

UTILIZAÇÃO DE SAIS FUNDIDOS NA GERAÇÃO SOLAR HELIOTÉRMICA

Urbano Uelligton Secundes – urbano.secundes@ufpe.br

Olga de Castro Vilela – ocv@ufpe.br

Naum Fraidenraich – nf@ufpe.br

Elielza Moura de Souza Barbosa – elielzamsb@gmail.com

Universidade Federal de Pernambuco – Departamento de Energia Nuclear/Grupo FAE

Resumo. A maior parte dos sistemas heliotérmicos comerciais (CSP- Concentrated Solar Power), instalados no mundo utilizam calhas cilindro-parabólicas como elemento de concentração solar, óleos térmicos como fluidos de transferência de calor (HTF-Heat Transfer Fluid) e não apresentam sistema de armazenamento térmico. A eficiência térmica desses sistemas é limitada pela temperatura máxima de operação, que em geral, é abaixo de 400°C quando se utiliza óleos térmicos. Os sais fundidos são bastante utilizados em sistemas heliotérmicos, porém, como fluido de armazenamento de calor devido à sua alta capacidade calorífica. Atualmente, vários estudos vêm sendo realizados objetivando a utilização de sais fundidos também como fluido de transferência de calor. As condições favoráveis para sua utilização como HTF, dentre elas, as temperaturas de fusão e de ebulição, viscosidade, condutividade térmica e capacidade calorífica são obtidas modificando a concentração de seus componentes. Na avaliação da aplicação desses sais substituindo os fluidos convencionais, outros condicionantes, como corrosividade, inflamabilidade e custo, entre outros, necessitam ser bem avaliados. Nem sempre a melhor opção técnica é a comercialmente viável. Este trabalho apresenta uma compilação de dados das principais propriedades e características de diferentes fluidos convencionais e de sais fundidos e uma avaliação conceitual comparativa entre alguns sais fundidos, que poderão ser utilizados como HTF em uma usina heliotérmica de calhas cilindro-parabólicas.

Palavras-chave: Energia Solar Concentrada, Sistemas Heliotérmicos, Sais Fundidos.

1. INTRODUÇÃO

Na busca pelo aumento da eficiência global dos sistemas heliotérmicos utilizando calhas cilindro-parabólicas, estudos apontam para a geometria ideal do sistema de concentração solar, para o diâmetro e o material dos tubos absorvedores, para o tipo de ciclo termodinâmico, particularmente, para o tipo fluido térmico responsável pela troca de calor no sistema (Bouquelia et al., 2017)

Dentre todos os aspectos supracitados, esse último tem recebido uma atenção especial por parte de pesquisadores, no sentido de utilizar fluidos que possam aumentar a eficiência dos sistemas heliotérmicos já existentes. Uma das possibilidades é o uso de sais fundidos, tanto para geração de vapor superaquecido como para o armazenamento térmico em usinas solares.

As maiores vantagens na utilização dos sais fundidos são a elevada temperatura de operação e a baixa pressão de vapor em altas temperaturas. No entanto, os maiores desafios na sua utilização como HTF são os elevados pontos de fusão, viscosidade, taxa de corrosão. Para isso, muitos estudos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de encontrar um sal que apresente características físicas e termodinâmicas melhores que as apresentadas pelo sal solar (NaNO_3 - KNO_3) que é usado amplamente nas usinas solares comerciais (Ruegamer et al., 2013).

O objetivo deste trabalho é comparar, entre diversos tipos de HTFs, as características físicas que determinam o potencial energético do HTF ao chegar no trocador de calor. Esses dados permitem a realização do estudo analítico do ciclo térmico, e a partir de então, será possível realizar as simulações da geração de energia que apontem para uma melhor eficiência global do sistema.

2. FLUIDOS TÉRMICOS

Nos sistemas heliotérmicos de geração indireta, o fluido térmico é aquecido nos absorvedores que compõem o campo solar coletor da irradiância direta que será concentrada, em uma linha ou em um ponto, após sofrerem reflexão em espelhos planos ou parabólicos. Tal fluido transfere parte de sua energia térmica em um ciclo água-vapor que alimenta o bloco de potência, através da expansão do vapor superaquecido em uma turbina a vapor conectada ao gerador elétrico do sistema. As usinas heliotérmicas podem ou não apresentar um sistema de armazenamento térmico.

A Fig. 1 mostra um esquema simplificado de uma usina heliotérmica de calhas cilindro-parabólicas, com sistema de armazenamento térmico. Observa-se que o fluido contido nos tanques de armazenamento está isolado do fluido que percorre o campo solar. Esse modelo de duplo circuito é típico de sistemas que usam óleos térmicos com HTF e sais fundidos como fluido de armazenamento térmico devido à sua alta capacidade calorífica (DLR, 2016). Quando os sais fundidos são utilizados como HTF e como fluido de armazenamento térmico, o duplo circuito deixa de ser necessário. Isso permite obter uma significativa redução da complexidade do sistema, bem como, do custo de investimento e

manutenção (DLR, 2016). Os sais fundidos são bastante utilizados em sistemas heliotérmicos, porém, como fluido de armazenamento de calor devido à sua alta capacidade calorífica (DLR, 2016).

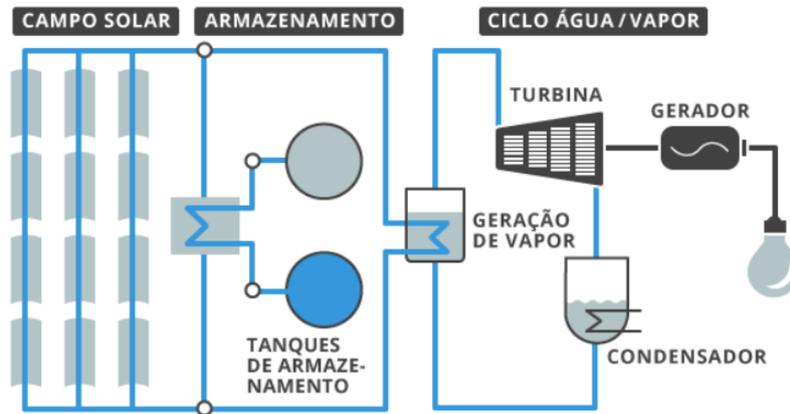


Figura 1 – Esquema simplificado de uma usina solar heliotérmica de calhas cilindro-parabólicas e com sistema de armazenamento térmico. Fonte: energiaheliotermica.gov.br

Para sistemas heliotérmicos comerciais em geral (calhas parabólicas e torres) que utilizam Energia Solar Concentrada, os fluidos térmicos mais utilizados para transferência de calor (HTFs) são: ar, água e óleos térmicos orgânicos ou sintéticos (Vignarooban *et al.*, 2015). A eficiência de uma planta CSP é limitada pela temperatura máxima de operação do HTF. O grande desafio, momentâneo, tem sido encontrar um fluido térmico com propriedades térmicas e de transporte favoráveis e que possa operar em altas temperaturas para a geração de eletricidade. Em se tratando dos sais fundidos, busca-se um fluido que além de eficiente na transferência de calor, também seja adequado para o armazenamento térmico.

As pesquisas atuais apontam para alguns sais fundidos que operem em temperaturas bem superiores à temperatura atingida pelo sal solar (550°C), mas que além da temperatura máxima de operação, apresentam outras características que podem viabilizar a operação do sistema. Segundo Li *et al.* (2016), para a utilização de sais fundidos como HTF ser viável, é necessário que o mesmo apresente as seguintes características: baixa pressão de vapor (<1 atm) a 800°C; viscosidade $\leq 0,012$ Pa.s a 300°C e $\leq 0,004$ Pa.s a 600°C; condutividade térmica $\geq 0,51$ W/m.K; massa específica ≤ 5400 kg/m³; capacidade calorífica $\geq 1,5$ kJ/kg.K; baixa taxa de corrosão para as ligas metálicas dos tubos absorvedores em alta temperatura; grande disponibilidade e baixo custo de produção.

Nas seções a seguir, será apresentado um comparativo entre algumas propriedades físicas de diferentes fluidos térmicos que poderão ser utilizados em ciclos de geração indireta. Algumas dessas propriedades físicas estão relacionadas ao aumento da eficiência do sistema, enquanto outras estão relacionadas à viabilidade técnico-econômica de operação do sistema. Desde que, nem sempre a melhor opção técnica é a comercialmente viável.

2.1 Propriedades físicas relacionadas à eficiência térmica

Para qualquer sistema de geração elétrica, a busca pelo aumento da eficiência global do sistema é o ponto chave das atuais pesquisas. E num sistema heliotérmico, aumentar a temperatura de operação do HTF implica diretamente no aumento energético do sistema como um todo. As propriedades de diversos fluidos térmicos são apresentadas nas tabelas seguintes. As informações, coletadas de diversos artigos científicos recentes, viabilizam estudos de simulação comparativos entre as opções de fluidos. Mais especificamente, entre as opções de sais e o óleo térmico sintético (Therminol VP-1), por ser um fluido amplamente utilizado nas usinas heliotérmicas de geração indireta.

2.1.1. Temperatura de operação estável

Dentre todas as propriedades dos fluidos térmicos relacionadas ao aumento da eficiência global do sistema, a temperatura máxima de operação configura-se como a mais importante entre elas, por restringir a eficiência térmica da planta solar (DLR, 2016). Motivo pelo qual muitas pesquisas vêm sendo realizadas com o intuito de encontrar/desenvolver um fluido que atinja temperaturas cada vez mais altas e que possam ser utilizados em sistemas de geração indireta em calhas cilindro-parabólicas.

Apesar dos coletores cilindro-parabólicos ocuparem mais de 95% das instalações de CSP, existe uma tendência futura de fomento das torres solares, exatamente por nessa opção onde temperaturas mais elevadas são atingidas e conseqüentemente, maior eficiência na conversão de calor em eletricidade.

A Tab. 1 apresenta a temperatura de operação estável para diversos fluidos térmicos. Avaliando-se apenas o aspecto da temperatura máxima de operação estável, é notório que diversos fluidos de térmicos apresentam temperaturas bem

mais elevadas que a do (Therminol VP-1). No entanto, avaliar isoladamente a temperatura máxima de operação não assegura a viabilidade do sistema, uma vez que várias outras propriedades para um HTF devem ser levadas em consideração, tanto do ponto de vista técnico, quanto do ponto de vista econômico.

Conforme a Tab. 1, a mistura líquida de (Pb-Bi) se apresenta como a mais interessante para operação em altas temperaturas, no entanto, o alto custo do produto, em relação a outros fluidos, tornaria um possível projeto comercialmente inviável. Enquanto que, os sais halogenados apresentam baixo custo e pode operar em altas temperaturas, mas, seu alto ponto de fusão em relação a outros sais, o tornaria tecnicamente inviável.

Tabela 1 – Temperatura máxima de operação estável por fluido térmico

FLUIDO TÉRMICO	TEMPERATURA DE OPERAÇÃO ESTÁVEL
Óleo Térmico (Therminol VP-1)¹	393°C
Sal Solar : NaNO ₃ (60%) – KNO ₃ (40%) ¹	550°C
Ar ¹	700°C
Água ¹	< 400°C
Sais halogenados (NaCl e KCl) ²	>1000°C
NaNO ₃ (7%) – KNO ₃ (53%) – NaNO ₂ (40%) ¹	550°C
NaNO ₃ (7%) – KNO ₃ (45%) – Ca(NO ₃) ₂ (48%) ¹	500°C
NaNO ₃ (28%) – KNO ₃ (52%) – LiNO ₃ (20%) ¹	600°C
Li ₂ CO ₃ (32,1%) – Na ₂ CO ₃ (33,4%) – K ₂ CO ₃ (34,5%) ¹	800°C
KNO ₃ – LiNO ₃ – Ca(NO ₃) ₂ ¹	~ 500°C
NaNO ₃ (14,2%) – KNO ₃ (50,5%) – LiNO ₃ (17,5%) – NaNO ₂ (17,8%) ¹	430°C
NaNO ₃ (9-18%) – KNO ₃ (40-52%) – LiNO ₃ (13-21%) – Ca(NO ₃) ₂ (20-27%) ¹	> 500°C
NaNO ₃ (6%) – KNO ₃ (23%) – LiNO ₃ (8%) – CsNO ₃ (44%) – Ca(NO ₃) ₂ (19%) ¹	> 500°C
Sódio (Na) líquido ¹	883°C
Mistura líquida Na (22,2%) – K(77,8%) ¹	785°C
Mistura líquida Pb (44,5%) – Bi(55,5%) ¹	1533°C

Fonte: 1 – Vignarooban *et al.* (2015); 2 – Li *et al.* (2016)

2.1.2. Capacidade calorífica

Essa propriedade favorece o funcionamento do sistema tanto no que diz respeito ao HTF, como ao fluido utilizado no sistema de armazenamento térmico. Portanto, visando o aumento da eficiência do sistema como um todo, busca-se um fluido que apresente alta capacidade calorífica. A água, dentre os HTFs considerados na Tab. 2, se apresenta como o fluido de maior capacidade calorífica. Além disso, apresenta baixo custo, baixa viscosidade, entre outros parâmetros importantes. Porém, a sua baixa temperatura máxima de operação limita a eficiência global do sistema.

Tabela 2 – Capacidade calorífica por fluido térmico

FLUIDO TÉRMICO	CAPACIDADE CALORÍFICA
Óleo Térmico (Therminol VP-1)	N/A
Sal Solar : NaNO ₃ (60%) – KNO ₃ (40%) ¹	1,1 kJ/(kg.K) (600°C)
Ar ¹	1,12 kJ/(kg.K) (600°C)
Água ¹	2,42 kJ/(kg.K) (600°C)
NaNO ₃ (7%) – KNO ₃ (53%) – NaNO ₂ (40%) ¹	1,56 kJ/(kg.K) (300°C)
NaNO ₃ (7%) – KNO ₃ (45%) – Ca(NO ₃) ₂ (48%) ¹	1,45 kJ/(kg.K) (300°C)
NaCl – KCl– ZnCl ₂ ²	0,9 a 0,92 kJ/(kg.K)
NaNO ₃ – KNO ₃ – LiNO ₃ – NaNO ₂ ¹	Superior à do sal solar
Mistura líquida Na (22,2%) – K(77,8%) ¹	0,87 kJ/(kg.K) (600°C)
Mistura líquida Pb (44,5%) – Bi(55,5%) ¹	0,15 kJ/(kg.K) (600°C)

Fonte: 1 – Vignarooban *et al.* (2015); 2 – Li *et al.* (2016)

2.1.3. Condutividade térmica

Esta propriedade está diretamente relacionada à absorção de calor pelo HTF no interior dos tubos absorvedores, assim como a troca de calor com a água sob alta pressão dentro do trocador de calor. A Tab. 3 apresenta a condutividade térmica de alguns HTFs em suas temperaturas de operação.

Tabela 3 – Coeficiente de condutividade térmica por fluido térmico

FLUIDO TÉRMICO	CONDUTIVIDADE TÉRMICA
Óleo Térmico (Therminol VP-1)¹	~0,1 W/m.K
Sal Solar : NaNO ₃ (60%) – KNO ₃ (40%) ¹	0,55 W/m.K
Ar ¹	0,06 W/m.K
Água ¹	0,08 W/m.K
NaCl – KCl– ZnCl ₂ ²	0,28 a 0,38 W/m.K
NaNO ₃ – KNO ₃ – NaNO ₂ ¹	~0,2 W/m.K
NaNO ₃ – KNO ₃ – Ca(NO ₃) ₂ ¹	~ 0,52 W/m.K
KNO ₃ – LiNO ₃ – Ca(NO ₃) ₂ ¹	~ 0,43 W/m.K
Sódio (Na) líquido ¹	1,25 W/m.K
Mistura líquida Na (22,2%) – K(77,8%) ¹	26,2 W/m.K
Mistura líquida Pb (44,5%) – Bi(55,5%) ¹	12,8 W/m.K

Fonte: 1 – Vignarooban *et al.* (2015); 2 – Li *et al.* (2016)

2.1.4. Armazenamento térmico

Sendo a eletricidade o produto final da geração heliotérmica, uma baixa capacidade de despacho configura-se como um fator desestimulante para sua implementação. Uma das formas de melhorar esse despacho é através do armazenamento térmico. A capacidade de armazenamento depende do tipo de fluido utilizado e das dimensões do reservatório que poderá garantir o funcionamento da usina durante mais algumas horas após o índice de irradiância ter caído a um nível que não seja mais capaz de aquecer o HTF.

2.1.5. Outros aspectos

Além das propriedades físicas dos fluidos térmicos utilizados como HTFs, existem outros aspectos que afetam diretamente no aumento da eficiência de um sistema heliotérmico, dentre os quais estão:

- A escolha da localidade: Locais com altos níveis de irradiância direta implicam diretamente na temperatura que o HTF poderá atingir;
- Layout do sistema: Configuração do sistema óptico de concentração solar.
- Sistema de backup: Além de garantir a temperatura mínima de segurança para a não solidificação do sal, quando necessário, também pode ser usado como fonte térmica na geração propriamente dita, caso não haja irradiância solar em certos períodos sazonais.
- Ciclo termodinâmico: A escolha do ciclo termodinâmico implicará diretamente na eficiência do bloco de potência.

2.2 Propriedades físicas relacionadas à viabilidade técnico-econômica

Outros fatores importantes, não diretamente relacionados com a eficiência térmica, influem na viabilidade técnico-econômica do sistema como a temperatura de fusão, pressão de vapor, viscosidade massa específica, taxa de corrosão e evidentemente, a disponibilidade do insumo e do custo para aquisição do mesmo.

2.2.1. Temperatura de fusão e pressão de vapor

Em comparação com os óleos térmicos, os sais apresentam uma temperatura de fusão bem superior, como mostra a Tab. 4. Observa-se que o óleo (Therminol VP-1) apresenta uma temperatura de fusão menor que 15°C muito abaixo da temperatura de operação, cerca de 400°C. Quando aos sais, a temperatura de fusão situa-se entre 65 a 400°C. O sal solar com 223°C e 550°C de temperatura de fusão e operação respectivamente, apresenta uma certa preocupação com o congelamento.

A solidificação do sal comprometeria absolutamente os tubos absorvedores do campo solar, bem como nos tanques de armazenamento térmico. A preocupação com a solidificação do sal implica na necessidade de um sistema de backup, geralmente a gás, para garantir uma temperatura mínima de segurança contra a solidificação do fluido. Normalmente, a energia necessária para proteção contra congelamento é algumas dezenas de vezes maior para os sais fundidos do que para os óleos térmicos (Ruegamer *et al.*, 2013)

A alta pressão de vapor é uma das características indesejáveis para um HTF em sistemas heliotérmicos, e a depender de sua magnitude, o projeto pode se tornar inviável. Sob esse aspecto, os sais fundidos apresentam um comportamento muito interessante, devido a sua baixa pressão de vapor em altas temperaturas, quando se trata de sistemas cilindro parabólicos.

Tabela 4- Temperatura de fusão por fluido térmico

FLUIDO TÉRMICO	TEMPERATURA DE FUSÃO
Óleo Térmico (Therminol VP-1)¹	<15°C
Sal Solar : NaNO ₃ (60%) – KNO ₃ (40%) ¹	223°C
Ar ¹	-
Água ¹	0°C
NaCl (7,5%) – KCl (23,9%) – ZnCl ₂ (68,6%) ²	204°C
NaCl (10%) – KCl (15,1%) – ZnCl ₂ (74,9%) ²	213°C
NaCl (8,1%) – KCl (31,3%) – ZnCl ₂ (60,6%) ²	229°C
NaNO ₃ (7%) – KNO ₃ (53%) – NaNO ₂ (40%) ¹	142°C
NaNO ₃ (7%) – KNO ₃ (45%) – Ca(NO ₃) ₂ (48%) ¹	120°C
NaNO ₃ (28%) – KNO ₃ (52%) – LiNO ₃ (20%) ¹	130°C
Li ₂ CO ₃ (32,1%) – Na ₂ CO ₃ (33,4%) – K ₂ CO ₃ (34,5%) ¹	400°C
NaNO ₃ (14,2%) – KNO ₃ (50,5%) – LiNO ₃ (17,5%) – NaNO ₂ (17,8%) ¹	~ 99°C
NaNO ₃ (9-18%) – KNO ₃ (40-52%) – LiNO ₃ (13-21%) – Ca(NO ₃) ₂ (20-27%) ¹	< 100°C
KNO ₃ (67,2%) – LiNO ₃ (13,5%) – Ca(NO ₃) ₂ (19,3%) ¹	100°C
KNO ₃ (64,8%) – LiNO ₃ (10,4%) – Ca(NO ₃) ₂ (24,8%) ¹	78°C
KNO ₃ (63,7%) – LiNO ₃ (9,0%) – Ca(NO ₃) ₂ (27,3%) ¹	76°C
NaNO ₃ (6%) – KNO ₃ (23%) – LiNO ₃ (8%) – CsNO ₃ (44%) – Ca(NO ₃) ₂ (19%) ¹	~ 65°C
Sódio (Na) líquido ¹	98°C
Mistura líquida Na(22,2%) – K(77,8%) ¹	-12°C
Mistura líquida Pb(44,5%) – Bi(55,5%) ¹	125°C

Fonte: 1 – Vignarooban *et al.* (2015); 2 – Li *et al.* (2016)

2.2.2. Viscosidade

A viscosidade do HTF é um fator importantíssimo para a viabilidade técnica de um sistema heliotérmico, uma vez que afeta diretamente no fluxo mássico do sistema. Em geral, a viscosidade tende a diminuir com o aumento da temperatura do fluido e quanto menor a viscosidade, melhor as condições de transporte desse fluido. Entre os fluidos relacionados na Tab. 5, o Ar apresenta a menor viscosidade, cerca de 20 vezes menos que o óleo (Therminol VP-1) e aproximadamente 67 vezes menos que o Sal Solar. Em Israel, pesquisas estão sendo realizadas para a utilização do ar como HTF para sistemas de calhas parabólicas, pois sua utilização em torres solares já é conhecida.

Tabela 5 – Viscosidade por fluido térmico

FLUIDO TÉRMICO	VISCOSIDADE
Óleo Térmico (Therminol VP-1)¹	$0,6 \cdot 10^{-3}$ Pa.s (300°C)
Sal Solar : NaNO ₃ (60%) – KNO ₃ (40%) ¹	$2 \cdot 10^{-3}$ Pa.s (500°C)
Ar ¹	$0,03 \cdot 10^{-3}$ Pa.s (600°C)
Água ¹	$1,33 \cdot 10^{-3}$ Pa.s (600°C)
NaCl – KCl – ZnCl ₂ ²	$4 \text{ a } 5 \cdot 10^{-3}$ Pa.s (700°C)
NaNO ₃ – KNO ₃ – NaNO ₂ ¹	$3,2 \cdot 10^{-3}$ Pa.s (600°C)
NaNO ₃ – KNO ₃ – Ca(NO ₃) ₂ ¹	$\sim 10 \cdot 10^{-3}$ Pa.s (200°C)
NaNO ₃ – KNO ₃ – LiNO ₃ ¹	$30 \cdot 10^{-3}$ Pa.s (300°C)
Li ₂ CO ₃ – Na ₂ CO ₃ – K ₂ CO ₃ ¹	$\sim 4,3 \cdot 10^{-3}$ Pa.s (800°C)
KNO ₃ – LiNO ₃ – Ca(NO ₃) ₂ ¹	$\sim 4 \cdot 10^{-3}$ Pa.s (190°C)
NaNO ₃ – KNO ₃ – LiNO ₃ – Ca(NO ₃) ₂ ¹	$< 3 \cdot 10^{-3}$ Pa.s
Sódio (Na) líquido ¹	$0,2 \cdot 10^{-3}$ Pa.s (600°C)
Mistura líquida Na (22,2%) – K(77,8%) ¹	$0,2 \cdot 10^{-3}$ Pa.s (600°C)
Mistura líquida Pb (44,5%) – Bi(55,5%) ¹	$1,1 \cdot 10^{-3}$ Pa.s (600°C)

Fonte: 1 – Vignarooban *et al.* (2015); 2 – Li *et al.* (2016)

2.2.3. Massa específica

Outro aspecto relacionado as condições de transporte do fluido dentro dos tubos absorvedores de calor é a massa específica. Fluidos com baixa massa específica favorecem a viabilidade da operação do sistema. De acordo com a Tab. 6, verifica-se que o Óleo Térmico (Therminol VP-1), tem massa específica bem semelhante à da água. Diversos outros fluidos térmicos apresentados nas tabelas anteriores não constam na Tab. 6 por falta dos dados na literatura.

Tabela 6- Massa específica por fluido térmico

FLUIDO TÉRMICO	MASSA ESPECÍFICA
Óleo Térmico (Therminol VP-1)¹	997 – 1090 kg/m ³
Sal Solar: NaNO ₃ (60%) – KNO ₃ (40%)	N/A
Ar ¹	~1,2 kg/m ³
Água ¹	~ 1000 kg/m ³
NaCl – KCl – ZnCl ₂ ²	1900 – 2300 kg/m ³

Fonte: 1 – Vignarooban *et al.* (2015); 2 – Li *et al.* (2016)

2.2.4. Taxa de corrosão

Em um sistema heliotérmico em que o HTF seja um sal fundido, é essencial verificar qual a taxa de corrosão que o fluido apresenta para o tipo de material do tubo absorvedor que o transportará. A perfuração nos tubos e nas conexões, ou o acúmulo de substâncias no interior dos mesmos devido à formação de óxidos, configuram um indesejável problema técnico. Em geral, aços inoxidáveis e ligas de Níquel são os materiais mais utilizados na composição dos tubos (Gentil, 2011). Como consta na Tab. 7, os sais fundidos apresentam maiores poder de corrosão, bem superiores em relação aos HTFs convencionais, não seriam indicados tubos de transporte com baixo teor de carbono, uma vez que esses favorecem a oxidação em altas temperaturas.

Tabela 7- Taxa de corrosão por tipo de fluido e por material do tubo absorvedor

FLUIDO TÉRMICO	MATERIAL DO TUBO	TAXA DE CORROSÃO
Óleo Térmico (Therminol VP-1)¹	Aços inoxidáveis	N/A
NaNO ₃ (60%) – KNO ₃ (40%) ¹	Aços inoxidáveis	6 – 15 µm/ano (570°C)
NaNO ₃ (60%) – KNO ₃ (40%) ¹	Liga a base de carbono	5 µm/ano (315°C)
NaNO ₃ (60%) – KNO ₃ (40%) ¹	Liga a base de ferro	10,4 µm/ano (600°C)
NaNO ₃ (60%) – KNO ₃ (40%) ¹	Liga a base de ferro	447 µm/ano (680°C)
NaNO ₃ (60%) – KNO ₃ (40%) ¹	Liga a base de níquel	21,7 µm/ano (600°C)
NaNO ₃ (60%) – KNO ₃ (40%) ¹	Liga a base de níquel	594 µm/ano (680°C)
Ar ¹	Aços inoxidáveis	7 - 14 µm/ano (1100°C)
Água ¹	Aços inoxidáveis	1,7 – 3,5 µm/ano (300°C)
NaNO ₃ (7%) – KNO ₃ (53%) – NaNO ₂ (40%) ¹	Aços inoxidáveis	Não apresentou taxa em fluxo contínuo após 10 meses
NaNO ₃ (7%) – KNO ₃ (45%) – Ca(NO ₃) ₂ (48%) ¹	Aços inoxidáveis	6 – 10 µm/ano (570°C)

Fonte: 1 – Vignarooban *et al.* (2015); 2 – Li *et al.* (2016)

2.2.5. Custo do fluido térmico

O HTF, um dos componentes mais importantes para o desempenho geral de CSP, é utilizado em grande quantidade e o seu custo pode inviabilizar completamente o projeto do ponto de vista comercial. Na Tab. 8 consta informações sobre a disponibilidade e custo de fluidos térmicos utilizados em CPC. O Óleo sintético (Therminol VP-1) apresenta custo 6 vezes maior que o Sal Solar que por sua vez tem custo equiparado a outros sais fundidos. Importante frisar, que os compostos que envolvem o sal Nitrato de Lítio (LiNO₃) terá uma elevação significativa de seus custos, à medida que aumenta a concentração deste sal, que isoladamente custa em média 4,30 \$/kg.

Tabela 8- Custo do fluido térmico por quilograma

FLUIDO TÉRMICO	CUSTO (\$/kg)
Óleo Térmico (Therminol VP-1)¹	3,0
Sal Solar (NaNO ₃ – KNO ₃) ¹	0,5 (Produção restrita)
Ar ¹	0
Água ¹	~ 0
Óleo mineral ¹	0,3
NaNO ₃ – KNO ₃ – LiNO ₃ ¹	~ 1,1
KNO ₃ – LiNO ₃ – Ca(NO ₃) ₂ ¹	0,6 – 0,8
NaNO ₃ – KNO ₃ – LiNO ₃ – NaNO ₂	N/A
NaNO ₃ – KNO ₃ – LiNO ₃ – Ca(NO ₃) ₂ ¹	0,62 – 0,81
NaNO ₃ – KNO ₃ – LiNO ₃ – CsNO ₃ – Ca(NO ₃) ₂ ¹	N/A
Sódio (Na) líquido ¹	2,0
Mistura líquida Na(22,2%) – K(77,8%) ¹	2,0
Mistura líquida Pb (44,5%) – Bi(55,5%) ¹	13,0

Fonte: 1 – Vignarooban *et al.* (2015); 2 – Li *et al.* (2016)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dentre todos os aspectos que influenciam no desempenho do sistema, o tipo de HTF utilizado configura-se como sendo o fator mais significativo.

- A elevada temperatura de operação que, os sais fundidos alcançam, em geral vem acompanhada de uma elevada temperatura de fusão, fator bastante preocupante pelo comprometimento que todo o sistema poderá sofrer, caso o sal se solidifique nos tubos absorvedores ou nos tanques de armazenamento. É muito difícil encontrar um sal que apresente baixo ponto de fusão e elevado ponto de ebulição;
- Misturas de sais que formem sistemas eutéticos devem apresentar em suas composições sais halogenados iônicos, que elevarão a temperatura de ebulição e sais halogenados covalentes que contribuirão para o abaixamento do ponto de fusão, dessa forma ampliando a faixa de temperatura em que a mistura possa operar e se manter quimicamente estável;
- Temperaturas de operação mais elevadas do HTF também implicam em maiores perdas térmicas, mas, o ganho na eficiência global só poderá ser evidenciado no balanço energético total.
- A taxa de corrosão em determinados tipos de liga metálica em contato com o sal fundido, pode variar algumas dezenas de vezes a depender da temperatura de operação do fluido, mesmo quando essa variação de temperatura seja apenas de algumas dezenas de graus Celsius.
- Nem sempre as propriedades físicas de faixa de temperatura de operação, de condução de calor e de transporte fluídico podem ser os únicos critérios para a tomada de decisão para o HTF a ser utilizado no sistema. Os metais líquidos, por exemplo, apresentaram características bastantes favoráveis nesses aspectos, porém, alguns apresentam alta combustibilidade e alto custo quando comparados com outros fluidos já utilizados comercialmente.
- A viabilidade técnico-econômica da utilização de sais fundidos como fluidos térmicos deve considerar todos os fatores abordados.

REFERÊNCIAS

- Boukelia, T.E., Arslan, O., Mecibah, M.S., 2017. Potential assessment of a parabolic trough solar thermal power plant considering hourly analysis: ANN-based approach, *Renewable Energy*.
- DLR Institute of Solar Research, 2016. Molten salt instead of thermal oil in solar thermal parabolic trough plants shall reduce the levelized electricity costs.
- GENTIL, V., 2011. *Corrosão*, LTC, 6ª ed. Rio de Janeiro.
- GIZ, 2014. *Parabolic Trough CSP Technology – State of the art and market overview*. Projeto Energia Heliotérmica. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Brasília – DF, Brasil.
- Li, P., Molina, E., Wang, K., Xu, X., Dehgham, G., Kohli, A., Horo, Q., Kassaei, M. H., Jeter, S. M., Teja, A. S., 2016. Thermal and Transport Properties of NaCl – KCl – ZnCl₂ Eutectic Salts for New Generation High-Temperature Heat-Transfer Fluid. *Journal of Solar Energy Engineering*.
- Ruegamer, T., Kamp, H., Kuckelkorn, T., Schiel, W., Weinreb, G., Nava, P., Riffelmann, K., Richert, T., 2013. Molten salt for parabolic trough applications: system simulation and scale effects. *SolarPACES*.
- Vignarooban, K., Xinhai Xu, Arvay, A., Hsu, K., Kannan, A. M., 2015. Heat transfer fluids for concentrating solar power systems – A review. Elsevier, *Applied Energy*.

USE OF MOLTEN SALTS IN THE HELIOTHERMAL SOLAR GENERATION

Abstract. *Most commercial concentrated solar power (CSP) installed in the world use parabolic troughs as a concentrator element, thermal oils as heat transfer fluids (HTF) and have no thermal storage system. The thermal efficiency of these systems is limited by the maximum operating temperature, which is generally below 400 ° C when using thermal oils. The molten salts are widely used in CSP, however, as heat storage fluid because of their high heat capacity. Currently, several studies have been carried out aiming at the use of molten salts also as heat transfer fluid. The favorable conditions for its use as HTF, among them, the melting and boiling temperatures, viscosity, thermal conductivity and heat capacity are obtained by modifying the concentration of its components. In the evaluation of the application of these salts, replacing the conventional fluids, other conditions, such as corrosivity, flammability and cost, among others, need to be well evaluated. The best technical option is not always commercially viable. This work presents a compilation of data of the main properties and characteristics of different conventional fluids and of molten salts and a comparative conceptual evaluation between some fused salts, which can be used as HTF in a heliotérmica plant of parabolic troughs.*

Keywords: *Concentrated Solar Power, Heliothermic Systems, Molten Salts.*

Esse trabalho vem sendo realizado dentro de projeto de P&D geração heliotérmica com concentradores solares do tipo calhas parabólicas