

Analisando os dados de artigos mais influentes dentre os 237 artigos que tiveram um mínimo de 100 relações de citações, obteve-se um resultado de 14 artigos principais, dos quais dois não tinham relação com os demais, assim foram extraídos da amostra representada na Fig. 5, que resultou então de 12 artigos mais citados dos dados da pesquisa, que estão separados em 4 *clusters* em cores diferentes, segundo van Eck e Waltman (2017), o tamanho de um *cluster* reflete o número de publicações pertencentes ao *cluster*, os *clusters* maiores, como na Fig.5 Ibrahim (2011), Tyagi (2012) e Agrawal (2010), incluem mais publicações. Os autores também descrevem que a distância entre dois *clusters* indica aproximadamente a relação dos *clusters* em termos de citações, os *clusters* que estão localizados próximos uns dos outros tendem a estar fortemente relacionados em termos de citações, o que pode-se verificar entre o *cluster* azul e o verde, enquanto os *clusters* que estão localizados mais distantes uns dos outros tendem a ser menos fortemente relacionados. Isso foi feito com base nas relações de citação entre os clusters. Na visualização apresentada na Fig. 5, cada *cluster* tem uma cor (vermelho, verde, azul e amarelo) que indica o grupo ao qual o *cluster* foi atribuído.

Descrevendo a relação no grupo de *clusters*, temos que o vermelho se refere a pesquisas sobre as construções integradas ou *Building Integrated*, aplicando aos sistemas Fotovoltaicos térmicos BIPVT (Agrawal and Tiwari, 2010b; Chow, Hand, and Strachan, 2003), onde o artigo de Agrawal se aproxima do *cluster* amarelo, que é o grupo que está relacionado ao interesse em performance e eficiência na aplicação do BIPVT (Anderson et al., 2009; Ibrahim et al., 2014), e busca uma aproximação com o *cluster* verde, que é referência às pesquisas, estudos e experimentos em coletores PVT (Tyagi, Kaushik, and Tyagi, 2012), estes se aproximam do *cluster* azul que está relacionado ao desenvolvimento de melhorias e aplicações do sistema de coletores Fotovoltaicos Térmicos Híbridos (Ibrahim et al., 2011; Tripanagnostopoulos, 2007).

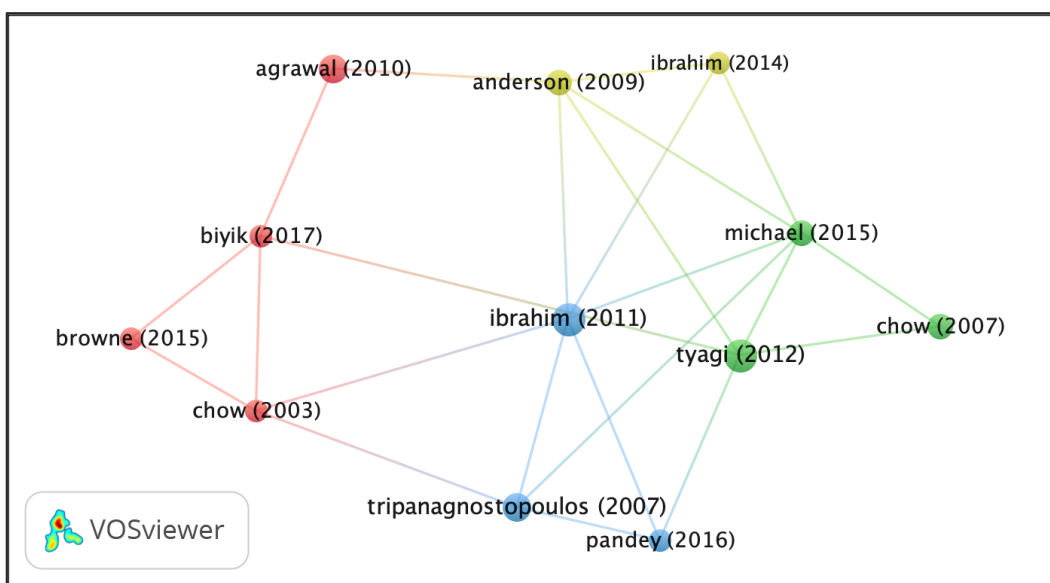


Figura 5. Artigos mais influentes agrupados em *clusters* (Elaborado pelo autor)

4. RESULTADOS

A partir dos dados extraídos da base do Web of Science, buscando artigos relacionados ao tema BIPVT *Building Integrated Photovoltaic Thermal* ou Construção Integrada do Sistema Fotovoltaico Térmico, obteve-se 237 publicações e foram relacionados 616 palavras chave, com um mínimo de 6 ocorrências teve-se como resultado 14 palavras, antes da análise foi feita uma padronização destas palavras, segundo Choi, Yi, and Lee (2011), é importante padronizar porque as informações das palavras-chave foram fornecidas pelos autores, assim podem ter sido escritas de forma diferente. Visando padronizar tais similaridades como PV/T e PVT ou expressões como *photovoltaic thermal* em PVT, como resultado após a padronização, foram encontradas e analisadas 9 (nove) palavras chave para o decorrer deste artigo. Figura 6 representa a rede de palavras chave correlacionadas encontradas, onde é possível ver a separação em dois *clusters*, o verde que integra o de fotovoltaico e suas análises e usos térmicos, e o *cluster* vermelho que tem uma maior representatividade de relação contendo o BIPVT, com 46 ocorrências de correlação, a energia solar, que é o ponto focal de uso do sistema fotovoltaico térmico PVT e suas análises de eficiências térmica e elétrica e o estudo da exergia, que segundo Fujisawa and Tani (1997) é a energia disponível obtida subtraindo a energia indisponível da energia total.

Um objetivo óbvio tem sido buscado visando reduzir o custo de construção de um BIPVT pela integração efetiva com o espaço do telhado, como nas pesquisas de Anderson et al. (2009). Estudos de sistemas BIPVT tem sido conduzidos relacionando quanto à melhoria do desempenho elétrico e térmico do sistema BIPVT com base nas análises de energia e exergia de acordo com Ibrahim et al. (2014), conforme é possível verificar no cluster vermelho.

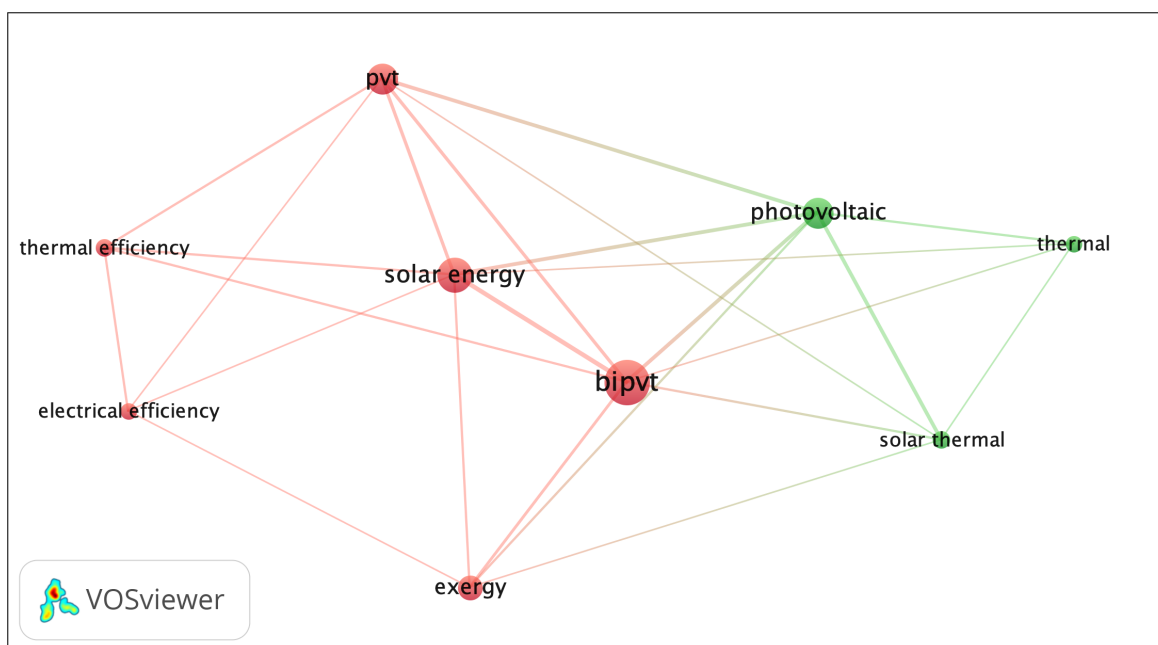


Figura 6. Rede de co-ocorrência de palavras chave (Elaborado pelo autor)

Analisando as tendências de pesquisa sobre BIPVT a Fig.7, demonstra quais os temas emergentes, entre as palavras chave são mais recentes e tem sido objetivo dos pesquisadores, que está diretamente relacionado ao discutido pelos autores (Anderson et al., 2009; Ibrahim et al., 2014), que deve ser o desenvolvimento de estudos que visem um aumento nas eficiências térmicas e elétricas do sistema, onde pode-se ver na figura as palavras BIPVT e exergia, como tendências seguidas por eficiência elétrica e energia solar.

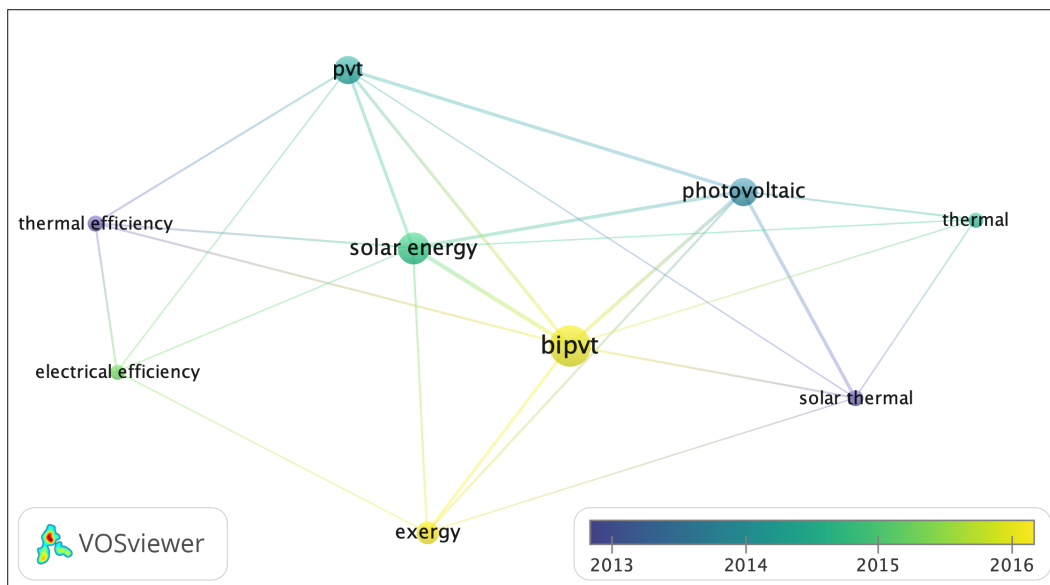


Figura 7. Rede de co-ocorrência de palavras-chave ao longo do tempo (Elaborado pelo autor)

5. CONCLUSÃO

Apresentar as tendências de pesquisas em áreas como PVT e *Bulding Integrated*, através do conceito de BIPVT foi realizado nesse artigo. Descrevendo onde as origens de documentos mais influentes, os países que mais pesquisam, as expressões referentes ao tema, e as palavras-chave mais citadas entre os documentos extraídos da pesquisa na base de dados do *Web of Science*. Sendo verificado assim que as pesquisas emergentes sobre BIPVT estão relacionadas à exergia, eficiências e melhorias no sistema.

Os usos e aplicações de BIPVT estão entre as aplicações mais econômicas de energia solar, entretanto, muitos trabalhos de pesquisa ainda precisam ser feitos e uma das partes mais importantes dos trabalhos de pesquisa e desenvolvimento nesta área deve ser alocada para o projeto de novos coletores de absorção térmica. Novos estudos experimentais e analíticos devem ser realizados com o objetivo de incrementar o conhecimento quanto à melhoria do desempenho elétrico e térmico do sistema BIPVT com base nas análises de energia e exergia.

6. REFERÊNCIAS

- Agrawal, Basant, and G. N. Tiwari. 2010a. "Life Cycle Cost Assessment of Building Integrated Photovoltaic Thermal (BIPVT) Systems." *Energy and Buildings* 42(9): 1472–81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.017>.
- . 2010b. "Optimizing the Energy and Exergy of Building Integrated Photovoltaic Thermal (BIPVT) Systems under Cold Climatic Conditions." *Applied Energy* 87(2): 417–26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.011>.
- Anderson, T. N., M. Duke, G. L. Morrison, and J. K. Carson. 2009. "Performance of a Building Integrated Photovoltaic/Thermal (BIPVT) Solar Collector." *Solar Energy* 83(4): 445–55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2008.08.013>.
- Choi, Jinho, Sangyoon Yi, and Kun Chang Lee. 2011. "Analysis of Keyword Networks in MIS Research and Implications for Predicting Knowledge Evolution." *Information and Management* 48(8): 371–81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.im.2011.09.004>.
- Chow, T. T. 2010. "A Review on Photovoltaic/Thermal Hybrid Solar Technology." *Applied Energy* 87(2): 365–79. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.037>.
- Chow, T. T., J. W. Hand, and P. A. Strachan. 2003. "Building-Integrated Photovoltaic and Thermal Applications in a Subtropical Hotel Building." *Applied Thermal Engineering* 23(16): 2035–49.
- Chow, T. T., J. Ji, and W. He. 2007. "Photovoltaic-Thermal Collector System for Domestic Application." *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME* 129(2): 205–9.
- Dupeyrat, P., C. Ménézo, and S. Fortuin. 2014. "Study of the Thermal and Electrical Performances of PVT Solar Hot Water System." *Energy and Buildings* 68(PART C): 751–55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.032>.
- van Eck, Nees Jan, and Ludo Waltman. 2010. "Software Survey: VOSviewer, a Computer Program for Bibliometric Mapping." *Scientometrics* 84(2): 523–38.
- . 2017. "Citation-Based Clustering of Publications Using CitNetExplorer and VOSviewer." *Scientometrics* 111(2): 1053–70.
- Energética, Empresa de Pesquisa. 2020. *Balanço Energético Nacional 2020: Ano Base 2019*. Rio de Janeiro.
- Ferreira, André G et al. 2015. "Otimização Da Eficiência Elétrica de Módulos Fotovoltaicos Através Do Acoplamento de Trocadores de Calor Tipo Tubo-Aleta." *VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VIII)*.
- Florschuetz, L. W. 1979. "Extension of the Hottel-Whillier Model to the Analysis of Combined Photovoltaic/Thermal Flat Plate Collectors." *Solar Energy* 22(4): 361–66.
- Fujisawa, Toru, and Tatsuo Tani. 1997. "Annual Exergy Evaluation on Photovoltaic-Thermal Hybrid Collector." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 47(1–4): 135–48.
- Ibrahim, Adnan et al. 2011. "Recent Advances in Flat Plate Photovoltaic/Thermal (PV/T) Solar Collectors." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(1): 352–65. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.024>.
- . 2014. "Efficiencies and Improvement Potential of Building Integrated Photovoltaic Thermal (BIPVT) System." *Energy Conversion and Management* 77: 527–34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.10.033>.
- Khan, Mohammed Ali, Sachin Mishra, and Ahteshamul Haque. 2020. "A Present and Future State-of-the-Art Development for Energy-Efficient Buildings Using PV Systems." *Intelligent Buildings International* 12(1): 44–63. <https://doi.org/10.1080/17508975.2018.1437709>.
- Lamnatou, Chr, and D. Chemisana. 2017. "Photovoltaic/Thermal (PVT) Systems: A Review with Emphasis on Environmental Issues." *Renewable Energy* 105: 270–87.
- Lamnatou, Chr, G. Nottton, D. Chemisana, and C. Cristofari. 2020. "Storage Systems for Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) and Building-Integrated Photovoltaic/Thermal (BIPVT) Installations: Environmental Profile and Other Aspects." *Science of the Total Environment* 699: 134269. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134269>.
- Tripanagnostopoulos, Y. 2007. "Aspects and Improvements of Hybrid Photovoltaic/Thermal Solar Energy Systems." *Solar Energy* 81(9): 1117–31.
- Tyagi, V. V., S. C. Kaushik, and S. K. Tyagi. 2012. "Advancement in Solar Photovoltaic/Thermal (PV/T) Hybrid Collector Technology." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(3): 1383–98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.12.013>.
- Wolf, Martin. 1976. "Performance Analyses of Combined Heating and Photovoltaic Power Systems for Residences." *Energy Conversion* 16(1–2): 79–90.
- Zondag, H. A. et al. 2003. "The Yield of Different Combined PV-Thermal Collector Designs." *Solar Energy* 74(3): 253–69.
- . 2008. "Flat-Plate PV-Thermal Collectors and Systems: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12(4): 891–959.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.