

## Uso da Água na Geração de Energia Geotérmica no Brasil a partir de Modelo de Aproximação para o Transporte de Calor

José Anderson do Nascimento Batista<sup>1</sup>, Sueli Yoshinaga Pereira<sup>2</sup>, José Ricardo Pelaquim Mendes<sup>3</sup>,  
Mário Nascimento Souza Filho<sup>2</sup>

nbatista@fec.unicamp.br; joseandersonbatista@gmail.com; suelyos@ige.unicamp.br;  
jricardo@fem.unicamp.br; mnsf0301@terra.com.br

Recebido: 04/07/12 - revisado: 17/08/12 - aceito: 08/07/13

---

### RESUMO

A geração hidroelétrica é a modalidade preponderante na matriz de geração do setor elétrico brasileiro. Diversos fatores tem contribuído para a abertura do setor a outras modalidades de geração consideradas atualmente como alternativas. A geração geotérmica tem sido alvo de pesquisa científica e tecnológica em todo mundo com respeito à aplicabilidade dos sistemas de reservatórios melhorados (sigla do idioma original, EGS) que visam ao aproveitamento de calor no interior de plataformas continentais. Esta tecnologia consiste em realizar injeção de água a temperatura ambiente em rocha seca do manto terrestre e posterior extração com vazão e temperatura suficiente para produzir eletricidade em turbinas de vapor. Este trabalho tem como objetivo levantar as demandas de água introduzidas por esses sistemas, particularmente vazões necessárias para o funcionamento de um tipo de usina por ciclo orgânico Rankine. Para isto, foram levantados dados de litologia, profundidade e temperatura em poços tamponados da indústria petrolífera. Três reservatórios identificados como os de maior fluxo geotérmico do Brasil foram considerados. Para a estimativa de transferência de calor induzida nesses reservatórios, foi elaborado um modelo de aproximação permitindo-se abstrair o elenco mínimo de parâmetros e variáveis intervenientes na vazão de água. As temperaturas obtidas dentro do limite de profundidade de 10 km, atualmente adotado pelos sistemas EGS, são suficientes para a geração de potências superiores a 1,0 MWe. As estimativas de consumo de água por unidade de potência para reposição de perdas por evaporação e por deterioração da qualidade da água no caso brasileiro, embora superiores aos da experiência internacional atual, ainda são pequenas se comparadas a outras modalidades de geração térmica.

**Palavras-chaves:** águas subterrâneas, geração elétrica, energia geotérmica, modelos de aproximação.

---

### INTRODUÇÃO

O Brasil possui condições favoráveis à instalação de usinas hidroelétricas: boas condições hidrográficas e geológicas, além de demanda crescente e baixa densidade populacional. Por outro lado, segundo a resseguradora Munich Resseguros (MR, 2009) a modalidade hidroelétrica tem enfrentado riscos políticos crescentes (conflitos entre formas de uso e preservação do ambiente) bem como riscos de construção (baixa densidade de dados hidrológicos e geotécnicos que levam ao superdimensionamento das obras). De acordo com a MR (2009) a geração geotérmica figura entre

aquelas modalidades de fontes renováveis como a de maior custo específico, porém com menor vulnerabilidade a fatores naturais e a fatores originários de fontes primárias. No Brasil as fontes geotérmicas, também conhecidas como fontes termais, são utilizadas atualmente apenas para uso direto em empreendimentos industriais, de saúde e de lazer. Segundo a Associação Geotérmica Internacional<sup>1</sup> a potência consumida a partir de fontes geotérmicas no Brasil é de 360,1 MWt a 4.800 litros/s no total. Fontes geotérmicas com potencial suficiente para a geração de eletricidade são encontradas tipicamente a profundidades acima de 1.000m. Muitas vezes é necessário estender a perfuração a profundidades de 4.000 a 10.000m para obter-se uma temperatura desejável seguindo o gradiente geotérmico.

---

<sup>1</sup> - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo/Unicamp

<sup>2</sup> - Instituto de Geociências/Unicamp

<sup>3</sup> - Faculdade de Engenharia Mecânica/Unicamp

---

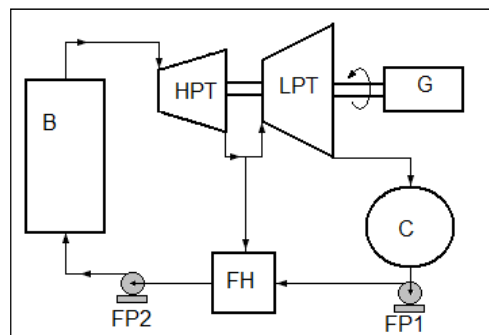
<sup>1</sup> Informação disponível em 02 de julho de 2012 no URL [www.geothermal-energy.org](http://www.geothermal-energy.org)

A avaliação do potencial energético de um reservatório geotérmico é feita de forma indireta, por meio de levantamentos de temperatura e de propriedades térmicas das rochas e dos fluidos e posterior análise com equações de transporte. Segundo Zhang et al. (2011) uma vez que a aplicação de métodos computacionais numéricos exige a representação do meio de forma discretizada e fechada, sua solução em reservatórios geotérmicos é fortemente ligada à concepção geométrica do modelo. Em casos de escassez de dados da distribuição geológica, modelos de funções analíticas aproximadas são constantemente utilizados como a melhor alternativa.

Este trabalho apresenta um estudo para a estimativa de vazão circulada e consumida bem como de profundidades mínimas de perfuração para a determinação da potência térmica fornecida pela fonte geotérmica a partir do desenvolvimento de um modelo de aproximação. O modelo utiliza formulação aproximada de modo que são permitidas as simplificações necessárias sobre a caracterização do meio físico para serem postas discussões iniciais sobre o comportamento dos reservatórios brasileiros submetidos ao funcionamento de sistemas de reservatórios melhorados (EGS) de modo a permitir a avaliação preliminar de três sítios identificados como aqueles de maior fluxo geotérmico no Brasil.

### Usinas termelétricas e usinas geotérmicas

Uma usina termelétrica (UTE), diferente das usinas hidroelétricas (UHE) que turbinam a vazão natural das bacias hidrográficas, é uma usina de geração elétrica na qual é turbinado vapor de água, que é produzido artificialmente por fontes diversas de energia para a ebulição (Figura 1, Tabela 1). As UTE são também consideradas modalidades de geração difusa, pois, diferentemente das UHE, permitem reduzir a distância até os centros de carga. Depois de passar pelas turbinas de alta e baixa pressão, o vapor de água é condensado mediante resfriamento com água do ambiente e reciclado para a caldeira, onde o ciclo se reinicia com a ebulição. Este ciclo termodinâmico produzido geralmente com água de alta qualidade sanitária é conhecido como ciclo de Rankine.

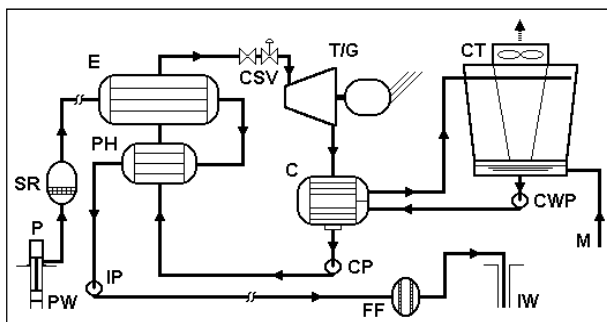


**Figura 1 - Diagrama simplificado do ciclo Rankine convencional (Adaptado de Wikipedia)**

**Tabela 1 - Componentes do ciclo Rankine Convencional**

Símbolo	Legenda
B	Evaporador
C	Condensador
FH	Caldeira
FP1	Bomba de água fria
FP2	Bomba de água quente
G	Gerador
HPT	Turbina de alta pressão
LPT	Turbina de baixa pressão

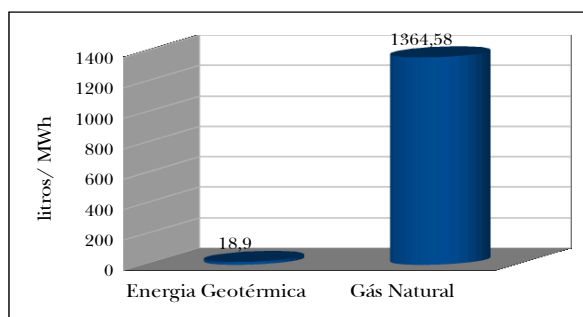
Em uma usina geotérmica não há caldeira. Se o fluido geotérmico não gerar vapor de alta qualidade, um fluido orgânico é adotado e aquecido junto ao fluido geotérmico diretamente no evaporador (Figura 2, Tabela 2). O fluido geotérmico é reciclado para a fonte geotérmica. A energia cinética produzida pela vaporização do fluido de trabalho é aproveitada mediante turbina de vapor orgânico e reciclado mediante o uso de um condensador. Este ciclo é conhecido como ciclo orgânico de Rankine. A troca no evaporador é antecipada apenas por um pré-aquecedor, para uma segunda troca térmica do fluido geotérmico com o fluido de trabalho. A água de resfriamento, por sua vez, tem origem no ambiente e após o condensador é reciclada mediante a torre de resfriamento. O resfriamento de água provoca perda sistemática de água por evaporação. O consumo de água para reposição dessas perdas é que constitui-se na demanda hídrica operacional de uma planta geotérmica. Este consumo equivale a 1,5% do praticado em uma UTE (Figura 3).



**Figura 2 - Diagrama simplificado do ciclo Rankine Orgânico. (Fonte: DiPippo, 2008)**

**Tabela 2: Abreviaturas usadas nos diagramas de fluxo**

Símbolo	Legenda
C	Condensador (fluido orgânico)
CP	Bomba de condensado (fluido orgânico)
CSV	Válvulas de controle e interrupção (fluido orgânico)
CT	Torre de resfriamento (água ambiente)
CWP	Bomba de água de resfriamento (água ambiente)
E	Evaporador (fluido orgânico)
FF	Filtro final (fluido geotérmico)
IP	Bomba de injeção (fluido geotérmico)
IW	Poços de injeção (fluido geotérmico)
M	Água do ambiente
P	Bomba de poço (fluido geotérmico)
PH	Pré-aquecedor (fluido orgânico)
PW	Poços de produção (fluido geotérmico)
SR	Removedor de areia (fluido geotérmico)
T/G	Turbina/gerador (vapor orgânico)



**Figura 3 - Consumo de água em litros por trabalho produzido em MWh na operação de uma planta de energia geotérmica e na de uma de gás natural (Fonte: Adaptado de GEA, 2007)**

### Características hidrológicas de usinas geotérmicas

As modalidades convencionais de geração geotérmica são aquelas que exploram o vapor de água diretamente encontrado na rocha (vapor direto) e aquelas que exploram água suficientemente quente na rocha (hidrotérmicas de alta entalpia). Na usinas geotérmicas convencionais, a água é convertida em vapor que movimenta o conjunto turbo-gerador. Nessas usinas, são realizados também usos adicionais de água para diluição de sólidos dissolvidos e resfriamento da água residuária. As usinas hidrotérmicas de baixa entalpia e as usinas de sistemas de reservatórios melhorados (sigla do idioma original, EGS) também chamadas de petrotermais são consideradas não convencionais. Diferentemente do modo com que é gerado vapor nos aproveitamentos geotérmicos convencionais, assim como nos de fontes térmicas de modo geral, uma usina geotérmica não convencional não turbinava vapor de água, permitindo manter a qualidade da água em padrões menos exigentes que o de potabilidade.

Os sistemas não convencionais de geração geotérmica produzem energia por intermédio da troca de calor entre a água que circula pelo reservatório em circuito fechado como fluido geotérmico (água) e um segundo fluido de trabalho circulante com ponto de ebulição inferior ao da água também em circuito fechado, cujo vapor é responsável por girar as turbinas. As usinas hidrotérmicas de baixa entalpia utilizam ciclo binário com águas termais naturais de temperaturas abaixo do ponto de ebulição e fluido orgânico secundário com ponto de ebulição abaixo da temperatura encontrada na água. Entretanto, esta atividade apresenta-se viável apenas em locais com temperaturas ambientes inferiores a 10°C.

No Brasil, pesquisas hidrogeológicas encontram águas a temperaturas máximas de 70°C (HAMZA et al. 2010) com temperaturas médias ambientes superiores a 20°C e por isso o potencial para o aproveitamento hidrotérmico não é verificado. As usinas por EGS realizam a geração elétrica pela injeção artificial de água doce em rochas abaixo da crosta terrestre mediante a abertura de fraturas induzidas a profundidades com temperaturas elevadas porém inicialmente livres de água (TESTER et al., 2006). Perfurações tem sido praticadas até profundidades onde são encontradas rochas a mais de 180°C para transferir calor suficiente à superfície para a geração elétrica pela circulação de água (ZHANG et al., 2011). A

atividade de geração geotérmica por sistemas EGS realiza o uso da água na implantação e na operação da usina. O uso da água na implantação da usina é feito basicamente para realizar o fraturamento do reservatório geotérmico (Tabela 3).

**Tabela 3 - Uso de Água por Atividade para Fraturamento Hidráulico de Um Poço (Fonte: USDOE, 2010)**

Atividade	Vazão de água (l/s)	Volume (m <sup>3</sup> )	Período (dias)
Testes iniciais	5,0 a 7,0	400 a 600	1,0
Fraturamento	30,0 a 70,0	13.000 a 58.000	1,0 a 6,4
Pós-fraturamento	7,0 a 50,0	7.200	2,5
Teste de Circulação curto	20,0	2.600 a 3.600	21,0
Teste de circulação longo	50,0 a 100,0	4.000 a 13.000	21,0

Segundo o Ministério de Energia dos Estados Unidos (sigla do idioma original, USDOE) na operação de usina do tipo EGS, a água tem deixado de ser utilizada para resfriamento, dando lugar ao resfriamento a ar devido às condições de temperatura ambiente serem favoráveis a esta prática nas localidades das usinas no país (USDOE, 2010). Não obstante a isto, o resfriamento da água no processo de geração da usina introduz uma perda por evaporação que é reposta. A vazão total de água circulante em uma planta depende basicamente da vazão de água produzida pelos poços da usina e a quantidade de poços produtores dessa usina. Em todo o mundo as usinas EGS tem sido testadas e recentemente também empregadas comercialmente. A Austrália possui atualmente a segunda maior potência instalada no mundo, porém seu curto período de experiência ainda não permitem estatísticas de uso de água. De acordo com séries históricas da Divisão de Óleo, Gás e Recursos Geotérmicos do Estado da Califórnia, nos Estados Unidos, uma produção típica representa uma vazão não consuntiva de água em massa entre 15,0 e 20,0 kg/s por megawatt de eletricidade produzido (MWe), porém ciclos termodinâmicos de geração mais eficientes (e.g. Ciclo Kalina) praticam vazões menores, entre 4,0 e 7,5 kg/s. Na Tabela 4

apresenta-se o uso consuntivo de água de acordo com a necessidade de reposição das perdas e da qualidade da água circulante. Nas usinas levantadas pelo USDOE não é considerado uso de água para resfriamento pois o resfriamento dessas usinas é feito a ar. Nota-se que a relação do consumo com a potência gerada é igual para os dois níveis de potência encontrados nos EUA, de acordo com o USDOE (2010).

**Tabela 4 - Consumo Médio de Água s para Duas Potências de Usinas EGS (Fonte: USDOE, 2010)**

Cenários	Consumo médio diário	
	litros/kWh	litros/dia
20 MWe	1,1 – 2,72	526 a 1.306
50 MWe	1,1 – 2,72	1.315 a 3.265

Devido à diferença de temperatura entre a fonte geotérmica e a atmosfera nos EUA utiliza-se os ciclos termodinâmicos mais eficientes tanto de geração (ciclo Kalina) quanto de refrigeração a ar. Por isso, alternativamente ao estudo do USDOE, utilizou-se do estudo da Comissão Nacional de Água (sigla do idioma original, NWC) australiana que estima que o volume de água consumida corresponde à vazão de circulação geotérmica na usina, considerando que o volume consumido corresponde a 1,0% da vazão circulada no reservatório geotérmico (NWC, 2012).

### Modelo Conceitual

Durante estudos de áreas alvos para instalação de usinas, a pesquisa geológica necessita do uso de técnicas de análise de dados para a interpretação dos resultados. As análises devem responder rapidamente sobre quais as perspectivas de aproveitamento do sítio para a aplicação. As informações geralmente utilizadas na avaliação do sítio como área alvo incluem 1) nomeação de formações geológicas de atividade recente, 2) levantamento de poços penetrantes nas formações de interesse e 3) extrapolação do gradiente geotérmico até uma temperatura mínima viável. Aquela temperatura considerada viável geralmente é determinada de acordo com a tecnologia empregada na planta geradora. Por outro lado, a temperatura encontrada na rocha seca não pode ser

transferida completamente para a água em circulação.

A transferência de temperatura da rocha para a água é determinada em função das propriedades térmicas e hidráulicas do fluido bem como das propriedades térmicas e hidráulicas da rocha. As propriedades térmicas e hidráulicas do fluido são: calor específico ( $c = 4.184 \text{ J/}^\circ\text{C}\cdot\text{kg}$ ) e massa específica ( $\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$ ). O escoamento de água em fraturas de rochas é obtido em regime turbulento dependendo da espessura e da velocidade do escoamento. Esta condição é favorável à transferência de calor pois interfere na condutividade térmica do fluido pois soma a sua condutividade térmica molecular de  $0,594 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$  (a  $20^\circ\text{C}$ ) uma componente de condutividade térmica turbulenta numerosas vezes superior à condutividade térmica molecular. Portanto, condutividade térmica molecular da água foi considerada desprezível em relação à condutividade turbulenta e consequentemente um valor muito superior ao da condutividade térmica das rochas (entre  $1,2$  a  $3,98 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ ). Isto representa uma condição de transferência instantânea de calor, mas não da temperatura, da rocha para a água. A transferência de calor da rocha para o fluido em sistemas EGS ao longo do percurso fraturado entre poços de injeção e poços de produção de forma que é favorecida pelo maior tempo de contato. O aumento da distância favorece o aumento da vazão de produção. A superfície de propagação das fraturas na rocha define a superfície de contato entre a rocha e o fluido de transferência favorecendo a troca de calor. Por outro lado, aumento de percurso e de área de contato aumentam a resistência ao escoamento e a necessidade de consumo de energia e custo para a circulação da vazão desejada. Entretanto, a permeabilidade da rocha, como propriedade que expressa sua resistência hidráulica, determina apenas a energia (gradiente piezométrica) necessária para o transporte da vazão, não participando das grandezas intervenientes na determinação da vazão necessária. Assim, são consideradas apenas as seguintes propriedades geométricas do meio: condutividade térmica da rocha ( $\lambda$  em  $\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$ ), distância entre os poços ( $L$  em m), área de contato entre o fluido e a rocha ( $A$  em  $\text{m}^2$ ). As variáveis de operação são: vazão de produção em massa (em  $\text{kg/s}$ ), temperatura de injeção do fluido ( $T_1$  em  $^\circ\text{C}$ ), temperatura da rocha ( $T_{\text{amb}}$  em  $^\circ\text{C}$ ), temperatura de saída do fluido ( $T_2$  em  $^\circ\text{C}$ ).

Considerando-se que a variação de energia interna total da água é dada apenas pela variação de temperatura, despreza-se a variação de energia interna do fluido devido a variação de pressão ao longo da fratura. Pela definição de quantidade de calor fornecida ao corpo, tem-se que  $Q$  em Joules (J) é expresso por:

$$Q = c\rho V\Delta T \quad (1)$$

Sendo  $c$  o calor específico do fluido em  $\text{J/}^\circ\text{C}\cdot\text{kg}$ ,  $\rho V$  o produto da massa específica do fluido ( $\rho$  em  $\text{kg/m}^3$ ) pelo seu volume ( $V$  em  $\text{m}^3$ ), que dá a massa de água em kg e  $\Delta T$  a diferença de temperatura sofrida pela água em  $^\circ\text{C}$ . Considera-se que a circulação da água injetada na rocha ocorra em uma região bem definida da rocha e as trocas de calor ocorrem entre o exterior e o interior dessa região através da área de contato.

Considerando-se que o fluxo de calor da rocha para a água ocorre por condução e seja dado pela taxa de fornecimento de calor por unidade de

área e de tempo,  $q = \frac{Q}{\Delta t A}$ , sendo  $\Delta t$  o intervalo de tempo em seg. do contato do corpo com a fonte e  $A$  a área de contato ( $\text{m}^2$ ), tem-se, utilizando-se (1), que:

$$q = \frac{c\rho V\Delta T}{\Delta t A} \quad (2)$$

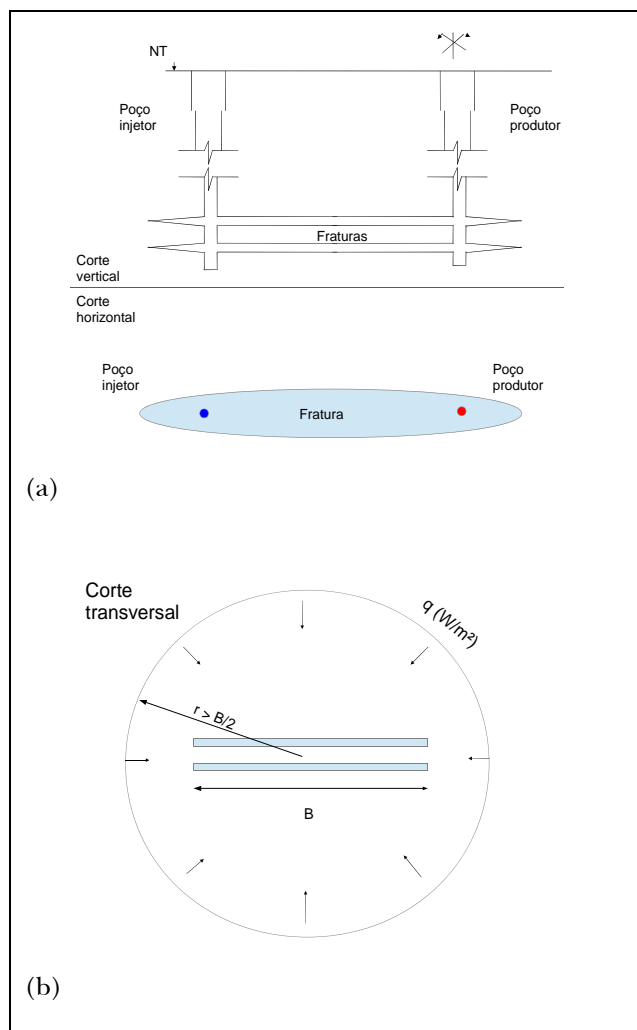
Considerando-se o volume de água escoado pelas fraturas com massa  $\rho V$  durante um tempo de trânsito  $\Delta t$  igual ao tempo de contato,

define-se a vazão de água em massa por  $\dot{M} = \frac{\rho V}{\Delta t}$ , (sendo  $\dot{M}$  dado em  $\text{kg/s}$ ). Assim, invertendo-se (2) para a diferença de temperatura,  $\Delta T$ , tem-se:

$$\Delta T = \frac{qA}{c\dot{M}} \quad (3)$$

### Modelo Matemático de Aproximação

O fluxo de calor induzido pelo escoamento entre os poços (Figura 4a) foi equacionado através de uma envoltória cilíndrica imaginária de raio  $r$  constante, distribuída ao longo da direção longitudinal,  $x$ . A envoltória cilíndrica abrange o fraturamento hidráulico que possui largura média dada igual a  $B$ , independentemente da geometria das fraturas, com um raio tal que  $r > B/2$  (Figura 4b).



**Figura 4 - Cortes esquemáticos para o modelo conceitual de fluxo de calor induzido na rocha: a) cortes longitudinais (vertical e horizontal) e b) corte transversal**

Considerando-se, ainda, que o fluxo de calor ( $q$ ) é constante em um trecho curto o suficiente ( $\Delta x$ ) e a diferença de temperatura

aplicada às extremidades do percurso,  $\Delta T = T_2 - T_1$ , com  $T_2$  para a temperatura da água que sai da rocha em °C e  $T_1$  para a temperatura da água injetada na rocha, em °C, tem-se:

$$T_2 = T_1 + \frac{q 2\pi r \Delta x}{c \dot{M}} \quad (4)$$

A expressão (4) reúne os fatores intervenientes no processo de transferência de calor de reservatórios petrotermais e demonstra que a diferença de temperatura é diretamente proporcional à distância entre os poços ( $\Delta x$  em m) e inversamente proporcional ao volume injetado com taxa em massa  $\dot{M}$ .

Considerando-se um pequeno trecho do circuito hidráulico  $\Delta x \rightarrow 0$  em que a diferença de temperatura da água aproxime-se de zero ( $\Delta T \rightarrow 0$ ), tem-se:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{2\pi r}{c \dot{M}} q(x) \quad (5)$$

A expressão (5) requer uma aproximação da distribuição longitudinal de fluxo de calor ( $q$ ) ao longo do percurso entre poços. Sabendo-se que a distribuição de calor ao longo deste circuito advectivo-difusivo é decrescente, pois a diferença de temperatura do fluido em relação à rocha circundante sofre redução ao longo do percurso, uma aproximação é obtida assumindo-se que a distribuição do acréscimo de calor ( $q$ ) no percurso segue aproximadamente uma distribuição linear (CARSLAW e JAEGER, 1959). Assim, escrevendo-se

$$q(x) = -ax + b, \quad (6)$$

então resolve-se (5) para  $T_x$ :

$$T_x - T_1 = -\frac{2\pi r}{c \dot{M}} \left( \frac{ax^2}{2} - bx \right) \quad (7)$$

com a distribuição de calor distribuída linearmente entre os poços, a distribuição de temperaturas, torna-se aproximada por uma parábola convexa.

Os coeficientes  $a$  e  $b$  são determinados pela vazão de injeção e pela condutividade térmica da rocha.

Considerando-se o fluxo de calor descrito pela lei de Fourier na forma de:

$$\vec{q} = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta \vec{r}} \quad (8)$$

sendo  $\Delta T$  a diferença de temperatura entre dois pontos distantes de  $\Delta r$  dentro do campo de influência do resfriamento da rocha e  $\lambda$  é a condutividade térmica da rocha. Considerando-se a conservação do calor em um meio homogêneo (CARSLAW e JAEGER, 1959), leva-se  $\Delta r \rightarrow 0$ , em que a diferença de temperatura da rocha por resfriamento aproxime-se de zero ( $\Delta T \rightarrow 0$ ) e tem-se a forma diferencial da lei (8). Considerando-se um fluxo de calor total ( $Q$ ) transversalmente à direção do fraturamento,  $x$ , por unidade de comprimento do percurso dado por:

$$Q = q 2\pi r. \quad (9)$$

Substituindo-se (9) em (8), esta na forma diferencial, tem-se:

$$\frac{Q}{2\pi\lambda\Delta x} \frac{dr}{r} = dT \quad (10)$$

Considerando-se que a temperatura da rocha possui uma temperatura conhecida no campo distante,  $r = r_{amb}$  dada por  $T_{amb} = cte$ . Assim, integrando-se a distribuição de fluxo de calor (10) substituindo-se  $q$  pela definição  $q = Q/2\pi R \Delta x$ , tem-se:

$$q = \frac{\lambda}{R} \frac{(T_{amb} - T)}{\ln \frac{r_{amb}}{R}} \quad (11)$$

Assim, escrevendo-se (6), para  $x=0$  e  $T=T_1$ , tem-se o coeficiente  $b$  dado por:

$$b = \frac{\lambda}{R} \frac{(T_{amb} - T_1)}{\ln \frac{r_{amb}}{R}}$$

sendo  $R$  o raio de propagação da fratura ao longo do percurso de fraturamento e  $r_{amb}$  a posição do campo distante em relação ao eixo de fraturamento onde a temperatura da rocha permanece inalterada ( $T_{amb} = cte$ ). Para  $x=L$  e  $T=T_2$ , tem-se o coeficiente  $a$  igual a:

$$a = \frac{1}{L} \frac{\lambda}{R} \frac{(T_2 - T_1)}{\ln \frac{r_{amb}}{R}}$$

Substituindo-se  $a$  e  $b$  em (7), tem-se a temperatura de produção ( $T_2$ ) dada por:

$$T_2 = \frac{T_1 + (2T_{amb} - T_1) \frac{\pi}{\ln \frac{r_{amb}}{R}} \frac{\lambda L}{c \dot{M}}}{1 + \frac{\pi}{\ln \frac{r_{amb}}{R}} \frac{\lambda L}{c \dot{M}}} \quad (12)$$

A Eq. 12 consiste no modelo utilizado neste trabalho para avaliar a potência gerada na fonte geotérmica entre um par de poços, sendo um injetor e um produtor. O consumo de água para o resfriamento realizado na usina é avaliado de acordo com a potência elétrica gerada.

Segundo Tester et al. (2006), usinas EGS atingem eficiências de geração entre 5,8 e 13,8% em relação à fonte. Como a energia é produzida na fonte diretamente proporcional à vazão e à diferença de temperatura da água (Eq. 1), considerando-se as variações de temperatura tomadas a partir da temperatura de injeção ( $T_1 = 50^\circ\text{C}$ ) e a eficiência de geração da planta igual à eficiência média do intervalo da literatura (9,8% igual à média entre 5,8 e 13,8%) tem-se uma potência elétrica dada por:

$$P = 0,098 * Q, \quad (13)$$

sendo  $Q$  o potencial geotérmico em Joules, dado pela Eq. 1. Seguindo a abordagem do NWC (2012) que estima o consumo de água por evaporação e



reposição da qualidade ( $E$  em  $m^3/\text{dia}$ ) correspondente à razão de 1,0% da vazão de circulação do fluido geotérmico, tem-se:

$$E = 0,01 \cdot V, \quad (14)$$

sendo  $V$  o volume diário de fluido geotérmico em circulação na usina ( $m^3/\text{dia}$ ).

### Estudo de Caso dos Reservatórios Brasileiros

A partir do modelo da Eq. (12) foram realizadas simulações considerando-se condições típicas de funcionamento das usinas EGS (Tabela 5) segundo a experiência internacional (USDOE, 2010) bem como as condições geológicas de regiões de maior fluxo geotérmico encontradas no Brasil (HAMZA et al, 2010).

**Tabela 5 - Parâmetros empregados em usinas EGS encontradas nos Estados Unidos (Adaptado de USDOE, 2010)**

Parâmetros, unidades	Valores
Temperatura, °C	150,0–225,0
Resfriamento do reservatório, % ano <sup>-1</sup>	0,3
Profundidade de poço, km	4–10*
Distância entre poços, m	600–1.000
Relação entre a vazão de produção e a de injeção	2,0
Vida útil da planta, anos	30

(\*) Valor de profundidade teoricamente atingível com as atuais tecnologias de construção de poços

O estudo desenvolvido por Zhang et al. (2011) demonstra a aplicação de um método de simulação de troca de calor induzida por poços para o caso de dois poços de 4 km de extensão perfurados, com diâmetro de 20cm que injeta água a 20°C ( $T_i$ ) a 2,0kg/s ( $q$ ) em uma formação rochosa com temperatura inicial da rocha com 180°C ( $T_{amb}$ ). A simulação demonstrou que a temperatura da água em contato com o reservatório, no fundo do poço não alcançaria a temperatura da rocha. Mas próximo ao regime permanente Zhang et al. (2011), a temperatura da água no fundo do poço injetor, atingiria uma temperatura próxima de 100°C ( $T_2$ ).

Segundo Hamza et al. (2010), os sítios de maior fluxo de calor geotérmico do Brasil estão

localizados principalmente em quatro regiões: bacia sedimentar do Amazonas, no planalto central, no nordeste setentrional e na região sul do país. Na Tabela 6 apresenta-se as definições de cada uma das quatro regiões geológicas brasileiras. A localização e a extensão das áreas de maior fluxo geotérmico estão mapeadas conforme a Figura 5.

Nas áreas mapeadas com maior fluxo de calor, estão localizados os grandes lineamentos e falhas com indícios de movimentação quaternária, definidos por Saadi (1993), que podem ser as causas dessas anomalias de fluxo.

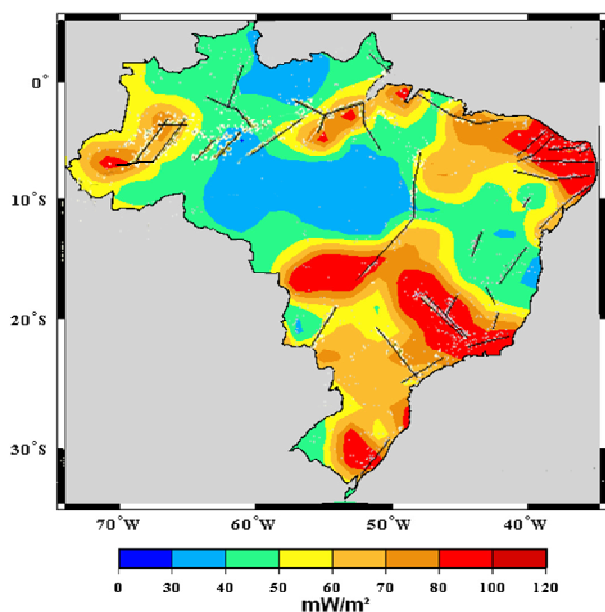
**Tabela 6 - Síntese das características geológicas das áreas brasileiras com maiores valores de fluxo de calor**

Região	Características geológicas gerais
Bacia sedimentar do Amazonas	Bacia Sedimentar do Acre, Solimões, Amazonas e Marajó – apresentam arenitos e sedimentos de idades que variam do terciários a quaternários, e holocênicos.
Nordeste Setentrional	Compreende rochas do embasamento cristalino e bacias sedimentares do Potiguar, Pernambuco-Paraíba e Sergipe-Alagoas
Planalto Central	As áreas de maiores fluxos de calor situam-se no limite norte da bacia sedimentar do Paraná, onde se situam rochas cristalinas, a bacia dos Parecis, São Francisco, Ilha do Bananal, Bacia de Taubaté e Campos.
Sul	Borda da bacia sedimentar do Paraná, onde ocorrem rochas sedimentares e vulcânicas.

Considerando-se a modalidade de geração geotérmica, que deve ser localizada próxima aos centros de carga, apenas três regiões foram consideradas neste trabalho como regiões alvo: Nordeste Setentrional, Planalto Central e Sul. As faixas de valores de condutividade térmica normalmente esperados para rochas graníticas são apresentadas por DiPippo (2008) entre 1,73 e 3,98 W/m°C. Esta faixa de condutividades e o valor de fluxo geotérmico (90mW/m<sup>2</sup>) fornecem uma faixa de gradientes geotérmicos adotada para as regiões da intrusão alcalina do sudeste (Bacia Taubaté) e do nordeste setentrional (Bacia Nordeste Nordeste Setentrional) entre 22,6 e 52,0 °C/km (Tabela 7). Foram obtidos dados cadastrais de poços perfurados no embasamento da Bacia do Paraná (formações Tubarão e Passa Dois) fornecidos pela Agência Nacional de Petróleo (ANP). As temperaturas de fundo (BHT) encontradas na Bacia do Paraná



variam mais frequentemente entre 80,5 e 135,5°C com profundidades entre 1,8 e 3,8 km. Assim, a região localizada no planalto central (Planalto) teve sua faixa de gradientes geotérmicos estimada pela diferença de temperatura em relação à temperatura do topo (50°C) e as suas profundidades, adotadas conforme aquelas observadas na Bacia do Paraná (Tabela 7). A partir destes gradientes e o fluxo geotérmico (90mW/m<sup>2</sup>) foi estimada a condutividade térmica do granito na região Planalto (Tabela 7).



**Figura 5 - Mapa dos fluxos de calor brasileiros e principais lineamentos e falhas. (Modificado de Hamza et al., 2010 e Saadi, 1993)**

Diversos autores, segundo Gupta e Singh (2010), estimam que o fraturamento hidráulico propaga-se na rocha a uma distância transversal de aproximadamente 100 metros em torno do eixo de fraturamento ( $R = 100 \text{ m}$ ). A distância da temperatura ambiente inalterada foi adotada com raio  $r_{amb} = 1.000\text{m}$ , como valor mínimo que produz razões  $T_2/T_{amb} \leq 1,0$ .

Considerando-se uma planta geotérmica binária seu rendimento é determinado de acordo com a temperatura de produção da água do reservatório. Sua temperatura de saída para

reinjeção ( $T_1$ ) é dada pela seguinte lei empírica<sup>2</sup> em relação à temperatura da água produzida ( $T_2$ ):

$$T_1 = 28,0T_2^{0,138} \quad (15)$$

**Tabela 7 - Condutividades e gradientes estimados em áreas com maior fluxo de calor geotérmico no Brasil**

Sítio	Bacia Taubaté	Bacia Nordeste Setentrional	Planalto
<b>Fluxo<sup>1</sup></b> (mW/m <sup>2</sup> )	90	90	90
<b>Profundidade do topo<sup>1</sup></b> (m)	750	300	1225
<b>Temperatura no topo da formação<sup>1</sup></b> (°C)	50°C	50°C	50°C
<b>Gradiente estimado</b> (°C/km)	[22,6-52,0]	[22,6-52,0]	[33,3-55,5]
<b>Condutividade estimada</b> (W/m°C)	[1,7-4,0] <sup>3</sup>	[1,7-4,0] <sup>3</sup>	[1,6-2,7] <sup>2</sup>

(1) Valores obtidos de Hamza et al. (2010)

(2) Valores estimados com os dados da ANP na Bacia Paraná

(3) Valores obtidos de DiPippo (2008)

Considerando-se parâmetros de reservatório correspondentes à geologia brasileira (Tabela 7) e dados relatados em plantas geotérmicas atualmente, com vazões  $q=[1,0\text{kg/s}; 50,0\text{kg/s}]$  e distância máxima entre os poços,  $L = 1.000,0\text{m}$  (e.g. NWC, 2012) e a lei da Eq. (15), tem-se as eficiências de transferência de temperatura da rocha para o fluido de produção ( $T_2$ ) de acordo com o gráfico da Figura 5. O resultado demonstra a distribuição assintótica dos valores de  $T_2$  (Eq. 12) entre seus limites máximo e mínimo, sendo  $\text{máx}\{T_2\} = T_{amb}$  e  $\text{mín}\{T_2\} = T_1$ .

Considera-se que uma planta geotérmica eficiente possua uma temperatura de produção da fonte geotérmica ( $T_2$ ) igual a 150°C (DIPIPO, 2008). A vazão de produção por poço de produção e sua potência unitária foram determinadas em

2 Comunicação verbal do Prof. Electo E. S. Lora (NEST/Unifei)

função da temperatura de saída, 150°C e da temperatura da rocha a profundidades viáveis (Figura 6). Para isso, foram extrapolados os gradientes geotérmicos encontrados nos sítios Bacia Taubaté, Bacia NE Setentrional e Bacia Planalto.

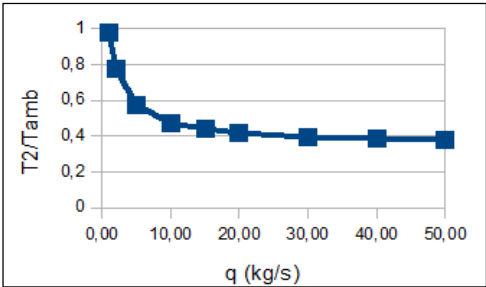


Figura 6 - Comportamento da temperatura de produção ( $T_2/T_{amb}$ ) em função da injeção de água a temperatura  $T_1/T_{amb}=40\%$  e vazão ( $q$ ) em um granito típico.

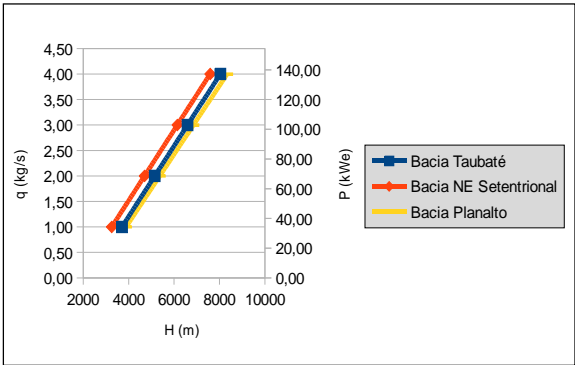


Figura 7 - Vazões de produção por poço ( $q$ ) com temperatura de saída igual a 150°C a partir de diferentes profundidades ( $H$ ) e potências geradas ( $P$ ).

Considerando-se uma potência elétrica modesta de 1000 kWe, segundo a Eq. 13, obteve-se uma vazão total de aproximadamente 25,9 kg/s. Para a faixa de produção obtida por poço (Figura 6) e um arranjo de poços convencional (e.g. USDOE, 2010; NWC, 2012), em que a relação entre o número de produção e o de injeção igual a 3,0, a potência da usina exige baterias de 6 a 27 produtores para 2 a 9 injetores, respectivamente. Esta quantidade e profundidade de poços é normalmente encontrada em usinas de maior potência e por isso, foi limitada a análise de um único valor de potência, igual a 1000 kWe.

De acordo com a potência gerada, o consumo de água foi estimado para a fase de

implantação e a fase de operação da usina. De acordo com os valores apresentados na Tabela 3, o consumo na fase de implantação foi estimado pela soma dos valores máximos de cada intervalo. O volume total por poço equivale a 82.400m³ durante um período aproximado de dois meses. Considerando-se uma quantidade de poços igual a 16 poços, média entre 6 e 27) obtém-se 1.318,4 mil m³, o que corresponde ao consumo de um município de 110.000 habitantes. Durante a operação, foi estimada, pela Eq. 14, uma demanda de água da torre de resfriamento mais a de reposição de qualidade igual a 23,0 mil m³/dia, que corresponde ao consumo de 11.000 habitantes.

Tabela 8 - Características da usina e consumos de água

	Previsto	USDOE	NWC
Potência gerada, MWe	1,0	20 a 50	10
Potência por poço, MWe	<0,14	3,0	5,0
Vazão do fluido geotérmico, kg/s	25,9	380 a 950	100,0
Poços de produção	6 a 27	6 a 16	2
Poços de injeção	2 a 9	3 a 8	1
Consumo operacional de água por MWe, mil m³/dia	23,0	4,5E-6	0,86
Consumo de água na implantação, mil m³/MWe	82,4	9,5	28,0

De acordo com a experiência do USDOE (2010) o consumo de 23,0 mil m³/dia/MWe corresponde aproximadamente a um resultado 14,2 vezes superior ao consumo médio das usinas norte-americanas, que é de 1,6 m³/dia/MWe (Tabela 4). Esta diferença deve-se às diferentes características de temperatura atmosféricas, portanto climáticas, que influenciam na diferença de temperatura produzida na planta sob temperaturas ambientes mais baixas na experiência internacional em relação às temperaturas encontradas no Brasil.

## CONCLUSÕES PARCIAIS

A elaboração de um modelo de aproximação permitiu abstrair o elenco mínimo de parâmetros e variáveis intervenientes na especificação da vazão de água como fluido geotérmico, bem como da temperatura de rocha e sua profundidade. A partir da representação da troca de calor por condução através da envoltória da região de fraturas foi obtida uma formulação que permite representar o comportamento de parâmetros geotérmicos de projeto para uma usina geotérmica do tipo EGS. O modelo representa o regime permanente do escoamento e transporte de calor e reproduz as condições de obtenção de temperaturas da água circulante. Considerando-se espessuras de formações sedimentares e parâmetros geotérmicos expeditos do embasamento em áreas de maior temperatura das bacias sedimentares Taubaté, Nordeste Setentrional e Planalto, foram estudadas configurações possíveis para um usina geotérmica a ser projetada nesses locais. Considerando-se profundidades de perfuração atualmente viáveis e condições de temperaturas de produção e injeção usuais, foram estimadas a vazão necessária por poço e sua potência unitária. A vazão de produção por poço foi encontrada entre 1,0 e 4,0 kg/s e sua potência unitária entre 20 e 140 kWe. Para atender 1000kWe, portanto, são necessários entre 8 e 36 poços, que variam de acordo com a profundidade de perfuração. Dados adicionais sobre a potência configuração de .

O volume de água consumido na implantação de usinas, durante cerca de dois meses, equivale a 1.318,4 mil m<sup>3</sup>, que corresponde ao consumo de água de 110.000 habitantes. A despeito disto, foi considerado que o uso de implantação não está relacionado às condições de operação que são térmicas (geotérmicas e climáticas) de forma que os valores máximos fornecidos pelo estado-da-arte internacional foram adotados. O consumo de água de operação foi encontrado aproximadamente igual a 23,0 mil m<sup>3</sup>/dia. Este valor é superior às referências de usinas geotérmicas devido a diferenças em relação ao clima brasileiro e corresponde ao consumo de uma população de 11.000 habitantes. Com base nos resultados obtidos e em futuros levantamentos mais específicos dos parâmetros envolvidos (raio de propagação, condutividade térmica da rocha e gradiente térmico do local), a profundidade de perfuração bem como a distância de perfuração entre os poços e a relação do número de poços de produção por poço de

injeção serão reavaliados, podendo determinar novas potências para uma usina geotérmica a ser projetada no Brasil e seu consumo de água.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) pelo apoio ao estudo (PD-0064-1018/2010) na categoria de Pesquisa Básica Dirigida, com vigência entre outubro de 2010 e setembro de 2013.

Os autores agradecem à ANP (Agência Nacional de Petróleo) pela cessão dos relatórios de perfuração de poços sob licença acadêmica para a realização da dissertação de mestrado do geólogo Mário Nascimento.

Aos revisores anônimos que muito contribuíram com dúvidas a serem esclarecidas no texto.

## REFERÊNCIAS

- CARSLAW, H.S.E.; JAEGER, J.C. *Conduction of heat in solids*. Oxford University Press, Oxford.
- DIPIPO, R. *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies, and Environmental Impact*, 2ª Ed., Butterworth-Heinemann: Elsevier, Oxford, England, 2008, 517p
- GEOHERMAL ENERGY ASSOCIATION. *A Guide to Geothermal Energy and the Environment*. Pensilvania, 2007, 86p.
- GUPTA, R.E.; SINGH, M. K. *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. 2ªed. Springer, Londres e Nova Iorque. 2010, 408p.
- HAMZA, V.M, CARDOSO, R.R., GOMES, A.J.L. E ALEXANDRINO, C.H.. "Brazil: Country Update". In: Roland N. Horne and Nenny Saptadji (Org.) ANAIS DO III WORLD GEOTHERMAL CONGRESS. Bali, Indonésia, 25-29 Abril 2010
- MUNICH REINSURANCE (MR). *Energy Mix of the Future: new risk and opportunity*, Munique, Alemanha, 2009, 56p.

NATIONAL WATER COMMISSION (NWC). Geothermal Energy and Water Use, Relatório Técnico, Waterlines Report Series No 72, Fevereiro de 2012.

TESTER JW, ANDERSON BJ, BATCHELOR AS, BLACKWELL DD, DIPIPO R, DRAKE EM, GARNISH J, LIVESAY B, MOORE MC, NICHOLS K, PETTY S, TOKSÖZ MN e VEATCH RW, 2006, The Future of Geothermal Energy – Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century, MIT Press, 372p.

SAADI, A. Neotectônica da plataforma brasileira: esboço e interpretações preliminares. *Geonomos*, v.11, p1-15, 1993.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (USDOE) Water Use in the Development and Operation of Geothermal Power Plants. C.E. Clark, C.B. Harto, J.L. Sullivan, and M.Q. Wang (org.). *Relatório Técnico*, Chicago, EUA, Setembro de 2010.

ZHANG, Y.; PAN, L.; PRUESS, K.; FINSTERLE, S. A time-convolution approach for modeling heat exchange between a wellbore and surrounding formation. *Geothermics*, v.40, n.4, December 2011, p. 261-266.

### ***Use Of Water For Geothermal Energy Generation In Brazil Based On The Approximate Model For Heat Transfer***

#### **ABSTRACT**

*Hydroelectric generation is the main source of electric power in Brazil. A number of factors have contributed to considering alternative electric power generation sources. As a result, geothermal studies have been performed worldwide on the application of enhanced geothermal systems (EGS) which aim to take heat from the Earth mantle in the continental platforms. This technology consists of injecting water at environmental temperature into hot dry rocks, then extracting it at a sufficient flow rate and temperature to run steam turbines. This paper aims to quantify the water demands present in the EGS, specifically in one type of plant: the organic Rankine cycle (ORC). To achieve this, lithological data were surveyed in cemented oil and gas industry wells. Three reservoirs were considered for geothermal assessment as having the highest heat flux in Brazil. To estimate water induced heat transfer, a simple approximate model was formulated. The*

*approximate model allowed to identify the minimal group of parameters and variables which interfere in the water flow specification in a geothermal power plant design. Considering the present status of the EGS technologies to a maximum depth of 10km, the reservoirs are able to produce up to 1.0 MWe. Water consumption per unit of power for replacement of losses to evaporation and deterioration of water quality in Brazil, although higher than in other geothermal projects worldwide, is still small compared to other thermal power sources*

**Keywords:** Groundwater. Electric power sources. Geothermal energy. Approximate models.