

VIABILIDADE ECONÔMICA PARA TERMOELÉTRICAS SOB A PERSPECTIVA DA ECONOMIA CIRCULAR: UMA REVISÃO

1. INTRODUÇÃO

O perfil do sistema elétrico brasileiro é formado, tradicionalmente, por hidrelétricas com grandes reservatórios. Contudo, por questões ambientais este tipo de empreendimento vem enfrentando dificuldades de implementação e impedimentos de licenciamento (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2018).

Na última década a preocupação com o crescimento da população mundial, estimada em 10 bilhões até 2050 e o crescimento econômico global, fez aumentar a busca por alternativas e políticas que promovam a redução de externalidades ao meio ambiente em conjunto com a responsabilidade pela exploração dos recursos de modo sustentável (ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT - OCDE, 2012).

No contexto global, 80% do abastecimento de eletricidade é alcançado por meio das usinas termoeletricas (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, 2017). Lund e Mathiesen (2012) acreditam que as termoeletricas irão desempenhar papel relevante durante o processo de transição energética para garantir a segurança e estabilidade do sistema.

O sentido de produção em uma estrutura linear (baseada em produzir, consumir e eliminar) deve transformar-se para uma estrutura mais sustentável capaz de refletir sobre todo o ciclo de vida da usina com o objetivo de minimizar impactos ambientais e sociais. A ideia central da economia circular traduz-se em promover a reutilização, recuperação de produtos e materiais sob um olhar estratégico (INSTITUT D'AMÉNAGEMENT ET D'URBANISME - IAU, 2013).

Para realização da pesquisa, a revisão sistemática da literatura foi utilizada para identificar, avaliar e interpretar os trabalhos disponíveis com certa relevância sobre o tema (SCHMIDT, 2008). Um outro método que está sendo cada vez mais utilizado para mapeamento dos trabalhos científicos, é a bibliometria. Segundo Zupic (2015), a bibliometria surge como uma ferramenta de evolução para garantir melhor análise das estruturas intelectual, social e conceitual da pesquisa científica ao longo de um determinado período. Esta por sua vez, mapeia a estrutura dinâmica da ciência, as publicações desenvolvidas pelos indivíduos, instituições, países e avalia o desempenho das mesmas.

A temática abordada no escopo do assunto ainda não é suficiente para suprir a necessidade de conhecimento sobre todos os aspectos que envolvem as termoeletricas. Portanto, este trabalho buscou avançar dentro da fronteira do conhecimento trazendo uma contribuição científica analisando artigos e artigos de revisão de modo geral sobre a evolução das termoeletricas no processo de renovação da matriz energética para fontes renováveis, levando em consideração os princípios da economia circular.

O artigo investigou as principais fontes em uso, possíveis alternativas energéticas, processos de modernizações das usinas, projetos híbridos com uso de fontes renováveis e/ou não renováveis, potenciais mercados para geração de energia e projetos de descomissionamentos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A Revisão Sistemática de Literatura (RSL) é utilizada para melhor identificação, avaliação e interpretação dos estudos científicos disponíveis. Os procedimentos foram adaptados com uma sequência lógica e de fácil entendimento, para que os futuros leitores repliquem todo o método utilizado durante o desenvolvimento do trabalho (KITCHENHAM, 2004).

Estágio 1: Planejamento

O primeiro passo para realização do estudo bibliométrico foi planejar a pesquisa. Para aumentar a validade dos termos de pesquisa, determinar as palavras-chave apropriadas é de suma importância (CHABOWSKI, SAMIEE, & HULT, 2013). Outro ponto essencial é a análise da citação, que mede o impacto do trabalho na esfera de outras pesquisas, ou seja, demonstra a influência e relevância do trabalho e o autor para outros pesquisadores (ZUPIC, 2015).

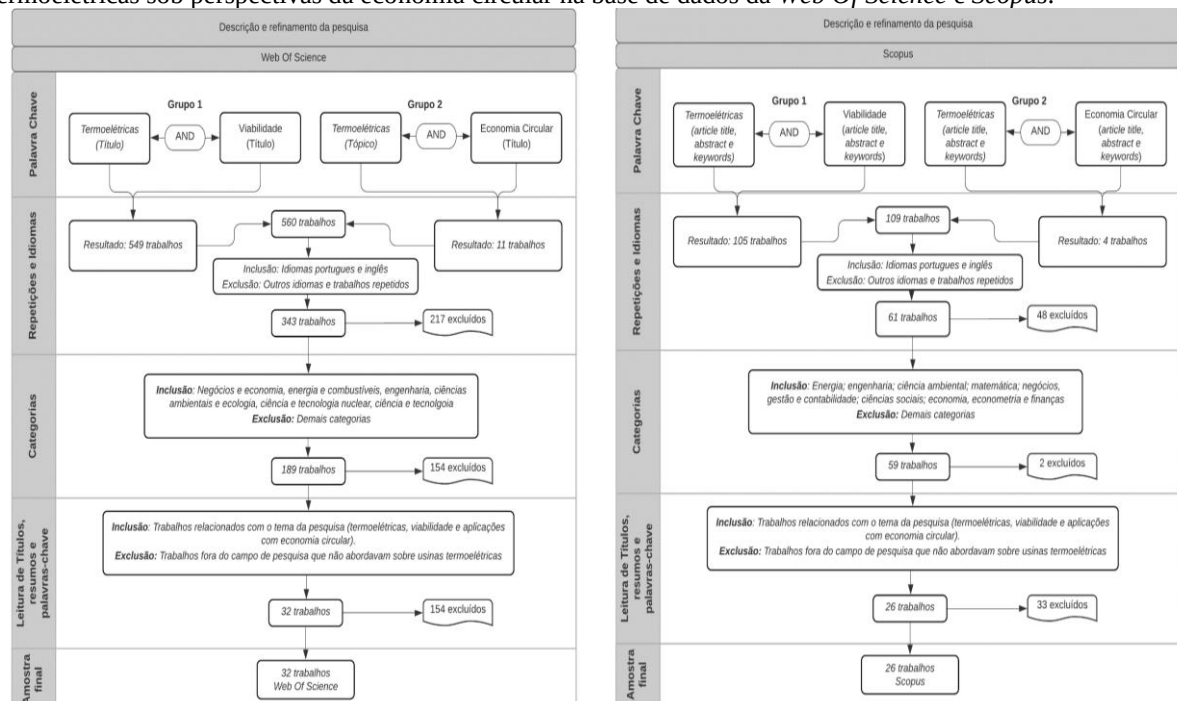
Tranfield et al. (2003), enfatizam a necessidade de realizar estudos para delimitação da área de estudo e qual a relevância do tema. Outro autor, também reforça que a pesquisa pode seguir de forma lógica com segmentação por países/regiões, este pode revelar a existências de grupos de pesquisas concentrados ou não em uma determinada região (ZUPIC, 2015).

Estágio 2: Aplicação da metodologia

Neste trabalho, a pesquisa foi realizada por meio dos bancos de dados, *Web of Science* (WOS) e *Scopus*. A Figura 1 mostra uma síntese das etapas realizadas para as duas base de dados escolhidas.

Conforme recomenda Tranfield et al. (2003), iniciou-se o processo de alinhamento dos estudos com o tema da pesquisa. Para seleção dos estudos foi necessário exportar os arquivos individualmente em formato de MS excel e realizar o procedimento de tabulação para unificação das bases e melhor tratamento dos dados. Ao final desse processo totalizaram 560 trabalhos (WOS) e 109 (Scopus).

Figura 1. Planejamento da amostragem para revisão sistemática de literatura da viabilidade econômica para termoeletrônicas sob perspectivas da economia circular na base de dados da *Web Of Science* e *Scopus*.



Fonte: Autores (2021)

Na etapa seguinte, realizou-se a seleção dos trabalhos por categorias pertinentes ao tema e área da pesquisa. Vale ressaltar que todos os procedimentos foram realizados com os dados exportados da base de dados do WOS e *Scopus* em formato de *MS Excel*. Unindo todos os

trabalhos encontrados, Scopus (59) e WOS (189) contabilizou-se 248 trabalhos em linha com o tema da pesquisa.

No estágio de tratamento dos dados, Tranfield et al. (2003) argumentam que fica a critério do pesquisador considerar as informações relevantes ao estudo, projeção de tabelas, resumo e síntese dos dados. Nesta pesquisa, foi desenvolvida uma planilha em *MS Excel*, com informações como título, resumos, autores, ano, número de citações, categorias, métodos, periódicos, fonte de energia e aderência com tema da pesquisa.

Após implementação da metodologia, fez-se a leitura de todos os títulos, resumos e palavras-chave de todos os trabalhos refinando os artigos que verdadeiramente estavam compatíveis com a área de interesse da pesquisa, restringindo a amostra final das bases WOS (32) e *Scopus* (26) em 58 trabalhos.

Estágio 3: Descrição e divulgação

Para que a pesquisa seja de fácil entendimento para os leitores, após compilação de todos os trabalhos selecionados, realizou-se uma análise descritiva agregando categorias como por exemplo, quem são os autores, quais países estão realizando mais pesquisas sobre a temática da pesquisa, o ano de publicação dos trabalhos, os tipos de trabalhos (artigos ou revisões de literatura), número de artigos publicados ao longo dos anos, quais revistas obtiveram maior relevância e quais métodos e linhas de pesquisa estão em evidência (TRANFIELD et al., 2003).

Com as informações extraídas no decorrer do estudo os dados foram tabulados de modo coerente com tema da pesquisa (KITCHENHAM, 2004). Ainda segundo o autor, a análise quantitativa pode ser apresentada através de mapas ou em formato de tabelas. Métodos quantitativos podem facilmente suportar grandes quantidades de dados buscando evidências empíricas nas mais diversas áreas de estudos (ZUPIC, 2015)

A exibição do mapa dos países de acordo com a publicação dos trabalhos foi produzida através do *excel* da plataforma Bing, em escala de três cores para facilitar a interpretação dos resultados. A distribuição espacial compreendeu o período de 2010 a 2019, onde foi elaborada através do valor mínimo, ponto médio e valor máximo de publicações encontradas.

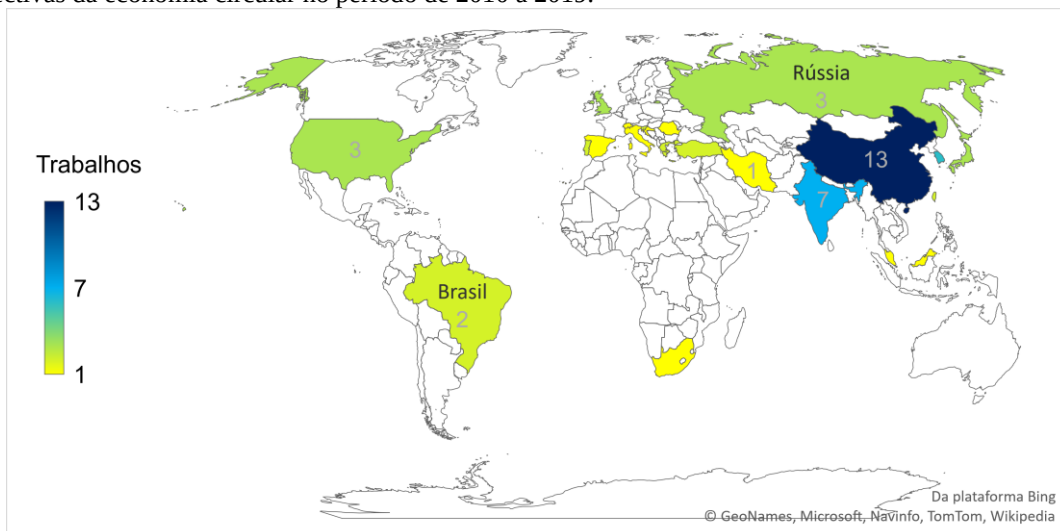
A partir de palavras-chave, autores, citações e demais dados extraídos no andamento da pesquisa desenvolveu-se através do *software* VOSviewer (versão 1.6.16) redes bibliométricas, cujo objetivo central é mostrar os resultados através de mapas para facilitação do entendimento, e análise no desenvolvimento da revisão sistemática da literatura, integrando temas diversos, fornecendo uma visão ampla, além de possíveis lacunas para futuras pesquisas.

Na pesquisa não foram identificados trabalhos com relação direta entre termoelétricas e economia circular, porém foi observado a tendência das usinas termoelétricas, em virtude das preocupações com o meio ambiente e a sustentabilidade aplicarem os conceitos da economia circular para melhoria de processos e competitividade no mercado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra a distribuição espacial da quantidade de publicações por país em relação ao período da pesquisa, 2010 a 2019. A pesquisa abrangeu 21 países, reunindo os 58 trabalhos.

Figura 2. Distribuição espacial dos países e as publicações de viabilidade econômica para termoeletricas sob perspectivas da economia circular no período de 2010 a 2019.



Fonte: Autores (2020)

Analisando a Figura 2, a China foi o país com maior concentração de trabalhos, 13 trabalhos, equivalente a 22% de todos os trabalhos encontrados. Em seguida, a Índia com 7 trabalhos, concentrou 12% dos trabalhos, e logo após, a Coreia do Sul com 6 trabalhos, totalizou 10% de todos os trabalhos da pesquisa. No total, estes três países (China, Coreia do Sul e Índia) centralizaram 44% de toda pesquisa bibliométrica. Em outros países como Estados Unidos, Japão, Reino Unido e Rússia foram encontrados 3 trabalhos, em cada, cuja participação individual foi de 5%. Brasil, Eslovênia, Grécia, Portugal, Taiwan e Turquia retornaram 2 trabalhos, cada um deles, configurando 3%. Os países que obtiveram apenas 1 trabalho foram, África do Sul, Croácia, Espanha, Irã, Itália, Malásia, Romênia e Suíça, com participação de 2%.

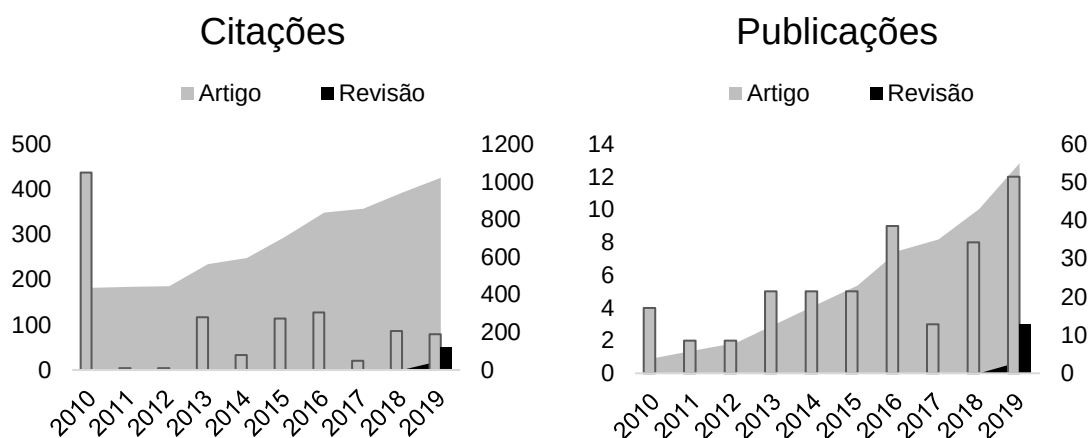
A Figura 3 apresenta a evolução anual e acumulada das publicações e citações (artigos e revisões) sob o campo de pesquisa do trabalho, viabilidade econômica para usinas termoeletricas sob a perspectiva da economia circular. Vale ressaltar que foi constatado no processo de triagem grande escassez de trabalhos que correlacionem diretamente termoeletricas ao conceito de economia circular. Em relação ao tipo de documento, dos 58 trabalhos, 55 eram artigos (95%) e 3 eram de revisões (5%).

Conforme Figura 3, é possível notar que o pico de citações foi em 2010. O trabalho mais citado nesse mesmo período, publicado pela *Journal of Cleaner Production* sobre economia circular recebeu 165 citações. Investigou os desafios e oportunidades de como as empresas e as organizações poderiam atingir um melhor equilíbrio em relação ao crescimento econômico e a gestão ambiental no contexto de ascensão da economia circular. O estudo foi realizado na China, sob a visão de modernizações e práticas sustentáveis (PARK; SARKIS; WU, 2010).

Em 2016, um trabalho em destaque, com 40 citações, publicado pela revista *Journal of Cleaner Production*, relatou o caso na China das emergentes usinas térmicas ecoindustriais, da qual visava promover a produção limpa e sustentável de carvão (LI e ZHAO, 2016).

Outro trabalho aplicou os conceitos de economia circular e sustentabilidade, contribuindo para eficiência energética e redução das emissões por meio dos princípios “3R” de “reduzir”, “reutilizar” e “reciclar”. As térmicas assumem o compromisso de reduzir consumo de recursos e emissão de poluentes fazendo uso de estratégias e planos de ação, especialmente sobre o uso do carvão, principal matéria prima para geração de energia no país (ZHOU et al., 2014). É notória a relevância da economia circular no ambiente estratégico das usinas, alterando processos, investimentos e aspectos institucionais.

Figura 3. Evolução das publicações e das citações (Artigos e Artigos de Revisão) de viabilidade econômica para termoeletricas sob perspectivas da economia circular, anual e acumulado, no período de 2010 a 2019.



Fonte: Autores (2021)

No que tange as publicações (Figura 3), vale destacar em 2018 a presença do trabalho “*Eco-innovation in the transition to a circular economy: An analytical literature review*”, apesar de recente, contabilizou 57 citações, sendo o mais citado entre 2016 e 2019, também publicado pela revista *Journal of Cleaner Production*. O trabalho mostra a relação entre economia circular e ecoinovação, onde a mudança para um novo modelo econômico voltado para economia circular requer soluções específicas. Estas, direcionadas pelos princípios da ecoinovação, que reflete não apenas em mudanças tecnológicas, mas também envolvendo transformações dinâmicas, de serviços e novos formatos organizacionais (JESUS et al., 2018).

Jesus et al., (2018) descrevem que mesmo com os atuais níveis de preocupação com processos de reciclagem, a produção de resíduos continua em grandes proporções de desequilíbrio. Portanto, uma nova estrutura econômica baseada na inovação abrangendo toda cadeia de valor é tida como grande aposta para redução de desperdícios, em materiais e energia. Nesses moldes, todos os agentes econômicos, inclusive o setor enérgico (usinas termoeletricas) com um todo, deverão implementar mudanças e custear novos investimentos para atender as exigências da atualidade.

Os 58 trabalhos da pesquisa englobaram 32 revistas dos mais variados campos de pesquisa. Algumas cobrindo pesquisas transdisciplinares sobre produção mais limpa, políticas para fornecimento de energia, tomada de decisão para formuladores de políticas, organizações governamentais e não governamentais, ciência ambiental e tecnologia ambiental, incluindo políticas ambientais, desenvolvimento de tecnologias, produtos, inovação, tecnologias sustentáveis, processos térmicos, utilização e conservação de energia. Os períodos contribuíram com o escopo do trabalho pela convergência ao tema das termoeletricas, aspectos da economia circular e viabilidade dos projetos de um modo geral.

A Tabela 1 mostra a classificação das revistas por quantidade de trabalhos em cada uma e ordenados pela quantidade de citações computadas. As cinco revistas mais citadas foram a *Journal of Cleaner Production*, *Energy Policy*, *Energy for Sustainable Development*, *Environmental Science and Technology* e *Energy*.

A *Journal of Cleaner Production* foi a revista de maior impacto na pesquisa com 7 trabalhos, totalizando 320 citações. O trabalho dos autores Park, Sarkis & Wu (2010) sobre economia circular destacou-se entre os demais por receber 165 citações.

Tabela 1. Classificação dos periódicos de maior impacto, com mais de nove citações, organizados pelo maior número de citações, no período de 2010 a 2019.

Revista	Qtde	Citações
Journal of Cleaner Production	7	320
Energy Policy	5	187
Energy for Sustainable Development	2	152
Environmental Science and Technology	2	74
Energy	3	45
Solar Energy	1	37
Energies	4	36
Clean Technologies and Environmental Policy	2	30
Energy Science and Engineering	1	28
Applied Thermal Engineering	1	24
Aerosol and Air Quality Research	2	19
Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Env. Effects	3	15
International Journal of Environmental Research	1	13
Electric Power Systems Research	1	12
Annals of Nuclear Energy	5	11
Environment and Planning A	1	10
Journal of Energy Resources Tech., Transactions of the ASME	1	10
Outras Revistas	16	47
Total	58	1070

Fonte: Autores (2021)

A partir da classificação e tabulação, os trabalhos foram separados por grupos e correlacionados de acordo com os temas, modelos de geração e tipos de estudos encontrados, conforme Tabela 2. Esse tipo de análise favorece o entendimento do leitor, trazendo um olhar macro de como as pesquisas se distribuíram, além de facilitar buscas de acordo com os temas desejados. Mostra como as pesquisas separadas pela contemplação dos novos modelos de geração (híbridos), suas respectivas fontes de energia (renovável ou não renovável), autores e quantidade de citações.

Com base na Tabela 2, dentro da pesquisa o assunto mais discutido no campo das energias renováveis é a biomassa. Os trabalhos concentraram-se no uso de resíduos florestais para redução dos níveis de poluição e trataram sobre apoio governamentais para incentivar esse modelo de geração de energia.

Em relação as energias não renováveis, a pesquisa realizada por Guttikunda e Jawahar (2018), avaliaram o impacto das usinas a carvão na saúde dos indianos. No país existe um grande uso da fonte, o que segundo os autores, levará a sérios impactos ambientais e sanitários para a região.

Sobre o uso do gás natural (Tabela 2), o trabalho mais citado Almeida et al. (2018), mostrou os desafios para o mercado no cenário brasileiro. Um outro trabalho mais recente dos autores, Miara et al. (2019), relataram sobre a importância da fonte na redução das externalidades ao meio ambiente e mitigação das mudanças climáticas que podem ocorrer no futuro.

Por ser uma fonte alternativa com notório destaque mundial para redução de externalidades ao meio ambiente, o gás natural deve ser um dos grandes protagonistas em políticas de incentivos governamentais que visam a redução das emissões, além de demonstrar bons indicadores de viabilidade econômica para usinas termoeletricas.

Tabela 2. Classificação dos trabalhos em ordem alfabética de autores, por modelos de geração, por fontes, autores e número de citações, no período de 2010 a 2019.

Modelos de Geração	Fontes	Autores	Citações
Renovável	Biomassa	Cardoso, Silva e Eusébio (2019)	22
		Mayer et al. (2015)	14
		Sagani, Hagidimitriou e Dedoussis (2018)	9
	Captura e Armazenamento de Carbono	Liang, Reiner e Gibbins (2010)	10
		Franki, Višković e Šapić (2019)	2
	Geotérmico	Procesi (2014)	7
Não Renovável	Carvão	Guttikunda e Jawahar (2018)	9
		Ma et al. (2016)	18
		Khankari e Karmakar (2016)	10
		Wang, Yan e Komonpipat (2019)	8
		Li, Ma e Yang (2018)	4
		Kiliç, Acarkan e Ay (2013)	2
	Gás Natural	Almeida et al. (2018)	7
		Katsaprakakis et al. (2015)	5
		Miara et al. (2019)	4
Híbrido	Biomassa e Carvão	Amirabedin e McIlveen-Wright (2013)	13
	Carvão e Gás Natural	Reddy, Kaushik e Tyagi (2014)	16
	Carvão e Óleo	Lin, Xu e Xia (2019)	2
	Carvão e Solar Térmica	Suresh, Reddy e Kolar (2010)	146
	Gás Natural e Óleo	Aminov et al. (2016)	23
	Heliotérmica e Solar Térmica	Heller e Gauché (2013)	37

Fonte: Autores (2021)

Ainda na Tabela 2, foram observados trabalhos com abordagem em modelos híbridos, estes, têm recebido vários destaques pelo uso combinatório de fontes renováveis ou não renováveis para melhoria da eficiência técnica e econômica dos projetos. Os trabalhos obtiveram bons níveis de citação, em especial, o trabalho dos autores Suresh, Reddy e Kolar (2010), 146 citações.

Na Tabela 3, as pesquisas foram classificadas de acordo com os projetos de investimento, em retrofit ou descomissionamento. De um modo geral, levam em consideração o tempo de vida útil das usinas em fim de atividades (descomissionamento) e investimentos para novas adequações, projetos de expansão, viabilidade econômica, redução de externalidades ao meio ambiente e melhorias técnicas das usinas (*retrofit*).

Conforme Tabela 3, todos os projetos de descomissionamento somaram 9 publicações e trouxeram cases de usinas nucleares. O principal artigo e mais citado dos autores Khattak et al. (2018), estimaram os custos administrativos e outros aspectos técnicos que envolvem o processo de descomissionamento para esse tipo de usina. A análise contribui para adoção dos princípios gerais em outros modelos de termoelétricas ao término da vida útil, reforçando a necessidade de mais estudos para essa linha de temática, pouco abordada para outros tipos de usinas termoelétricas.

Tabela 3. Classificação dos trabalhos por tipo de investimento, em descomissionamento ou retrofit, por ordem alfabética de autores, no período de 2010 a 2019.

Projeto	Autores	Citações
Descomissionamento	Khattak et al. (2018)	38
	Jeong et al. (2016)	15
	Park et al. (2016)	8
	Jeong et al. (2016)	8
	Jeong et al. (2014)	3
	Jeong et al. (2019)	13
	Bylkin et al. (2011)	9
	Jeong et al. (2014)	2
	Li et al. (2018)	23
Retrofit (modernização)	Franki, Višković e Šapić (2019)	2
	Veselov et al. (2017)	8
	Galvin e Sunikka-Blank (2013)	55
	Gingerich e Mauter (2015)	70
	Cui, Zhao e Wu (2018)	60
	Fan et al. (2019)	72

Fonte: Autores (2021)

Sobre *retrofit*, ou modernização, os estudos também consistem sobre processos para redução de externalidades ao meio ambiente de um modo geral, levando em consideração aspectos de viabilidade econômica e técnica. Galvin e Sunikka-Blank (2013), discutem sobre a política de redução das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) até 2050, com adoção de medidas, subsídios e financiamentos para facilitar a transição para uso de fontes mais limpas.

Os trabalhos dos autores Cui, Zhao e Wu (2018) e Fan et al., (2019), trataram da tecnologia de captura e armazenamento de carbono com outras fontes renováveis e não renováveis.

A Tabela 4 unificou os trabalhos de acordo com os diversos assuntos encontrados na pesquisa. Englobaram aspectos de otimização, eficiência, desempenho, riscos e viabilidade técnico-econômico dos projetos em termoelétricas.

Tabela 4. Classificação sistemática dos trabalhos por temas diversificados encontrados na pesquisa, por ordem alfabética de autores, no período de 2010 a 2019.

Tema	Autores	Citações
Desempenho	Ahmadi et al. (2019)	240
	Chandel, Singh e Kumar (2017)	34
	Gupta e Tewari (2011)	37
	Liu, Lin e Lewis (2010)	115
Eficiência	Meng et al. (2016)	23
	Xie et al. (2019)	28
Otimização	Semin et al. (2019)	5
	Wang et al. (2019)	287
Riscos	Bhangu, Pahuja e Singh (2015)	12
Viabilidade	Bricl e Avsec (2019)	16

Fonte: Autores (2021)

Conforme é apresentado na Tabela 4, avaliando o desempenho das termoeletricas, os trabalhos concentraram-se do ponto de vista de avaliação dos modelos de geração de acordo com critérios econômicos e probabilísticos para estratégias operacionais mais eficientes. O trabalho com maior destaque em relação ao número de citações (240) foi dos autores Ahmadi et al. (2019), realizaram um estudo sobre a melhoria do desempenho das usinas térmicas, incluindo os pilares de economia, energia e exergia (3E).

Liu, Lin e Lewis (2010) também abordaram sobre a avaliação de desempenho de diversas usinas no Taiwan através da análise envoltória de dados (DEA), os resultados apontaram estratégias operacionais mais eficientes, além de políticas para o futuro das usinas.

Em relação a eficiência Meng et al. (2016) estudam os efeitos da competição de mercado para melhorar a geração das usinas termoeletricas. O estudo mostrou o impacto dessa medida como reforma de reduzir drasticamente o consumo de carvão na China. Outro estudo na China dos autores Xie et al. (2019), analisam a eficiência pela relação de usinas termoeletricas estatais e não estatais, os resultados mostram que as usinas não estatais são mais eficientes que usinas estatais.

Sobre otimização o trabalho mais relevante obteve 287 citações, sendo o mais citado entre os diversos assuntos agrupados na Tabela 3. Fornece uma visão abrangente e comparativa das metodologias de análise e otimização para discussão e suas aplicações em usinas termoeletricas (WANG et al., 2019).

No enfoque de risco, os autores Bhangu, Pahuja e Singh (2015) realizaram uma avaliação sobre dados de falhas para medir a confiabilidade das usinas termoeletricas, através de método indutivo e probabilísticos. Sobre a viabilidade, Briel e Avsec (2019) estimam alternativas economicamente viáveis para usinas térmicas no cenário da política da União Europeia de 2030, utilizam cálculos analíticos e dados numéricos para simular as operações e demonstrar a aceitação dos projetos de investimento.

Por fim, a Tabela 5 relaciona os trabalhos que abordam aspectos sobre a economia circular, sustentabilidade e meio ambiente de um modo geral. Apesar da baixa quantidade de trabalhos nessa linha de pensamento, as contribuições foram importantes para o avanço da temática e a relação com as usinas termoeletricas.

Tabela 5. Classificação dos trabalhos pela ótica da economia circular, meio ambiente e sustentabilidade, por ordem alfabética de autores, no período 2010 a 2019.

Tema	Autores	Citações
Economia Circular	Jesus et al. (2018)	226
	Park, Sarkis e Wu (2010)	46
Meio Ambiente	Grigore et al. (2016)	18
	Li e Zhao (2016)	68
	Zhang, Xia e Li (2014)	2
Sustentabilidade	Ye, Sun e Huang (2018)	11
	Zhang et al. (2012)	17

Fonte: Autores (2021)

O trabalho mais citado no âmbito da economia circular foi dos autores, Jesus et al. (2018), com 226 citações, trouxeram uma nova concepção para a economia circular ao incluir dentro da abordagem o conceito da ecoinovação. Devido a poucas informações sobre o assunto, o trabalho contribui facilitando o processo de mudança para uma economia circular, através da ecoinovação.

Ainda sob a visão da economia circular, Park, Sarkis e Wu (2010), também contribuem com a visão de negócios no enfoque da economia circular e o valor ambiental pela

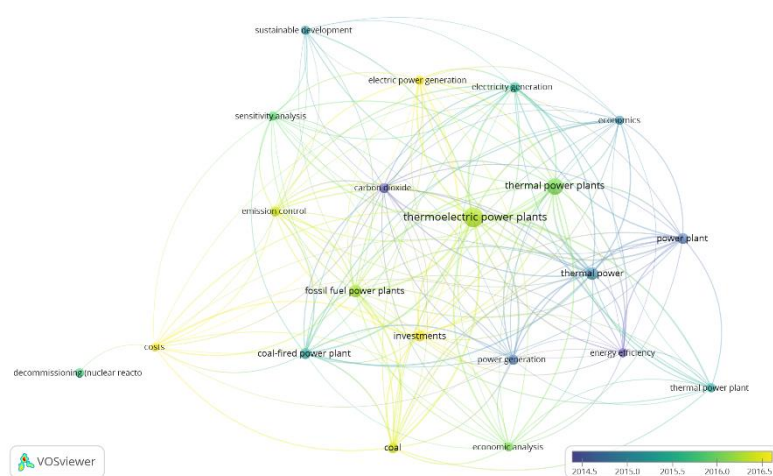
modernização ecológica, a pesquisa investiga oportunidades e desafios que devem ser incluídos em todas as esferas de negócios, até mesmo para as usinas. Ponto crucial, para reformulação de processos e adequação ao princípios ecológicos.

Em relação ao meio ambiente, Li e Zhao (2016), demonstraram usinas térmicas ecoindustriais que estão em desenvolvimento na China, empregando conceitos sustentáveis para reduzir poluentes e produzir energia limpa. A análise apontou para a eficácia e o excelente desempenho das usinas dentro dessa nova perspectiva de modelo.

Sob a ótica da sustentabilidade os trabalhos concentraram-se em métodos de avaliação a fim de avaliar os níveis de desenvolvimento sustentável das usinas, utilizou-se indicadores econômicos e Análise Hierárquica (AHP). O objetivo dos trabalhos foi de garantir a geração de energia mais limpa com menor impacto ao meio ambiente (YE; SUN; HUANG, 2018; ZHANG et al., 2012).

Concluindo, a Figura 4 apresenta os clusters temáticos da análise espacial de palavras-chave associadas à termoeletricas, no período de 2010 a 2019, através do *software* VOSviewer. Dentre os diversos temas encontrados é possível identificar as conexões e mapeamentos associados às usinas termoeletricas. Os principais temas encontrados foram: desenvolvimento sustentável, análises de sensibilidade, investimentos de um modo geral, geração de energia, eficiência energética, controle de emissão, dióxido de carbono, análises econômicas e demais assuntos relacionados. Por se tratar de um tema amplo, vários temas interligados contribuem para melhor entender relações e caminhos para o foco da atual pesquisa.

Figura 4. Evolução da rede de palavras-chave associados à termoeletricas sob a ótica da economia circular, no período de 2010 a 2019.



Fonte: Autores (2021).

Entre os 58 trabalhos a grande maioria apresentou relação direta com o tema da pesquisa, dentre os mais variados assuntos abordados destacaram-se a abrangência com as diversas fontes utilizadas para geração de energia: óleo, carvão, biomassa, calor, gás natural, células a combustíveis e modelos híbridos.

Em relação ao tema economia circular poucos trabalhos abrangem o tema de forma específica para termoeletricas, contudo, contribuíram para pensamento crítico de curto e médio prazo para formulação de estratégias e expectativas de mudanças para o longo prazo. O cenário internacional evidencia cada vez mais a necessidade dos agentes econômicos estabelecer diretrizes e estratégias para acomodar os anseios de um bom uso dos recursos naturais.

Alguns trabalhos abordaram questões climáticas e os principais impactos pela escassez de água dentro do setor energético. Outras pesquisas também se concentraram sobre aspectos

ligados a poluição das termoeletricas, apresentando alternativas como o *retrofit* para melhoria de indicadores ambientais. Sobre o tema de descomissionamento, grande parte dos trabalhos concentraram-se em termoeletricas nucleares, mesmo assim foi possível extrair conceitos gerais e experiências que contribuem para outras fontes de energia no processo de descomissionamento.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho sistematizou diversos trabalhos que associaram a temática das termoeletricas e as principais aplicações no contexto mundial. Os resultados mostraram como os diversos autores estão concentrando estudos e análises nessa área, ao mesmo tempo observando aspectos sobre viabilidade técnica e econômica, como também a preocupação dos agentes com o meio ambiente e redução de externalidades negativas causadas pelas usinas termoeletricas.

A pesquisa contabilizou 58 trabalhos, distribuídos em artigos e revisões em relação ao tema estudado. As principais contribuições demonstraram a importância das usinas termoeletricas dentro do sistema elétrico e a garantia da segurança energética pela capacidade de geração. Apesar da constante migração para uso de fontes renováveis, a energia fornecida pelas usinas termoeletricas continuam sendo utilizadas e devem permanecer por um longo período de tempo.

O trabalho ainda identificou como os diversos países pretendem mitigar os impactos negativos pelo uso dos combustíveis fósseis. A tendência de aplicar novos conceitos e combinação entre fontes de energia, possivelmente essa deve ser a nova inclinação dos projetos termoeletricos. Cada vez mais, pesquisas são desenvolvidas nesse escopo, abrangendo a eficiência técnica associada aos cuidados com o meio ambiente e viabilidade econômica.

Quanto aos conceitos da economia circular observou-se projetos aplicando os princípios da sustentabilidade e ecoinovação. Os novos pilares dessa nova concepção de mercado estão diretamente conectados com as novas pesquisas e ações dos empreendimentos. Os indicadores de ecoeficiência para melhoria dos processos e adequação ao tema amplamente discutido estão cada vez mais sendo incorporados nos diversos tipos de negócios, desde a concepção de novos produtos. Esse tipo de olhar tem levado gestores a repensar os processos e tornar a geração de eletricidade mais sustentável, mesmo se tratando de usinas termoeletricas e pela utilização fontes não renováveis.

Em relação as fontes de energia, aumentaram significativamente os projetos com uso de outras tecnologias para melhorar os resultados econômicos e também reduzir impactos negativos ao ecossistema de um modo geral. Os principais projetos envolvem o uso do gás natural, armazenamento e captura de carbono e a biomassa. Ainda foram abordados alguns temas pertinentes quanto a regulamentação e estratégias de alguns países onde existe um alto grau de uso das termoeletricas, considerando a real importância dos governos em incentivar e financiar projetos para alcançar determinados objetivos em relação as metas de poluição entre os países.

Ao final da pesquisa foi possível identificar os principais direcionamentos e as linhas de pensamento para o futuro das termoeletricas. Apesar da preocupação pelo uso dos combustíveis fósseis, existe um longo caminho para percorrer e as termoeletricas irão desempenhar um papel importante para garantir da segurança do setor energético. Apesar do alto custo ambiental, torna-se importante na cadeia produtiva e alinhamento estratégico de longo prazo.

Os trabalhos futuros podem restringir mais as palavras-chave da pesquisa para melhor análise individual de cada um dos temas que surgiram na pesquisa. Outros assuntos específicos que fazem parte do escopo e campo de atuação das termoeletricas não foram encontrados, a exemplo, dos mercados ancilares e projetos de descomissionamentos. Todavia, esse trabalho

servirá de base para futuras pesquisas e aprofundamentos sobre os demais assuntos que não foram alcançados por esse trabalho.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMADI, MH; NAZARI, MA; SADEGHZADEH, M; POURFAYAZ, F; GHAZVINI, M; MING, TZ; MEYER, JP; SHARIFPUR, M. Thermodynamic and economic analysis of performance evaluation of all the thermal power plants: A review. **Int J Soc Ecol Sustain Dev**, v. 9, p. 12-25, 2019.

ALMEIDA, J.; ALMEIDA, E.; TORRES, E.; FREIRES, F. Economic value of underground natural gas storage for the Brazilian power sector. **Energy Policy**, v. 121, p. 488-497, 2018

AMINOV, Z.; NAKAGOSHI, N.; DANG X. T.; HIGASHI, O.; ALIKULOV, K. Evaluation of the energy efficiency of combined cycle gas turbine. Case study of Tashkent thermal power plant, Uzbekistan. **Applied Thermal Engineering**, v. 103, p. 501-509, 2016.

AMIRABEDIN, E.; MCILVEEN-WRIGHT, D. A Feasibility Study of Co-Firing Biomass in the Thermal Power Plant at Soma in order to Reduce Emissions: an Exergy Approach. **International Journal of Environmental Research**, v. 7, p. 139-154, 2013.

BHANGU, NS; PAHUJA, GL; SINGH, R. Application of Fault Tree Analysis for Evaluating Reliability and Risk Assessment of a Thermal Power Plant. **Energy Sources Part A Recovery Utilization and Environmental Effects**, v. 37, p. 2004-2012, 2015.

BRICL, M; AVSEC, J. Evaluation of System for Economically Viable Thermal Power Plant Operation. **Tehnicki Vjesnik-technical Gazette**, v. 26, p. 1038-1043, 2019.

BYLKIN, BK; PEREGUDA, VI; SHAPOSHNIKOV, VA; TIKHONOVSKII, VL. Composition And Structure Of Simulation Models For Evaluating Decommissioning Costs For Nuclear Power Plant Units. **Atomic Energy**, v. 110, p. 77-81, 2011.

CARDOSO J.; SILVA, V.; EUSÉBIO, D. Techno-economic analysis of a biomass gasification power plant dealing with forestry residues blends for electricity production in Portugal. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, 2019.

CHABOWSKI, B.; SAMIEE, S; HULT, G. A bibliometric analysis of the global branding literature and a research agenda. **J Int Bus Stud**, v. 44, p. 622–634, 2013.

CHANDEL, R; SINGH, H; KUMAR, R. Performance evaluation of state-owned thermal power plants in northern India using DEA. **International Journal of Global Energy Issues**, v. 40, p. 380, 2017.

CUI, H.; ZHAO, T.; WU, R. An Investment Feasibility Analysis of CCS Retrofit Based on a Two-Stage Compound Real Options Model. **Energies**, v. 11, n. 7, p. 1711, 2018.
EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco Energético Nacional**. Rio de Janeiro/RJ, 2018.

FAN, JL; XU, M; YANG, L; ZHANG, X. Benefit evaluation of investment in CCS retrofitting of coal-fired power plants and PV power plants in China based on real options. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 115, p. 109350, 2019.

FRANKI, V.; VIŠKOVIĆ, A.; ŠAPIĆ, A. Carbon capture and storage retrofit: Case study for Croatia. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**. 2019.

GALVIN, R.; SUNIKKA-BLANK, M. Economic viability in thermal retrofit policies: Learning from ten years of experience in Germany. **Energy Policy**, v. 54, p. 343–351. 2013.

GINGERICH, D.; MAUTER, M. Quantity, Quality, and Availability of Waste Heat from United States Thermal Power Generation. **Environmental science & technology**, v. 19, n. 14, p. 8297-8306, 2015.

GRIGORE, R.; CORNELIA, C.; HAZI, A.; HAZI, G. Eco-efficiency indicators in the evaluation of environmental performance of thermal power plants. **Environmental engineering and management journal**, v. 15, p. 143-149, 2016.

GUPTA, S; TEWARI, PC. Maintenance Performance Evaluation Of Power Generation System Of A Thermal Power Plant. **Iranian Journal of Science and Technology Transaction B: Engineering**, v. 35, p. 47-59, 2011.

GUTTIKUNDA, S. K.; JAWAHAR, P. Evaluation of Particulate Pollution and Health Impacts from Planned Expansion of Coal-Fired Thermal Power Plants in India Using WRF-CAMx Modeling System. **Aerosol Air Qual. Res**, v. 18, p. 3187-3202, 2018.

HELLER L.; GAUCHÉ, P. Modeling of the rock bed thermal energy storage system of a combined cycle solar thermal power plant in South Africa. **Solar Energy**, v. 93, p. 345-356, 2013.

INSTITUT D'AMÉNAGEMENT ET D'URBANISME - IAU. Économie circulaire, écologie industrielle Éléments de réflexion à l'échelle de l'Île-de-France. **IAU Ile-de-France**, 2013.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Key World Energy Statistics 2017**; International Energy Agency: Paris, France, 2017.

JEONG, K; CHOI, B; MOON, J; HYUN, D; LEE, J; KIM, I; KIM, G; KANG, S; CHOI, J; JEONG, S; AHN, S; LEE, J. An estimation to measure and to evaluate the work times following the trajectory of workers during decommissioning of nuclear facilities. **Annals of Nuclear Energy**, v. 94, p. 10-15, 2016.

JEONG, K; CHOI, B; MOON, J; HYUN, D; LEE, J; KIM, I; KIM, G; SEO, J. An evaluation of the dismantling technologies for decommissioning of nuclear power plants. **Annals of Nuclear Energy**, v. 69, p. 62-64, 2014.

JEONG, K; CHOI, B; MOON, J; HYUN, D; LEE, J; KIM, I; KIM, G; SEO, J. The digital mock-up system to simulate and evaluate the dismantling scenarios for decommissioning of a NPP. **Annals of Nuclear Energy**, v. 69, p. 238-245, 2014.

JEONG, K; PARK, S; HAHM, I; HA, J; MIN, S; HONG, S; SEO, B; LEE, B; KIM, D; KIM, J; JEONG, S; AHN, S; LEE, J; LEE, B. Approach to optimization of risk assessment based on an evaluation matrix for decommissioning processes of a nuclear facility. **Annals of Nuclear Energy**, v. 128, p. 53-62, 2019.

JEONG, KS; CHOI, BS; MOON, JK; HYUN, DJ; LEE, JH; KIM, IJ; KANG, SY; CHOI, JW; AHN, SM; LEE, JJ; LEE, BS. The safety assessment system based on virtual networked environment for evaluation on the hazards from human errors during decommissioning of nuclear facilities. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 156, p. 34-39, 2016.

JESUS, A. D.; ANTUNES, P.; SANTOS, R.; MENDONÇA, S. Eco-Innovation in the transition to a circular economy: an analytical literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 2999-3018, 2018.

KATSAPRAKAKIS, D.; KALLIGEROS, S.; PASADAKIS, N.; MONIAKIS, M.; SKIAS, I. The feasibility of the introduction of natural gas into the electricity production system in the island of Crete (Greece). **Energy for Sustainable Development**, v. 27, p. 155-167, 2015.

KHANKARI, G.; KARMAKAR, S. Power Generation From Coal Mill Rejection Using Kalina Cycle. **Energy Resour. Technol**, v. 138, 2016.

KHATTAK, M. A.; BORHANA, A.; SALMAN, M.; ALI, H.; NAWAZ, S.; KHAN, Z. Cost evaluation of proposed decommissioning plan of CANDU reactor. **Journal of Engineering Science and Technology**, v. 13, p. 3173-3189, 2018.

KILIÇ, O.; ACARKAN, B.; AY, S. FGD investments as part of energy policy: A case study for Turkey. **Energy Policy**, v. 62, p. 1461-1469, 2013.

KITCHENHAM, B. **Procedures for performing systematic reviews**. Keele, UK, Keele Univ. 33, 28. 2004.

LI, M.K.; LIU, Y.K.; PENG, M.J.; XIE, C.L.; YANG, L.Q. The digital simulation and fuzzy evaluation to reduce the likelihood of unsafe behavior in nuclear decommissioning, **Annals of Nuclear Energy**, v. 119, p. 331-341, 2018.

LI, N.; ZHAO, H. Performance evaluation of eco-industrial thermal power plants by using fuzzy GRA-VIKOR and combination weighting techniques. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 169-183, 2016.

LI, S.; MA, X.; YANG, C. A combined thermal power plant investment decision-making model based on intelligent fuzzy grey model and its stochastic process and its application. **Energy**, v. 159, p. 1102-1117, 2018.

LIANG, X.; REINER, D.; GIBBINS, J.; LI, J. Getting Ready for Carbon Capture and Storage by Issuing Capture Options. **Environment and Planning A: Economy and Space**, v. 42, p. 1286-1307, 2010.

LIN, L.; XU, B.; XIA, S. Multi-Angle Economic Analysis of Coal-Fired Units with Plasma Ignition and Oil Injection during Deep Peak Shaving in China. **Applied Sciences**, v. 9, n. 24 p. 5399, 2019.

LIU, C.; LIN, S.; LEWIS, C. Evaluation of thermal power plant operational in Taiwan by data envelopment analysis. **Energy Policy**, v. 38, p. 1049-1058, 2010.

LUND, H.; MATHIESEN, B. V. The role of carbon capture and storage in a future sustainable energy system. **Energy**, v. 44, p. 469–76, 2012.

MA, Y.; YANG, L.; LU, J.; PEI, Y. Techno-economic comparison of boiler cold-end exhaust gas heat recovery processes for efficient brown-coal-fired power generation. **Energy**, v. 116, p. 812-823, 2016.

MAYER, F. D.; SALBEGO, P. R. S.; ALMEIDA, T. C. et al. Quantification and use of rice husk in decentralized electricity generation in Rio Grande do Sul State, Brazil. **Clean Techn Environ Policy**, v. 17, p. 993–1003, 2015.

MENG, M.; MANDER, S.; ZHAO, X.; NIU, D. Have market-oriented reforms improved the electricity Generation efficiency of China's thermal power industry? An empirical analysis. **Energy**, v. 114, p. 734–741, 2016.

MIARA A.; COHEN S. M.; MACKNICK J.; VÖRÖSMARTY, C. J.; CORSI, F.; SUN, Y.; TIDWELL, V. C.; NEWMARK, R.; FEKETE, B. M. Climate-Water Adaptation for Future US Electricity Infrastructure. **Environmental Science & Technology**, v. 53, p. 14029-14040, 2019.

OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development). **OECD Environmental Outlook to 2050**. Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris. 2012.

PARK, HS; PARK, SK; JIN, HG; SONG, CH; MOON, JK. A study of the decommissioning procedure of an activated structure through an evaluation of the decommissioning cost for a research reactor. **Progress in Nuclear Energy**, v. 91, p. 399-410, 2016.

PARK, J.; SARKIS, J.; WU, Z. Creating integrated business and environment value within the context of China's circular economy and ecological modernization. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, p. 1494-1501, 2010.

PROCESI, M. Geothermal Potential Evaluation for Northern Chile and Suggestions for New Energy Plans. **Energies**, v. 7, p. 5444-5459, 2014.

REDDY, V.; KAUSHIK, S.; TYAGI, S. Exergetic analysis and evaluation of coal- fired supercritical thermal power plant and natural gas-fired combined cycle power plant. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 16, p. 489-499, 2014.

SAGANI, A.; HAGIDIMITRIOU, M.; DEDOSSIS, V. Perennial tree pruning biomass waste exploitation for electricity generation: The perspective of Greece. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 31, p. 77-85, 2018.

SCHMIDT, F. Meta-analysis: A constantly evolving research integration tool. **Organizational Research Methods**, v. 11, n. 1, p. 96-113, 2008.

SEMIN A.N., PONKRATOV V.V., LEVCHENKO K.G., POZDNYAEV A.S., KUZNETSOV N.V., LENKOVA O.V. Optimization model for the Russian electric power

generation structure to reduce energy intensity of the economy. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 9, n. 3, 2019.

SURESH, M.V. J. J.; REDDY, S.; KOLAR, A. 4-E (Energy, Exergy, Environment, and Economic) analysis of solar thermal aided coal-fired power plants. **Energy for Sustainable Development**, v. 14, p. 267-279, 2010.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a methodology for developing evidence informed management knowledge by means of systematic review. **Br. J. Manag**, v. 14, p. 207-222, 2003.

VESELOV F.V., EROKHINA I.V., MAKAROVA A.S., KHORSHEV A.A. Comprehensive assessment of the effective scope of modernization of thermal power plants to substantiate the rational structure of the generating capacities for the future until 2035. **Thermal Engineering**, v. 64, p. 161–169, 2017.

WANG, L.; YANG, Z.; SHARMA, S.; MIAN, A.; LIN, T. E.; TSATSARONIS, G.; MARÉCHAL, F.; YANG, Y. A Review of Evaluation, Optimization and Synthesis of Energy Systems: Methodology and Application to Thermal Power Plants. *Energies*, v. 12, n. 73, 2019.

WANG, Y.; YAN, W.; KOMONPIPAT, S. How does the capacity utilization of thermal power generation affect pollutant emissions? Evidence from the panel data of China's provinces, **Energy Policy**, v. 132, p. 440-451, 2019.

XIE, J; LIANG, Z; ZHANG, XB; ZHU, L. Efficiency evaluation of thermal power plants in China based on the weighted Russell directional distance method. **Journal of Cleaner Production**, v. 222, p. 573-583, 2019.

YE, M.; SUN, J.; HUANG, S. Comprehensive evaluation of cleaner production in thermal power plants based on an improved least squares support vector machine model. **Environmental Engineering Research**, v. 24, n. 4, 2018.

ZHANG, W.; XIA, X.; LI, J. Comparison of energy and environmental regulations for thermal power plants in China. *Environmental Engineering and Management Journal*, v. 13, p. 1221-1227, 2014.

ZHANG, Y.; QIN, F.; SHAO, S.; LIU, S. L.; CHEN, Y.; ZHANG, S. S. An Evaluation of the Sustainability of Thermal Power Plants Based on Emergy and Exergy Theory. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, v. 34, p. 1249-1258, 2012.

ZHOU, K.; BONET, F.; DOMINIQUE, W.; CHENGCHENG, D.; AKUMBA and JUILLARD, G. A Study on Circular Economy Implementation in China. **Department of Research, Ipag Business School**, n. 2014-312, 2014.

ZUPIC, T. ČATER. Bibliometric methods in management and organization. **Organizational Research Methods**, v. 18, n. 3, p. 429–472, 2015.

i

ⁱ Os autores agradecem à Fundação Para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia (FDTE), pelo apoio financeiro e ao projeto de P&D financiando pela EPASA S.A.