

EFICIÊNCIAS E EFETIVIDADES DE SISTEMAS GEOTÉRMICOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA: UMA REVISÃO.

Bruno Gomes Cunha¹
Edna Cordeiro de Souza²
Thâmmara Lariane Henriques Tito³
José Jefferson da Silva Nascimento⁴

RESUMO

Este trabalho, traz uma revisão da literatura acerca dos estudos realizados sobre os sistemas de geração de energia a partir de matrizes geotérmicas. As pesquisas aqui exploradas foram publicadas entre 2008 e 2018, e seus autores procuraram apresentar os avanços tecnológicos e estudos para aumento de eficiência e eficácia dos ciclos térmicos, principalmente o Ciclo Orgânico de Rankine (ORC) e o Ciclo de Kalina (KC) e suas variações. O investimento em pesquisas deste tipo corrobora com a necessidade latente em escala global, da mudança nas matrizes energéticas atuais, onde predominam o uso de combustíveis fósseis, em detrimento do uso de fontes de calor limpas e renováveis como é o caso da energia geotérmica. Ao longo destes 10 anos o avanço tecnológico neste tipo de sistema restringiu-se a melhoria no rendimento dos ciclos térmicos, e instalação de plantas com sistemas híbridos entre geotérmicas, solar, biomassa e gás, para melhorar a eficiência energética e exegética do sistema como um todo, tornando-o mais barato, e economicamente viável.

Palavras-chave: Eficiência, Efetividade, Sistema Geotérmico, Termodinâmica.

INTRODUÇÃO

O consumo de energia deverá aumentar em todo o mundo consideravelmente nos próximos anos, devido ao crescimento contínuo da população mundial e à maior demanda humana por energia. Atualmente, os combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural) são amplamente utilizados para fornecer energia. De acordo com a International Energy Agency (IEA) estima-se que o a produção mundial de petróleo pode atingir o pico em 2030, assim, com a possível escassez de combustíveis fósseis e as preocupações crescentes sobre os problemas ambientais que os mesmos causam, o uso de fontes renováveis de energia têm surgido como uma alternativa parcial aos problemas energéticos decorrentes da utilização pouco eficiente das fontes não renováveis de energia.

Neste cenário, a energia geotérmica, definida como a energia térmica proveniente do interior da Terra, desponta como uma alternativa promissora como fonte de energia renovável

¹ Doutorando pelo Curso de Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, eng.bgomes@gmail.com;

² Doutorando pelo Curso de Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, ednasouza2@hotmail.com;

³ Doutorando pelo Curso de Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, thammaratito@gmail.com;

⁴ Professor orientador: Doutor, Pesquisador do Departamento de Engenharia de Materiais – DEMa/CCT/UFCG.

e não-poluidora. A temperatura e/ou a entalpia são propriedades comumente utilizadas para classificar as fontes geotérmicas, desta forma podem ser divididas em três grupos: fontes de baixa, média e alta entalpia. A geração de eletricidade é a mais importante forma de utilização de fontes geotérmicas de alta temperatura $>150^{\circ}\text{C}$. As fontes de média e baixa temperatura $<150^{\circ}\text{C}$ são adequadas em diferentes tipos de aplicações na agricultura, na indústria e na utilização residencial (SINGHAL; GUPTA, 2010).

Um dos fatores que dificultam o aproveitamento das fontes de energia geotérmica é que as fontes de média e alta temperatura estão disponíveis em poucos lugares do mundo, dessa forma, torna-se necessário o desenvolvimento de tecnologias de aproveitamento das fontes de baixa temperatura. Dentre as tecnologias disponíveis destacam-se o Ciclo Kalina e o Ciclo Orgânico de Rankine.

O Ciclo Kalina e o Ciclo Orgânico de Rankine são tecnologias utilizadas para produção de trabalho útil a partir de fontes de calor de baixa temperatura. Estes ciclos são caracterizados por utilizarem fluidos de trabalho ou misturas de fluidos que apresentam baixas temperaturas de vaporização, o qual os torna conveniente para o aproveitamento de fontes de calor de baixa temperatura. Estas tecnologias permitem obter maiores potências a partir de fontes quentes, revalorizando as fontes de calor que tinham um baixo potencial de realização de trabalho e dissipa o calor jogado na atmosfera sem produzir contaminação adicional ao meio ambiente (HO, 2012). Embora algumas fontes de energia geotérmica não sejam viáveis o suficiente, muitas pesquisas vêm sendo realizadas com o intuito de avaliar o desempenho dessas fontes energéticas para várias aplicações potenciais. Uma vez que a produção de energia isoladamente produz muito desperdício de calor, o qual não pode ser recuperado nesse sistema, tem-se considerado como alternativa os sistemas de produção de energia multigeracional para utilização do calor residual (YUKSEL et al, 2018). De acordo com o levantamento bibliográfico realizado, sistemas de produção de energia de cogeração e trigeração baseados em energia geotérmica tornam-se mais viáveis do que sistemas de geração única. No entanto, sistemas integrados de multigeração, além da trigeração, são relativamente novos. Portanto, espera-se que sistemas multigeracionais integrados sejam mais utilizados no futuro, visto que esses sistemas proporcionam maior eficiência e menos danos ao meio ambiente.

METODOLOGIA

Esta pesquisa está caracterizada como uma revisão sistemática da literatura com finalidade descritiva (VERGARA, 2013) e destinando-se a explicar sobre o fenômeno de utilização de

(83) 3322.3222

contato@conapesc.com.br

www.conapesc.com.br

sistemas geotérmicos e suas respectivas eficiências, efetividades e sustentabilidade relatadas em estudos nos últimos 10 anos. Foi utilizado o meio bibliográfico para busca na literatura científica pelo tema e almejou-se uma abordagem qualitativa dos dados analisados (GIL, 2010), visando à disponibilização de uma síntese dos dados relacionados aos níveis de eficiência desses sistemas termodinâmicos assim como a evolução comparativa desse fator no período determinado de tempo. O método de busca foi realizado utilizando o Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php?option=com_phome&Itemid=68), uma biblioteca virtual que possui um acervo de mais de 45 mil títulos com textos completos disponíveis e 130 bases referenciais. Para o sistema de “busca avançada” foram utilizados os descritores “thermodynamics”, “entropy”, “enthalpy” e “system”, no campo 1 e “geothermal energy”, no campo 2 e os conectores “qualquer” e “contém”, “and”, e “no título” e “é exato”, respectivamente. A base de dados “Scopus” foi selecionada com a finalidade de eliminar a duplicidade de estudos ao mesmo tempo em que abrange a maioria dos artigos publicados na literatura científica. Foi selecionado o período de publicação de 2008 a 2018, e a opção de periódicos revisados por pares.

Desde a seleção à avaliação dos dados trazidos pelos autores das pesquisas encontradas, a análise de inclusão e exclusão de artigos pertinentes ao objetivo proposto nesta pesquisa três autores com diferentes especializações realizaram avaliações individuais para um consenso posterior e quando conflito existente, um consenso para análise de exclusão ou inclusão do artigo em questão foi realizado entre os três. O quarto autor revisou a pertinência da seleção dos estudos incluídos e mantidos para análise final.

A busca por dados e geração de resultados considerou questões sobre eficiência, efetividade e sustentabilidade dos sistemas termodinâmicos que utilizam energia geotérmica como fonte de calor para gerar trabalho e assim estimar e comparar a evolução do estado da técnica da utilização de sistemas geotérmicos. A classificação dos estudos em ordem crescente na tabela 1.1 considerou o fator “relevância” do estudo estabelecido automaticamente pela Plataforma Capes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A busca resultou em 30 artigos, dos quais, depois de lidos os respectivos resumos, 10 foram excluídos da pesquisa por não apresentarem em seus resultados uma estimativa de eficiência, de efetividade, ou de sustentabilidade de forma explícita pelos autores, e após a

(83) 3322.3222

contato@conapesc.com.br

www.conapesc.com.br

leitura completa, 9 artigos foram eliminados por analisarem um tipo de energia específica sem foco estabelecido para um sistema geotérmico, apresentarem foco apenas para estado da arte ou análise econômica estritamente.

Os 11 estudos incluídos para descrição nesta revisão apresentaram pelo menos uma das questões de forma explícita.

No estudo 1 os autores apresentaram uma proposta de sistema integrado que consistia em um ciclo de refrigeração, a uma temperatura de 26,9%, por absorção de amônia-água, neste a energia geotérmica (fonte geotérmica líquida disponível a 200°C a uma taxa de 100 kg /s) fornecia calor para realização de trabalho no gerador, e o Ciclo de Claude para liquefação do hidrogênio (KANOGLU; YILMAZ; ABUSOGLU,2016).

Ao utilizarem as 1ª e 2ª leis da termodinâmica com os parâmetros ajustados, foi calculado para o ciclo de refrigeração por absorção de amônia-água uma eficiência exergética de 67,0% e para o ciclo de Claude de 63,7. Os autores atribuíram a redução no consumo de trabalho necessário no processo de liquefação em 25,4% à utilização da fonte do sistema geotérmico para fornecimento de calor ao gerador que realiza trabalho para o processo de pré-resfriamento do hidrogênio. O estudo quantitativo conseguiu demonstrar que a fonte de calor geotérmica auxiliou assim um aumento da efetividade do sistema em um valor considerável, provavelmente contribuindo para uma eficiência exergética de 67,9%. Por fim há a indicação da energia geotérmica para tecnologias de hidrogênio baseadas em energias renováveis (KANOGLU; YILMAZ; ABUSOGLU,2016).

Os autores do estudo 2 tiveram como principal objetivo realizar uma análise termodinâmica de um novo sistema de energia multigeracional baseado na geotermia e nas primeira e segunda lei da termodinâmica. O estudo trouxe o desenvolvimento de um novo sistema com a utilização da energia geotérmica para geração e armazenamento de hidrogênio; a condução de uma análise termodinâmica para os processos integrados analisando saídas úteis; e a definição de taxa de destruição exergética e os desempenhos exergéticos de cada subsistema, e de todo o sistema. E para definição do desempenho do sistema integrado foi realizada uma investigação para estimar parâmetros mais eficientes e eficazes (YUKSEL; OZTURK; DINCER, 2018).

Os pontos positivos mais importantes encontrados pelos autores para o sistema analisado foram os seguintes:

□ À medida que a temperatura de referência aumentou de 0°C para 40°C, a taxa de destruição exergética do sistema diminuiu acentuadamente, e ao se aproximar da temperatura da fonte geotérmica, mostrou que houve aumento do desempenho exergético do processo.

- À medida que a temperatura de referência aumentou, as taxas de produção de energia e hidrogênio aumentaram, e a taxa de produção de energia aumentou de cerca de 4350kW para quase 5100kW, com consequente aumento da taxa de produção de hidrogênio, de 0,0315 kg/s para 0,0355 kg/s.
- Taxas de produção de eletricidade e hidrogênio foram investigadas para a faixa de 130°C e 200 °C, mostrando aumento da taxa de produção de energia de 2000 kW para 9000 kW e a taxa de produção de hidrogênio de 0,015 kg/s para 0,06 kg/s.
- O aumento na temperatura do fluido geotérmico e redução da destruição exergética, aumentou eficiência exergética do processo de 3500 kW para 13500 kw e de 38% a 64%, respectivamente.

Como a energia térmica geotérmica foi utilizada como única entrada do sistema multigeracional, a temperatura da fonte geotérmica desempenhou um papel crucial para as taxas de produção de energia e hidrogênio. Logo, a fonte geotérmica com temperatura mais alta carrega uma maior entalpia e o aumento na temperatura do fluido geotérmico teve efeito positivo na taxa de saída do sistema. Ficou evidente no estudo que a temperatura de referência tem efeito positivo no desempenho do sistema, logo, aumentos na temperatura de referência diminuem a taxa de destruição exergética de todo o processo e as taxas de produção de energia e hidrogênio aumentam. E como desvantagem houve a abordagem de que o aumento da temperatura aumenta a pressão alta turbina, o que estabelece uma maior carga sobre a turbina Kalina, e esse aumento na pressão de entrada diminui as taxas de velocidade na geração de eletricidade e hidrogênio, afetando negativamente, porém não significativamente em relação ao total, as taxas de saída do sistema.

Os autores do estudo 3 propuseram e analisaram um modelo de sistema integrado com um ciclo de classificação intermitente, desumidificação e humidificação em uma unidade de dessalinização, almejando à utilização de energia a partir do vapor de água conseguido a utilizando uma fonte geotérmica. Entre os achados principais para o sistema em questão os autores observaram como relevante que em combinação com a queda contínua da entalpia com a elevação da temperatura de entrada na turbina a vapor, um valor máximo da produção de energia (157,0 kW) quando a temperatura intermitente está à 102,15°C, enfatizando que para garantir a segurança da turbina a vapor e a qualidade do vapor da exaustão da turbina a temperatura intermitente deve ser menor que 112,15°C, considerado como o limite inferior para a segurança da turbina que deve atingir uma qualidade de vapor de ~ 0,88 (exatamente 89,82%) (HE; YANG; HAN, 2018). Para julgar a viabilidade real das condições térmicas os autores analisaram a entropia nesse, tomando todos os valores de geração de entropia em comparação

obtiveram o resultado de que a evaporação intermitente tem a perda máxima irreversível entre todos os processos térmicos com o peso máximo de aproximadamente 40,4%. Ao fim, foi relatado que diante das condições analisadas o sistema não seria capaz de alcançar a produção de água (HE; YANG; HAN, 2018). Foi sugerido pelos autores que devido à elevação da taxa de fluxo de massa para equilibrar massa e energia, a redução da temperatura de pulverização e diferença de temperatura terminal do aquecedor de água do mar pode aumentar o desempenho do sistema integrado (HE; YANG; HAN, 2018).

O estudo 4 apresentou um sistema de geração de energia tripla utilizando uma fonte geotérmica, dados obtidos a partir da modelagem do sistema e de sua validação, elaborado para produzir eletricidade, aquecimento e hidrogênio. Os autores realizaram uma análise termodinâmica detalhada, desenvolvida com alta precisão para o sistema de três gerações, validando o modelo utilizando dados experimentais das literaturas consultadas. Os autores discutem os resultados da modelagem termodinâmica apresentando várias perspectivas. Inicialmente é colocado que a taxa do fluxo de massa do geofluido é um dos parâmetros do projeto neste estudo, e como variável, é vista como tendo um efeito mínimo na eficiência energética de cogeração considerando as três formas de gerações no sistema, contudo aumenta a eficiência exergética delas e ao aumentar essa taxa de fluxo, a produção de energia líquida aumenta. Isso foi visto pelos autores como uma interferência não significativa na eficiência energética, porém, devido à natureza da energia elétrica, a eficiência exergética seria aumentada (AKRAMI, et al., 2017b). Os autores enfatizam que a amplificação da pressão pode reduzir a eficiência energética, reafirmando a colocação dos autores do estudo 2 que analisaram o efeito do aumento da pressão no ciclo Kalina (YUKSEL; OZTURK; DINCER, 2018), e demonstram que qualquer aumento na pressão de entrada da turbina pode reduzir a entalpia na entrada da turbina, ao mesmo que outros parâmetros permanecem inalterados. É trazida também a informação que, nessa modelagem, a tentativa de reduzir a entalpia e aumentar o fluxo de massa de vapor de água decorrente do fluxo da fonte geotérmica pode provocar uma diminuição na eficiência energética (AKRAMI, et al., 2017b). O último parâmetro analisado pelos autores foi o aumento na temperatura de entrada na turbina, que resultou no aumento da eficiência energética e na diminuição da eficiência exergética tanto para o sistema triplo como para o sistema global. A razão do declínio na tendência de eficiência exergética é que, apesar do aumento no potencial de energia, haverá uma diminuição na produção de energia devido à redução do fluxo de massa de fluido de trabalho (AKRAMI, et al., 2017b). Assim concluíram que o aumento do fluxo de geofluidos tem um efeito positivo significativo no aquecimento e na geração de energia elétrica e na eficiência exergética, mas tem um efeito leve sobre a eficiência energética do sistema

proposto. O aumento na produção de energia elétrica proporciona maior produção de hidrogênio (a cada 10,4 kW de energia elétrica na unidade de eletrólise, o hidrogênio puro será produzido a uma taxa de 0,2 kg/h). Um aumento na temperatura de entrada da turbina ORC aumenta a eficiência energética do sistema, enquanto um aumento nesta temperatura reduz a eficiência exergética (AKRAMI, et al., 2017b).

O estudo 5 de Yilmaz (2017) apresenta além de uma análise termodinâmica comparativa entre os ciclos Rankine e Kalina comparativo, sugestões de otimização desses dois sistemas que possuem diferentes unidades geradoras de energia. Com o objetivo de avaliar tais sistemas o autor utilizou modelos termodinâmicos são desenvolvidos e um estudo paramétrico de eficiência baseado na segunda lei da eficiência energética. Uma modelagem de destruição exergética também foi conduzida para identificar as principais fontes de irreversibilidades dentro dos componentes dos sistemas considerados.

Uma análise termodinâmica abrangente e de otimização energia geotérmica de baixo grau resultou em dados comparativos e de otimização, baseada na segunda lei da eficiência, entre os dois ciclos analisados. Tais resultados consideraram condições ótimas de funcionamento dos sistemas geradores de energia.

O autor encontrou indícios baseados na lei da eficiência energética que o ciclo Kalina apresentou maior nível de eficiência em relação ao ciclo Rankine, com eficiências máximas de 50,36% e 46,51%, respectivamente, a uma temperatura de 120°C. Dessa forma o ciclo Kalina foi considerado mais eficiente para produção de energia quando apresentou 12,2% a mais de capacidade para essa produção quando comparado ao ciclo Rankine, ambos em condições ótimas (YILMAZ, 2017).

O estudo 6, de Yilmaz e Kanoglu (2014) apresentou um projeto de configuração de um sistema desenvolvido para produção de hidrogênio a partir de um sistema termodinâmico com fonte de energia geotérmica acionada por eletrólise da água. Os autores consideraram uma fonte geotérmica a 160°C disponível a uma taxa de 100 kg/s, operando em condições reais. A usina geotérmica binária produziu uma potência elétrica de 3810 kW que foi utilizada como entrada de energia para o eletrolisador, permitindo que o hidrogênio fosse produzido a uma taxa de 0,0340 kg/s. Assim, mostrou uma eficiência 30% maior que uma usina à mesma potência elétrica, com parâmetros determinados, à temperatura de 70°C. Os autores justificam que a água entra no eletrolisador a uma temperatura mais alta por meio do pré-aquecimento da água geotérmica residual da usina e a temperatura dos recursos geotérmicos afeta diretamente a energia produzida pela usina e a taxa de produção de hidrogênio, e parece diminuir o consumo de eletricidade no processo de eletrólise. É apresentado no estudo que a potência líquida pode

aumentar de 3810 kW a 160°C para 5575 kW a 180 °C, por exemplo. As eficiências de energia e de exergia aumentaram à medida que a temperatura da água geotérmica aumentou, considerando que a demanda por energia diminuiu. Contudo, esse aumento de temperatura de operação da eletrólise afeta tensões de entalpia e eletrólise, esta que reduz o potencial elétrico. A água de eletrólise pôde ser pré-aquecida a 80°C pela água geotérmica a fim de aumentar a eficiência do sistema e do hidrogênio ser produzido a uma taxa de 0,0340 kg/s. Sendo a produção de produção de hidrogênio proporcional à temperatura do recurso geotérmico. Assim, o sistema apresentado ofereceu uma opção viável para produção de hidrogênio movida a energia renovável, segundo os autores.

As eficiências, energética e exérgica, da usina geotérmica binária analisada foram estabelecidas no estudo como de 11,4% e 45,1%, respectivamente, assim como as correspondentes para os sistemas de eletrólise que foram de 64,0% e 61,6%, respectivamente, e os do sistema global de 6,7% e 23,8%, respectivamente (YILMAZ; KANOGLU, 2014).

No estudo 7, uma planta de usina de energia híbrida solar-geotérmica foi examinada com base em Ciclos Orgânicos de Rankine subcríticos e supercríticos, para qual simulações e modelagens foram realizadas utilizando o pacote de simulação de processo, Aspen HYSYS, ferramenta abrangente de simulação em engenharia direcionada para otimização de projeto e operação de processos por meio da modelagem de estados estável e dinâmico. Análises de energia e exergia da planta híbrida foram realizadas com base na primeira e na segunda lei da termodinâmica, enquanto a análise econômica foi realizada usando a abordagem do custo nivelado da eletricidade (ZOUH, 2014).

A ênfase do autor foi dada ao estudo da hibridização do sistema de energia solar e geotérmica em um ciclo orgânico de Rankine supercrítico, e os desempenhos da planta híbrida foram então avaliados através de análise técnica, análise econômica e a figura de análise de mérito. A análise técnica mostrou que termodinamicamente uma planta híbrida com um ciclo Rankine supercrítico apresenta uma eficiência superior à mesma planta com um ciclo Rankine subcrítico quando a condição de entrada de exergia solar fosse $> 66\%$, com um aumento na produção de energia de 4 a 17% utilizando os mesmos recursos de energia (ZOUH, 2014). As análises mostraram ainda que o aumento dessa porcentagem de entrada de exergia solar pode alcançar cerca de 27 a 34% para planta híbrida supercrítica, e de 21 a 32% na planta híbrida subcrítica. A análise de mérito mostrou que as plantas híbridas, de ciclo Rankine subcrítico e ciclo Rankine supercrítico produzem 15% e 19%, respectivamente, nas condições de taxas de exergia solar $>79\%$ e $>74\%$, também respectivamente, a mais de energia em relação às mesmas plantas autônomas. O autor realizou também uma análise econômica, apresentando que um sistema de

energia solar de entrada para o cenário supercrítico seria mais econômico de 1,5 a 3,3% em relação comparativa ao do cenário subcrítico, apresentando assim uma análise custo-efetividade e definindo o sistema híbrido de energia solar e geotérmica como ciclo de Rankine supercrítico como mais viável e eficiente em um investimento de recursos (ZOUH, 2014).

O estudo 8 um sistema energético de múltiplas gerações baseado na geotérmica, incluindo o ciclo Rankine orgânico, aquecedor de água doméstico, ciclo de refrigeração de absorção e electrólise por membrana de permuta foi desenvolvido para gerar eletricidade, aquecimento, resfriamento e hidrogênio, e análises energética e exergética foram realizadas sobre o mesmo. Efeitos de variáveis também foram comentados no estudo de Akrami et al. (2017a).

Os principais resultados encontrados no estudo de análises energéticas e exergéticas foram explanadas para um sistema integrado baseado em energia geotérmica e a influência de parâmetros vitais do projeto foram examinados nas variáveis como eficiências de energia e exergia de todo o sistema, produção de energia elétrica líquida e produção de hidrogênio. Os resultados da análise exergética mostraram que os focos de mais expressivas destruições exergéticas ocorrem no evaporador e na turbina, respectivamente, esta proporcionalmente ao aumento de temperatura e, conseqüentemente, da pressão, reduzindo a entalpia do sistema, insinuando a necessidade de atenção deve ser dada a novos projetos desses componentes, visando a evitar as principais irreversibilidades que refletem na eficiência geral do sistema. Para as determinadas condições termodinâmicas adotadas no estudo e uma temperatura de 200°C para a água geotérmica, a produção de energia elétrica líquida e a taxa de produção de hidrogênio são de 952,3 kW e 0,052 g/s, respectivamente. As eficiências, energética e exergética, de todo o sistema foram determinadas como 34,98% e 49,17%, respectivamente. Os autores realizaram ainda análises econômicas do sistema e seus componentes (AKRAMI et al. 2017a).

O estudo 9 foi publicado no ano de 2018 e os autores realizaram a investigação de um sistema combinado de resfriamento e energia impulsionado por energia geotérmica para produções de gelo e de hidrogênio. A combinação do ciclo geotérmico flash, do ciclo Kalina, do ciclo água-amônia de refrigeração e absorção e do eletrolisador compôs o sistema estudado. Modelos matemáticos e alguns parâmetros-chave foram analisados para determinar o seu desempenho exergético do sistema. Uma análise de destruição exergética para todos os componentes foi realizada para descobrir o grau e a localização de ineficiência exergética (CAO et al. 2018). Como já comentado em estudos aqui já descritos, o estudo de Cao et al. (2018) reafirma a ocorrência do fenômeno de redução da eficiência exergética proporcional à diferença de temperatura em refrigeradores e ao aumento de pressão de retorno da turbina a vapor e a pressão

de retorno da turbina de amônia-água. Os resultados mostraram que a eficiência exergética atinge 23,59% a 150°C, 25,06% a 160°C e 26,25% a 170°C, apresentando assim um aumento dessa eficiência proporcional ao aumento da temperatura da água geotérmica.

O estudo 10 analisou a viabilidade de utilização de geradores termoelétricos para utilizar o calor residual de um ciclo Kalina e aumentar a eficiência de um sistema termodinâmico baseado em uma fonte de energia geotérmica. Os resultados foram quantificados e comparados entre a modelagem do desempenho do sistema proposto e o modelo convencional de um ciclo Kalina, e estimaram um aumento de 7,3% para potência de saída líquida e eficiências de energia e exergia (SADAGHIANI et al. 2018).

A nova usina de geração de energia proposta pelos autores era acionada por água quente geotérmica à temperatura de 163°C e utilizou o gás natural líquido para recuperar a energia dentro dessa fonte de energia, que possuía dois ciclos Rankine orgânicos e um ciclo Kalina. Análises, baseadas na primeira lei da termodinâmica, de energia, exergia e sensibilidade foram realizadas a fim de estimar seu desempenho. Após modelagem e análises, os autores relatam em seus principais resultados em relação à eficiência e à efetividade que a eficiência exergética do ciclo de Kalina aumentou consideravelmente, refletindo no aumento da sua eficiência energética de 7,224% para 25,90%; a eficiência exergética do primeiro ciclo orgânico de Rankine foi calculada em 20,73%, sendo capaz de recuperar aproximadamente 20% da exergia dissipada do condensador do ciclo de Kalina e da exergia capturada do fluxo de gás natural líquido; a eficiência exergética do segundo ciclo orgânico de Rankine foi estimada em 15,06%, refletindo principalmente sua capacidade de recuperar as energias de baixa qualidade (SADAGHIANI et al. 2018).

A análise de energia mostrou que a planta proposta goza de 13,25% e 26,13% de eficiência energética e de eficiência exergética, respectivamente, demonstrando a importância imperativa de processos para recuperação da energia de baixa qualidade da água geotérmica e energia captada em fluxos de gás natural líquido. Modificações feitas na planta aumentaram a eficácia do sistema e ocasionou aumento da eficiência exergética para 32,15%. A eficiência de recuperação a frio também foi introduzida e calculada, mostrando que 57% da exergia destruída no fluxo de gás natural líquido é recuperado pelo processo proposto, valor que revela que mais de metade da energia fria retida no fluxo de gás natural líquido é recuperada e convertida na energia útil pelo processo. Além disso, os autores também realizaram uma avaliação econômica dessa integração de geradores termoelétricos com o ciclo Kalina determinando o sistema proposto como rentável (SADAGHIANI et al. 2018).

O estudo 11 analisou a utilização da energia geotérmica para a liquefação de gás nas três possíveis situações seguintes: utilização da saída do trabalho geotérmico como entrada para um ciclo de liquefação (1); utilização de energia geotérmica em um processo de refrigeração por absorção para pré-lubrificar o gás antes do mesmo ser liquefeito em um ciclo (2); e utilizando de parte da energia geotérmica para refrigeração por absorção para pré-armazenar o gás e parte da energia geotérmica para produzir trabalho com o objetivo de colocá-lo em utilização em um ciclo de liquefação - fenômeno de cogeração. Os autores detectaram que quando as irreversibilidades são consideradas, o resfriamento por absorção geotérmica para pré-resfriamento do gás produz economias significativas na necessidade de trabalho para a liquefação de gás e é vantajoso em relação ao uso do trabalho geotérmico no ciclo de liquefação, tornando o sistema mais efetivo, eficiente e sustentável (KANOGLU; DINCER; CENGEL, 2008). O gás resfriado foi o nitrogênio que ao entrar no liquidificador reversível a -20°C (por meio de seu resfriamento em um sistema de refrigeração por absorção) ao invés de a 25°C , o trabalho necessário por unidade de massa de liquefação diminuiu de 762 kJ para 758 kJ, com uma diminuição de 4 kJ e a redução correspondente na análise irreversível foi de 7459 kJ ou 58%. Quando o gás foi pré-resfriado a -45°C , o trabalho de liquefação diminuiu cerca de 75%, ficando claro o sentido termodinâmico do uso de energia geotérmica para resfriamento por absorção em vez de usá-lo apenas para geração de energia sustentável (KANOGLU; DINCER; CENGEL, 2008).

Para recursos geotérmicos de alta temperatura ($>175^{\circ}\text{C}$), os autores indicaram a utilização do recurso para ser usado na geração combinada de energia e resfriamento por absorção. Como proposta a utilização da extremidade de alta temperatura da energia geotérmica para geração de energia e a baixa temperatura final para o resfriamento por absorção, apresentando uma melhor abordagem termodinâmica para minimizar a geração de entropia. Para recursos geotérmicos de temperatura relativamente baixa ($< 175^{\circ}\text{C}$), parece poder ser utilizado de uma melhor forma como entrada de energia para um sistema de refrigeração por absorção sustentável (KANOGLU; DINCER; CENGEL, 2008).

A tabela 1.1 traz a síntese dos dados relatados pelos autores dos estudos desta revisão.

	Autores/Ano	Técnica(s)	Principais resultados relatados pelos autores
Estudo 1	KANOGLU; YILMAZ; ABUSOGLU (2016)	Ciclo de refrigeração por absorção de amônia-água; Ciclo de Claude; Sistema Integrado.	COP: 0,556 Ψ : 67,0% COP: 0,0120 Ψ : 67,3% Efetividade: 25,4% de economia na necessidade de trabalho. COP: 0,162 Ψ : 67,9%
Estudo 2	YUKSEL; OZTURK; DINCER (2018)	Subsistema geotérmico; Geração de energia e produção de hidrogênio; Ciclo Kalina; Sistema integrado.	\uparrow da T de referência: 130 °C \rightarrow 200 °C: Produção de E: 2000 kW \rightarrow 9000 kW; Produção de hidrogênio: 0,015 kg/s \rightarrow 0,06 kg/s. $\uparrow p \downarrow \eta$ Produção de E: 4800 kW \rightarrow 3700 kW; Produção de hidrogênio: 0,034 kg/s \rightarrow 0,026 kg/s. Ψ : 48,24%
Estudo 3	HE; YANG; HAN (2018)	Ciclo Orgânico Rankine; Sistema integrado.	Potência máxima: 157,0 kW à T 102,15 °C (considerando a margem de segurança para a turbina e qualidade do vapor descarregado deve-se garantir T \downarrow 112,15 °C); Entropia: $\downarrow \eta$ 40,4% η máxima: 43,98% a 105,15 °C.
Estudo 4	AKRAMI, et al. (2017b)	Sistema integrado.	Fonte geotérmica a 180°C: η : 26,14% Ψ : 44,45%
Estudo 5	YILMAZ (2017)	Ciclo Orgânico Rankine; Ciclo Kalina;	Fonte geotérmica a 120°C: η : 50,36% η : 46,51% Produção de E: \uparrow 12,2%
	Autores/Ano	Técnica(s)	Principais resultados relatados pelos autores
Estudo 6	YILMAZ; KANOGLU (2014)	Usina geotérmica binária; Sistemas de eletrólise; Sistema integrado.	A 160°C η : 11,4% Ψ : 45,1% A 80°C η : 64% Ψ : 61,6% η : 6,7% Ψ : 23,8%

Estudo 7	ZOUH (2014)	<p>Planta Híbrida - Ciclo Orgânico Rankine</p> <p>Planta Híbrida - Ciclo Orgânico Rankine Supercrítico</p>	<p>Entrada de exergia solar >66%</p> <p>Ψ: 23 a 32%</p> <p>Produção de eletricidade anual \uparrow15% (para fração de exergia solar >79%)</p> <p>Ψ: 27 a 34%</p> <p>Produção de eletricidade anual \uparrow19% (para fração de exergia solar >74%)</p>
Estudo 8	AKRAMI et al. (2017a)	Sistema Integrado	<p>T da água geotérmica: 200°C</p> <p>Produção de E elétrica líquida: 952,3 kW</p> <p>Taxa de produção de hidrogênio: 0,052 g/s</p> <p>η: 34,98%</p> <p>Ψ: 49,17%</p>
Estudo 9	Cao et al. (2018)	Sistema integrado	<p>Ψ / T da água geotérmica</p> <p>Ψ: 23,59% a 150°C</p> <p>Ψ: 25,06% a 160°C</p> <p>Ψ: 26,25% a 170°C</p> <p>Destruição exérgica na turbina a vapor e na turbina de amônia-água: 15,99%</p> <p>Destruição exérgica nos regeneradores de calor: 14,72%</p>
Estudo 10	SADAGHIANI et al. (2018)	<p>Ciclo Kalina</p> <p>Ciclo Orgânico de Rankine 1</p> <p>Ciclo Orgânico de Rankine 2</p> <p>Sistema integrado</p>	<p>Água geotérmica a 163°C</p> <p>η: 7,224% - \uparrow25,90%</p> <p>Ψ: \uparrow 20,73%</p> <p>Recuperação de exergia dissipada do condensador do ciclo Kalina: 20%</p> <p>Ψ: \uparrow 15,06%</p> <p>Recuperação de exergia dissipada do condensador do ciclo Kalina:</p> <p>η: 13,25%</p> <p>Ψ: 26,13%</p> <p>Eficiência de Recuperação a frio da planta: ~57%</p> <p>Saída de energia líquida: 13.468MW</p>
Estudo 11	KANOGLU; DINCER; CENGEL (2008)	<p>Pré-lubrificação de Gás Nitrogênio</p> <p>Fenômeno de cogeração</p>	<p>T= -20°C \rightarrow W \downarrow em 58%</p> <p>Recurso geotérmico líquido > 165°C</p> <p>T= -45°C \rightarrow W \downarrow em 75%</p> <p>Recurso geotérmico líquido < 165°C</p>

Tabela 1.1 Síntese dos dados relatados pelos autores em seus respectivos estudos, que fazem parte dessa revisão, com ênfase para técnicas utilizadas e principais resultados que refletem as eficiências e efetividades dos sistemas geotérmicos analisados entre os anos de 2008 e 2018.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa visou à busca de informações acerca de formas de utilização de sistemas geotérmicos para a obtenção de energia assim como sobre dados referentes à eficiência desses sistemas termodinâmicos relatados por autores nos últimos 10 anos. Dessa forma, a evolução de níveis de eficiência, efetividade e sustentabilidade e uma classificação de vantagens e benefícios e desvantagens e riscos desse sistema pôde ser compilada e apresentada como norte sobre o seu estado da técnica nesse estudo.

Os estudos aqui apresentados visaram despertar o interesse por uma nova linha de pesquisa, buscando meios para otimização e viabilização dessa fonte renovável de energia. A necessidade latente de desenvolvimento dessas novas tecnologias, e/ou aperfeiçoamento das atuais, com vistas ao aumento da eficiência e redução de custos para a geração de energia limpa, renovável e acessível; permite que os sistemas de geração com matriz geotérmica tenham um papel cada vez mais relevante neste contexto. Diante do que foi exposto, verifica-se que países que possuem fontes de média entalpia (80 °C a 150 °C) a alta entalpia (acima de 150 °C), tem se destacado quanto ao avanço na exploração deste recurso, sendo estes os que melhor apresentam indicadores de redução de emissão de CO₂ na atmosfera.

O investimento crescente em usinas geotérmicas e em pesquisas voltadas para uso de ciclos térmicos mais eficientes como o Ciclo Kalina (KC) ou o Ciclo Rankyne Orgânico (ORC); ou sistemas híbridos que aglutinam captação solar, biomassa e geotermia como fontes de calor para o sistema, apresentados nas pesquisas aqui referenciadas, mostram que ainda há muito o que avançar para tornar o uso de fontes geotérmicas como fonte de energia mais usual e acessível. Dados internacionais da IEA (figura 01) mostram que a projeção para as próximas décadas para o aumento do usos de energias renováveis em especial o sistema geotérmico, ainda apresenta um dos menores crescimentos percentuais. na geração de energia elétrica, apesar de seu uso para outros fins, como calefação residencial, uso industrial, banhos termais, adropecuária dentre outros, ser mais comum e mais presente.

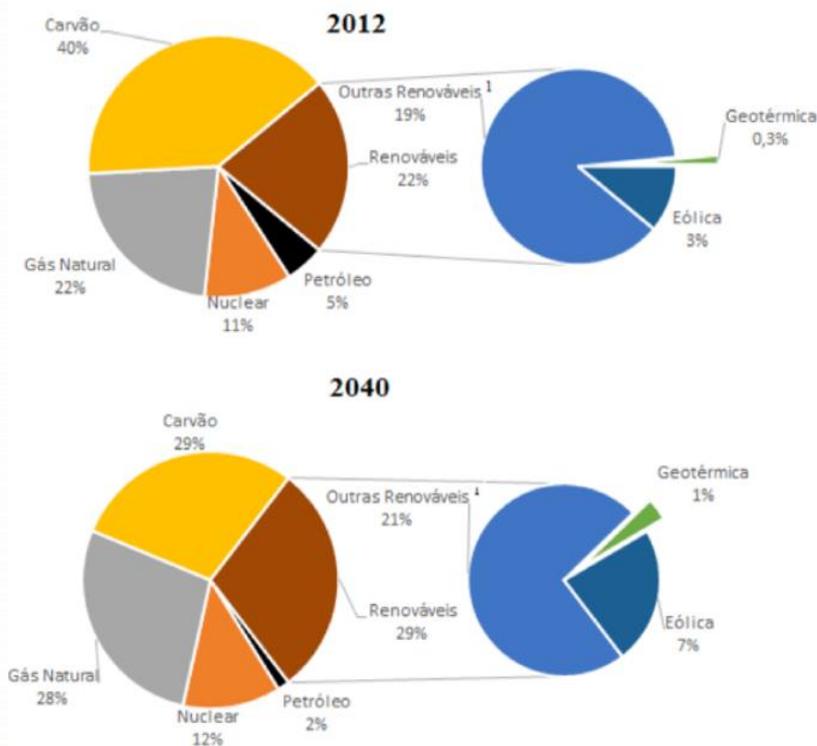


Figura 01: Geração líquida de eletricidade por fonte (2012-2040)

Fonte: CAMPOS (2017) Espacios magazine, Vol. 38 (Nº 01),

Vantagens e Benefícios:

A energia geotérmica, é considerada uma energia limpa por ser uma fonte sem emissão de poluentes nocivos, além de apresentar capacidade de operar continuamente, sem estar sujeita às condições meteorológicas, ao contrário da energia solar e eólica, por exemplo, que demandam condições climáticas favoráveis para a geração de energia. Além desses benefícios, cabe destacar a vantagem de reutilizar o fluido extraído, reinjetando-o na crosta terrestre, o que torna o recurso geotermal uma fonte renovável de energia. Além disso, a inserção da energia geotérmica na matriz energética reduz custos com a exploração e utilização de outras fontes, como o carvão mineral e o petróleo, por exemplo, e contribui para a sustentabilidade. Segundo CAMPOS (2017) em se tratando dos aspectos econômicos, o preço atual da energia vendida pelas usinas de energia geotérmica, varia entre USD 0,03 a USD 0,05 por kWh gerado, enquanto a o preço ofertado pelas usinas hidrelétricas gira em torno de USD 0,12 (PESQUISA UNIFICADA, 2015). Ainda segundo o mesmo autor, estima-se, por outro lado, que o custo inicial para instalação de uma usina seja entre USD 3000 a USD 5000 por kW instalado (para uma usina pequena <1MW). No entanto, o alto custo aplicado para a instalação da usina geotérmica é compensado pelos baixos custos de produção e pelo lucro obtido na concessão de energia elétrica (PESQUISA UNIFICADA, 2015).

Outro fator importante refere-se ao aproveitamento da capacidade da usina geotérmica, capaz de produzir em até 98% de sua capacidade instalada.

Desvantagens e Riscos:

Ademais, o recurso geotermal também apresenta algumas desvantagens, entre elas destacam-se as condições de operações (as usinas só podem ser construídas em zonas geológicas propícias, presentes em menos de 10% do planeta), o custo inicial elevado para perfuração do poço, estudo e implantação da usina, a poluição sonora (na fase de implantação da usina), dentre outros. Os principais impactos ambientais resultantes do trabalho com a energia geotérmica são a liberação, mesmo que em pequenas quantidades, de gases dissolvidos na atmosfera, como o H₂S (sulfeto de hidrogênio), por exemplo, o aluimento da terra, o ruído (poluição sonora), além do aumento da temperatura no entorno onde está instalada a usina, ocasionada pela liberação de vapores na atmosfera. Apesar da liberação de gases dissolvidos na atmosfera ser insignificante – os gases são liberados na fase de perfuração do poço, durante um tempo entre 20 e 30 minutos, quando a perfuratriz atinge a profundidade adequada para extração do fluido e vapor. Em relação ao aluimento da terra, a reinjeção do fluido na crosta é a principal forma de prevenção desse fenômeno, que pode ocasionar um afundamento da terra, onde o fluido é extraído, entre 30 e 40cm por ano. Apesar dos impactos ambientais negativos, é importante destacar que para a implementação de uma usina não é necessário desmatamento e desvio do curso de rios. Além disso, não há riscos associados a contaminação por vazamento de qualquer tipo de compostos (a usina opera basicamente com o aproveitamento dos recursos geotermiais), assim como não há poluição atmosférica, uma vez que o vapor liberado para a atmosfera é composto de água.

Os estudos, analisados segundo a quantidade de publicações no tempo; apresentaram um maior número a partir de 2016 e intensificaram-se em 2018 de forma expressiva. O único estudo do ano de 2008 previa a necessidade de análises de custo-efetividade associadas aos estudos de eficiência de sistemas termodinâmicos utilizando fontes geotérmicas, entretanto, tal fenômeno tornou-se mais evidente efetivamente a partir de 2014 segundo a amostra de revisões que compuseram este estudo.

Os estudos mostram cada vez mais a utilização de modelagens, estudos de viabilidade e análises de custo-efetividade para justificar o investimento de técnicas para captura e utilização de energia de fontes geotérmicas de média e baixa potência, seja para aumento de eficiência do sistema a partir de revisão de seus componentes e ciclos, seja a partir de integração

com outros sistemas, principalmente de fontes de energia sustentáveis para aumentar eficiências energéticas e exergéticas em sistemas termodinâmicos para geração de energia.

Objetivo do estudo pôde elucidar o estado da técnica e provavelmente reunir dados que poderão direcionar interessados sobre os sistemas que têm se mostrado mais eficientes e o conhecimento sobre os riscos e desvantagens de sistemas menos eficientes, podendo contribuir para o discernimento de pesquisas que foquem em soluções para atuais desvantagens e mitigação de riscos, e em investimento em aumento de eficiência e efetividade de sistemas que apresentam benefícios e progressos que podem ser melhorados atualmente.

A elevação da temperatura pode aumentar a eficiência exergética e a eficiência energética de sistemas, principalmente integrados, que utilizam fontes geotérmicas de forma proporcional, e os estudos analisados, em sua maioria, demonstraram tal afirmação utilizando princípios das leis da termodinâmica, modelagem matemática e validação de dados.

Os estudos mais recentes (2017-2018) apresentam além de avaliação de eficiência e efetividade; a sustentabilidade e análise econômica, como sendo fatores positivos da implementação do sistema, aumentando a abrangência de seu uso para suprir necessidades industriais e de mercado, o que influencia a disseminação do conhecimento e inclusão estratégica do público interessado em alta tecnologia.

A utilização de energia geotérmica associado a outro tipo de fonte de energia, principalmente as renováveis, apresenta um caminho para sustentabilidade de sistemas, assim como a redução de emissão de gases poluentes no ambiente e do efeito estufa.

REFERÊNCIAS

- AKRAMI, E. et al. Energetic and exergoeconomic assessment of a multi-generation energy system based on indirect use of geothermal energy. *Energy*. v.124, p. 625-639, 2017a.
- AKRAMI, E. et al. Energy and exergy evaluation of a tri-generation system driven by the geothermal energy. *Journal of Mechanical Science and Technology*. v. 31, n.1, p. 401-408, 2017b.
- CAMPOS, Adriana Fiorotti. A panorama of the geothermal energy in Brazil and the World: Environmental and economic aspects. *Espacios magazine*, Vol. 38 (Nº 01), 2017. p. 8.
- CAO, L. et al. Exergy analysis and optimization of a combined cooling and power system driven by geothermal energy for ice-making and hydrogen production. *Energy Conversion and Management*. v.174, p. 886-896, 2018.
- GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 5ªed. São Paulo: Atlas, 2010.
- HE, W.F.; YANG, H.X.; HAN, D. Thermodynamic analysis of a power and water combined system with geothermal energy utilization. *Geothermics*. v. 76, p. 106-115, 2018.
- HO, T. *Advanced Organic Vapor Cycles for Improving Thermal Conversion Efficiency in Renewable Energy Systems*, University of California, Berkeley, 2012.
- KANOGLU, M.; DINCER, I.; CENGEL, Y. A. Investigation of Geothermal Energy Use in Gas Liquefaction. *Heat Transfer Engineering*. Taylor and Francis Group, LLC. v.29, n.10, p.885-892, 2008.
- KANOGLU, M.; YILMAZ*, C.; ABUSOGLU, A. Geothermal energy use in absorption precooling for Claude hydrogen liquefaction cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*. v.41, p. 11185-11200, 2016.
- SADAGHIANI, M. S. et al. Process development and thermodynamic analysis of a novel power generation plant driven by geothermal energy with liquefied natural gas as its heat sink. *Applied Thermal Engineering*. v.133, p.645-658, 2018.
- VEGARA, S. C. *Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração*. 12ªed. São Paulo: Atlas, 2013.
- SINGHAL, S. B. B.; GUPTA, P. R. *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. 2 ed. New York: Springer Dordrecht Heidelberg, 2010.
- YILMAZ, C. Thermo-economic modeling and optimization of a hydrogen production system using geothermal energy. *Geothermics*. v. 65, p.32-43, 2017.
- YILMAZ, C.; KANOGLU, M. Thermodynamic evaluation of geothermal energy powered hydrogen production by PEM water electrolysis. *Energy*. v. 69, p.592-602, 2014.
- YUKSEL, Y. E.; OZTURK, M.; DINCER, I. Thermodynamic analysis and assessment of a novel integrated geothermal energy-based system for hydrogen production and storage. *International Journal of Hydrogen Energy*. v.43, p.4233-4243, 2018.
- ZARE, V. A comparative thermodynamic analysis of two tri-generation systems utilizing low-grade geothermal energy. *Energy Conversion and Management*. v.118, p.264-274, 2016.



ZHOU, C. Hybridisation of solar and geothermal energy in both subcritical and supercritical Organic Rankine Cycles. Energy Conversion and Management. v.81, p.72-82, 2014.