

GERAÇÃO DE

energia geotermelétrica a partir de plantas do tipo Kalina

O presente artigo pretende apresentar o ciclo de potência Kalina e sua aplicação na produção de energia elétrica a partir de fontes geotérmicas de energia. As plantas do tipo Kalina têm como fluido de trabalho uma mistura de água e amônia, fator este que diminui o seu ponto de ebulição permitindo desta forma que esta trabalhe a temperaturas mais baixas do que os ciclos de potência que operam somente com água como fluido de trabalho (como é o caso do tradicional ciclo Rankine). Aqui serão abordados tópicos como princípios de funcionamento, potencial de geração, eficiência de operação, uma abordagem sobre custos e alguns exemplos de sistemas em operação atualmente

NATÁLIA PEREIRA DE MORAES* E PAULINO E. COELHO**

A energia geotérmica é produzida a partir do calor originado no interior da Terra. Vulcões, gêiseres, fontes de água e lama quentes são evidências do calor que existe dentro e abaixo da crosta terrestre.

Plantas de geração geotérmica utilizam vapor ou água quente subterrânea de poços com profundidade de 1,5km ou mais. O vapor ou água quente é canalizado do poço e passa através de uma turbina que gerará a eletricidade. Normalmente a água é então devolvida ao solo para recarregar o reservatório e completar o ciclo da energia renovável (DOE, 2001).

A energia geotérmica é dividida em três sub-classes:

Alta entalpia – Com a temperatura da água a aproximadamente 150°C (geralmente vapor seco).

Média entalpia – Com a temperatura entre 80 e 150°C.

Baixa entalpia – Temperaturas abaixo de 80°C.

A eletricidade só pode ser gerada utilizan-

do-se a alta ou média entalpia, e isso pode ser realizado de três formas diferentes. Sendo estas: sistemas de vapor seco; sistemas de vapor úmido; ciclo binário.

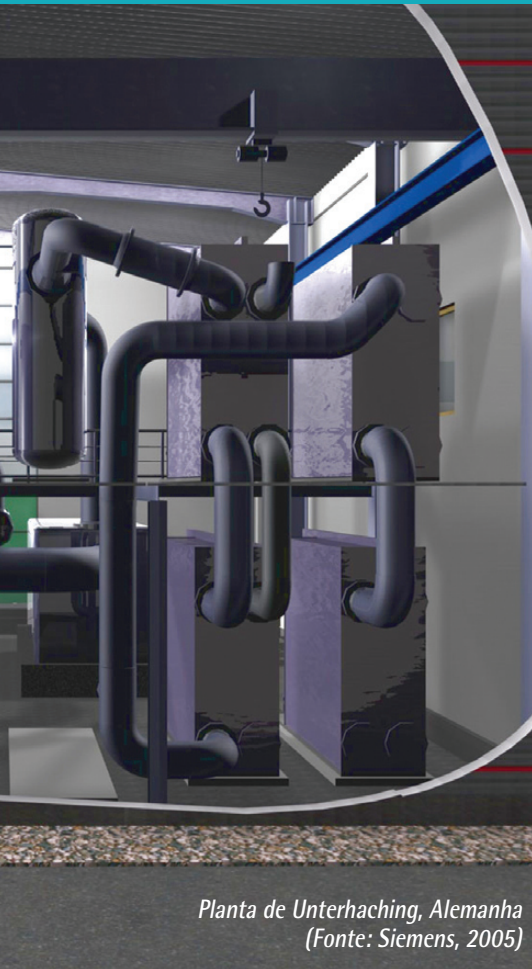
A alta entalpia pode ser utilizada em plantas de vapor seco e de vapor úmido, enquanto a de média entalpia pode utilizar o ciclo binário. As plantas de vapor seco são possíveis onde o vapor geotérmico não contém água no estado líquido, estando geralmente a alta pressão e temperaturas entre 180-350°C. Nestas condições o vapor passa por uma turbina gerando eletricidade (Koroneos, 2007).

As plantas de vapor úmido e ciclo binário também utilizam o reservatório de água como fonte quente. Ao contrário dos sistemas de vapor seco e úmido, as plantas de ciclo binário transferem calor da água para qualquer outro fluido de trabalho. Portanto, plantas do ciclo binário podem operar utilizando água a baixas temperaturas entre 225°F (~107°C) e 360°F (~182°C) (DOE, 2001).



Outro tipo de utilização da energia geotérmica é o uso direto. Para este tipo de aplicação, as temperaturas variam na faixa de 70°F (~21°C) a 302°F (~150°C). Os Estados Unidos possuem instalados em torno de 1 300 sistemas de geração geotérmica direta. No uso direto, um poço é perfurado até o reservatório geotérmico, que provê um fluxo estável de água quente. Alguns sistemas utilizam a água diretamente, mas a maior parte bombeia a água para um trocador de calor. Na troca de calor, a água não se mistura com o fluido de trabalho (sendo este normalmente água ou uma mistura de água e fluido de baixo ponto de ebulição). O calor da água é transferido para o fluido de trabalho que percorre as tubulações distribuindo o calor diretamente para o uso a que for destinado (Idem).

Embora as temperaturas do ar possam variar amplamente durante as estações do ano, as temperaturas superficiais do solo variam de 50°F (~10°C) a 70°F (~21°C), dependendo da latitude. As bombas geotérmicas de calor operam nesta



Planta de Unterhaching, Alemanha
(Fonte: Siemens, 2005)

temperatura relativamente estável como fonte de calor para edifícios no inverno e mantendo-os resfriados no verão (Ibidem).

Através de tubulações subterrâneas, as bombas de calor geotérmicas distribuem calor de dentro do edifício para o solo no verão, muito parecido com um refrigerador que utilizaria a energia elétrica para manter a temperatura mais fria. No inverno, este processo é invertido; a bomba de calor geotérmica extrai calor do solo e o transfere para o edifício. Este processo é limpo e muito eficiente, sendo pelo menos três vezes mais eficiente do que as outras formas de aquecimento disponíveis no mercado hoje, como por exemplo, a queima de combustível para aquecimento (DOE, 2001).

Em 1904 foi produzida pela primeira vez eletricidade a partir de vapor natural, na Itália. A capacidade total mundial de geração instalada em 1998 era de 8 000 MW. Na Califórnia, 7% da demanda total de energia é suprida por geração geotérmica; no Havaí, 25% da eletricidade é

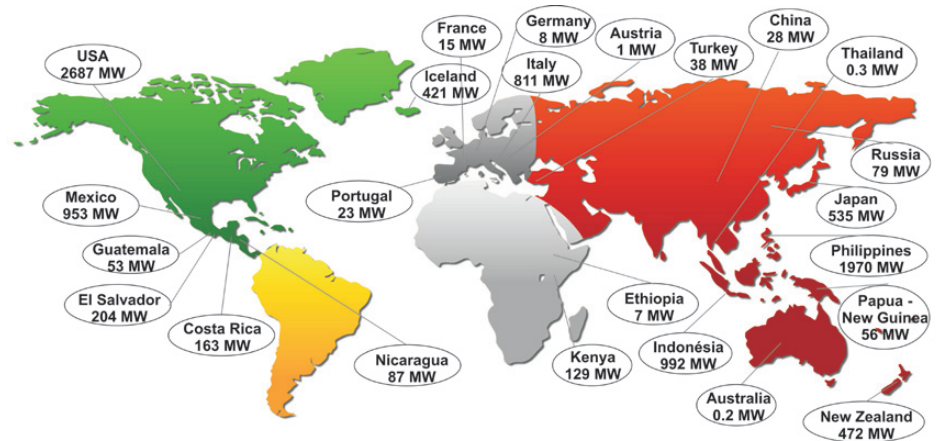


Figura 1 - Geração de energia geotérmica no mundo (Fonte: Bertani, 2007)

obtida a partir destas fontes; Filipinas, Indonésia e México apresentaram um rápido crescimento nas suas capacidades geradoras durante a década de 1980 (Hinrichs, 2003).

A figura 1 demonstra a produção total mundial, por região, de energia geotérmica em 2007.

A figura 1 mostra que os países com a maior potência de geração a partir de fontes geotérmicas no mundo em 2007 eram, respectivamente, os Estados Unidos com 2 687 MW; Filipinas com 1 969,7 MW; e Indonésia com 992 MW.

Água quente de fontes subterrâneas fornece aquecimento direto para a maioria das casas da capital da Islândia e Reykjavik, por exemplo (Hinrichs, 2003).

Nos Estados Unidos, todas as plantas de geração de eletricidade a partir de energia geotérmica encontram-se nos estados de Califórnia, Nevada, Utah e Havaí. Todos juntos somando 2 800 MW anuais de produção (DOE, 2001).

O Brasil caminha para novas descobertas na geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis. As regiões com sinais de potencial para implantação de energia geotérmica são as regiões Norte e Nordeste. A empresa israelense Ormat Technologies Inc. e a paulista Ponte Di Ferro firmaram contrato de 150 milhões de dólares para estudar a viabilidade e a relação custo-benefício para a exploração desta fonte. As empresas já estão iniciando os trabalhos em Mossoró, no Rio Grande do Norte. Está sendo investido na construção de uma usina geotérmica que poderá gerar 75 MW de potência (ABIN, 2007).

PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

Nos ciclos tradicionais, como ciclos do tipo Rankine, por exemplo, é utilizada apenas uma substância como fluido de trabalho. Os ciclos do

tipo Kalina se diferenciam dos ciclos tradicionais por utilizarem uma mistura como fluido de trabalho. Esta mistura é composta por água e amônia.

A mistura água-amônia já é utilizada em sistemas de refrigeração há mais de 100 anos, e sua utilização em ciclos de potência foi proposta por Alexander Kalina em 1983. Ele criou uma companhia e a chamou de Exergy como pioneira no desenvolvimento do ciclo amônia-água. Este trabalho culminou na construção da primeira planta de demonstração em Canoga Park, na Califórnia. Esta planta foi testada entre 1992 e 1997 (Exorka, 2008).

A amônia possui a característica de evaporar a temperaturas bem menores do que a água, tornando-se assim uma substância capaz de recuperar calor a partir de fontes de baixa temperatura. Por este motivo, os ciclos Kalina possuem atrativa aplicação em ciclos finais de usinas de cogeração e em alguns sistemas geotérmicos (Borget Junior, 2003).

A figura 2 apresenta um esquema simplificado do ciclo Kalina e será explicada a seguir. Emprega-se uma turbina que recebe o vapor e o expande até a uma baixa pressão no absorvedor. O ciclo apresenta também misturadores e separadores que unem e separam uma corrente em duas ou mais, respectivamente.

Analisando a figura 2, pode-se notar que do tanque de separação saem duas correntes: uma com maior concentração de amônia (vapor saturado) e uma solução com menor concentração de amônia (líquido saturado). À corrente de vapor saturado é adicionada uma parte da mistura que foi bombeada após o condensador 1, formando uma corrente com uma concentração de amônia, que será chamada de concentração básica. Esta corrente segue para um conden-

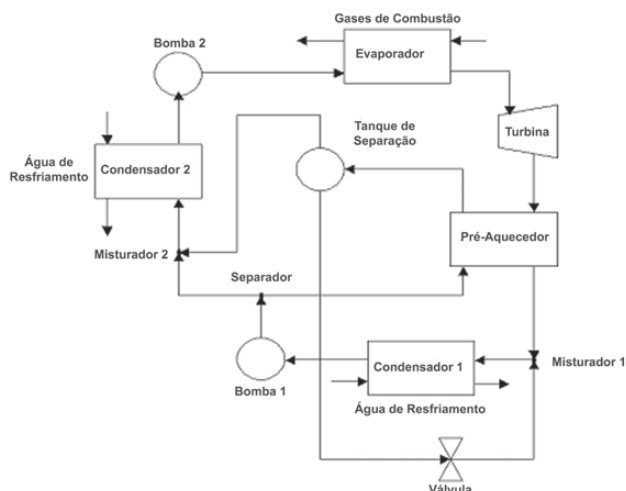


Figura 2 - Ciclo Kalina (Fonte: Borget Junior, 2003)

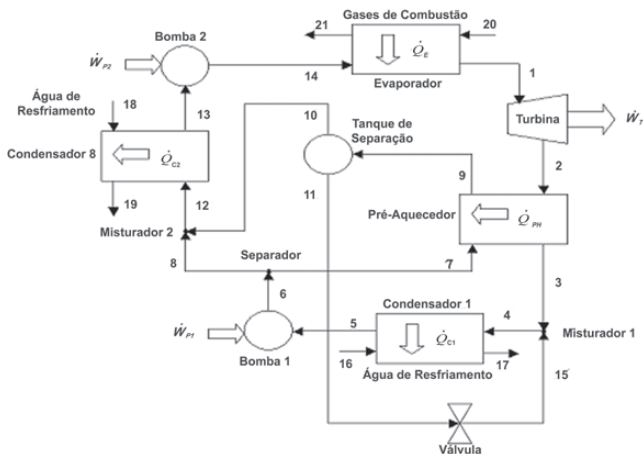


Figura 3 - Ciclo Kalina (Fonte: Borget Junior, 2003)

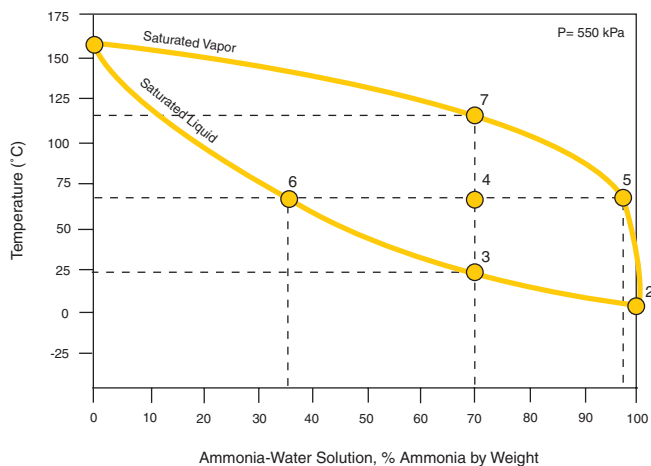


Figura 4 - Amônia-água - Diagrama de fase (Fonte: Mlcak, 1996)

sador 2, perdendo energia para uma corrente de água fria e depois é bombeada para o evaporador onde recebe calor dos gases de combustão (no caso da utilização da energia geotérmica, esta etapa do aquecimento da mistura se daria pela passagem do fluido geotérmico ao invés de gases de combustão). A mistura aquecida segue para a turbina para geração de potência. Após sair da turbina a mistura passa por um pré-aquecedor. Do pré-aquecedor, a corrente com a concentração básica (amônia) adiciona-se a corrente de líquido saturado que foi separada no tanque, e passou por uma válvula para equilibrar a pressão entre as duas soluções. É formada, assim, a mistura com uma concentração intermediária que segue para o condensador 1 onde troca calor com uma corrente de água de arrefecimento. A mistura é então bombeada e separada em duas correntes. Uma delas é adicionada ao vapor saturado que saiu do tanque de separação.

A outra segue para o pré-aquecedor já mencionado, para que a sua energia seja aumentada tornando a mistura saturada para que, então, possa entrar no tanque de separação (Borget Junior, 2003). Devido ao uso da mistura pelos ciclos do tipo Kalina, quando ocorre a troca de fase, à pressão constante, ocorre variação de temperatura (Idem).

CÁLCULO DO POTENCIAL GERADOR

O princípio da conservação de energia na ter-

modinâmica diz que o trabalho líquido produzido por um ciclo de potência deve ser igual ao calor líquido adicionado. Para se calcular a eficiência termodinâmica, deve-se considerar as perdas ocorridas durante o processo (Moran, 2005).

Será apresentada a metodologia de cálculo a ser realizada para a determinação da potência gerada, considerando as irreversibilidades presentes no ciclo. A figura 3 apresenta o ciclo Kalina contendo todas as correntes numeradas e os processos de transferência de calor e trabalho explicitados.

A figura 3 contém as definições dos pontos referentes a cada processo envolvido na planta. Estas definições são importantes para a aplicação das fórmulas que estão a seguir.

A tabela 1 apresenta as fórmulas envolvidas nos cálculos de cada componente do sistema.

A tabela 1 contém formulações de cálculos para os componentes do sistema, sendo estes: turbina, pré-aquecedor, misturadores 1 e 2, bombas 1 e 2, tanque de separação, condensadores 1 e 2, evaporador e válvula. Para estes, existem as equações de eficiência, balanço de energia, balanço de massa, balanço de entropia, variando conforme o componente apresentado. Após a obtenção dos resultados, deve ser aplicada a formulação geral da primeira lei, que diz que, conforme já mencionado, o trabalho líquido do ciclo é igual ao calor líquido do ciclo. Ou seja:

$$W_{\text{ciclo}} = Q_{\text{ciclo}} \quad (1)$$

Utilizando-se os dados da planta aplicados nas fórmulas apresentadas, é possível obter então a potência gerada pelo sistema.

CONDIÇÕES MÍNIMAS NECESSÁRIAS

A construção de pequenas plantas, convencionais ou não, pode ser importante como fonte de energia para áreas isoladas. A eletricidade pode facilitar diversas aplicações aparentemente banais, mas extremamente importantes como bombas de irrigação e resfriamento de frutas e vegetais para uma maior conservação (IGG, 2004).

A geração de energia elétrica a partir de fontes geotérmicas não é tão comum quanto o aproveitamento desta fonte para aquecimento. Entretanto, o ciclo Kalina agrega facilidades podendo ser usado com fontes a baixas temperaturas, o que se deve ao baixo ponto de ebulição da amônia utilizada como fluido de trabalho no ciclo (German Renewable, 2007).

A temperatura de congelamento da amônia é de -78°C , enquanto a da água é de 0°C . Sua temperatura de ebulição, a uma concentração 100% é de 20°C . A figura 4 apresenta um diagrama com os diferentes pontos de ebulição

Tabela 1 - Equações para a análise energética (Fonte: Borget Junior, 2003)

Turbina	$\dot{W}_T = \dot{m}_1 (h_1 - h_2)$	Eq. Balanço Energia
	$S_{25} = S_1$	Eq. Balanço Entropia
	$h_2 = h_1 - \eta_T (h_1 - h_{2s})$	Eq. Eficiência Isentrópica
Pré-Aquecedor	$\dot{Q}_{pr} = -\dot{m}_1 (h_2 - h_3) = \dot{m}_7 (h_7 - h_6)$	Eq. Balanço Energia
Misturador 1	$\dot{m}_1 + \dot{m}_{11} = \dot{m}_4$	Eq. Balanço Massa
	$\dot{m}_1 \gamma_1 + \dot{m}_{11} \gamma_{11} = \dot{m}_4 \gamma_4$	Eq. Balanço Espécie
	$\dot{m}_1 h_3 + \dot{m}_{11} h_{15} = \dot{m}_4 h_4$	Eq. Balanço Energia
Condensador 1	$\dot{Q}_{c1} = -\dot{m}_1 (h_4 - h_5) = \dot{m}_{16} c_{p16} (T_{16} - T_{17})$	Eq. Balanço Energia
Bomba 1	$\dot{W}_{P1} = \dot{m}_4 (h_5 - h_6)$	Eq. Balanço Energia
	$S_{65} = S_5$	Eq. Balanço Entropia
	$h_6 = h_5 - (h_5 - h_{6s}) / \eta_{p1}$	Eq. Eficiência Isentrópica
Tanque de separação	$\dot{m}_7 = \dot{m}_{10} + \dot{m}_{11}$	Eq. Balanço Massa
Misturador 2	$\dot{m}_8 + \dot{m}_{10} = \dot{m}_1$	Eq. Balanço Massa
	$\dot{m}_8 \gamma_4 + \dot{m}_{10} \gamma_{10} = \dot{m}_1 \gamma_1$	Eq. Balanço Espécie
	$\dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{10} h_{10} = \dot{m}_1 h_{12}$	Eq. Balanço Energia
Condensador 2	$\dot{Q}_{c2} = -\dot{m}_1 (h_{12} - h_{13}) = \dot{m}_{18} c_{p18} (T_{18} - T_{19})$	Eq. Balanço Energia
Bomba 2	$\dot{W}_{P2} = \dot{m}_1 (h_{13} - h_{14})$	Eq. Balanço Energia
	$S_{145} = S_{13}$	Eq. Balanço Entropia
	$h_{14} = h_{13} - (h_{13} - h_{14s}) / \eta_{p2}$	Eq. Eficiência Isentrópica
Evaporador	$\dot{Q}_E = -\dot{m}_1 (h_{14} - h_1) = \dot{m}_{20} c_{p20} (T_{20} - T_{21})$	Eq. Balanço Energia
Válvulas	$h_{17} = h_{15}$	Eq. Balanço Energia

para as misturas de amônia e água.

Devido ao baixo ponto de ebulição da amônia, o ciclo Kalina tem a capacidade de operar em baixas temperaturas, conseguindo recuperar calor a partir de fontes energéticas de até 90°C, por exemplo (German Renewable, 2007).

Desta forma, as plantas geotérmicas que utilizam o ciclo Kalina, são classificadas como plantas do ciclo binário podendo trabalhar em alta e média entalpias.

CUSTOS DE CAPITAL E OPERACIONAL

As plantas do tipo binário possuem uma boa relação custo-benefício e recursos confiáveis para converter a energia em eletricidade dos campos geotérmicos de baixa temperatura - abaixo de 170°C (IGG, 2004).

É provável que as plantas do ciclo Kalina custem menos para serem construídas do que as plantas do ciclo Rankine de mesma potência. É possível uma economia de até 30% na construção das plantas do ciclo Kalina (Mlcak, 1996).

O custo da geração com energia geotérmica varia entre 3-4,5 centavos de euro (euro em janeiro de 2007 equivalia a R\$ 2,81833) por kWh para as plantas a vapor e de 3,8-6 centavos de euro por

kWh para plantas do tipo binário. Como parâmetro de comparação, temos energias não renováveis como a energia a partir do carvão sendo 1,7 centavos de euro por kWh; gás natural de 4-12 centavos de euro por kWh; energia nuclear, 1,3 centavos de euro por kWh; e, dentre as renováveis, pode-se citar a eólica que está estimada em 3,7 centavos de euro por kWh; e a solar entre 10 a 16 centavos de euro por kWh (Koroneos, 2007).

Os custos envolvidos na construção de sistemas binários são de 1 500-2 500 US\$/kW aproximadamente. Pensando em regiões isoladas, para se estender as redes de distribuição, o custo seria de 20 000 US\$/km. A demanda por pessoa por eletricidade em regiões pouco desenvolvidas é de aproximadamente 0,2 kW e para as regiões desenvolvidas é de 1 kW. Sendo assim, uma planta de 100 kW poderia abastecer 100 a 500 pessoas (IGG, 2004).

Como exemplo do potencial de geração existe um estudo do Bundestag que estimou o potencial aproveitável de geotermia na Alemanha em 300 terawatt/hora, o que representaria cerca de metade da energia gerada no país.

Como exemplo de custos, pode ser citado o da usina de geração de Unterhaching (Munique)

que utiliza o ciclo Kalina de operação. O custo de construção da usina foi de 16 milhões de euros (euro em janeiro de 2005 equivalia a R\$ 3,61213) e terá a capacidade de geração inicial de 3,36 MW (Siemens, 2005).

MÉTODO DE DESENVOLVIMENTO

As plantas do tipo Kalina utilizam os sistemas do tipo binário, ou seja, o calor provindo da fonte geotérmica é utilizado para aquecer um fluido de um ciclo termodinâmico. O vapor é então expandido em uma turbina, produzindo energia elétrica. Um sistema bem simplificado é exposto na figura 5.

Neste processo não existe contato entre os fluidos geotérmico e de trabalho e as emissões para a atmosfera são muito reduzidas, visto que a quase totalidade do vapor é condensada e reinjetada com a água. As centrais geotérmicas são constituídas por um parque de poços geotérmicos de produção onde se capta o geofluido, pelos grupos geradores e sistemas auxiliares, além da subestação que transforma e injeta na rede a energia elétrica. Após aproveitamento do calor, o geofluido é conduzido para os poços de injeção, onde regressa ao reservatório geotérmico (Sogeo, 2004).

Através do fluido secundário adequado, sistemas binários podem ser projetados para utilizar fluidos geotérmicos a temperaturas entre 85-170°C. O limite superior depende da estabilidade do fluido binário, e do limite dos fatores técnico-econômicos (IGG, 2004).

As plantas do tipo binário são construídas em pequenos sistemas modulares que vão desde centenas de kW até poucos MW de capacidade de geração (IGG, 2004).

EFICIÊNCIA

A eficiência térmica que indica qual parcela do calor adicionado é convertida em trabalho líquido disponível e é sempre menor do que

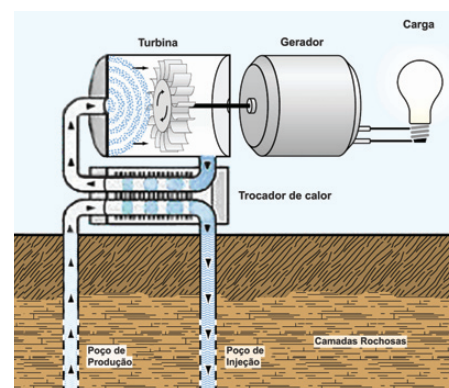


Figura 5 - Planta de geração geotérmica com ciclo binário (Fonte: REPP, 2003)

Tabela 2 - Comparativo de potência gerada e de eficiência

	MW	Eficiência da Segunda Lei
Planta Heber	59,2	48,62
Sistema Proposto	80,79	66,44

100%. Uma melhora no desempenho termodinâmico resulta de uma redução das irreversibilidades (Moran, 2005).

Atualmente, poucas plantas no mundo estão operando por meio do processo Kalina (German Renewable, 2007).

Embora ainda não esteja sendo usada comercialmente em larga escala, essa tecnologia pode ser mais eficiente do que os métodos convencionais, especialmente ao usar fontes de calor de temperaturas mais baixas para a geração de eletricidade. Grande parte dos recursos geotérmicos mundiais ainda não explorados mostra uma faixa de temperaturas baixas adequada ao uso do Ciclo Kalina (Atlas Copco, 2008).

A eficiência térmica do ciclo Kalina é considerada maior do que os outros circuitos que operam com vapor d'água ou ORC (Organic Rankine Circuit - Ciclo Orgânico de Rankine) e, trabalhando ainda com baixas temperaturas, irá possibilitar uma operação economicamente eficiente da planta (Siemens, 2005).

O ciclo de potência Kalina é uma das tecnologias mais eficientes de conversão de calor em eletricidade em temperaturas de aproximadamente 100°C até 200°C (Exorka, 2008).

Comparando com o convencional Ciclo Rankine, o ciclo de potência Kalina pode oferecer ganhos de eficiência de até 50% para gerações a partir de fontes com temperatura entre 150°C e 210°C. Ganhos de 20% podem ser atingidos com seu uso em outros processos, como por exem-



Figura 6 - Planta de Husavik (Fonte: Ingvar, 2000)

plo, na cogeração (Mlcak, 1996).

A ORC é um dos processos mais avançados de conversão da energia geotérmica em elétrica, entretanto, ele é associado a uma quantidade significativa de perdas. Este sistema precisa trabalhar com temperaturas relativamente altas da fonte geotérmica e, para se ter uma eficiência maior, teria que se resfriar o fluido a temperaturas baixas - Eficiência de Carnot (Kalina, 1991).

Alexander Kalina, cientista russo emigrado para os Estados Unidos da América nos anos 1980, em um artigo de 1991, propõe a utilização do ciclo Kalina em plantas geotérmicas. Ele realiza um comparativo de eficiências termodinâmicas entre um sistema implantado em Heber, Califórnia e seu novo ciclo proposto, ou seja, o ciclo Kalina. A eficiência termodinâmica da planta utilizando o ciclo Rankine é de 48,62%.

A substituição dos sistemas convencionais que usam energia térmica dos fluidos geotérmicos por processos de temperatura relativamente baixa, com um sistema que combine mais adequadamente a temperatura do fluido de trabalho com a temperatura da fonte geotérmica, pode reduzir substancialmente as perdas termodinâmicas. Reduzindo estas perdas, pode haver um ganho substancial de eficiência.

Kalina propunha a utilização de uma mistura de um fluido com baixo ponto de ebulição e outro com alto ponto de ebulição. A adição do componente com baixo ponto de ebulição proposta deve situar-se entre 55 a 95% do total da mistura.

Os resultados encontrados por Kalina, com relação à eficiência da planta de Heber e o sistema proposto (Kalina) estão demonstrados na tabela 2.

A eficiência da segunda lei é a medida de eficiência da transformação do calor de entrada em trabalho, considerando as irreversibilidades.

Em seu estudo, Kalina chegou a informações de um aumento de 36,7% de eficiência do ciclo utilizando a planta por ele projetada (tipo Kalina). A potência gerada através do ciclo Rankine era de 59,2 e passou a ser 80,79 MW.

EXEMPLOS

A primeira planta comercial do ciclo Kalina foi instalada em 1998 em uma aplicação de cogeração em Kashima, no Japão. Esta planta produzia 3,1 MW utilizando 1 300 toneladas por hora de água quente, a 98°C, como fonte de calor (Exorka, 2008).

A primeira planta do ciclo Kalina utilizan-

do fonte geotérmica, foi instalada em 1999 em Husavik, norte da Islândia. Esta planta produzia 2 MW a partir da água salgada a 90kg/s e 120°C. A água de refrigeração ficava em torno de 5°C. A água saía à temperatura de 80°C e então era usada para aquecimento direto (Exorka, 2008).

Outra planta utilizando ciclo Kalina para geração a partir de fontes geotérmicas localiza-se em Reno, Nevada, construída para uma produção de 6 MW de potência a partir de 140kg/s de água da fonte geotérmica. A temperatura de operação é de 160°C.

A Alemanha, mais especificamente o município de Unterhaching (Munique), possui a maior área contígua de águas termais da Europa. Lá funciona um projeto de geotermia que, além do uso direto (abastecimento da rede de calefação local), o calor também será transformado em eletricidade. A prefeitura investiu 70 milhões de euros, dos quais 16 milhões só para a construção e a manutenção da usina (o restante pode ser atribuído a alguns seguros e contratos realizados durante a construção da planta). Em 2007, durante os acertos finais da planta, cerca de 140 clientes e aproximadamente 90 estações de transferência estavam ligadas à rede de calefação baseada em energia geotérmica. Pelo menos 25% das 20 000 casas em Unterhaching se utilizariam do calor e eletricidade gerados. No médio prazo deverão ser fornecidos 70 MW (megawatts). Segundo o prefeito Knapek afirmou em 2007: "Em cerca de 20 anos, os custos estarão amortizados" (DW-World, 2007).

A energia gerada será injetada na rede de distribuição. O sistema entrou em operação em 2008 (German Renewable, 2007).

A planta geotérmica é do tipo Kalina e foi a primeira da Europa. O planejamento e desenvolvimento da planta foram realizados pela Siemens. A usina possui a capacidade ativa de geração de 3,4 MWh, para a população local o novo sistema pode reduzir as contas de energia em 15%. Com a utilização da planta, deixarão de ser emitidas entre 30 000 e 40 000 toneladas de CO₂ anuais, o que representa até dois terços do total das emissões do município (DW-World, 2007). O calcário poroso contém água a ser explorada que se encontra a uma temperatura de 100°C e uma profundidade de em torno de 3 000 metros. O poço irá produzir água em uma faixa de 150 litros por segundo. Destes, 25 litros por segundo serão utilizados para gerar calor de forma direta e os 125 litros por segundo restantes serão utilizados para produzir 3,36 MW de energia elétrica na planta de geração

(Siemens, 2005).

Outro exemplo de aplicação desta tecnologia está na Ilha de Nisyros, localizada em Dodecanese, Grécia, onde é utilizado o ciclo Kalina para cogeração. Esta é uma ilha vulcânica com potencial para energia geotérmica de alta entalpia. A água das perfurações geotérmicas que está sendo explorada é uma mistura de água e vapor de alta entalpia com fluxo de 12t/h. Ela é encontrada a uma pressão de 10bar (~9,9atm) e a temperatura de 187°C. O vapor superaquecido pode ser utilizado diretamente para produção de eletricidade. O vapor residual, depois da expansão, pode ser utilizado como fonte de calor no ciclo Kalina de potência que usa uma mistura de 70% de amônia e 30% de água (Koroneos, 2007).

Inicialmente o vapor é separado em corrente de vapor superaquecido (9,3t/h) e corrente líquida (2,7t/h). O vapor superaquecido passa pela turbina que possui uma eficiência isentrópica de 90%. Depois da expansão, o vapor pressurizado em 2 bar (~1,98atm) e 120°C e a produção de energia é 260,235kJ/kg (932,50kW). O vapor residual é então utilizado para trocas de calor com a mistura de amônia e água – no ciclo Kalina (Idem).

A mistura água-amônia depois de passar pelo condensador, está a 3 bar e 28°C. Esta entra na bomba e é pressurizada a 13 bar e sua temperatura passa a 29°C. A mistura precisa ser aquecida a 89°C (vapor superaquecido) para então passar pela turbina que possui uma eficiência isentrópica de 90%. Isso é realizado passando o fluido de trabalho do ciclo Kalina através de três trocadores de calor que utilizam como fonte quente o vapor geotérmico residual. A mistura água-amônia possui um fluxo de 13,6t/h e produz potência de 776,33 W (Koroneos, 2007).

A empresa Siemens detém os direitos sobre implantação de 10 MW de plantas do ciclo Kalina em projetos de geração de energia geotérmica na Alemanha. A Siemens irá avaliar os poços durante cinco anos, testando e observando a implantação inicial e o desenvolvimento da tecnologia. A Exorka, empresa da Islândia, é uma companhia baseada em energia verde. Esta adquiriu o direito para implantação do Ciclo Kalina em 1999, incluindo a Islândia e a maior parte da Europa Ocidental (Recurrente, 2008).

No ano de 2007, a Exorka, com sede em Munique, deu início a construção de um sistema de usina elétrica de 5,5 megawatts em Mauerstetten, no sul da Alemanha. O sistema irá operar com o ciclo Kalina (Atlas Copco, 2007).

CONCLUSÃO

Como é possível observar ao longo deste texto, o potencial da utilização da energia geotérmica na geração de energia elétrica foi bastante ampliado pela introdução das plantas do tipo Kalina, utilizando o ciclo binário. Com a possibilidade de se utilizar o calor geotérmico a temperaturas mais baixas na geração de energia elétrica, amplia-se a

perspectiva de geração de energia elétrica a partir de vários campos geotérmicos no território brasileiro. ☺

**** Natália Pereira de Moraes**, tecnóloga ambiental, mestrandia em energia, Universidade Federal do ABC
E-mail: nataliapmoraes@yahoo.com.br

*** Paulino E. Coelho**, Ph.D., professor do curso de pós-graduação em energia, Universidade Federal do ABC
E-mail: paulino.coelho@uft.edu.br

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **ABIN**, Agência Brasileira de Inteligência, "País começa a investir em geotérmica", disponível em: <http://www.abin.gov.br/modules/articles/article.php?id=156> - acessado em: 02/05/2009.
- [2] **ATLAS COPCO**, "Atlas Copco recebe pedido de usina elétrica geotérmica alemã", Novembro de 2007. Disponível em: http://www.atlascopco.com.br/brus/news/corporatenews/081007_atlas_copco_wins_german_geothermal_power_plant_order.asp - acessado em: 30/04/2009.
- [3] **BERTANI**, Ruggero, "World Geothermal Generation in 2007", International Division, Renewable Energy Business Development, Rome, Italy, 2007.
- [4] **DOE** - US Department of Energy - National Renewable Energy Laboratory, "Renewable Energy: An Overview", Março de 2001.
- [5] **DW-WORLD**, "Projeto Alemão tenta abrir caminho para a geotermia na Europa", Alemanha, Novembro de 2007. Disponível em: <http://www.dw-world.de/dw/article/0,,2971315,00.html> - acessado em: 28/04/2009.
- [6] **EXORKA**, 2008, "High output from low temperatures - The Kalina Cycle", 2008, disponível em: <http://www.exorka.com/index.php/kalina-cycle.html> - acessado em: 25/04/2009.
- [7] **EXORKA**, 2008, "The first generation in Kalina geothermal", 2008, disponível em: <http://www.exorka.com/index.php/husavik-kalina-plant.html> acessado em: 25/04/2009.
- [8] **GERMAN RENEWABLE Energy**, "Geothermie Unterhaching case study: Supplying both heat and electricity from geothermics to a municipality", 2007. Disponível em: <http://www.german-renewable-energy.com/Renewables/Navigation/Englisch/Geothermie/case-studies,did=241098.html?view=renderPrint> - acessado em: 24/04/2009.
- [9] **HINRICHS**, Roger A.; **KLEINBACH**, Merlin. "Energia e Meio Ambiente"; Editora Cengage Learning - tradução da 3. ed. Norte-Americana - São Paulo, 2004.
- [10] **IGG** - Istituto di Geoscienze e Georisorse; "What is Geothermal Energy", Fevereiro de 2004 - Pisa, Italy.
- [11] **INGVAR**, "A binary geothermal power plants using the Kalina cycle process", reference list 2000, disponível em: www.ingvar.is/Sorp/Kalina.doc - acessado em: 28/04/2009.
- [12] **BORGET JUNIOR**, José Augusto, "Otimização Exergoeconômica de Ciclos de Absorção para Geração de Potência", Pontifícia Universidade Católica do Paraná-PUCPR, Curitiba, fevereiro de 2003. disponível em: http://www.biblioteca.pucpr.br/tede//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=234 - acessado em: 24/04/2009.
- [13] **KALINA**, Alexander, "Method and Apparatus for Converting Heat from Geothermal Fluid to Electric Power", Janeiro, 1991.
- [14] **KORONEOS**, Christopher J.; **ROVAS**, Dimitrios C. "Electricity from Geothermal Energy with the Kalina Cycle - An Energy Approach", Laboratory of Heat Transfer and Environmental Engineering - Aristotle University of Thessaloniki, 2007.
- [15] **MLCAK**, Henry A., "An Introduction to the Kalina Cycle", The American Society of Mechanical Engineers, 1996. Disponível em: http://www.exorka.com/tl_files/pdf/An_Introduction_to_the_Kalina_Cycle.pdf - acessado em: 30/04/2009.
- [16] **MORAN; SHAPIRO; MUNSON; DEWITT**. "Introdução à engenharia de sistemas térmicos", Editora LTC, 2005.
- [17] **RECURRENT**, "Current Licensees e Licensee Projects", 2008. disponível em: <http://www.recurrentengineering.com/licensees.html> - acessado em: 02/05/2009.
- [18] **REPP**, Renewable Energy Policy Project, "Geothermal Energy for Electric Power", Washington, Dezembro, 2003.
- [19] **SIEMENS**, "Siemens to build Kalina cycle geothermal power plant", Siemens press release, Novembro de 2005.
- [20] **SOGEO**, "Centrais Geotérmicas", Empresa de energia geotérmica, Portugal, 2004, disponível em: http://www.sogeo.eda.pt/geo_1.php - acessado em: 03/05/2009.