

Avaliação Numérica da Viabilidade de Utilização de uma Chaminé Solar para Dessalinização

Paulo Marinho Junior Fonseca (PUC Minas) - pfmjunior@sga.pucminas.br

Janaina de Oliveira Castro Silva (Instituição - a informar) - janainajocs@hotmail.com

Cristiana Brasil Maia (PUC Minas) - cristiana@pucminas.br

Resumo:

Nas últimas décadas a demanda energética tem apresentado um crescimento acelerado, com isso, as preocupações ambientais estão cada vez maiores, incentivando a busca por fontes renováveis de energia. Em adição a esta busca, a grande diversidade da aplicabilidade do uso da água, tanto para consumo humano como para recurso técnico das atividades antropogênicas, somado às diferentes características e funções da mesma, têm tornado a necessidade da utilização dos recursos hídricos muito complexa. Desta forma, tecnologias que promovam a preservação destes dois recursos vêm ganhando destaque mundial. Chaminés solares são dispositivos que utilizam energia solar para gerar um fluxo de ar quente, combinando as tecnologias de coletores solares, chaminés e turbinas. O fluxo de ar gerado pode ser aproveitado para acionar turbinas eólicas gerando energia que pode ser convertida em trabalho para aplicação na dessalinização da água. Centrado primordialmente em dois tipos distintos de funcionamento; a osmose inversa e a dessalinização térmica, o processo de dessalinização basicamente consiste na remoção dos sais da água, tornando-a potável para o consumo. Este artigo realiza uma avaliação numérica a partir da utilização do ANSYS-CFX para o valor de temperatura do coletor de uma chaminé solar de pequeno porte, para a obtenção da análise da viabilidade da aplicação deste dispositivo na dessalinização de águas de minério.

Palavras-chave: *Chaminé Solar; Dessalinização; Avaliação Numérica*

Área temática: *Conversão Térmica com coletores planos*

Subárea temática: *Sistemas de conversão térmica para aplicações industriais, agrícolas e outras*

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DE UMA CHAMINÉ SOLAR PARA DESSALINIZAÇÃO

Paulo Fonsêca Marinho Júnior – pfmjunior@sga.pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica

Janaína de Oliveira Castro Silva – janainajocs@hotmail.com

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica

Cristiana Brasil Maia – Cristiana@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. Nas últimas décadas a demanda energética tem apresentado um crescimento acelerado, com isso, as preocupações ambientais estão cada vez maiores, incentivando a busca por fontes renováveis de energia. Em adição a esta busca, a grande diversidade da aplicabilidade do uso da água, tanto para consumo humano como para recurso técnico das atividades antropogênicas, somado às diferentes características e funções da mesma, têm tornado a necessidade da utilização dos recursos hídricos muito complexa. Desta forma, tecnologias que promovam a preservação destes dois recursos vêm ganhando destaque mundial. Chaminés solares são dispositivos que utilizam energia solar para gerar um fluxo de ar quente, combinando as tecnologias de coletores solares, chaminés e turbinas. O fluxo de ar gerado pode ser aproveitado para acionar turbinas eólicas gerando energia que pode ser convertida em trabalho para aplicação na dessalinização da água. Centrado primordialmente em dois tipos distintos de funcionamento; a osmose inversa e a dessalinização térmica. O processo de dessalinização basicamente consiste na remoção dos sais da água, tornando-a potável para o consumo. Este artigo realiza uma avaliação numérica a partir da utilização do ANSYS-CFX para o valor de temperatura do coletor de uma chaminé solar de pequeno porte, para a obtenção da análise da viabilidade da aplicação deste dispositivo na dessalinização de águas de minério.

Palavras-chave: Chaminé Solar; Dessalinização; Avaliação Numérica.

1. INTRODUÇÃO

A expansão populacional do mundo somada ao crescimento evolutivo dos padrões de vida do ser humano tem aumentado as proporções de necessidade em escala mundial tanto da demanda de água potável, quanto da necessidade de energia limpa. Porém, a própria evolução humana em si, agindo em contrapartida ao meio, por vezes resulta suas inúmeras atividades antropocêntricas na contaminação das águas, do ar e do ambiente como um todo. Com isso, a busca por novas tecnologias que ajam diretamente de forma parceira ao meio ambiente, tem crescido constantemente nas últimas décadas.

Para a resolução da questão energética, dispositivos denominados de chaminés solares são uma tecnologia promissora pois, absorvem a radiação solar direta e difusa para geração de um escoamento de ar quente que pode então ser aproveitado por uma turbina e a partir desta gerar energia elétrica de forma natural, limpa e renovável.

Para a questão da recuperação das fontes de água comprometidas a partir do desenvolvimento humano, uma das frentes mais promissoras propostas dos últimos anos é a indústria de dessalinização. De acordo com Hohmeyer e Bohm, (2015), os sistemas de dessalinização mais comuns não dependem de combustíveis fósseis, portanto, são capazes de reduzir a pegada de carbono. Sendo assim, essas tecnologias de energia limpa são consideradas alternativas mais sustentáveis e de curto prazo para a solução tanto da questão energética quanto na questão da água.

1.1 A água e o processo de dessalinização

A água, além de apresentar-se como a substância mais comum no mundo, é considerada também um dos produtos mais nobres do planeta. Durante muito tempo a água não foi considerada como um bem econômico, hoje, em contrapartida, a escassez de água de boa qualidade disponível no mundo fez com que esse produto assumisse uma nova condição.

Uma das preocupações mais frequentes da população mundial está relacionada a questão da água potável. Estima-se que apesar de 70% do planeta Terra ser coberto por água, apenas 3% dela é doce, sendo que, deste percentual 2% estão dispostas em forma de gelo, ou seja, apenas 1% está disponível para o consumo (Malleviale et al. 1996).

Dados divulgados pelo Governo Federal Brasileiro em 2017 comprovam que o Brasil é um país privilegiado pois, em sua extensão territorial este possui 12% das reservas de água doce disponíveis no mundo, sendo que a Bacia Amazônica concentra 70% desse volume. O restante deste valor é distribuído desigualmente para atender a toda população brasileira. O Nordeste, devido a má distribuição e às irregularidades das chuvas possui menos de 5% das reservas e grande parte da água é subterrânea, com teor de sal acima do limite aceitável para o consumo humano.

Dentre os desafios do setor relativo a água, pode se destacar: o crescimento acelerado da população, exaustão das fontes de água tradicionais, escassez da água originárias das mudanças climáticas e o gerenciamento ineficiente dos recursos hídricos disponíveis (ANA, 2006). Resultante disto, de acordo com um relatório recente das Nações Unidas, quase metade da população mundial, cerca de 3,6 bilhões de pessoas – atualmente vive em áreas vulneráveis de escassez de água e quase 2 bilhões de pessoas podem sofrer escassez de água até 2025.

Mancuso e Dos Santos, (2012), dizem que, se considerar que 65% de toda água consumida é utilizada pela agricultura, 25% pela indústria e que os restantes 10% são encaminhados para diversos fins urbanos, dessa forma, obtendo uma redução de 10% na fração destinada à irrigação, liberaria água suficiente para duplicar o consumo doméstico em âmbito mundial.

Porém, da mesma forma como é imprescindível para os seres vivos, a água também é vital para o desenvolvimento humano. As atividades antropogênicas tais como a indústria e a mineração, geram efluentes que podem alterar a qualidade das águas (Jonnalagadda e Mhere, 2001), em contrapartida são de extrema necessidade para o desenvolvimento socioeconômico.

Dados divulgados pela ANA, (2006), destacam que a atividade minerária é provavelmente, dentre as principais usuárias de água no Brasil, pois o sucesso de uma operação em mineração depende, em grande parte, da resolução adequada de suas interações com a água. Necessariamente, o empreendimento minerário destaca-se, dentre todos os outros setores usuários de água. O grande volume da sua significativa interação com os recursos hídricos superficiais e subterrâneos cria a necessidade de um olhar cuidadoso para com esta interação, considerando as características intrínsecas à atividade minerária, como a rigidez locacional e o caráter ainda insubstituível da grande maioria dos bens minerais para a manutenção da qualidade de vida da população, vis-à-vis à consideração de que a água é elemento indispensável à vida.

Em contrapartida, de acordo com o IBRAM (2019), a indústria extrativa mineral também tem participação fundamental no Produto Interno Bruto (PIB) e representa 1,4% de todo o PIB do Brasil, empregando cerca de 195 mil trabalhadores diretamente. Dessa forma, esta indústria é também um importante fomentadora da indústria nacional pois é o segmento fornecedor de matéria-prima para todos os tipos de indústrias existentes no país.

Ainda segundo o IBRAM (2019), o Produto Interno Bruto é formado predominantemente pelo setor de serviços, com 71,2% de seu total, seguido pelo setor industrial com 23,8% e por fim, pelo setor agropecuário com 5%. A indústria extrativa representa 3,7% de todo PIB brasileiro, sendo que a pauta dos bens minerais exportados pelo Brasil no ano de 2018 atingiu um volume de 409 milhões de toneladas e representou, em dólares, US\$ FOB 29,9 bilhões.

Dentre esses, os principais produtos exportados foram: minério de ferro, ouro, nióbio, cobre, bauxita, manganês, pedras naturais e de revestimentos, caulim entre outros; o valor referente a cada uma dessas exportações divulgado pelo IBRAM (2019) é disposto na Fig. 1:

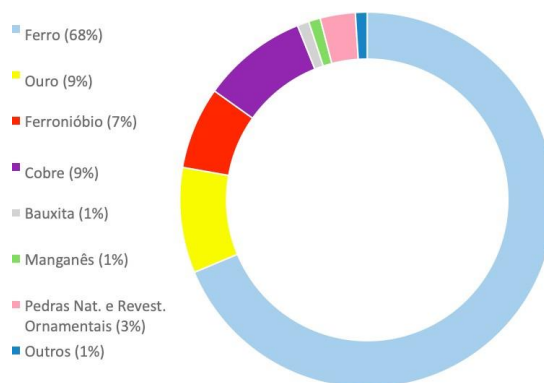


Figura 1 – Exportações Minerárias Brasileiras no ano de 2018.

Em contrapartida a todo desenvolvimento, de acordo com a ANA, (2006), a atividade da mineração provoca, como várias outras atividades econômicas, problemas ambientais. De um modo geral, esta atividade destaca os problemas com os recursos hídricos, em particular, principalmente no que se refere à poluição das águas e à degradação de áreas sob exploração mineral. Isso se explica pelo fato que, as atividades minerárias e de processamento mineral envolvem um grande número de etapas às quais estão associadas inúmeras possibilidades de contaminação da água e do meio ambiente como um todo. Esses riscos ambientais devem ser avaliados durante o desenvolvimento do fluxograma de operação da usina, que deve prever as formas de gerenciamento e tratamento dos efluentes produzidos.

Assim como dito por Oliveira, 2001, um dos principais problemas encontrados pela indústria de mineração é a necessidade cada vez mais elevada da utilização de fontes de águas primárias tornando-as impuras e com altos níveis de salinidade (incluindo sais de cálcio, magnésio e ferro como precipitados em potencial). De acordo com a Organização Mundial de Saúde, a permissividade de sal na água para consumo é de 550ppm, a água do mar normalmente tem um valor variável entre 3500 e 4500 ppm (Eltawil et al., 2009). Para o caso de águas de minério o valor proveniente de sal é inferior a este número, porém, outros agentes dispostos nas pilhas de minério e de estéril, das barragens de decantação de finos e de rejeitos, assim como dos efluentes líquidos da mina ou das usinas de beneficiamento do minério tornaram

essa água imprópria para consumo. Uma iniciativa para minimizar essa situação de transformar essa água imprópria para o consumo em água potável é a instalação de equipamentos de dessalinização.

O processo de dessalinização surgiu há muitos anos com o objetivo de remover os sais da água, tornando-a potável para o consumo. Diversos métodos de dessalinização vêm sendo estudados dentre estes destacam-se a osmose inversa e a dessalinização térmica.

Define-se como osmose inversa o processo conduzido por eletricidade ou energia mecânica sob o qual a água a ser dessalinizada é colocada sob alta pressão, passando então por membranas poliméricas, dotadas de minúsculos orifícios, que retêm os sais presentes no líquido. Já o processo de dessalinização térmica, processo o qual acionado pelo calor, envolve processos de destilação nos quais consiste na forma em que a água salgada é aquecida e evapora, acumulando-se na parte interna do tanque. Em um outro compartimento, o vapor é resfriado, condensa-se e transforma-se novamente em água limpa.

Dados provenientes de uma pesquisa elaborada pela revista virtual FAPESP em maio de 2019, demonstram que atualmente 15,9 mil plantas de dessalinização encontram-se em operação no planeta, com capacidade para purificar cerca de 95 milhões de m³ de água por dia. Essas usinas estão localizadas principalmente no Oriente Médio, norte da África, EUA, China e Austrália.

Por outro lado, apesar de todos os pontos positivos originários desse processo, de acordo com Al-Kararaghoul e Kasmerski, 2013, todos os processos de dessalinização tem um impacto negativo no ambiente por consumir muita energia, desta forma para a resolução deste problema o uso de energia renovável superaria todos estes inconvenientes.

1.2 Chaminés solares de pequeno porte

Estimativas da ONU (2019) determinam que a população mundial tem aproximadamente 7 bilhões de pessoas. Dados disponibilizados pela United Nations (2004) projetam que, para o ano de 2050, este número se eleve para cerca de 9 bilhões. Uma vez alcançado este valor a demanda energética pode chegar a se duplicar. Em decorrência disto, por possuir uma grande dependência de fontes não renováveis tais como carvão, petróleo e gás natural a preocupação relacionada à captação de energia para com o meio ambiente passa a ser também uma questão mundial (EPE, 2019).

Ainda de acordo com dados divulgados pela EPE, (2019), em contrapartida a majoritária produção energética mundial, o Brasil possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo. Em 2016 o Brasil obteve uma produção energética com base renovável percentual de 44% de sua produção total, enquanto a produção referente ao restante do mundo obteve o valor de 14% de toda produção. O Brasil possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo. A comparação entre o potencial energético provindo de fontes renováveis brasileiro para com o restante do mundo no ano de 2016 pode ser observada na Fig. 2 (EPE, 2018):

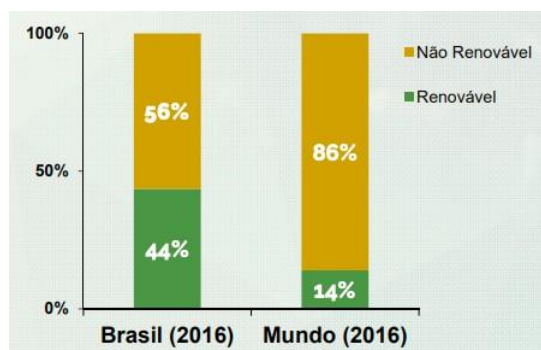


Figura 2 – Comparação entre o potencial energético provindo de fontes renováveis Brasil x Mundo.

Para o ano de 2018, somando lenha, carvão vegetal, energia hidráulica, derivados de cana e outras energias renováveis o potencial desta obteve um percentual de 42,9% da produção energética brasileira, sendo este quase metade de sua matriz. (EPE, 2019). De acordo com o Ministério de Minas e Energia brasileiro a projeção é que para o ano de 2027 a parcela renovável da oferta de energia brasileira totalize 48% de sua matriz.

Energias renováveis consistem nos tipos energéticos provindos dos recursos naturais que são naturalmente reabastecidos; tendo como principais fontes a bioenergia (provindos de fontes biológicas) e as energias geotérmica, hídrica, oceânica, solar e eólica. É importante salientar que nem toda fonte natural é renovável; o urânio por exemplo é uma fonte natural, mas não renovável pois existe em uma capacidade limitada no meio ambiente. Assim como o termo renovável refere-se apenas a uma escala humana de tempo (cerca de bilhões de anos) e não à eternidade (MARINHO JUNIOR et al, 2018). Dentre as energias renováveis disponíveis, a energia solar é abundante, permanente, renovável, não poluente e não prejudicial ao ecossistema. Em dados numéricos, a radiação solar anual que atinge o planeta Terra é equivalente a 7500 vezes do consumo mundial de energia total primária (Thirugnanasambandam, Inyan e Goic, 2010).

Um dispositivo que baseia seu funcionamento primordialmente em energia solar é a chaminé solar, seu funcionamento envolve primordialmente a combinação e comunicação de três dispositivos distintos, sendo estes: coletores solares, torres e turbinas. De maneira resumida, o funcionamento deste dispositivo se comporta da seguinte forma: no período diurno, parte da radiação solar incidente durante o dia atravessa a cobertura transparente da chaminé, promovendo assim o aquecimento natural do solo. Uma vez aquecido, o solo por convecção natural transfere calor para

massa de ar disponível no interior do coletor. A massa de ar então escoava ascendentemente em direção a torre devido as forças de empuxo provenientes dos gradientes de temperatura no interior do dispositivo. Ao encontrar a torre o ar aquecido é então succionado para o exterior do dispositivo (Castro Silva, 2018). No período noturno, quando a incidência solar é cessada, o solo ao inferior da chaminé, solo este que durante o dia armazenou parte da incidência solar passa a funcionar como efeito estufa, liberando então o calor armazenado e gerando um fluxo quase que contínuo de funcionamento, porém, em menores proporções. A Fig. 3 refere ao comportamento do ar no interior de uma chaminé solar (Maia et al, 2019 - adaptado):

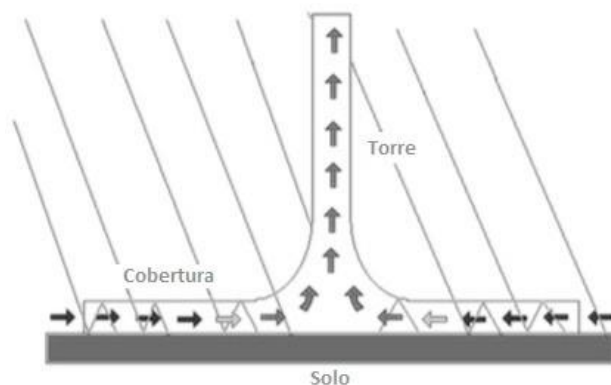


Figura 3 – Comportamento do ar no interior da chaminé solar.

Ainda em 1903, Cabaynes definiu o conceito de chaminé solar. Porém, somente sessenta e cinco anos depois em 1968 que o alemão Jörg Schlaich descreveu novamente os ideais de Cabaynes tornando tal conceito passível a uso. Dessa forma, em 1981 o governo alemão em parceria com a União Fenosa promoveu e financiou a execução do primeiro protótipo de chaminé solar (BERNARDES E OUTROS, 2003).

Sendo assim, o primeiro protótipo experimental feito no mundo, foi construído em Manzanares na Espanha, no ano de 1981. De acordo com Schlaich, (2002), a chaminé possuía uma altura da torre equivalente a 194,6m, um diâmetro de 5,08m e 0,00125m de espessura da parede metálica. Em relação ao coletor os dados equivalentes são de 122m de raio com uma cobertura de vidro e estrutura de teto feita em PVC. O sistema de turbinas da chaminé era feito com rotor único equipado com quatro lâminas de 5m na base da chaminé (Kasaeian et al, 2016). Este protótipo operou durante o período de anos entre 1982 até 1989, com uma potência máxima de funcionamento no valor de 50kW. A eletricidade gerada pelo mesmo foi integrada à rede elétrica local.

Dentre as possibilidades de se trabalhar com o fluxo de ar quente gerado por este dispositivo, a principal utilidade do mesmo se dá para alimentação de turbinas eólicas (Fathi et al., 2016; Kasaeian et al., 2017; Schlaich, 2002) para disposição então de energia elétrica, porém, grandes áreas são necessárias para gerar esta energia a preços competitivos (Maia et al. 2009).

Em adição deste, assim como descrito por Zhou et al, 2015, é necessário um enorme investimento para a construção de uma planta comercial pois exige enormes quantidades de material. Somado a esta limitação outros empecilhos também podem ser descritos para uma planta de grande porte, devido às restrições tecnológicas da utilização do concreto armado, as proporções para o tamanho necessário da altura da torre é limitada. Preocupações ambientais também são destacadas uma vez que além de alterar a geometria local traz consequências também para espécies de plantas e animais, como os pássaros por exemplo (Herrman, 2016).

Desta forma, como a análise experimental deste trabalho, foi criado um viés centrado no estudo de chaminés solares de pequeno porte, e como estas mesmas se comportariam para a finalidade de dessalinização de águas de minério. Vários estudos têm sido realizados sobre chaminés solares de pequeno porte. Maia e outros (2009), utilizando técnicas de volumes finitos realizaram uma análise numérica do escoamento em comportamento transiente de uma chaminé solar de pequeno porte. As equações de quantidade de movimento linear, da energia, da conservação de massa e as equações de transporte para grandezas turbulentas governaram a solução do problema. Os resultados obtidos foram comparados dados experimentais também feitos pelos autores. A análise numérica demonstrou que a altura e o diâmetro da torre foram os parâmetros mais importantes.

Castro Silva, 2018, utilizando análise numérica e experimental determinou a influência dos parâmetros geométricos no desempenho de uma chaminé solar de pequeno porte. A análise numérica de seu estudo determinou que o diâmetro do coletor e o diâmetro da torre são os parâmetros que mais influenciam na taxa de transferência de calor. Em complemento deste, para a análise experimental do mesmo, conclui-se que os parâmetros mais influentes sobre a vazão mássica foram o diâmetro e a altura da torre, foi também determinado que, para a saída do escoamento o fator mais influente é o diâmetro do coletor.

Diversos estudos com protótipos de pequeno porte foram analisados experimental e numericamente em diversos países do mundo, dentre estes se destacam os estudos de Maia et al. (2009), Akbarzadeh et al. (2009), Kasaeian et al. (2011), Mohammad e Obada (2012), Najmi et al. (2012), Al-Dabbas (2012), Kalash et al. (2012), Motsamai et al. (2013), Ghalamchi et al. (2015) e Castro Silva (2018). Para a aplicabilidade deste dispositivo em pequenas dimensões, como vantagens destacam-se o aproveitamento das componentes diretas e difusas provenientes da radiação solar; os materiais de construção ampla e facilmente disponíveis; seu baixo custo de manutenção comparado a

outras tecnologias; simplicidade de operação; capacidade de funcionamento contínuo e tecnologia simples (Castro Silva, 2018).

3. MODELAGEM MATEMÁTICA

Para esta questão avaliadas, as equações governantes do problema são dadas pelas equações de conservação de massa, de conservação de momento e de conservação de energia, respectivamente descrito nas Equações (1), (2) e (3). Estas equações são avaliadas a partir de Versteeg e Malalasekera, 2007:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho \cdot \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot \vec{v}) + \nabla (\rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \left(\mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \mathbf{I} \right] \right) + \rho \vec{g} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{\text{eff}} \nabla T - h \vec{j} + \left(\mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \mathbf{I} \right] \cdot \vec{v} \right) \right) \quad (3)$$

Por se tratar de uma grande complexidade originária dos escoamentos turbulentos, para este problema não se é possível uma abordagem estritamente analítica, sendo assim, se torna necessária a modelagem do problema proposto. No presente trabalho optou-se por modelar a turbulência através do modelo k-ε que utiliza o conceito de viscosidade turbulenta, que pode ser calculado através da Equação (4). A escolha do modelo k-ε no presente trabalho se dá a partir da pesquisa bibliográfica sobre chaminés solares, uma vez que, tomando como referência este modelo de turbulência se apresentam os melhores resultados para análises CFD em chaminés solares, sendo este então, conseqüentemente, o modelo mais utilizado na literatura.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

Tendo que, os termos C_μ representa uma constante empírica, k representa a energia cinética turbulenta e ε a dissipação da energia cinética turbulenta.

Ainda de acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), este modelo de turbulência permite que os efeitos de transporte das suas propriedades sejam avaliados através da solução de equações de transporte para a energia cinética turbulenta, k , e para a dissipação da energia cinética turbulenta, ε . As equações de transporte que permitem a caracterização de k e ε serão dadas respectivamente pelas Equações (5) e (6):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (6)$$

Tendo que, o termo G_k representa a produção de energia cinética turbulenta resultante da média dos gradientes, G_b a produção de energia cinética turbulenta devido às flutuações, Y_M a contribuição da dilatação flutuante na turbulência compressível para a taxa de dissipação. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ e $C_{3\varepsilon}$ são constantes. S_k e S_ε são termos definidos pelo usuário. As constantes que governam este problema assumem os seguintes valores:

$$C_\mu = 0,09 \quad \sigma_k = 1,00 \quad \sigma_\varepsilon = 1,30 \quad C_{1\varepsilon} = 1,44 \quad C_{2\varepsilon} = 1,92$$

Cengel e Ghajar (2011) pontuam que, sólido semi-infinito é definido como um corpo ideal que tenha uma superfície em um único plano e estende-se até ao infinito em todas as direções. Sendo assim, desta forma o solo pode ser considerado como um meio semi-infinito para determinar a variação de temperatura próxima a sua superfície. Por curtos períodos de tempo, a maioria dos corpos pode ser modelado como um sólido semi-infinito, uma vez que, o calor não tem tempo suficiente para penetrar profundamente no corpo. A solução analítica para o caso da temperatura constante em uma superfície, pode ser calculado a partir da Equação (7).

$$\frac{T(x)-T_s}{T_i-T_s} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-u^2} du \quad (7)$$

Onde os termos $T(x)$, refere a temperatura na profundidade, T_s a temperatura na superfície e T_i a temperatura na superfície inicial. O termo η pode ser calculado a partir da Equação (8), onde os termos x representa a profundidade do solo, α a absorvidade do solo e t o tempo.

$$\eta = \frac{x}{\sqrt{4\alpha t}} \quad (8)$$

4. METODOLOGIA

Dentre os dois principais métodos de dessalinização, o processo de osmose inversa foi usado anteriormente em comunhão com painéis solares por Souza Filho e Laborde, (2006), a fim de se obter a partir da geração de energia térmica a alimentação de um motor, porém, assim como dito por Castro Silva, (2015), chaminés solares de pequeno porte não geram fluxo em um volume suficiente para a alimentação de motores. Desta forma, se torna inviável a aplicabilidade deste dispositivo em comunhão do método de dessalinização por osmose inversa. Em consequência disto, para a resolução deste problema foi avaliado a viabilidade do processo de dessalinização térmica.

Em termos técnicos, Libânio, (2010), descrevem que, a evaporação se sucede quando as moléculas de água escapam através da superfície líquida. Em um ambiente fechado, o equilíbrio é atingido quando o número de moléculas que deixam a superfície e então igualando este ao número de moléculas de vapor que se condensam ao atingir a superfície livre. Dessa forma, a pressão de vapor se entende como à pressão exercida no espaço pelas moléculas de vapor. A magnitude desta pressão é governada pela pressão reinante e pela temperatura, de forma que, quando a pressão acima da superfície líquida se iguala à pressão de vapor o líquido entra em ebulição, mesmo a temperatura ambiente. Desta forma, para conseguir obter a ebulição da água em temperatura ambiente é necessário que a mesma atinja aproximadamente 100°C. Sendo assim, esta temperatura de 100°C é a temperatura que deve ser obtida na região do centro do coletor da chaminé solar quando a finalidade desta está condicionada a dessalinização térmica.

Devido a essas proposta de obtenção de temperatura, inicialmente, a resolução do problema tomou como princípio a pesquisa da temperatura abaixo da superfície do coletor de uma chaminé solar de pequeno porte, uma vez que, o sistema de dessalinização da água dependeria diretamente do valor de obtenção de temperatura nas regiões dadas mais quentes da chaminé, para assim se determinar os valores de temperatura dispostos na mesma e com isso a necessidade ou não do uso de uma fonte auxiliar de calor necessária para se obter o ponto de evaporação da água.

Desta forma, para a realização da análise em CFD foi usado o software ANSYS-CFX 19. Na resolução do problema, a geometria padrão utilizada obtinha as dimensões de: uma torre com 2,5 m de altura e 0,2 m de diâmetro, coletor com 5 m de diâmetro e altura em relação ao solo de 0,1 m, além disto, foram considerados as seguintes condições: escoamento em regime transiente, o fluido como um gás ideal e o modelo de turbulência k-e.

Por se tratar de um problema complexo, o desenho da chaminé solar foi dividido em três partes, seguindo o modelo de resolução feita por Castro Silva, 2018, onde o domínio da chaminé solar era subdividido em atmosfera, a chaminé solar propriamente dita e o solo. As seguintes divisões podem ser observadas na Fig. 4 (elaborada pelos autores):

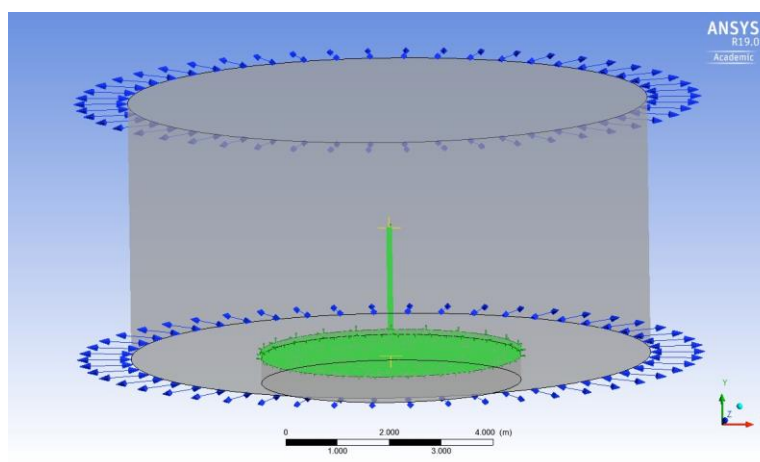


Figura 4 – Subdivisão da Chaminé Solar nos domínios Atmosfera, Solo e Chaminé Solar.

Os parâmetros de entrada de resolução do problema foram: Para a atmosfera e chaminé: morfologia considerada um fluido contínuo, componente gravitacional no plano Y de $9,81\text{m/s}^2$, pressão atmosférica de 91500Pa e Temperatura Ambiente equivalente a 298,3K (25,15°C). Para o solo: 565W/m^2 de calor absorvido e regime estacionário, definido a partir da literatura de Castro Silva (2018) para a cidade de Belo Horizonte.

A simulação foi feita a partir de um computador Dell, com processador Intel Xeon de 3.80GHz e uma memória interna de 32GB, somando um tempo de aproximadamente 2 horas. Esta foi feita a partir de uma malha com 551.796 elementos para o domínio da atmosfera, 6.907 elementos para o domínio do solo e 125.373 elementos para a chaminé, executados em regime permanente e, em um segundo momento, para resolução do problema feita novamente toda esta em regime transiente e os resultados referentes a mesma são discutidos no próximo tópico.

5. RESULTADOS

A partir da simulação feita pelo ANSYS-CFX, os valores obtidos para a temperatura na chaminé solar de pequeno porte a partir da superfície abaixo do coletor solar são demonstrados na Fig. 5 (elaborado pelos autores):

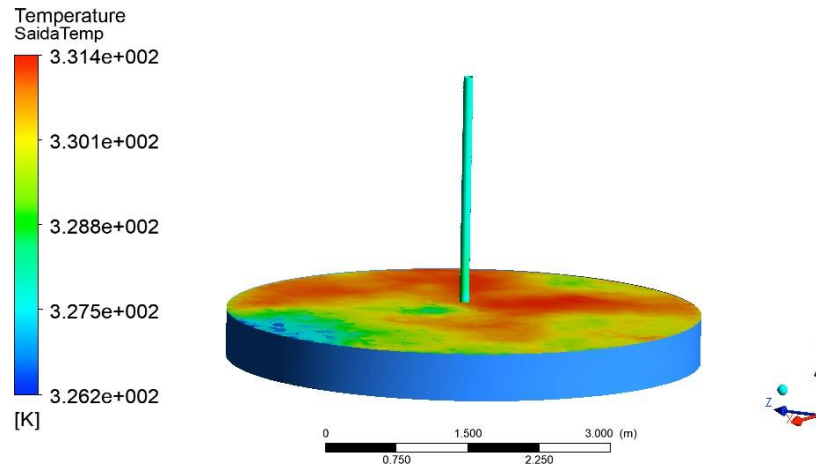


Figura 5 – Comportamento da Temperatura no interior da Chaminé Solar.

Estudos feitos a partir de Castro Silva (2018) comprovaram a importância da influência dos ventos sobre o dispositivo, oriundo a este, na Fig. 5 é possível observar que a distribuição de temperaturas não se dá de forma regular no interior do dispositivo. A partir da comparação entre a temperatura ambiente prescrita de 298,3K pode se observar que foi encontrada uma temperatura máxima de 331,40K quando em seu melhor desempenho, ou seja, no momento que a taxa de absorvidade de temperatura pelo solo proveniente de forma natural tem os valores mais elevados. Sendo assim, a chaminé solar de pequeno porte funciona corretamente como a espécie de um “forno natural”, elevando a temperatura a uma diferença de 33,10K para a temperatura ambiente, fator este que descreve o correto funcionamento do dispositivo.

Em uma análise geral, pode se observar que é nas regiões mais internas da chaminé solar onde são avaliados os valores mais altos da temperatura. Este fator é explicado através das resoluções dispostas em transferência de calor, uma vez que, um corpo (neste caso a massa de ar) tende a transferir calor da região mais quente para as regiões mais frias, ou seja, a transferência de calor no caso da chaminé solar se inicia pela ocorrência de fora para dentro. Depois de aquecido o corpo, as regiões mais internas deste tendem a estar mais quentes do que suas regiões mais externas, este comportamento pode ser avaliado a partir da Fig. 5. O ar ambiente entra de modo natural pelas extremidades da chaminé, logo, o mesmo tende a estar em uma temperatura inferior quando comparada a encontrada no interior do dispositivo, sendo assim, este fator também faz com que as regiões mais externas obtenham valores de temperatura inferiores aos valores dispostos nas regiões mais centrais do dispositivo. De forma transiente, a avaliação da comparação entre as temperaturas no interior da chaminé solar e a temperatura do interior do dispositivo podem ser analisadas a partir da Fig. 6 (elaborado pelos autores):

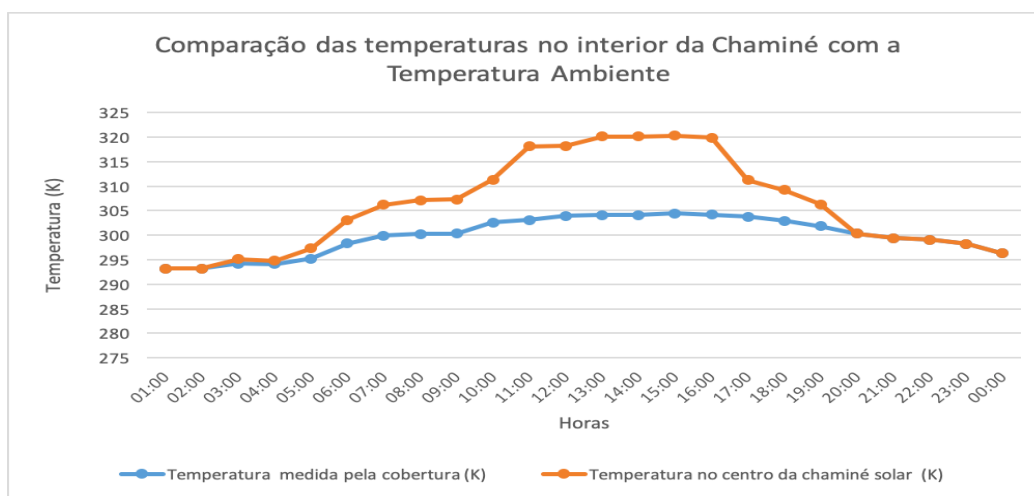


Figura 6 – Comparação das temperaturas no interior da Chaminé com a Temperatura Ambiente.

Para a análise foram avaliadas as temperaturas da cobertura e do interior da chaminé. Para a temperatura da cobertura, foi mensurada uma região mais central do dispositivo onde a mesma está diretamente relacionada ao valor da temperatura ambiente. No caso da temperatura no interior da chaminé, foi mensurada em uma região mais central do dispositivo, disposta a partir do solo do mesmo. Para o correto funcionamento do dispositivo; dispositivo este assim como estudado que se deve comportar como um forno natural, ou seja, elevar a temperatura no interior do mesmo; a chaminé solar de pequeno porte estudada obteve o seu correto funcionamento.

A partir de uma análise nos valores de temperatura encontrados e comparando os resultados com os dispostos pela literatura de Castro Silva (2018), para os horários relativos ao funcionamento completo de um dia para a chaminé solar, pode-se concluir que, durante o funcionamento das 6 da manhã até as 8 da noite a temperatura no interior do dispositivo passa a ter um aumento significativo, demonstrando seu correto funcionamento (tendo os valores de diferença de temperatura de 5 a 19 graus). Para os demais horários, horários este onde o sol já é cessado a diferença de temperatura obtém valores de menores proporção, até que o mesmo configure a diferença em valor zero, o que também demonstra o correto funcionamento, uma vez que, o solo deste se comporta como uma espécie de armazenador de temperatura, uma vez cessada a transferência de calor exercida pelo sol, o solo dispõe de sua temperatura armazenada para a chaminé fazendo com que a mesma tenha um funcionamento contínuo, ainda que em menores proporções numéricas.

Em suma, para um funcionamento normal em um dia onde a temperatura ambiente média tem o valor de 25,15°C a máxima temperatura atingida pela chaminé solar de pequeno porte foi de 58,25°C em seu horário de melhor funcionamento, obteve-se que, sem a adição de uma fonte complementar de calor, fonte esta que pode ser advinda de uma resistência auxiliar ao sistema a dessalinização térmica da água, sob estas condições de funcionamento ficaria inviável a aplicação deste projeto pois, uma vez que, para o funcionamento correto da dessalinização térmica seria necessário alcançar valores de temperatura interna referentes a 100°C.

6. CONCLUSÕES

A partir da avaliação numérica de uma chaminé solar de pequeno porte para águas de minério disposta de forma simulada pelo ANSYS-CFX, para este presente trabalho conclui-se que: o processo de dessalinização térmica aplicado diretamente foi inviável, desta forma obtém-se então as duas sugestões: se o objetivo ainda for trabalhar com um dispositivo natural, sem adição de outras fontes de calor, uma solução seria então trocar as proporções de tamanho do mesmo, variando este de uma chaminé solar de pequeno porte para uma chaminé solar de grande porte; em contrapartida, se o objetivo for trabalhar com uma chaminé solar de pequeno porte, fica então a necessidade de se usar uma fonte auxiliar de calor que opere em comunhão com a chaminé solar elevando e mantendo a temperatura da água sempre em ponto de ebulição, ou seja, próximo a 100°C.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, do CNPq, da FAPEMIG, e da PUC Minas.

REFERÊNCIAS

- AKBARZADEH A, JHONSON P, SINGH R. Examining potential benefits of combining a chimney with a salinity gradient solar pond for production of power in salt affected areas. *Sol Energy* 2009;83(8):1345–59.
- AL-DABBAS MA. The first pilot demonstration: solar updraft tower power plant in Jordan. *Int J Sustain Energy* 2012;31(6):399–410.
- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. A gestão dos recursos hídricos e a mineração. Agência Nacional de Águas, Coordenação-Geral das Assessorias ; Instituto Brasileiro de Mineração ; organizadores, Antônio Félix Domingues, Patrícia Helena Gambogi Boson, Suzana Alípez. Brasília : ANA, 2006. 334 p.
- BERNARDES M.A.S.; VOß A.; WEINREBE G. Thermal and Technical Analyses of Solar Chimneys. *Solar Energy*, v.75, p. 511-524, 2003.
- CABANYES, I., Proyecto de Motor Solar. *La Energia Eléctrica: Revista General de Electricidad y sus Aplicaciones*, v. 8, p. 61-65, 1903.
- CASTRO SILVA, J. Análise Experimental e Numérica de uma Chaminé Solar Modular. 2018. 128 f. TESE (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 2018.
- CASTRO SILVA, JANÁINA DE OLIVEIRA ; FERNANDES, T. S. ; MARINHO JUNIOR, P.F. ; LEDO, L.F.R. ; Hanriot, Sergio de Moraes ; MAIA, CRISTIANA BRASIL . Influência do regime de escoamento em uma chaminé solar de pequeno porte. In: CMN 2015 - Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia, 2015, Lisboa. Anais do CMN 2015, 2015.
- CENGEL, Y.A.; GHAJAR, A.J. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications*, 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2011.
- ELTAWIL, M.A., ZHENGMING, Z., YUAN, L., A review of renewable energy Technologies integrated with desalination systems. *Renew. Sustain. Energy Review*. 13, 2245-2262. 2009
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Matriz Energética e Elétrica. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

- FATHI, N., ALEYASIN, S.S., VOROBIEFF, P., 2016. Numerical-analytical assessment on Manzanares prototype. Appl. Therm. Eng. 102, 243–250. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.133>.
- FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO - FAPESP. Para tirar o sal da água. Engenharia Hídrica. Revista Virtual. P 64-68 - Maio 2019.
- GHALAMCHI M, KASAEIAN A, Experimental study of geometrical and climate effects on the performance of a small solar chimney. Renew Sustain Energy Rev 2015; 43:425–31.
- GHALAMCHI M, KASAEIAN A, MIRZAHOSSEINI A H. An experimental study on the thermal performance of a solar chimney with different dimensional parameters. Renewable Energy 2016;91:477–83.
- GOVERNO FEDERAL BRASILEIRO. Água e Consumo consciente. Disponível em: <<http://legado.brasil.gov.br/noticias/educacao-e-ciencia/2010/10/agua-e-consumo-consciente/#main-navigation>>. Acesso em: 25 nov. 2019.
- HERRMAN, Ulf. Renewable Energy Technologies. Course Master Engineer Systems – Winter Semester 15/16. 673 f. Notas de Aula. PDF.
- HOMEYER, O. H., BOHM, S., 2015. Trends toward 100% renewable electricity supply in Germany and Europe: a paradigm shift in energy policies. Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ. 4, 74 – 97.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. IBRAM -Gestão de Barragens e Estruturas de Disposição de Rejeitos. Disponível em: <<http://portaldamineracao.com.br/ibram/>>. Acesso em: 20 set. 2019.
- JONNALAGADDA, S. B.; MHERE, G. Water quality of the Odzi River in the eastern highlands of Zimbabwe. Water Research, v. 35, n. 10, p. 2371 – 2376, 2001.
- KALASH, S., NAIMEH, W., AJIB, S. Experimental investigation of a solar collector temperature field of a sloped solar updraft power plant prototype, In: 3rd International Conference on Solar Updraft Tower Power Technology, Wuhan, 2012, pp. 128-137.
- KASEAIAN A.B., MOLANA, S.H. , RHAMANI, K. , WEN, D. - A review on solar chimney systems - Renewable and Sustainable Energy Reviews, V.57, P. 954 – 987, 2016.
- KASEAIAN A.B., HEIDARI E, VATAN SN. Experimental investigation of climatic effects on the efficiency of a solar chimney pilot power plant. Renew Sust Energ Rev 2011;15(9):5202–6.
- LIBÂNIO, M. Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água – Editora Átomo. 3 Edição. Campinas, SP. 2010.
- MAIA C. B., SILVA, F.V.M., OLIVEIRA, V.L.C., KAZMERSKI, L.L. 2019. An overview of the use solar chimneys for desalination. Solar Energy. V. 183, p. 83 – 95, 2019.
- MAIA, C.B.; FERREIRA, A.G.; VALLE, R.M.; CORTEZ, M.F.B. Theoretical evaluation of the influence of geometric para meters and materials on the behavior of the airflow in a solar chimney, Computers & Fluids, v. 38, p. 625-636, 2009.
- MALLEVIALLE, J. ODENDAAL, P. E.; WIESNER, M. R. Water Treatment Membrane Processes. American Water Works Associaciton Research Foundation; Lyonnaise des Eaux; Water Research Comossion of South Africa. McGraw- Hill. Washington, DC, USA, 1996.
- MANCUSO, P. C. S., DOS SANTOS, H. F. Reúso da Água. Coleção Ambiental. Editora Manole. Baurueri, SP. 2003
- MARINHO JUNIOR, P. F., MORAIS, B. L. F., BARBOSA, R. R. C., Análise Experimental da Secagem de Bananas em um Secador Solar Híbrido. 2018. 117 f. . Trabalho de Conclusão de Curso – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 2018.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Apresentação para a comissão de serviços de Infraestrutura do Senado Federal. Ministrado por: Ministro Bento Albuquerque. Disponível em: <www.mmegov.br/>. Aceso em: 24 nov. 2019
- MOTSAMAI O, BAFETANYE L, MASHABA K, KGASWANE O. Experimental investigation of solar chimney power plant. J. Energy Power Eng 2013;7:1980–4.
- OLIVEIRA, A. P.; Recursos hídricos e tratamento de águas na mineração. CETEM/MCT, 2001. 36p. (Série Tecnologia Ambiental)
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. População Mundial. Disponível em: <nacoesunidas.org/acao/população-mundial/>. Acesso em: 24 nov. 2019.
- SCHLAICH, J. 2002. The Solar Chimney: electricity from the Sun. Stuttgart.
- SOUZA FILHO, J. S., LABORDE, H. M. Avaliação do Consumo Energético de um dessalinizador solar de pequeno porte. – Água subterrânea e dessalinização/ Theodoro Paulo Severino Peters. Et al. Organizadores Arminda Sconi Messias, Marcos Roberto Nunes da Costa. Recife: UNICAP, 2006.
- THIRUGNANASAMBANDAM, M.; INIYAN, S.; GOIC, R. A review of solar termal Technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, n. 1, p. 312 – 322, 2010.
- UNITED NATIONS, Department of Economic and Social Affairs/Population Division. World Population to 2300. New York, 2004.
- VERSTEEG, H.K.; MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method, 2.ed. Essex: Pearson Education Limited, 503p, 2007
- ZHOU, X. XU, Y. YUAN, S. WU, C. ZHANG, H. Performance and pntial of solar updraft tower used as na effective measure to alleviate Chinese urban haze problem. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE USE FEASIBILITY OF A SOLAR CHIMNEY FOR DESALINATION

Abstract. *In the last decades the energy demand has presented a fast growth, therefore, the environmental concerns are increasing, encouraging the search for renewable energy sources. In addition to this search, the wide diversity of the applicability of water use, both for human consumption and for the technical resource of anthropogenic activities, added to its different characteristics and functions, has made the need for the use of water resources very complex. Thus, technologies that promote the preservation of these two resources have gained worldwide prominence. Solar chimneys are devices that use solar energy to generate a hot air flow by combining three technologies: solar collector, chimney and turbine. The generated air flow can be harnessed to drive wind turbines generating energy that can be converted to work for water desalination application. Primarily centered on two distinct types of operation; inverse osmosis and thermal desalination, the desalination process basically consists of removing salts from the water, making it pure for consumption. This paper performs a numerical evaluation from the use of ANSYS-CFX, for this the collector temperature value of a small solar chimney, to obtain the feasibility analysis of the application of this device in ore water desalination.*

Key words: *Solar chimney; Desalination; Numerical Analysis.*