

## **APLICAÇÃO DA 1ª LEI DA TERMODINÂMICA NA SÍNTESE ENERGÉTICA DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI**

Bruno Felipe Canatto canatto.geo@gmail.com

Roniza Helena Maciel Passeri passeri@gmail.com

**Resumo:** O Sistema Aquífero Guarani (SAG) cobre uma área de cerca de 1.000.000 km<sup>2</sup>, está localizado no sul do continente sul-americano no subsolo de Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai. No Brasil se situa sob os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e Goiás. Para muitos desses estados é uma das principais fontes de abastecimento público de água a partir da utilização de poços tubulares profundos, porém as águas do SAG possuem temperaturas elevadas, e assim é necessário a utilização de torres de resfriamento para reduzir suas altas temperaturas à condição ambiente gerando gastos com energia elétrica. O intuito do presente artigo foi realizar a aplicação da 1ª Lei da Termodinâmica em duas etapas: no processo de formação da unidade aquífera com geração do calor geotérmico e geopressurização do sistema; e no processo de refrigeração das águas nas torres de resfriamento. Com tal análise, conclui-se que a energia geotérmica do SAG é perdida para o meio ambiente sem nenhum aproveitamento durante o processo de resfriamento e que a geopressurização do sistema gera uma energia que só é utilizada para se dispensar o bombeamento das águas nos poços.

Palavras chave: unidade aquífera, energia geotermal, geopressurização, torre de resfriamento.

## **APPLICATION OF THE 1<sup>st</sup> LAW OF THERMODYNAMICS IN THE ENERGY SYNTHESIS OF THE GUARANI AQUÍFERO SYSTEM**

**Abstract:** The Guarani Aquifer System (GAS) covers an area of around 1.000.000 km<sup>2</sup>, it is in the south american continent in the subsoil of Brazil, Argentina, Uruguay and Paraguay. In Brazil it is located on the states of Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais and Goiás. For many of these states the aquifer is the one of the main sources of public supply water from the utilization of deep tube wells, however, this water's SAG contains elevated temperature and to cool it down to ambient temperature it is necessary to utilize cooling towers generating electric power costs. The purpose of this article was to realize the application of the 1<sup>st</sup> law of thermodynamics in two stages: 1 in the process of formation of the aquifer unit with the generation of geothermal heat and geopressurization of the system; and in the process of refrigeration of the water in the cooling towers. With such analysis it is concluded that the geothermal energy from the "GAS" is lost to the environment without any utilization during the cooling process, and that the energy generated by the geopressurization in the system is only used to replace the pumping system in the well.

Keywords: aquifer unit, geothermal energy, geopressurization, cooling tower.

## 1. INTRODUÇÃO

Energia geotérmica é a energia gerada no interior do planeta Terra pela combinação de diversos fenômenos naturais. O interior da Terra pode ser dividido em crosta, manto e núcleo, sendo o núcleo a principal fonte geradora de calor a partir de processos relacionados à convecção de líquidos metálicos condutivos, reações químicas e decaimento radioativo de isótopos. Estimativas sobre o calor interno do planeta indicam que o núcleo atinge temperaturas que podem chegar aos 6.000°C, com diminuição gradual em direção à superfície, atingindo 1.500°C a 1.200°C no manto e 1.000°C a 200°C na base da crosta (LAZZERINI & CARNEIRO, 2012). Porém, apesar de altas temperaturas interiores estimadas, pouco desta energia se manifesta em profundidades menores que 10km, e na superfície, tal energia é pontualmente evidenciada em locais como vulcões, gêiseres e fontes quentes de água e lama.

A energia geotermal acessível, segundo estimativas inferidas, corresponde a aproximadamente  $1,3 \times 10^{27}$  J, o que equivale a energia gerada pela queima de  $3,0 \times 10^{17}$  barris de petróleo por dia. Se for considerado um gasto médio de  $100,0 \times 10^6$  barris por dia, teoricamente a energia geotérmica seria suficiente para abastecer o consumo da humanidade por 6 milhões de anos (LAZZERINI & CARNEIRO, 2012). Contudo esse potencial não é distribuído homoganeamente e se concentra principalmente em áreas tectonicamente ativas como em áreas de vulcanismo ativo, rifteamentos e *hots spots*, áreas nas quais as atividades magmáticas são mais intensas e ocorre contato entre fluidos superficiais frios com ambientes quentes subterrâneos através de fraturas e falhas geológicas.

Quando são acessíveis, as fontes de energia geotérmica podem ser utilizadas para geração de energia elétrica a partir dos seguintes métodos:

- a) Vapor seco: utiliza vapor quente com temperaturas acima de 235°C e com pouca água no sistema geotermal;
- b) Vapor *flash*: utiliza vapor de água de reservatórios pressurizados com temperaturas acima de 180° C;
- c) Método de ciclo binário: utiliza misturas de água e elementos fluidos com baixa temperatura de ebulição – possui vantagem de gerar energia elétrica em temperaturas menores que 100°C (HINRICHS, KLEINBACH & REIS, 2014; LAZZERINI & CARNEIRO, 2012).

A energia térmica também é usada para aquecimento de ambientes através de sistemas de bombas de troca de calor. É possível também usar diretamente águas geotérmicas para consumo

residencial, industrial e turístico. Países que se encontram em zonas tectonicamente ativas como Estados Unidos, Japão, Indonésia, Islândia, Hungria, Filipinas, México e Nova Zelândia possuem uma significativa participação da geração de energia elétrica provenientes de sistemas geotérmicos e alguns países utilizam as fontes geotérmicas para prover aquecimento a sua população (HINRICHS, KLEINBACH & REIS, 2014).

A realidade brasileira é muito diferente dos países descritos acima, situado em área tectonicamente estável o Brasil não apresenta magmatismo ativo e, com exceção de ilhas oceânicas, não há fontes geotérmicas conhecidas capazes de serem utilizadas na produção de energia elétrica a um baixo custo. Contudo, existe uma grande quantidade de fontes geotérmicas de baixa temperatura, <90°C, relacionadas a aquíferos em grandes profundidades. Gastmans *et al.* (2012) analisaram a temperatura de poços abertos no Sistema Aquífero Guarani (SAG) no Centro Oeste do Estado de São Paulo e constataram que a temperatura dos poços é superior a 38°C. Cidades como Tupã e Pereira Barreto são abastecidas por poços abertos no SAG com mais de 1000m de profundidade e com águas que chegam aos 50°C (RABELO *et al.*, 2002).

As águas do SAG são usadas para abastecimento público e devido suas altas temperaturas são resfriadas com uso de torres de resfriamento, gerando custos para o abastecimento sem aproveitamento de seu potencial térmico. Além disso, a pressurização das unidades aquíferas do SAG gera uma grande energia potencial (geopressurização) que só é aproveitada para dispensar o bombeamento da água nos poços.

Assim, o intuito deste artigo é aplicar a Primeira Lei da Termodinâmica, o conceito de conservação de energia e massa, para sintetizar a origem da energia geotermal e da geopressurização das águas do Sistema Aquífero Guarani e aplicar também a mesma lei ao processo de refrigeração de suas águas em torres de resfriamento.

### **1.1.Energia geotérmica**

A energia geotérmica é originada no interior do planeta e é responsável, entre outros eventos, pela origem do magmatismo ativo na crosta terrestre. Indiretamente influi no movimento das placas tectônicas e na origem campo magnético da terra (LAZZERINI & CARNEIRO 2012). O interior da Terra pode ser simplificada em três camadas: núcleo, manto e crosta. O núcleo do planeta é constituído por duas camadas: interna e externa. A interna é constituída por uma liga de ferro e níquel em temperaturas que podem ultrapassar 6.000°C, que devido à alta condição de pressão, se encontra em estado sólido. A camada externa possui a mesma composição, porém, em estado líquido. Destaca-se que a movimentação circular do

núcleo interno em relação ao núcleo externo é responsável pela geração do campo magnético terrestre (STOBER & BUCHER, 2013). O manto terrestre possui uma densidade menor que o núcleo e é constituído por rochas peridotíticas, ferro-magnesianas, com variações nos estados sólido e líquido, sua temperatura diminui gradualmente em direção à superfície, variando entre 1.500°C a 1.200°C no interior do manto e 1.000°C a 200°C na base da crosta (LAZZERINI & CARNEIRO, 2012). Apesar da temperatura interna da terra seguir um determinado padrão vertical, ocorre uma grande variação do gradiente geotermal em profundidades menores que 10km, consideradas próximas à superfície.

O gradiente geotérmico é a variação da temperatura com a profundidade, é em torno de 1°C para cada 33m, mas varia conforme a região e pressão litostática. Em zonas de riftes e magmatismo ativo podem atingir altas temperaturas enquanto zonas de subducção possuem baixo gradiente geotérmico.

Segundo Souza Filho (2012), o tipo de geotermalismo pode ser dividido de acordo com sua entalpia: alta entalpia, temperaturas do local de captação acima de 150°C; média entalpia, temperaturas entre 90 e 150°C; baixa entalpia, temperaturas menores que 90°C.

Fontes de alta entalpia ocorrem em regiões próximas a sistemas com magmatismo ativo tais como vulcões em arcos de ilhas, sistemas orogênicos ativos, *hot spots* e sistemas de *riftes*, nesses locais ocorre contato de fluidos frios com magma em alta temperatura, com isso há formação de vapor que pode ser aproveitado para geração de energia elétrica.

As áreas de média entalpia são associadas a regiões de magmatismo residual ou zonas altamente pressurizadas, orógenos antigos. Sistemas de baixa entalpia estão associadas a áreas tectonicamente estáveis, ocorre devido ao gradiente geotérmico associado ao local em relação a pressão litostática e profundidade.

O Brasil possui algumas fontes geotermiais de média entalpia associadas a orógenos antigos e sistemas com magmas residuais, mas as principais ocorrências são de fontes de baixa entalpia associadas ao Sistema Aquífero Guarani, sendo que grande parte dos registros do uso desse potencial térmico é para turismo em parques aquáticos e *spas*.

## **1.2.Características do Sistema Aquífero Guarani (SAG)**

Segundo dados registrados por LEBAC (2008a) e LEBAC (2008b), o Sistema Aquífero Guarani (SAG) compreende uma área de aproximadamente 1.000.000 de km<sup>2</sup> localizado no sul do continente sul-americano no subsolo de parte do Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai.

Ainda segundo LEBAC (2008a) e LEBAC (2008b) o SAG é uma unidade hidrogeológica composta por rochas sedimentares mesozoicas siliciclásticas de origem deposicional continental que ocorre nas bacias sedimentares do Paraná, Chacoparanaense e Norte, com delimitação estratigráfica feita no topo pelas rochas basálticas da Formação Serra Geral e na base pela discordância permo-eotriássica. O controle sedimentar é determinado ao Norte pelos arcos Canastra e São Vicente; a Oeste, pelos arcos de Assunção e Pampeano/Puna; ao Sul pelo Arco do Rio da Prata; internamente à bacia ocorre como importantes delimitadores de controle sedimentar os Arcos de Ponta Grossa, Arco do Rio Grande e o Sinclinal de Torres.

As características que envolvem o grande aporte de águas subterrâneas desse sistema estão relacionadas a sua estratigrafia abrangida por depósitos de arenitos eólicos de ambientes desérticos compostos por sedimentos com alto grau de arredondamento e selecionamento, o que eleva o número de espaços intersticiais, aumentando assim a capacidade de armazenamento das rochas. Dentre as diversas unidades estratigráficas associadas ao SAG, duas são de grande importância e interesse por serem as mais representativas, são elas a Formação Piramboia e a Formação Botucatu (SÃO PAULO, 2005).

Segundo Caetano-Chang (1997) e Caetano-Chang & Wu (2006) a Formação Pirambóia, se espalha sob a região Centro-Leste Paulista e é composta de rochas de ambientes de formação desérticos em facies eólicas de dunas, interdunas e de canais fluviais entrelaçados. É constituída por arenitos de granulometria fina a muito fina, subfeldspáticos, portadores de estratificações cruzadas de porte variável, em geral porte médio, e pacotes métricos sub-horizontais de arenitos de granulometria muito fina, siltosos, em geral intensamente bioturbados, ou preservando laminações paralelas formadas pela migração de ondas eólicas. Na porção superior da unidade são reconhecidos depósitos de arenitos conglomeráticos de canais fluviais entrelaçados, associados a depósitos eólicos de arenitos finos a médios, com estratificações cruzadas planares de pequeno porte.

A Formação Botucatu está sobreposta à Formação Pirambóia em um contato discordante marcado de forma abrupta pela textura e coloração. Segundo França *et al.* (2003) essa formação é constituída por dunas eólicas em ambiente desértico com sets de estratificações cruzadas com espessuras variando de 1,5m a 10m., mais ou menos contínuos ao longo da bacia sedimentar do Paraná. São arenitos de granulometria fina a média com coloração castanho-avermelhada, essencialmente quartzosos e com alto grau de arredondamento dos grãos.

As áreas de recarga do aquífero se encontram nas bordas da Bacia Sedimentar do Paraná onde as rochas das referidas Formação Piramboia e Formação Botucatu afloram na região

central do Estado de São Paulo. Segundo Araújo *et al.* (1995), o fluxo das águas subterrâneas possui direção aproximadamente EW, até o Rio Paraná.

Gastmans *et al.* (2012), fizeram estudos medindo a temperatura de diversos poços profundos no Estado de São Paulo com a utilização de técnicas de geotermômetro e concluíram que o gradiente geotérmico da área do SAG localizado no Estado de São Paulo varia de 25°C/km até 30°C/km e a temperatura da água dos poços varia de 37,9°C até 67,2°C, Quadro 1.

### **1.3.Torre de resfriamento**

Torres de resfriamento são utilizadas na indústria para o reaproveitamento das águas de processos industriais. As águas atingem altas temperaturas durante seu uso e assim, para poderem ser reaproveitadas são resfriadas e tratadas sendo então devolvidas aos processos originais. Não só para refrigeração de águas industriais as torres de resfriamento podem ser utilizadas, em regiões abastecidas por águas do SAG tais torres são necessárias para diminuir a temperatura das águas a uma condição ideal para abastecimento público.

Moran (2002) simplifica a ideia da torre de resfriamento ao dizer que ela é essencialmente uma coluna de transferência de calor e massa onde deve existir uma grande superfície de contato entre as duas correntes: a fria e a quente. No caso as correntes de entrada são: água aquecida a uma temperatura  $T_1$ , uma vazão mássica  $\dot{m}_1$  e uma corrente fria de ar à temperatura  $T_2$  e vazão mássica  $\dot{m}_2$  (onde  $T_2 < T_1$ ). As correntes de saída são a água resfriada e o ar aquecido. A Figura 1 apresenta um modelo simplificado do funcionamento de uma torre de resfriamento do tipo contracorrente.

Em uma torre de resfriamento o principal responsável pela refrigeração da água é o processo de evaporação, pois, para que água se transforme em vapor ela precisa de calor latente que é retirado da própria água que passa pela torre. Esse efeito ocorre quando a água aquecida passa por um sistema que faz com que ela goteje da parte superior da torre e desça verticalmente entrando em contato com uma corrente contrária de ar frio. Na relação de contato entre as correntes de água e ar ocorre a evaporação da água, sendo essa responsável por até 80% do resfriamento do sistema, o restante é feito pela diferença de temperatura entre a água e o ar (SAPUNARU *et al.*, 2014).

Existem diversos tipos de torre de resfriamento e a classificação de cada uma é dada de acordo com o método de circulação de ar em seu interior denominados como ventilação natural, forçada ou induzida.

As torres que utilizam ventilação natural, denominadas torres atmosféricas, têm uma grande dependência do tipo climático da região e são de baixa vazão e de grandes dimensões, funcionam a partir de venezianas que possibilitam a entrada de ar.

As torres que utilizam ventilação mecânica são as mais utilizadas pois possuem melhor eficiência e tamanho reduzido, nelas são utilizados ventiladores para movimentar o ar no interior da torre. A ventilação mecânica é dividida em forçada e induzida. Na ventilação forçada, os ventiladores são colocados na lateral da torre fazendo um ângulo de 90° com a entrada da água. Já nas de tiragem induzida os ventiladores se posicionam no topo da torre. Esses sistemas de ventilação mecânica ainda podem ser subdivididos em dois tipos de torre: torre de contracorrente onde a água entra verticalmente nas torres e no sentido oposto o ar entra em contato com a água; e torre de corrente cruzada onde a água cai verticalmente enquanto o ar entra na horizontal.

Segundo Cortinovis & Song (2005), mesmo em sistemas de ventilação mecânica o funcionamento de uma torre de resfriamento pode variar de acordo com a condição climática. No inverno a saída de água pode ter uma temperatura menor que a esperada já no verão a tendência é que a água de saída seja mais quente, outras condições como neblinas e excesso de umidade ao redor da torre podem interferir no processo de refrigeração.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

A aplicação da primeira lei da termodinâmica está dividida em duas etapas, na primeira a aplicação no conceito das energias acumuladas dentro da unidade aquífera e na segunda a aplicação é relacionada ao processo de resfriamento das águas para abastecimento público usando torres de resfriamento.

A aplicação da primeira lei da termodinâmica para a primeira etapa do trabalho foi feita com base na evolução tectono-estratigráfica da Bacia Sedimentar do Paraná sugerida por Quintas (1995) e Milani (1997), e para simplificação do modelo aplica-se uma condição onde o SAG é considerado como um sistema fechado, denominado de “unidade aquífera”, constituído por rochas de porosidade ideal onde a transmissividade é igual em todo seu conteúdo. Além disso, é tratado que o volume de água na unidade é tão grande que a exploração de uma certa quantidade não seria suficiente para alterar as condições internas do sistema e que apesar da ocorrência de magmatismo no decorrer da evolução geológica do SAG é desconsiderada a entrada de calor no sistema no decorrer dos eventos magmáticos.

Para a aplicação dos conceitos da primeira lei na fase de resfriamento da água para abastecimento público é considerado que a torre de resfriamento é um sistema aberto onde os fluxos são constantes e ideais. Utiliza-se o modelo de absorção térmica por evaporação em uma torre de contracorrente onde a água entra verticalmente na torre e no sentido oposto o ar entra em contato com a água. Não é considerado para este trabalho a energia elétrica empregada para o funcionamento dos ventiladores.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. A Energia acumulada na unidade aquífera

A Figura 2 apresenta uma síntese de formação de uma unidade aquífera, onde ocorre deposição sedimentar, formação da unidade aquífera e repetição do processo para formação de uma camada impermeável que isola a unidade. Considera-se que com o passar do tempo, em anos geológicos (milhões de anos) e o contínuo processo de subsidência, novas unidades serão formadas aumentando a pressão exercida sobre a unidade aquífera, comprimindo-a e diminuindo seu volume, Figura 2.

Pela análise da Figura 2:

$$P_1 = \rho_1 g z_1 \quad (1)$$

$$P_2 = \rho_2 g z_2 \quad (2)$$

$$P_3 = \rho_3 g z_3 \quad (3)$$

Onde:

P= Pressão em Newtons por metro quadrado [N/m<sup>2</sup>];

$\rho$ = Massa específica em quilogramas por metro cúbico [kg/m<sup>3</sup>];

z= Altura em metros a partir do topo da unidade aquífera [m];

g= aceleração da gravidade, aproximadamente 9,80m/s<sup>2</sup>.

A variação da pressão em relação a profundidade no interior da terra, onde a pressão aumenta com a profundidade, é denominada pressão litostática. Portanto, a massa específica das rochas sobrejacentes à unidade aquífera é variável de acordo com o aumento de sua espessura, logo, a variação da pressão exercida sobre a unidade aquífera é igual a variação da massa específica das rochas em função da variação da sua espessura ao longo do tempo multiplicada pela força da gravidade na superfície, sendo expressa como:

$$P = g \int \rho(z) dz \quad (4)$$

Considerando um sistema fechado onde não há troca de calor, mas que pode receber trabalho, devido à variação de seu volume, temos para o balanço de energia:

$$\Delta U + \Delta E_p + \Delta E_k = Q - W \quad (5)$$

Onde:



$$\Delta Ep = 0;$$

$$\Delta Ek = 0;$$

$$Q = 0$$

Logo:

$$\Delta U = -W \quad (6)$$

$$\Delta U = - \int_{v_1}^{v_2} P dv \quad (7)$$

Considerando que o volume da unidade aquífera varia em função da pressão exercida pelas camadas adjacentes e aplicando a equação 4 em 7, tem-se:

$$\Delta U = g \int_{v_1}^{v_2} dv \int_{z_1}^{z_2} \rho(z) dz \quad (8)$$

$$\Delta U = - \left[ \frac{g}{2} (\rho(z)_2^2 - \rho(z)_1^2) (V_2 - V_1) \right] \quad (9)$$

Considerando que a pressão sobre a unidade aquífera aumenta com o tempo enquanto o volume diminui ( $V_1 > V_2$ ), temos que a energia do sistema é o trabalho recebido.

Em um determinado momento da história geológica, chamado neste trabalho de  $t_2$ , a unidade considerada torna-se incompressível, seu volume se torna invariável, mas a pressão exercida sobre ela continua aumentando, assim com o aumento da pressão litostática e a continuidade da subsidência, aumento de profundidade, a unidade aquífera entra em condições de maior calor geotérmico, Figura 3, neste momento não ocorre mais trabalho e toda energia é convertida na forma de calor para a unidade.

$$\Delta U = Q_{(t_2, t_n)} \quad (10)$$

Assim, a energia adquirida pelo sistema nas duas fases,  $t_1$  até  $t_2$  e  $t_2$  até  $t_n$ , onde  $t_n$  é o tempo decorrido após a unidade se tornar incompressível pode ser expressa por:

$$\Delta U = \left\{ - \left[ \frac{g}{2} (\rho(z)_2^2 - \rho(z)_1^2) (V_2 - V_1) \right] \right\} + Q_{(t_2, t_n)} \quad (11)$$

Considerando que  $V_1 > V_2$  e  $\rho(z)_1 < \rho(z)_2$ , e  $V > 0$  e  $\rho(z) > 0$ , o primeiro termo da equação 11 se torna positivo, logo a equação pode ser escrita como:

$$\Delta U = W_{(t_1, t_2)} + Q_{(t_2, t_n)} \quad (12)$$

Ou seja, a equação 12 mostra que a energia interna do sistema é a soma do trabalho recebido no intervalo de tempo  $t_1$  até  $t_2$  com o calor resultante do sistema em condição isocórica sob maiores temperaturas e pressões no intervalo  $t_2$  até  $t_n$ .

Ao se perfurar um poço tubular profundo e atingir a unidade aquífera em questão, Figura 4, a água contida, para poder subir até o nível desejado, deverá exercer trabalho contra a força peso exercida pela coluna d'água da tubulação do poço:

$$W = \int \vec{F} dx \quad (13)$$

$$\vec{F} = \vec{P} = mgh \quad (14)$$

$$dx = dh \quad (15)$$

Onde:

$m$  = massa da água em quilogramas [kg];

$h$  = altura da coluna d'água em metros [m];

Aplicando as equações 14 e 15 em 13 temos:

$$W = \int_{h_1}^{h_2} mgh dh = \frac{mg}{2} (h_2^2 - h_1^2) \quad (16)$$

Considerando que a energia acumulada pelo aquífero é superior a força peso aplicada pela coluna d'água do poço, pode-se considerar tal modelo como um “poço jorrante”, onde o nível máximo que a água chegará é superior à superfície. Pode-se considerar que as perdas de calor são insignificantes, logo, a temperatura na saída do poço será semelhante à temperatura dentro da unidade aquífera.

### **3.2. Balanço de energia no processo de refrigeração de água usando torres de resfriamento**

A energia térmica acumulada dentro da unidade aquífera é transferida para a água em contato com a unidade, quando aberto um poço a água perde calor para a tubulação do poço e também para o meio ambiente na superfície, para este estudo essas perdas são consideradas insignificantes. A água explotada não necessita de bombeamento, pois como já foi mostrado, o nível freático dela é superior ao solo, dispensando bombeamento, e assim, economizando energia.

Como a temperatura da água é muito alta há a necessidade de refrigeração empregando sistemas de torres de resfriamento para tal. O processo para redução de temperatura, consiste na entrada da água, a uma temperatura  $T_{\text{água E}}$  e um fluxo de massa  $\dot{m}_{\text{água E}}$ , na parte superior da torre onde é pressionada em uma placa com orifícios que faz com que ela caia verticalmente em gotas para dentro da torre. Um sistema de ventiladores gera um fluxo de ar, à taxa de massa  $\dot{m}_{\text{ar E}}$ , à  $T_{\text{ambiente}}$ , a uma pressão  $P$  e com índice de umidade próximo a zero, que entra pela torre na parte inferior.

O contato direto entre os dois fluxos de massas faz com que o ar absorva calor da água, além disso, como a umidade do ar é baixa ele tem a possibilidade de vaporizar parte da água. Esse processo de vaporização da água é o grande responsável pela diminuição da temperatura pois para se vaporizar é preciso que a água receba calor latente, assim a parte da água que se vaporiza absorve calor da água dentro do sistema.

A saída do sistema é:

- a) água a uma taxa de massa  $\dot{m}_{\text{águaS}}$  à  $T_{\text{águaS}}$ , onde  $\dot{m}_{\text{águaS}} < \dot{m}_{\text{águaE}}$ , pois parte da água de entrada é levada em forma de vapor pelo ar, e  $T_{\text{águaS}}$  é aproximadamente a temperatura ambiente do ar de entrada,  $T_{\text{ambiente}}$ .
- b) ar com taxa de massa  $\dot{m}_{\text{arS}}$  e temperatura  $T_{\text{arS}}$ , onde  $\dot{m}_{\text{arS}} > \dot{m}_{\text{arE}}$ , pois o ar de saída está saturado com vapor de água, e  $T_{\text{ambiente}} < T_{\text{arS}} < T_{\text{águaE}}$ , pois a temperatura  $T_{\text{arS}}$  é a temperatura de equilíbrio entre  $T_{\text{ambiente}}$  do ar de entrada e a temperatura  $T_{\text{águaE}}$  da água de entrada.

Logo, esse sistema obedece ao conceito de conservação de massa:

$$\sum \dot{m}_{\text{Entrada}} = \sum \dot{m}_{\text{Saída}} \quad (17)$$

$$\dot{m}_{\text{águaE}} + \dot{m}_{\text{arE}} = \dot{m}_{\text{águaS}} + \dot{m}_{\text{arS}} \quad (18)$$

A energia do sistema se mantém conservada pois a energia contida no fluxo de água de entrada,  $\dot{m}_{\text{águaE}}$ , é parte transferida para o fluxo do ar de entrada,  $\dot{m}_{\text{arE}}$ , e no vapor que satura o fluxo de massa de ar de entrada, resultando na saída de água com menor energia térmica a uma taxa  $\dot{m}_{\text{águaS}}$  e ar de maior energia térmica a taxa  $\dot{m}_{\text{arS}}$ .

#### 4. CONCLUSÕES

Com a aplicação da 1ª Lei da Termodinâmica no Sistema Aquífero Guarani foi possível determinar que no decorrer do tempo geológico ele ganha energia térmica e potencial.

Se tratando de um dos maiores sistemas aquíferos do mundo a energia acumulada nele é enorme e de grande interesse. Sua energia geotérmica já foi fonte de diversos estudos, porém, apesar da existência de geotermalismo, tal energia transferida para as águas não é suficiente para a geração de energia elétrica e a utilização direta para aquecimento de ambientes acaba sendo descartada tendo em vista que o Brasil é um país de clima tropical. Assim, seu uso fica restrito para o abastecimento público onde a água deve ser refrigerada em torres de resfriamento, que pelo balanço de energia feito, o calor é perdido sendo dissipado no ambiente além disso ocorre gasto de energia elétrica para o funcionamento das torres.

De pouco estudo, a energia potencial associada à pressurização do sistema é apenas utilizada para dispensar o bombeamento da água de dentro do poço, porém essa é uma fonte grande de energia que poderia ser utilizada para mover turbinas e gerar eletricidade o que talvez seria suficiente para suprir a energia elétrica gasta no processo de refrigeração. Logo, mais estudos associados à energia potencial no SAG devem ser feitos tendo em vista o aproveitamento dessa fonte.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha esposa Roniza Passeri pela elaboração das figuras e participação no trabalho e a CAPES pela ajuda financeira.

## 6. REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, L.M.; FRANÇA, A.B.; POTTER, P.E. 1995. **Aquífero gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai, mapas hidrogeológicos das formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacaurémbo.** Curitiba, UFPR/Petrobras, 4 mapas, escala 1:5.000.000.
- CORTINOVIS, G. F.; SONG, T.W. 2005. **Funcionamento de uma torre de resfriamento de água.** *Revista de Graduação de Engenharia Química*. Sl.,v. 6, n. 14 , jul.-dez. Disponível em <<http://www.hottopos.com/regeq14/giorgia.pdf>> Acessado em 15/04/2019
- FRANÇA, A.B.; ARAÚJO, L.M.; MAYNARD, J.B.; POTTER, P.E.; 2003. **Secondary porosity formed by deep meteoric leaching: Botucatu eolinite, Southern South America.** *American Association of Petroleum Geology Bulletin*, **87**(7):P 1073-1082.
- GASTMANS, D.; REIS, M.M.; KIANG, C.H. 2012. **Geotermometria das águas hipertermais do Sistema Aquífero Guarani no estado de São Paulo.** *Revista Brasileira de Geociências*, volume 42(Suppl 1). P 208-225.
- HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M.; REIS, L. B. do. 2014. **Energia e Meio Ambiente.** Tradução da 5ª edição norte americana. São Paulo. Editora Trilha. 764p.
- LABORATÓRIO DE ESTUDOS DE BACIAS (LEBAC). 2008a. **Mapa hidrogeológico do Sistema Aquífero Guarani. Rio Claro.** 8 mapas. Escala 1:3.000.000.
- LABORATÓRIO DE ESTUDOS DE BACIAS (LEBAC). 2008b. **Informe final de hidrogeologia regional do SAG. Rio Claro.** 8 mapas. Escala: 1:3.000.000.
- LAZZERINI, F. T.; CARNEIRO, C. D. R. 2012. **Recursos Geotermiais do Brasil.** *Geologia do Brasil*. Cap. 34 (DVD). São Paulo. Editora Beca. P 840-844.
- MILANI, E. J. 1997. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica Fanerozóica do Gondwana sul-ocidental.** Porto Alegre. Tese de Doutorado em Geociências. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 225.
- MORAN, M. J.; *et al.* 2002. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia.** tradução Francesco Scofano Neto – RJ: Ed. LTC livros técnicos e científicos S.A.
- QUINTAS, M.C.L. 1995. **O embasamento da Bacia do Paraná: reconstrução geofísica de seu arcabouço.** São Paulo, IAG-USP (Tese Doutorado).
- RABELO, J. L.; OLIVEIRA, J. N.; REZENDE, R. J.; WENDLAND, E. 2002. **Aproveitamento da energia geotérmica do sistema Aquífero Guarani - Estudo de Caso.** *Anais do XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. Florianópolis. Santa Catarina.

SÃO PAULO. DAEE/IG/IPT/CPRM. 2005. **Mapa de águas subterrâneas do estado de São Paulo**. São Paulo, CPRM, 1 mapa, escala 1:1.000.000.

SAPUNARU, R. A.; *et al.*. 2014. **As Influências das Torres Hiperbólicas nas Usinas Termoelétricas: Um Foco Termonuclear**. Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas- Universidade Federal dos Vales de Jequitinhonha e Mucuri- MG, v. 37 Ed. Especial. p 30-34.

SOUZA FILHO, M. N. 2012. **Avaliação do Potencial Geotérmico da Bacia Sedimentar de Taubaté**. Dissertação de Mestrado em Geociências. Instituto de Geociências. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. p. 121.

STOBER, I., & BUCHER, K. 2013 **Geothermal Energy**. Springer.

## ANEXOS

**Quadro 1: Valores de temperatura das águas, profundidade, gradiente geotérmico e as cidades dos poços tubulares profundos que captam água do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo**

Fonte: Gastmans et al. (2012).

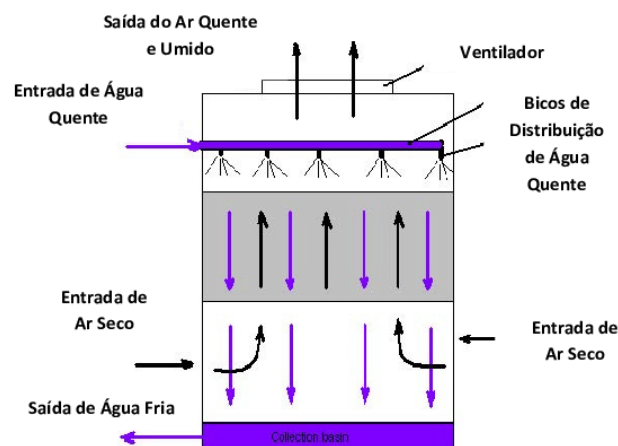
Table 1: Water temperature values, depth, geothermal gradient and cities of the deep tubular wells that collect water from the Guarani Aquifer System in the State of São Paulo

Source: Gastmans et al. (2012).

Cidade	T (°C)	Prof. topo SAG (m)	Gradiente (°C/km)
Monte Alto	37,9	452,00	35,18
Vera Cruz	41,2	911,00	21,08
Lins	41,2	968,00	19,83
Palmital	41,9	723,00	27,52
Marília	42,8	835,00	24,91
Buritama	43,8	800,00	27,25
Valparaíso	43,8	764,00	28,53
Bebedouro	44,0	680,00	32,35
São José do Rio Preto	44,4	964,00	23,24
Pereira Barreto	48,5	786,00	33,72
Barretos	48,7	786,00	33,97
Olimpia	50,2	874,00	32,27

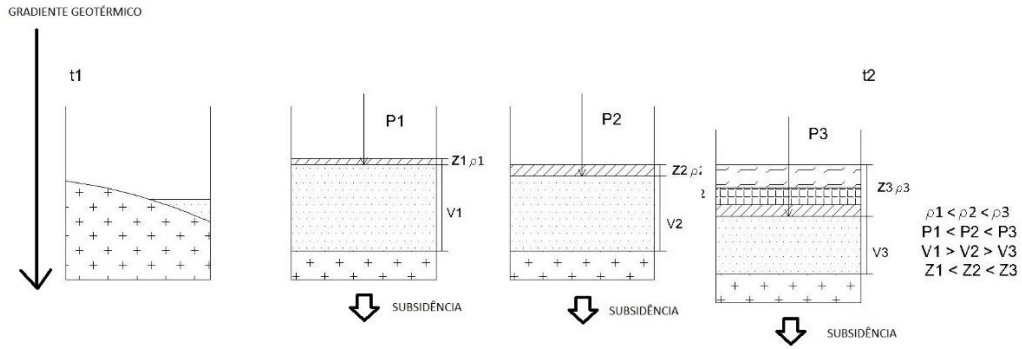
  

Cidade	T (°C)	Prof. topo SAG (m)	Gradiente (°C/km)
Araçatuba	50,3	1090,00	25,96
Presidente Prudente	63,0	1440,00	28,47
Jales	51,1	986,00	29,51
Auriflama	51,4	1002,00	29,34
Tupã	53,8	1131,00	28,12
Birigui	53,9	1228,00	25,98
Guararapes	53,9	1130,00	28,23
Votuporanga	54,3	1180,00	27,37
Palestina	57,3	1214,00	29,08
Fernandópolis	58,4	1270,00	28,66
Presidente Epitácio	67,2	1623,00	27,85

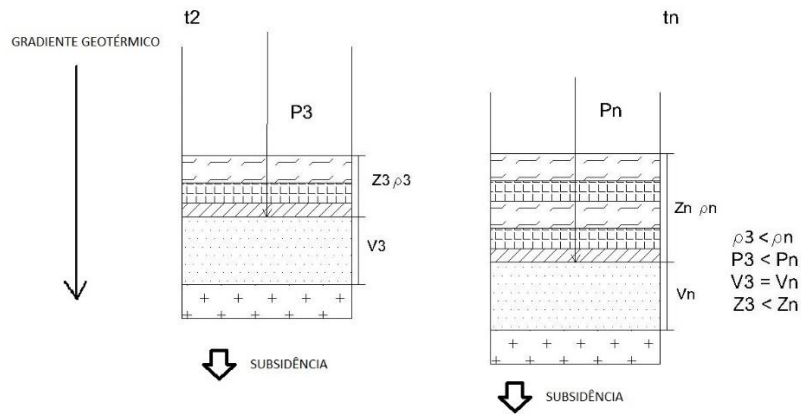


**Figura 1: Modelo de torre de resfriamento de contracorrente. Fonte: ilustração do autor**

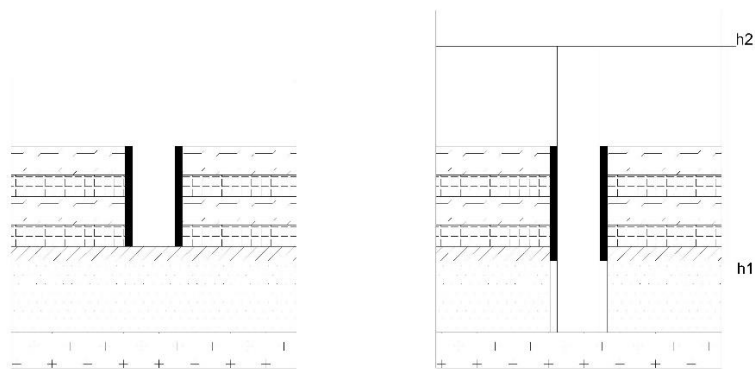
Figure 1: Countercurrent cooling tower model. Source: author's illustration



**Figura 2: Modelo simplificado de evolução de uma unidade aquífera, V representa o volume da unidade aquífera, Z a espessura das camadas sobrejacentes e P a pressão exercida sobre a unidade aquífera. Fonte: Ilustração do autor**  
 Figure 2: Simplified evolution model of an aquifer unit, V represents the volume of the aquifer unit, Z the thickness of the overlying layers and P the pressure exerted on the layers. Source: Author's illustration



**Figura 3: Modelo de evolução onde a unidade aquífera se torna incompressível, mas com pressão aumentando devido a acréscimo de camadas sobrejacentes. Fonte: ilustração do autor**  
 Figure 3: Evolution model where the aquifer unit becomes incompressible and isochoric with increasing pressure due to overlying layering. Source: author's illustration



**Figura 4: Abertura de poço tubular profundo, a água contida na unidade aquífera atinge a cota h2. Fonte: Ilustração do autor**  
 Figure 4: Opening of deep tubular well, the water contained in the aquifer unit reaches the dimension h2. Source: Author's illustration