

**Nº 176812**

**Tira dúvidas sobre a Linha IV do Rota 2030.**

**Ana Paola Villalva Braga**

*Palestra apresentada no WORKSHOP AÇÕES DO IPT NA LINHA IV DOPROGRAMA  
ROTA2030: FERRAMENTAS BRASILEIRAS MAIS COMPETITIVAS. **Palestra on line....***

A série “Comunicação Técnica” compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública.

# ENGENHARIA NO SÉCULO XXI

VOLUME 15



Editora Poisson

Editora Poisson

# Engenharia no Século XXI

## Volume 15

1ª Edição

Belo Horizonte  
Poisson  
2020

**Editor Chefe:** Dr. Darly Fernando Andrade

**Conselho Editorial**

Dr. Antônio Artur de Souza – Universidade Federal de Minas Gerais

Msc. Davilson Eduardo Andrade

Dra. Elizângela de Jesus Oliveira – Universidade Federal do Amazonas

Msc. Fabiane dos Santos

Dr. José Eduardo Ferreira Lopes – Universidade Federal de Uberlândia

Dr. Otaviano Francisco Neves – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Dr. Luiz Cláudio de Lima – Universidade FUMEC

Dr. Nelson Ferreira Filho – Faculdades Kennedy

Msc. Valdiney Alves de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

**E57**

**Engenharia no Século XXI - Volume 15/  
Organização Editora Poisson - Belo  
Horizonte - MG: Poisson, 2020**

**Formato: PDF**

**ISBN: 978-65-86127-18-8**

**DOI: 10.36229/ 978-65-86127-18-8**

**Modo de acesso: World Wide Web**

**Inclui bibliografia**

**1. Engenharia 2. Educação.I. Título.**

**CDD-620**

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

[www.poisson.com.br](http://www.poisson.com.br)

[contato@poisson.com.br](mailto:contato@poisson.com.br)

# SUMÁRIO

**Capítulo 1:** Erros e obstáculos no processo de aprendizagem de aplicações de derivadas parciais sob o olhar do estudante de Engenharia Civil do IFBA/Eunápolis..... 07

Celso Eduardo Brito, Eric Oliveira Santos

**DOI:** 10.36229/978-65-86127-18-8.CAP.01

**Capítulo 2:** Análise Léxica de conteúdos sobre resíduos industriais galvânicos..... 16

Sheilla da Silva Melo Figueirêdo, Cícera Camila Alves Macedo, Jair Paulino de Sales, Paulo Renato Alves Firmino, Francisco Jose de Paula Filho

**DOI:** 10.36229/978-65-86127-18-8.CAP.02

**Capítulo 3:** Diagnóstico e caracterização de resíduos de madeiras obtidos em madeiras da cidade de Manaus ..... 23

Asthon César Nunes de Oliveira Filho, Jéssica de Souza Fortes, Valdete Santos de Araújo, Carla Souza Calheiros, Raimundo Pereira de Vasconcelos

**DOI:** 10.36229/978-65-86127-18-8.CAP.03

**Capítulo 4:** Estudo sobre usina de reciclagem de resíduos da construção civil e demolição no Estado da Paraíba ..... 28

Ana Letícia Nóbrega Rabello Tavares, Cinthia Maria de Abreu Claudino, Maria Ingridy Lacerda Diniz, Thiago da Sá Sena

**DOI:** 10.36229/978-65-86127-18-8.CAP.04

**Capítulo 5:** Indústria 4.0: Aplicação experimental em motor de indução monofásico ..... 34

José William Ribeiro Borges, Antonio Roniel Marques de Sousa, Elen Priscila de Souza Lobato, Jefferson Alan da Silva Lima, Wellington da Silva Fonseca

**DOI:** 10.36229/978-65-86127-18-8.CAP.05

**Capítulo 6:** Confeção e análise de blocos de argamassa translúcida ..... 40

Fernanda dos Santos Gentil, Claudia Claumann da Silva

**DOI:** 10.36229/978-65-86127-18-8.CAP.06

**Capítulo 7:** Produção de partículas submicrométricas de PMMA por atomização de solução polimérica em meio líquido circulante (Nanoprecipitação Modificada) ..... 45

André Anderson Costa Pereira, Anderson Alles de Jesus, Ênio Rafael de Medeiros Santos, Elisa Maria Bittencourt Dutra de Sousa, Jackson Araujo de Oliveira, Thelma Sley Pacheco Cellet, Vanessa Hafemann Fragal, Vitor Fernandes Dias Lopes

**DOI:** 10.36229/978-65-86127-18-8.CAP.07

# SUMÁRIO

**Capítulo 8:** Diagnóstico do sistema de macrodrenagem do Município de Gurupi – TO: O estado de conservação dos seus corpos hídricos..... 51

Pedro Felipe Alves de Oliveira, Ana Flávia Rocha Monteiro, Alesi Teixeira Mendes

**DOI:** 10.36229/978-65-86127-18-8.CAP.08

**Capítulo 9:** Estudo da conformidade dos parâmetros adotados na escolha do tipo de fundação das obras de Uruaçu - GO ..... 61

Poliana Braz de Oliveira, Jéssica Azevedo Coelho

**DOI:** 10.36229/978-65-86127-18-8.CAP.09

**Capítulo 10:** Avaliação da caminhabilidade no entorno de escolas: Estudo de caso na Região Metropolitana de Ribeirão Preto – SP ..... 78

Thays Ribeiro Fávaro Miessa Rodrigues, Luiz Henrique Souza da Rocha, Marcelo Augusto Amancio, Fernando Brant da Silva Carvalho

**DOI:** 10.36229/978-65-86127-18-8.CAP.10

**Capítulo 11:** Estudo da imobilização da enzima tirosinase em carvão ativado granular para futura utilização na remoção de fenol de efluentes..... 86

Ana Carina Cruz de Mello, Andréa Medeiros Salgado, Fabiana Valéria da Fonseca

**DOI:** 10.36229/978-65-86127-18-8.CAP.11

**Capítulo 12:** Abordagem sistêmica e comparativa de fluidos térmicos orgânicos de base parafínica e parafínica hidrogenada ..... 90

Maurino Gomes Costa, Catia Fredericci

**DOI:** 10.36229/978-65-86127-18-8.CAP.12

**Capítulo 13:** Análise da influência do combustível na obtenção de HAp via reação de combustão..... 107

Thaíla Gomes Moreira, Thalita Lorene dos Santos, Amanda Melissa Damião Leite, Kaline Melo de Souto Viana

**DOI:** 10.36229/978-65-86127-18-8.CAP.13

**Capítulo 14:** Influência do líquido de castanha de caju (*Anacardium occidentale* L.) no fenômeno da precipitação de parafina em petróleo pesado ..... 113

Carlos Wagner Lobo Siqueira, Denes Carlos Santos da Graça, Rosiane dos Santos, Tarcisio Soares Siqueira Dantas, Gisélia Cardoso

**DOI:** 10.36229/978-65-86127-18-8.CAP.14

# SUMÁRIO

<b>Capítulo 15:</b> Índice de PMV e PPD para análise de conforto térmico de residência no Semiárido Paraibano .....	119
Paula Isabella de Oliveira Rocha, Vicente de Paula Teixeira Rocha, Vera Solange de Oliveira Farias, Emmanuel Eduardo Vitorino de Farias	
<b>DOI:</b> 10.36229/978-65-86127-18-8.CAP.15	
<b>Capítulo 16:</b> Aquecedor solar em casas populares: Economia ou desperdício de água? .....	125
Gizele Poltronieri do Nascimento, Paulo Henrique Fernandes Zanandrea, Afonso Celso de Souza Oliveira	
<b>DOI:</b> 10.36229/978-65-86127-18-8.CAP.16	
<b>Capítulo 17:</b> Sistema fotovoltaico no aeroporto internacional de Manaus: Análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental de implantação usando simulação computacional.....	130
Carlos Gomes Fontinelle, Jandecy Cabral Leite, Carlos Magno Cassio de Assis	
<b>DOI:</b> 10.36229/978-65-86127-18-8.CAP.17	
<b>Capítulo 18:</b> Validação de dados de onda de reanálise do Era-Interim para estimativa do potencial energético das ondas .....	143
Rafael Luz Espindola, Alex Maurício Araújo	
<b>DOI:</b> 10.36229/978-65-86127-18-8.CAP.18	
<b>Capítulo 19:</b> Análise do desempenho térmico e elétrico de um módulo fotovoltaico acoplado a um coletor solar plano .....	154
Othon Lucas Procópio, André Guimarães Ferreira, Ivan Magela Corgozinho, Lucas Paglioni Pataro Faria, Elizabeth Marques Duarte Pereira, Rafael Máximo Martins, Rodrigo Andrade da Silveira, Luís Guilherme Monteiro Oliveira, Santiagu Lucas Procópio, Alessandra Chagas Daniel	
<b>DOI:</b> 10.36229/978-65-86127-18-8.CAP.19	
<b>Capítulo 20:</b> Ensino técnico em sistemas de energias renováveis no Semiárido Brasileiro .....	164
Manuel Rangel Borges Neto, Ricardo Maia Costa, Francisco Jonatas Siqueira Coelho, Poliana Silva, Luiz Carlos Nascimento Lopes	
<b>DOI:</b> 10.36229/978-65-86127-18-8.CAP.20	
<b>Autores:</b> .....	171

# Capítulo 12

## *Abordagem sistêmica e comparativa de fluidos térmicos orgânicos de base parafínica e parafínica hidrogenada*

*Maurino Gomes Costa*

*Catia Fredericci*

**Resumo:** Os sistemas de fluido térmico orgânico representam para as plantas industriais, investimentos significativos de capital, altos custos de reposição e são essenciais para a capacidade de fabricação de muitos produtos. Por serem aplicados em sistemas térmicos, que trabalham em temperaturas elevadas (aproximadamente 300 °C), os riscos de incêndio e de descontinuidade operacional são muito comuns. Esse trabalho consistiu numa primeira etapa, na identificação e quantificação dos segmentos que utilizam Fluido Térmico Orgânico (FTO) e quais são os mais utilizados em plantas térmicas. Os resultados mostraram que há cerca de 3.370 plantas industriais instaladas no Brasil que utilizam o FTO preponderantemente no estado líquido, sendo a segunda alternativa no estado vapor. Todas trabalham com a finalidade de transportar calor em baixas pressões e em temperaturas elevadas. Com relação ao tipo de fluido, os de base mineral parafínica e base parafínica hidrogenada foram os mais citados, sendo utilizados em aproximadamente 82 % das aplicações, devido a boa relação entre a confiabilidade operacional oferecida e o atrativo custo de aquisição. No entanto, os fluidos térmicos orgânicos em temperaturas elevadas podem apresentar degradações térmicas e oxidação, levando a sérios riscos de segurança e descontinuidade de processo. Na segunda etapa desse trabalho foram escolhidos três dos fluidos mais utilizados em sistemas térmicos, dos quais dois são de base parafínica (A e B) e um de base parafínica hidrogenada (PH).

Como as informações de catálogos das propriedades dos fluidos antes de sua operação (fluido novo) não cobrem várias propriedades importantes, para mapeamento de riscos, esse trabalho teve como objetivo avaliar propriedades físico-químicas dos fluidos como densidade e viscosidade na faixa de temperatura de 15 °C a 320 °C, residual de carbono, ponto de fulgor, insolúveis, estabilidade térmica, teor de umidade, índice de acidez e análise química de 19 elementos, por espectroscopia de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente. Análises de espectroscopia no infravermelho foram realizadas para identificar e confirmar a base do fluido térmico, e detectar possível degradação desse. Também foram calculadas e avaliadas algumas propriedades termodinâmicas como condutividade térmica, calor específico, entalpia específica, e número de Prandtl no intervalo de 15 °C a 320 °C. O objetivo foi verificar a possibilidade de estabelecer uma abordagem sistêmica e comparativa que permita considerar as propriedades específicas do meio de transferência de calor, o FTO novo (antes de sua aplicação), para garantir uma operação mais segura em plantas térmicas que o utilizem em fase líquida, considerando a capacidade de recalcar o fluido ou bombeamento, a segurança no uso, a eficiência e a continuidade operacional. Após as análises dos três fluidos minerais, (A e B - parafínicos e PH - parafínico hidrogenado), obteve-se como melhor possibilidade de escolha o fluido PH, em função de: (a) maior estabilidade térmica, (b) menor taxa de reposição no sistema (c) maior segurança operacional da unidade industrial quanto às consequências de sua degradação e potenciais riscos de incêndio e explosão, (d) menor probabilidade de falha ou perdas junto à produção, e (e) maior retorno sobre a estrutura de investimento (custo total do fluido x expectativa de vida útil).

**Palavras-chave:** fluido térmico orgânico, degradação térmica, propriedades, parafínico, mineral.

## 1. INTRODUÇÃO

O surgimento da aplicação dos fluidos térmicos orgânicos (FTO's) para transferência de calor está diretamente relacionado ao processo de industrialização e ao desenvolvimento de novas tecnologias de produção nas sociedades modernas a partir da Revolução Industrial. Durante a Segunda Guerra Mundial, a demanda significativa por novos materiais e por produtos químicos, tanto em diversidade quanto em escala, impulsionou o desenvolvimento da indústria química (KIRK-OTHMER, 1992; KLETZ, 2010; WAGNER, 1997).

De acordo com a Exxon Mobil Corporation (2019) há uma classificação denominada API (*American Petroleum Institute*) para os óleos básicos. Esta classificação visa padronizar as especificações de óleos básicos, para todas as refinarias existentes no mundo. Foram adotados três parâmetros como referência: teor de enxofre, teor de saturados e o índice de viscosidade (I.V. ou VI – do inglês *viscosity index*), como apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Classificação API dos óleos básicos

Grupo	Especificações Físicas			Processos de Produção
	VI	Enxofre (%) peso	Saturado (%) peso	
I	80 – 120	> 0,03	< 90	Convencional (refino por solvente)
II	80 - 120	≤ 0,03	≥ 90	Hidrocraqueamento/desparafirização
III	≥ 120	≤ 0,03	≥ 90	Hidrocraqueamento/desparafirização
IV	140 typ	0,00 typ	> 90 typ	PAO (polialfaolefina) de síntese química
V				Todos os outros tipos: ésteres, poliglicol, ésteres-fosfatos, etc.

O mercado mundial de fluidos de transferência de calor deverá atingir US\$ 2,87 bilhões até 2021, a uma taxa de crescimento de 8,2 % no período de previsão (entre 2016 e 2021), dados mencionados em “Global Heat Transfer Fluid Market”. Em 2017 havia previsão de movimentação de US\$ 2.557,2 milhões, (WRIGHT et al., 2015).

Os setores químico e petroquímico, devido à sua natureza competitiva, associada ao crescimento da economia em escala mundial e ao rápido avanço tecnológico, incrementaram o aumento das plantas industriais e a complexidade dos processos produtivos (KLETZ e AMYOTTE, 2010). Tal demanda gerou a necessidade de surgimento de fluidos térmicos que ampliassem as limitações físicas definidas do uso da água em suas fases, como o ponto de congelamento a 0 °C e temperatura crítica  $T_c$  de 374,1 °C, pressão de vapor relativamente elevada e pressão crítica  $P_c$  de 221,2 bar. Com a ampliação da necessidade de temperatura de trabalho acima de 100 °C, devido à pressão de saturação da água, houve a necessidade da utilização de equipamentos com maior exigência estrutural e de custos mais elevados. O custo de equipamentos de processos térmicos está diretamente relacionado com a sua pressão de projeto. Por exemplo, para o caso de temperaturas de processo acima de 180 °C faz-se necessária a análise de utilização e aplicação de fluidos térmicos específicos.

A pressão de trabalho do fluido, para atender a temperatura e solicitações de processo, é condição primária a ser considerada, seguida da própria seleção do fluido térmico, que pode se tornar uma tarefa complexa, devido às considerações econômicas e técnicas inter-relacionadas. Uma incompatibilidade entre o fluido e o processo pode resultar em ineficiência operacional, redução da efetividade térmica, perdas de produção, danos ao sistema térmico em caso de FTO, necessidades de reposição gerando excessivo custo do fluido, em função de sua rápida degradação, e aumento da probabilidade de incêndios e explosões.

As desvantagens de aplicação do FTO residem na possibilidade de oxidação, combustão e em sua degradação térmica, devido a sua base ser oriunda de hidrocarbonetos. Todo fluido térmico pode sofrer degradação química com o tempo. De fato, em operação com temperaturas elevadas (> 180 °C), as ligações entre as cadeias de hidrocarbonetos podem se romper e formar outros hidrocarbonetos de cadeias curtas e longas. Ambos têm consequências para a segurança do sistema de FTO. O acúmulo de componentes leves é um risco potencial para ocorrência de incêndios, pois diminui a temperatura de ignição do FTO.

O acúmulo de produtos pesados (cadeias longas) pode resultar na formação de depósitos de carvão viscosos, denominados lamas. Da mesma forma, a oxidação também leva à formação de resíduos de carbono, que se depositam nas superfícies internas da tubulação do sistema que utiliza o FTO. Essa lama torna o sistema menos eficiente, i.e., taxas de transferência de calor são reduzidas, resultando em maiores tempo de aquecimento e menores taxas de produção. Além disso, os depósitos de carbono incrustantes propiciam locais de superaquecimento que podem causar destruição da tubulação aquecedora e nos aquecimentos elétricos, sendo outra fonte de ocorrência de incêndio (WRIGTH et al., 2015). Em uma importante discussão no artigo de Wright et al. (2015), os autores fazem uma reflexão de quais análises são fundamentais para evitar danos aos FTOs e consequentes riscos aos sistemas que os aplicam.

De um modo geral os catálogos dos fabricantes de fluidos térmicos orgânicos reportam propriedades como ponto de fulgor, viscosidade (até 100 °C), densidade (geralmente em temperatura de no máximo 40 °C), índice de acidez (mgKOH/g) e carbono residual. No entanto, o uso de fluido térmico em plantas industriais são empregados na faixa de 0 °C a 400 °C. Seria interessante informações como degradação, frações de leves e pesados, viscosidade, densidade, ponto de fluidez, ponto de fulgor numa faixa mais ampla de temperatura, visto que na maioria dos processos industriais as temperaturas são superiores a 180 °C.

Em vários trabalhos publicados na literatura (WRIGTH et al., 2015; VIGNAROOBAN, et al., 2015; WRIGTH, PICOT, BEMBRIDGE, 2015) são reportados que esses ensaios são realizados durante a utilização do FTO na planta e são retiradas amostras para a análise. Os fabricantes de FTO recomendam geralmente que um FTO seja analisado uma vez por ano (WRIGTH et al., 2015). No entanto, a partir de nosso conhecimento não há trabalhos que abordem ensaios referentes às propriedades acima citadas, em ampla faixa de temperatura, a serem realizados a partir de fluidos novos que possam indicar que o fluido apresente características adequadas para determinadas aplicações, antes mesmo de ser aplicado ao sistema. Esses ensaios e suas análises poderiam indicar as melhores opções para a implantação de um novo sistema de aquecimento de fluido térmico, evitando custos com reposição e com problemas relacionados a incêndios. Portanto, a motivação e justificativa deste trabalho é a avaliação de alguns fluidos térmicos orgânicos novos (antes de sua aplicação) em ampla faixa de temperatura (15 °C a 320 °C), no sentido de prever futuros problemas nas plantas industriais.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. ANÁLISE DO MERCADO BRASILEIRO PARA FTO E SUAS OPÇÕES

Tem-se como premissa que a aplicação do fluido térmico orgânico (FTO) é criticamente essencial para a capacidade de fabricação de muitos negócios. Nesta etapa, o objetivo foi identificar os setores da indústria brasileira que o utilizam como vetor de transferência de energia em suas etapas produtivas, quantidade de empresas onde é aplicado e a base de fluido térmico orgânico mais utilizada.

A sequência de análise foi desenvolvida da seguinte forma:

- a) Elaboração de uma lista de clientes da empresa OCP Engenharia com atuação na área de FTO;
- b) Identificação dos principais setores da indústria como potenciais usuários de fluidos. Foram elencados 40 segmentos industriais, utilizando a segmentação adotada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE;
- c) Entrevistas com fornecedores de aquecedores de fluido térmico, bombas centrífugas e válvulas industriais específicas dessa aplicação (principais equipamentos que orientam estas instalações), os quais subsidiaram a priorização dos setores mais relevantes e com potencial de mercado;
- d) Elaboração de questionário enviado aos clientes;
- e) Emprego de análise conforme o princípio de Pareto, identificando a quantidade de segmentos industriais com maior número de instalações no mercado brasileiro e/ou volume instalado;
- f) Análise dos dados coletados e consolidação das informações obtidas;

g) Contatos com no mínimo 06 empresas, dos setores identificados e priorizados, para o aprimoramento do entendimento das necessidades do processo, característica de instalação do sistema de fluido térmico, equipamentos de consumo térmico e condições de operação quanto à temperatura, pressão, sistema de expansão, fluido térmico orgânico, vazão e volume da instalação, identificação de necessidade e itens valorizados pelos segmentos priorizados.

## 2.2. DEFINIÇÃO DO FLUIDO TÉRMICO ORGÂNICO A SER UTILIZADO NESTA PESQUISA

Os fluidos térmicos orgânicos eleitos foram escolhidos com base nas respostas e análises do item 2.1, que convergiu para aqueles de maior aplicação no mercado brasileiro, os de base mineral e sua opção mineral hidrogenada. Os mesmos são utilizados em processos com temperatura máxima de 300 °C. Foram escolhidos três fluidos, apresentados na Tabela 1, disponibilizados por três dos principais fornecedores atuantes no mercado brasileiro e, desta forma, o nome dos fluidos, marcas e seus fornecedores foram preservados por motivos sigilosos, sendo utilizados os nomes fictícios informados na Tabela 2.

Tabela 2- Fluidos térmicos orgânicos analisados

Item	Composição do Fluido	Fluido	Base predominante	Tratamento Adicional	Fornecedores
1	Parafínico Hidrogenado - PH	Mineral	Parafínica	Hidrogenação	X
2	Parafínico A	Mineral	Parafínica	-	Y
3	Parafínico B	Mineral	Parafínica	-	Z

## 2.3. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS ANALISADAS

Para se atingir o objetivo geral, relacionado com a condição operacional do sistema nos aspectos de influência quanto à capacidade de recalcar o fluido ou bombeamento, segurança no uso, eficiência e continuidade operacional foram realizadas as análises descritas na Tabela 3. Cada amostra de fluido foi analisada no mínimo três vezes e serão apresentados os valores médios.

Como não foram encontrados laboratórios no Brasil dedicados às análises de algumas propriedades termodinâmicas e físico-químicas no intervalo de temperatura de 15 °C a 320 °C, algumas delas foram calculadas, como: (a) condutividade térmica, (b) calor específico, (c) viscosidade dinâmica, (d) entalpia específica, (e) expansão volumétrica, e (f) n° de Prandtl. As informações de como os cálculos foram efetuados encontram-se no trabalho de COSTA (2018).

Para melhor compreensão e posterior apresentação dos resultados, inicialmente foi efetuada a comparação das propriedades dos três fluidos. Foram construídas curvas de densidade x temperatura, viscosidade x temperatura, calor específico x temperatura e condutividade x temperatura na faixa de temperatura de 15 °C a 320 °C, que são dados mais próximos à realidade das instalações e são dados inéditos com relação aos três fluidos estudados.

Tabela 3 – Análises realizadas nos FTOs e as áreas de atuação onde são necessárias

Item	Procedimento Recomendado	Norma	Áreas de Atuação			
			Bombeamento	Segurança no Uso	Eficiência	Continuidade Operacional
01	Ponto de Fulgor – Vaso Fechado	ASTM D93 ou ASTM D 3828	X	X		X
02	Ponto de Fulgor – Vaso Aberto	ASTM D92	X	X		X
03	Viscosidade Cinemática	ASTM D445	X			X
04	Densidade	ASTM D4052	X			
05	Residual de Água	ASTM D95	X			
06	Estabilidade Térmica	ASTM D6743 DIN 51528				X
07	Insolúveis de Pentano	ASTM D893 ASTM-D4055				X
08	Resíduo de Carbono	ASTM D189				X
09	Índice de Acidez	ASTM D664				X
10	Cor	ASTM D1500				X
11	Espectroscopia de Emissão Óptica para 19 elementos	ASTM D6595				X
12	Condutividade Térmica(*)	ASTM D2717		X		
13	Calor Específico(*)	ASTM D2766		X		

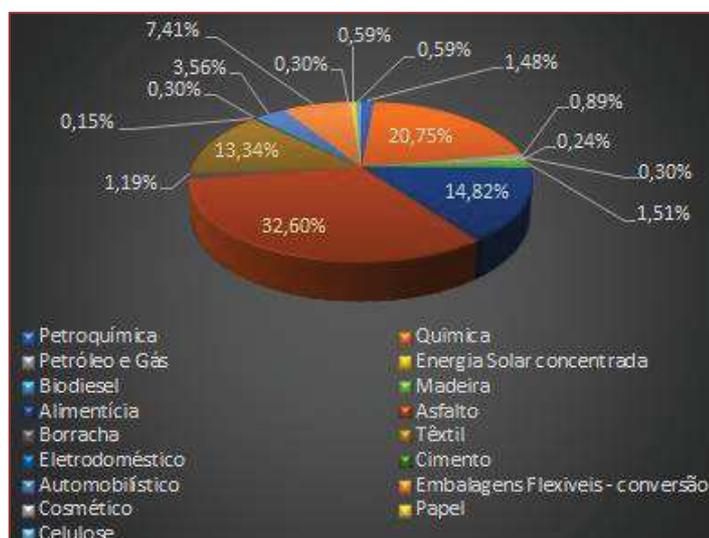
(\*) Valores calculados

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. ANÁLISES DO MERCADO BRASILEIRO PARA FTO E DEFINIÇÃO DO FLUIDO TÉRMICO ORGÂNICO A SER UTILIZADO NESTA PESQUISA

A partir da pesquisa realizada chegou-se a um número superior a 3.370 empresas que utilizam o FTO como meio de transferência de calor indireto, com a maior concentração dessas empresas observada na região sudeste e sul. A demanda por FTO conduz para múltiplas aplicações em distintos segmentos industriais que se concentram em seis principais sendo 32,60 % do segmento de asfalto, 20,75 % de química, 14,82 % de alimentos, 13,34 % de têxtil, 7,41 % de embalagens e 3,56 % da indústria automobilística, como mostra a Figura 1.

Figura 1. Percentual de Instalações de FTO por Segmentos Industriais no Brasil



Esta ampla diversidade de segmentos industriais mostrou-se condicionada em quantidade significativa ao uso de fluido térmico orgânico de base mineral parafínica com temperatura de operação de aproximadamente 280 °C a 320 °C, faixa orientada pelos fabricantes para sua aplicação. Durante a pesquisa também foi possível constatar o interesse de algumas empresas em utilizar fluido térmico sintético, uma vez que é reportado que estes teriam uma taxa de transferência de calor ( $W/m^2$ ), na faixa de trabalho de 250 °C a 275 °C superior ao fluido mineral. No entanto, em alguns casos estudados, não foi comprovada nas plantas térmicas que a durabilidade do fluido sintético e sua relação custo/benefício é maior que a do mineral hidrogenado nesta faixa operacional. Mas deve-se avaliar também a perspectiva do uso deste fluido no momento em que as plantas industriais estão em seu limite operacional, seja de geração de calor ou distribuição hidráulica. De forma geral é orientada uma discussão deste conteúdo durante a fase de projeto envolvendo tantos os fabricantes dos equipamentos quanto os fabricantes das plantas térmicas. Na pesquisa também foi constatado que em diversas plantas são utilizados fluidos de base parafínica ou naftênica, porém hidrogenados, com ampla aplicação no segmento alimentício. Este fluido apresenta custo superior ao mineral, mas não é significativo, quando comparado com o do fluido sintético. Desta forma, como a maioria das respostas indicaram a aplicação de fluidos térmicos orgânicos de base mineral e parafínica e parafínica hidrogenada, os fluidos escolhidos para este trabalho foram dois de base parafínica (fornecedores Y e Z) e um parafínico hidrogenado (fornecedor X).

### 3.2. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS ANALISADAS

Foram analisadas as propriedades físico-químicas dos três fluidos escolhidos sendo elas: densidade, ponto de fulgor, viscosidade, índice de acidez, residual de carbono, conteúdo de umidade, temperatura de autoignição, temperatura máxima de filme, temperatura máxima de operação, solúveis de pentano e análise química de 19 elementos químicos. Os resultados são apresentados na Tabela 4 para os três fluidos.

O fluido A (parafínico) apresenta-se, quando sem uso, com aparência brilhante e clara com coloração amarelada e odor característico. Observou-se que há divulgação limitada de conteúdo por parte do fabricante do fluido. Pode-se observar, também, uma diferença de 16 °C em relação ao ponto de fulgor vaso aberto determinado (216 °C) em relação ao especificado (200 °C) e de 30 °C no ponto de fulgor vaso fechado, como mostra a Tabela 4. Essa diferença está no intervalo de aproximadamente 7 % a 14 %, que se encontra dentro de tolerâncias exigidas nos projetos de engenharia das plantas industriais, sendo aceitáveis diferenças em torno de 10 % segundo a experiência do autor. A densidade reportada é de  $867,5 \text{ kg/m}^3$  a 20 °C.

Os valores medidos de índice de acidez e residual de carbono são inferiores aos reportados nos catálogos do fabricante, o que implica em resultado melhor do que o esperado. Esses dados são típicos de fluidos térmicos orgânicos de base mineral (WRIGHT, 2014).

Os valores de viscosidade cinemática a 40 °C (média de  $31 \text{ mm}^2/\text{s}$  entre medido e catalogado) está dentro do intervalo especificado por Wright et al. (2014 e 2015). Há uma queda da viscosidade com o aumento de temperatura, com valores medidos e catalogados similares.

Como os fluidos elencados podem ser utilizados em temperaturas próximas de 300 °C, torna-se interessante por parte dos fornecedores a apresentação de informações dedicadas neste intervalo, portanto a partir de dados medidos, indicados pelos fabricantes e disponibilizados pela OCP Engenharia foram calculadas as propriedades, como densidade, calor específico, viscosidade cinemática, condutividade térmica, entalpia específica, expansão volumétrica e número de Prandtl em temperaturas no intervalo de 15 °C a 320 °C em função das condições de trabalho dos sistemas obtidos dessa pesquisa e que utilizam os fluidos A, B e PH nessa faixa de temperatura (Tabelas 5, 6, 7). Oyekunle e Susu (2005) reportam valores de  $0,72 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$  para calor específico e de  $0,131 \text{ kcal/m.h.}^\circ\text{C}$  ( $0,152 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ ) para condutividade térmica de um óleo parafínico a 350 °C, valores próximos aos apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7 para o fluido de base parafínica à 320 °C, indicando uma boa correlação entre dados medidos e calculados.

Tabela 4: Propriedades medidas e catalogadas dos fluidos A, B e PH

Propriedades	Fluido A		Fluido B		Fluido PH		
	Novo	Catálogo	Novo	Catálogo	Novo	Catálogo	
Conteúdo de Umidade (ppm)	126	-	165	-	111	-	
Ponto Fulgor - Vaso Aberto	216	200	216	220	228	> 240	
Ponto Fulgor -Vaso Fechado	210	180	210	210	218	> 210	
Temp.Auto-Ignicção (°C)	380	-	360	-	371	-	
Temp. Máxima de Filme (°C)	-	-	340	-	343	-	
Temp. Máxima de Operação (°C)	316	-	320	-	310	-	
Viscosidade Cinemática (mm <sup>2</sup> /s) 20°C	83,29	-	80,66	75,00	121,47	-	
Viscosidade Cinemática (mm <sup>2</sup> /s) 40°C	30,97	32,00	30,18	25,00	42,28	39,00	
Viscosidade Cinemática (mm <sup>2</sup> /s) 60°C	14,72	-	14,40	13,50	19,08	-	
Viscosidade Cinemática (mm <sup>2</sup> /s) 80°C	8,32	-	8,18	7,90	10,41	-	
Viscosidade Cinemática (mm <sup>2</sup> /s) 100°C	5,31	5,20	5,22	4,70	6,46	6,40	
Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) 20°C	867,5	-	869,1	863,0	862,3	863,0	
Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) 30°C	861,2	-	862,6	850,0	-	-	
Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) 40°C	854,8	-	856,3	-	849,8	-	
Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) 50°C	848,5	-	850,0	-	843,6	-	
Índice de Acidez mgKOH/g	0,02	0,05	0,02	< 0,05	0,01	-	
Insolúveis de Pentano (%)	< 0,01	-	0,04	-	0,09	-	
Residual de Carbono Conradson (% massa)	< 0,01	0,05	< 0,01	0,02	< 0,01	-	
Análise química (ppm)	Fe	ND	-	ND	-	ND	-
	Cr	ND	-	ND	-	ND	-
	Pb	1,0	-	ND	-	1,0	-
	Cu	ND	-	ND	-	ND	-
	Sn	ND	-	ND	-	ND	-
	Al	ND	-	ND	-	ND	-
	Ni	ND	-	ND	-	ND	-
	Ag	ND	-	ND	-	ND	-
	Si	ND	-	ND	-	ND	-
	B	ND	-	ND	-	ND	-
	Na	ND	-	ND	-	ND	-
	Mg	ND	-	ND	-	ND	-
	Ca	ND	-	ND	-	ND	-
	Ba	ND	-	ND	-	ND	-
	P	4,0	-	ND	-	5,0	-
	Zn	ND	-	ND	-	ND	-
	Mo	ND	-	ND	-	ND	-
	Ti	ND	-	ND	-	ND	-
	V	ND	-	ND	-	ND	-

Outras propriedades analisadas foram o conteúdo de umidade (126 ppm), insolúveis de pentano (< 0,01 %), índice de acidez (0,02 mgKOH/g) e análise de 19 elementos que apresentou indicação de chumbo (Pb) em 1 ppm quanto à classe de metais de desgaste e fósforo (P) de 4 ppm quanto à classe de carga aditiva e não foram indicados valores para contaminantes (Tabela 4). Tais valores são considerados satisfatórios.

O fluido B, também parafínico, apresenta-se em condição similar ao fluido A, porém de fabricante diferente. A partir dos dados obtidos de ensaios com referências dos laboratórios em comparação aos obtidos em catálogos do fabricante, foram obtidos dados que apresentaram ponto de fulgor medido (216 °C) e o reportado (220 °C), densidade 869,1 kg/m<sup>3</sup> a 20 °C, índice de acidez e residual de carbono dentro das tolerâncias de projeto e são similares aos dos fluidos A. Os valores medidos de ponto de fulgor tanto em vaso aberto quanto em fechado são idênticos para ambos os fluidos A e B (216 °C e 210 °C). A viscosidade cinemática tem variações da ordem de 7 % a 17 % entre 20 °C e 100 °C quando comparados os valores medidos e os catalogados. A análise de espectroscopia de emissão atômica revelou ausência de Pb e P que foram determinados no fluido A.

Assim como para o fluido A, foram calculadas para o fluido B as propriedades como densidade, calor específico, viscosidade cinemática, condutividade térmica, entalpia específica, expansão volumétrica e número de Prandtl, também no intervalo de 15 °C a 320 °C, e não foram observadas diferenças significativas nas propriedades físicas e termodinâmicas entre os fluidos A e B (Tabelas 5 e 6).

O fluido PH é parafínico hidrogenado e apresenta-se quando sem uso com aparência incolor e inodora, característica do tratamento de hidrogenação, o qual a partir da eliminação das cadeias duplas de carbono

e do enxofre, evita o escurecimento por oxidação e presença da luz, mantendo-o mais claro, em relação aos fluidos A e B.

Assim como nos fluidos anteriores, foram obtidos dados a partir dos ensaios com referências dos laboratórios e comparados aos obtidos em catálogos do fabricante. O ponto de fulgor vaso aberto foi medido obtendo-se o valor de 228 °C que é inferior ao especificado pelo fabricante, mas está dentro das tolerâncias quanto à variação de origem do óleo e/ou petróleo e de projeto de plantas térmicas. Os pontos de fulgor (vaso fechado e aberto) são 12 °C e 18 °C superiores aos fluidos A e B, respectivamente, e a viscosidade cinemática a 20 °C é aproximadamente 30 % superior ao dos fluidos sem tratamento de hidrogenação, o que indica que a quebra das duplas ligações resultam em cadeias maiores e um pouco mais estáveis, dificultando a formação de moléculas com baixo peso molecular que poderiam diminuir o ponto de fulgor.

A densidade do fluido PH é de aproximadamente 862 kg/m<sup>3</sup> a 20 °C. A temperatura de autoignição (371 °C) é praticamente semelhante ao do fluido A (380 °C) e do fluido B (360 °C), assim como as temperaturas máximas de filme e as de operação citadas (316 °C para fluido A, 320 °C para o B e o 310 °C para o fluido PH).

A análise de espectroscopia de emissão atômica apresentou indicação de chumbo (Pb) em 1 ppm, na classe de metais de desgastes não sendo indicados valores para os metais de aditivação ou contaminantes.

Foram calculadas as propriedades como densidade, calor específico, viscosidade cinemática, condutividade térmica, expansão volumétrica e número de Prandtl para o fluido PH, no mesmo intervalo de temperatura utilizado para os fluidos A e B (15 °C e 320 °C), apresentadas na Tabela 7.

Tabela 5: Propriedades físicas e termodinâmicas calculadas do Fluido A em função da temperatura

Temperatura (°C)	Propriedades Medidas			Propriedades Calculadas				
	Densidade Kg/m <sup>3</sup>	Calor Específico Kcal/(kg°C)	Viscosidade Cinemática mm <sup>2</sup> /s	Condutividade Térmica W/m°C	Entalpia Específica kJ/kg	Viscosidade Dinâmica mPa.s	Expansão Volumétrica 1/K	Número Prandtl
15	870,59	0,4457	151,7351	0,1344	30,98	132,10	0,00079	1832,14
20	867,50	0,4500	83,2900	0,1341	31,49	72,25	0,00079	1014,66
30	861,20	0,4587	46,7020	0,1333	62,78	40,22	0,00080	758,88
40	854,8	0,4674	30,9700	0,1326	84,44	26,47	0,00080	390,40
50	848,50	0,4761	19,5971	0,1319	106,46	16,63	0,00081	251,16
60	842,06	0,4848	14,7200	0,1312	128,85	12,40	0,00082	191,71
75	832,55	0,4979	9,8364	0,1301	163,11	8,19	0,00083	131,17
80	829,38	0,5022	8,3210	0,1297	174,71	6,90	0,00083	111,82
100	816,70	0,5196	5,3100	0,1282	222,04	4,34	0,00084	73,53
110	810,36	0,5283	3,9255	0,1275	266,24	3,18	0,00085	55,15
150	785,00	0,5632	1,9500	0,1246	346,72	1,53	0,00088	28,95
200	753,30	0,6067	1,2000	0,1209	480,51	0,90	0,00091	18,97
250	721,60	0,6502	0,8500	0,1173	632,41	0,61	0,00095	14,23
260	715,26	0,6589	0,7994	0,1165	653,090	0,57	0,00096	13,53
270	708,92	0,6676	0,7455	0,1158	683,12	0,53	0,00097	12,75
280	702,58	0,6763	0,6970	0,1151	713,53	0,49	0,00098	12,04
300	689,90	0,6937	0,6500	0,1136	775,42	0,45	0,00100	11,46
310	683,56	0,7024	0,5774	0,1129	806,92	0,39	0,00100	10,27
315	680,39	0,7068	0,5605	0,1125	822,80	0,38	0,00101	10,02
320	677,22	0,7111	0,5000	0,1122	838,78	0,34	0,00101	8,98

Tabela 6: Propriedades físicas e termodinâmicas calculadas do Fluido B em função da temperatura

Temperatura (°C)	Propriedades Medidas			Propriedades Calculadas				
	Densidade Kg/m <sup>3</sup>	Calor Específico Kcal/(kg°C)	Viscosidade Cinemática mm <sup>2</sup> /s	Condutividade Térmica W/m°C	Entalpia Específica kJ/kg	Viscosidade Dinâmica mPa.s	Expansão Volumétrica 1/K	Número Prandtl
15	872,16	0,4453	146,4646	0,1342	30,97	127,74	0,00079	1773,28
20	869,10	0,4496	80,6600	0,1338	41,47	70,10	0,00079	985,32
30	862,60	0,4583	45,3933	0,1331	62,76	39,16	0,00080	564,08
40	856,30	0,4670	30,1800	0,1324	84,41	25,84	0,00080	381,45
50	850,00	0,4757	19,1455	0,1317	106,42	16,27	0,00081	246,03
60	843,54	0,4844	14,4000	0,1309	128,79	12,15	0,00081	188,04
75	834,00	0,4974	9,6488	0,1298	163,04	8,05	0,00082	129,00
80	830,82	0,5018	8,1810	0,1295	174,64	6,80	0,00083	110,22
100	818,10	0,5192	5,2190	0,1280	221,94	4,27	0,00084	72,46
110	811,74	0,5279	4,0881	0,1273	246,13	3,32	0,00085	57,59
150	786,30	0,5627	2,1181	0,1244	346,56	1,67	0,00087	31,53
200	754,50	0,6061	1,1510	0,1207	480,28	0,87	0,00091	18,25
250	722,70	0,6496	0,7172	0,1171	623,11	0,52	0,00095	12,03
260	716,34	0,6583	0,6600	0,1163	652,76	0,47	0,00096	11,19
270	709,98	0,6670	0,6092	0,1156	682,78	0,43	0,00097	10,44
280	703,62	0,6757	0,5640	0,1149	713,17	0,40	0,00098	9,77
300	690,90	0,6931	0,4873	0,1134	775,03	0,34	0,00099	8,61
310	684,54	0,7018	0,4546	0,1127	806,51	0,31	0,00100	8,11
315	681,36	0,7061	0,4394	0,1123	822,39	0,30	0,00101	7,87
320	678,18	0,7105	0,4250	0,1120	838,35	0,29	0,00101	7,65

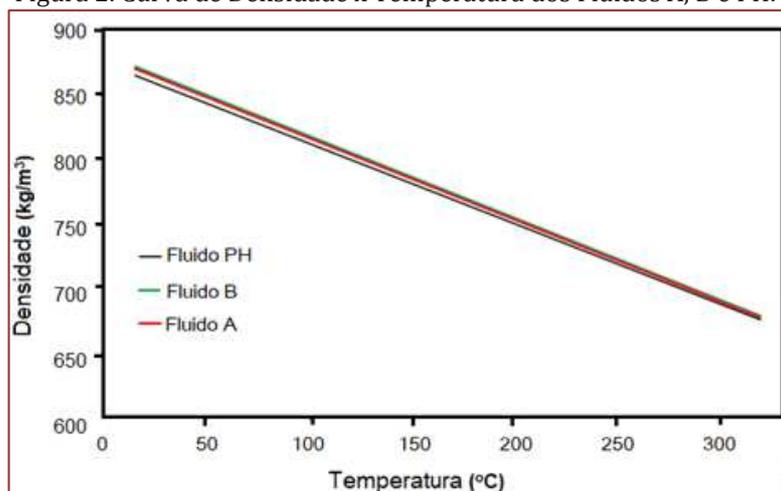
Tabela 7 - Propriedades físicas e termodinâmicas calculadas do Fluido PH em função da temperatura

Temperatura (°C)	Propriedades Medidas			Propriedades Calculadas				
	Densidade Kg/m <sup>3</sup>	Calor Específico Kcal/(kg°C)	Viscosidade Cinemática mm <sup>2</sup> /s	Condutividade Térmica W/m°C	Entalpia Específica kJ/kg	Viscosidade Dinâmica mPa.s	Expansão Volumétrica 1/K	Número Prandtl
15	865,36	0,4470	224,5766	0,1353	31,02	194,34	0,00079	2312,18
20	862,30	0,4514	121,4700	0,1349	41,55	104,74	0,00080	1261,80
30	856,00	0,4601	63,3848	0,1342	62,87	54,26	0,00080	669,91
40	849,80	0,4688	42,2800	0,1334	84,56	35,93	0,00081	669,91
50	843,60	0,4776	24,9523	0,1327	106,61	21,05	0,00081	272,75
60	837,32	0,4863	19,0800	0,1319	129,03	15,98	0,00082	211,96
75	827,98	0,4994	11,9054	0,1308	163,35	9,86	0,00083	135,44
80	824,85	0,5038	10,4100	0,1305	174,97	8,59	0,00083	119,35
100	812,40	0,5212	6,4560	0,1290	222,36	5,24	0,00085	76,28
110	806,17	0,5299	5,9182	0,1283	246,61	4,77	0,00087	70,96
150	781,25	0,5649	3,3602	0,1253	347,25	2,63	0,00088	42,59
200	750,10	0,6085	1,9877	0,1217	481,28	1,49	0,00092	26,85
250	718,95	0,6522	1,3228	0,1180	624,44	0,95	0,00096	18,92
260	712,72	0,6609	1,2314	0,1173	654,17	0,88	0,00096	17,81
270	706,49	0,6696	1,1495	0,1165	684,26	0,81	0,00097	16,80
280	700,26	0,6783	1,0756	0,1158	714,72	0,75	0,00098	15,89
300	687,80	0,6958	0,9484	0,1143	776,74	0,65	0,00100	14,29
310	681,57	0,7045	0,8933	0,1136	808,30	0,61	0,11101	13,60
315	678,46	0,7089	0,8876	0,1132	824,21	0,59	0,00101	13,27
320	675,34	0,7133	0,8430	0,1128	840,22	0,57	0,00102	12,96

### 3.3. COMPARAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES FÍSICAS DO FLUIDO A, B E PH

Neste item estão correlacionadas as propriedades básicas entre os fluidos dos diversos fornecedores. Os fluidos em uso possuem suas bases predominantemente parafínicas, porém apresentam em seu óleo básico especificações diferenciadas obtidas conforme sua rota de produção, conferindo aos fluidos diferentes características de comportamento quando aquecidos. De acordo com as categorias de base da API os fluidos A e B são do Grupo I e o fluido PH do Grupo II. Observou-se que as curvas de densidade dos fluidos quase que se interpõem devido à predominância da base parafínica. A diferença de densidade na temperatura de 250 °C entre o fluido B e o A é de 0,15 % (Figura 2). Entre o fluido B e o PH é de 0,52 % e entre o fluido A e o PH é de 0,37 %.

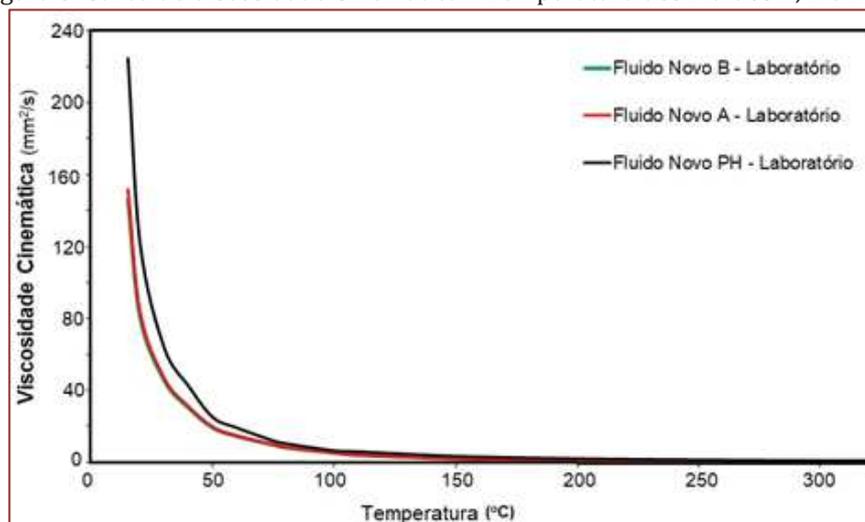
Figura 2. Curva de Densidade x Temperatura dos Fluidos A, B e PH.



É possível observar que as curvas de viscosidade cinemática (Figura 3) quase se sobrepõem em valores de temperatura acima de 150 °C, porém para valores de temperatura inferiores, o fluido PH possui maiores valores e o fluido B os menores valores. Tal condição orienta para pontos de atenção na escolha do fluido, quando da determinação da potência das bombas centrífugas em condição de partida dos sistemas, onde o fluido está em temperatura ambiente e será exigida uma maior potência para o fluido PH, menor para o fluido A e menor ainda para o B.

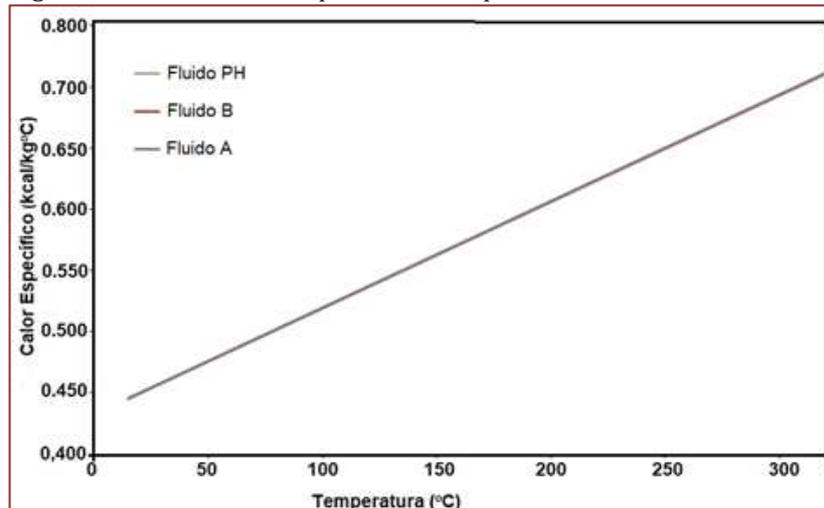
Com relação à viscosidade cinemática, os valores a 40 °C dos fluidos A, B e PH são respectivamente de 32,00 mm<sup>2</sup>/s, 25,00 mm<sup>2</sup>/s e 39,00 mm<sup>2</sup>/s (Tabela 4), considerando-se os dados de catálogo, e 30,98 mm<sup>2</sup>/s, 30,18 mm<sup>2</sup>/s e 42,28 mm<sup>2</sup>/s com relação aos valores medidos nesse trabalho (Tabela 4). É possível observar um aumento dos valores de viscosidade cinemática do fluido PH em relação ao A e ao B. Para uma temperatura de 250 °C a diferença entre os valores de viscosidade é de 15,62 % entre os fluidos B e o A; de 45,78 % entre B e PH, e de 35,74 % entre o A e o PH. As oscilações de viscosidade influenciam de forma direta na definição de vazão e em seus correlatos como número de Reynolds, perda de carga, potência do motor da bomba entre outras propriedades.

Figura 3. Curva de Viscosidade Cinemática x Temperatura dos Fluidos A, B e PH.



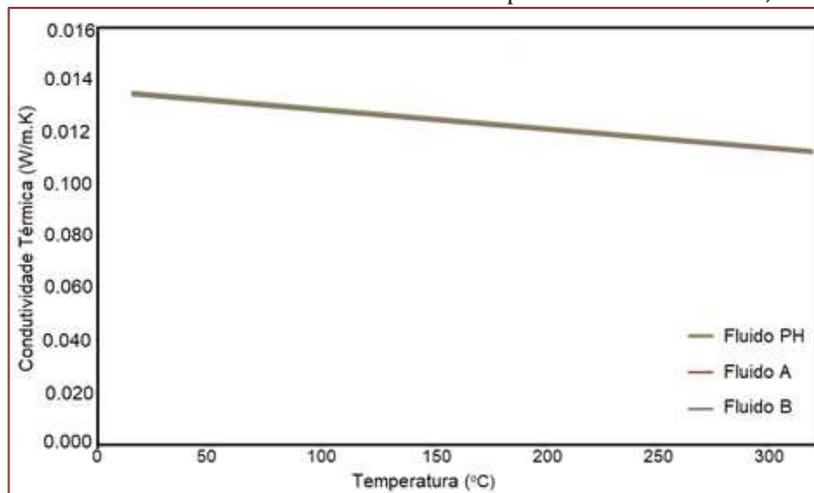
No caso da relação entre calor específico e temperatura, as curvas dos três fluidos térmicos (Figura 4) se superpõem em quase toda a extensão. A diferença entre os valores apresentados é de 0,09 % entre o B e o A, 0,40 % entre o B e o PH, e 0,31 % entre o A e o PH na temperatura de 250 °C, sendo a diferença insignificante e quando a referência é transferida para o sistema térmico a variação é assumida pelas tolerâncias dos componentes que os inclui.

Figura 4: Curva de Calor Especifico x Temperatura dos Fluidos A, B e PH.



O comportamento das curvas de condutividade térmica em função da temperatura é mostrado na Figura 5. Pode-se observar que as curvas se superpõem em quase toda a extensão. A diferença entre os valores apresentados é de 0,17 % entre o B e o A, 0,76 % entre o B e PH, e 0,59 % entre o A e o PH a uma temperatura de 250 °C, sendo esta diferença também insignificante. Quando a referência é transferida para o sistema térmico a variação é assumida pelas tolerâncias dos componentes que os inclui.

Figura 5. Curva de Condutividade Térmica x Temperatura dos Fluidos A, B e PH



Ao analisar as propriedades dos três fluidos, observou-se que as propriedades como resíduo de água, insolúveis de pentano e resíduo de carbono são bons indicadores de possíveis contaminações, oxidação e estresse térmico. No entanto, esses valores são muito próximos para os três fluidos e não possibilitam indicar qual sofreria maior dano quando em uso durante o processo.

A análise de espectroscopia no infravermelho teve como objetivo identificar e confirmar a base do fluido térmico, assim como a possibilidade de oxidação do mesmo, a partir de bandas específicas correspondentes às ligações químicas dos constituintes do fluido principalmente C-H e C-C. Desta forma a análise comparativa entre os três fluidos permitiu indicar qual é o que apresenta menor tendência à oxidação e ao envelhecimento.

Os espectros de infravermelho (Figuras 6 e 7) mostram a presença de bandas de elevada intensidade características de parafina como as bandas em 2933  $\text{cm}^{-1}$ , 2864  $\text{cm}^{-1}$ , 1462  $\text{cm}^{-1}$  atribuídas aos grupos -

CH<sub>2</sub> de alcanos lineares (DUNCKE, 2015) e a banda em 1372 cm<sup>-1</sup> a grupos -CH<sub>3</sub> (SANCHES et al., 2015). Mas, também apresentam bandas de baixa intensidade próximo a 1600 cm<sup>-1</sup> correspondentes à C=C, e em 810 cm<sup>-1</sup> e 750 cm<sup>-1</sup> devido à presença de grupos aromáticos policíclicos e substituídos (WANG et al., 2013).

A Figura 7 mostra os espectros de infravermelhos na região de 600 cm<sup>-1</sup> a 1800 cm<sup>-1</sup>, com ênfase nas diferenças dos espectros entre os três fluidos, atribuídas às duplas ligações (TORRES et al., 2010) que podem reagir com O<sub>2</sub> formando produtos de oxidação resultando em deterioração do fluido. O fluido PH por ter passado pelo processo de hidrogenação não apresenta compostos com ligações duplas, que é um bom indicício de estabilidade à oxidação.

Figura 6. Espectros de infravermelho dos fluidos PH, A e B.

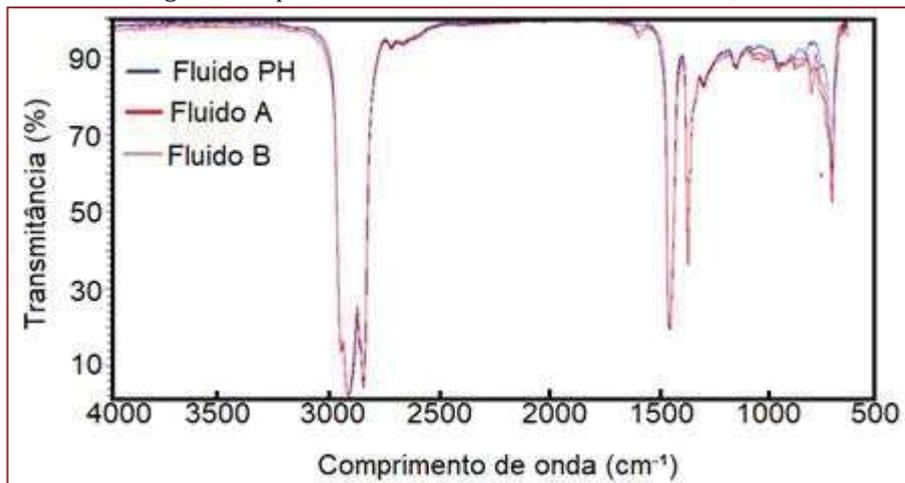
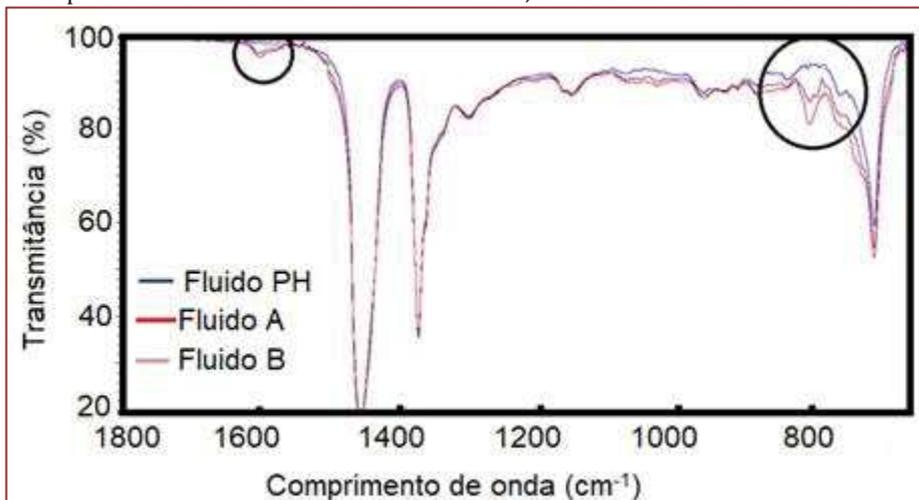


Figura 7. Espectros de infravermelho dos fluidos PH, A e B no intervalo de 1800 cm<sup>-1</sup> a 600 cm<sup>-1</sup>

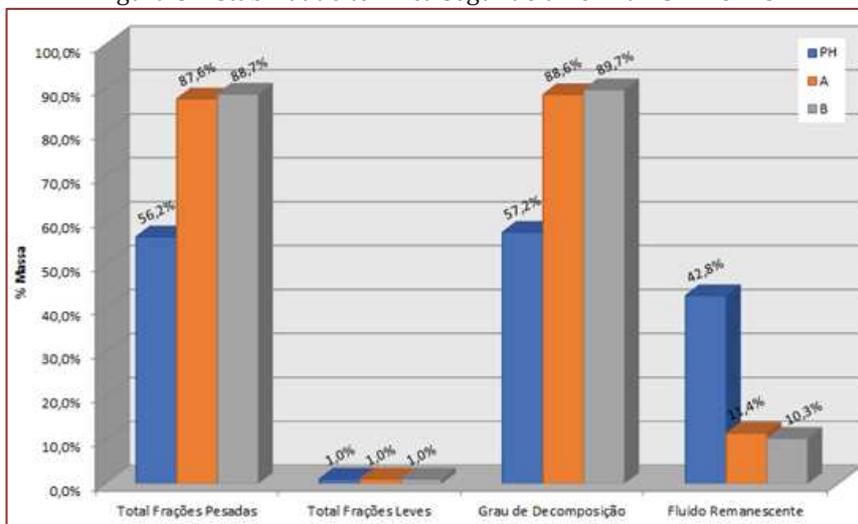


Com relação à estabilidade térmica as condições de realização do ensaio consideram os parâmetros que seguem em obediência às orientações da norma ASTM D 6743 (2015) e complemento com a ASTM D 2887 (2016) para identificação e confirmação da curva de destilação determinando os pontos de ebulição inicial e final. A temperatura de teste foi de 280 °C, a duração do ensaio foi de 500 h, e faixa do ponto de ebulição medido e comparado os valores com o fluido estressado. Este método fornece informações que podem ajudar a decidir sobre o uso ideal de um fluido, sendo utilizado como um fator no processo de tomada de decisão para a seleção do fluido térmico orgânico.

Os resultados deste ensaio (Figura 8) consideram que quanto menor o grau de decomposição, à mesma temperatura e duração do teste de um fluido de transferência de calor, maior é a estabilidade térmica do

produto. Desta forma, tem-se por conclusão que o grau de decomposição do fluido PH se apresenta menor que o do fluido A e do B, tendo o fluido PH maior estabilidade térmica que os demais. Este resultado também pode ser traduzido na quantidade de fluido remanescente, sendo para o fluido PH mais que o dobro dos fluidos A e B.

Figura 8. Estabilidade térmica segundo a norma ASTM 6743.



Realizou-se então a comparação de capacidade de transferência de calor entre os fluidos. Para estabelecer esta análise define-se a mínima velocidade requerida para manter o completo desenvolvimento do fluxo em regime turbulento, sendo assumida a ocorrência do número de Reynolds de 8.000, através de uma tubulação ASTM – A106 GrB, diâmetro 3/4” (20,93 mm), Sched 40. O número de Prandtl, o número Nusselt e coeficiente de troca térmica são os valores a serem estabelecidos.

Os valores apresentados para os fluidos de mesma base mineral parafínica para temperaturas entre 250 °C a 280 °C são muito próximos (Tabela 8). Apesar de o fluido PH apresentar maior valor em termos de propriedades que os fluidos A e B, como coeficiente de troca térmica, número de Nusselt, e número de Prandtl, neste intervalo de temperatura, os valores estão entre 10 % e 17 % em relação aos fluidos A e B, sendo a maioria absorvidos pelas tolerâncias que compõem as instalações.

Tabela 8: Comparação de efetividade de troca térmica entre os fluidos

Temp. °C	Fluido PH			Fluido A			Fluido B		
	Coef. de Troca Kcal/H m² °C	N° Nusselt	N° Prandtl	Coef. de Troca Kcal/H m² °C	N° Nusselt	N° Prandtl	Coef. de Troca Kcal/H m² °C	N° Nusselt	N° Prandtl
15	3.757,60	675,79	2312,18	3.403,05	615,72	1832,14	3.352,84	607,73	1773,28
20	2.941,14	530,39	1261,80	2.679,37	486,10	1014,66	2.643,33	480,43	985,32
30	2.270,66	411,72	669,91	2.128,96	388,36	578,88	2.103,22	384,36	564,08
40	1.933,67	352,55	454,52	1.808,62	331,74	390,40	1.788,70	328,68	381,45
50	1.567,71	287,41	272,75	1.507,74	278,09	251,16	1.492,65	275,80	246,03
60	1.409,47	259,84	211,96	1.345,83	249,61	191,71	1.333,06	247,69	188,04
75	1.168,43	217,22	135,44	1.146,62	214,45	131,17	1.136,97	213,03	129,00
80	1.107,66	206,50	119,35	1.072,68	201,19	111,82	1.064,63	200,04	110,22
100	915,66	172,65	76,28	896,87	170,13	73,53	890,01	169,13	72,46
110	884,48	167,73	70,96	794,86	151,64	55,15	807,26	154,29	57,59
150	704,60	136,75	42,59	600,16	117,18	28,95	619,86	121,25	31,53
200	568,65	113,70	26,85	491,97	98,96	18,97	483,45	97,42	18,25
250	479,49	98,86	18,92	425,22	88,20	14,23	396,95	82,48	12,03
260	465,06	96,48	17,81	414,10	86,43	13,53	383,22	80,13	11,19
270	451,51	94,26	16,80	401,85	84,40	12,75	370,36	77,93	10,44
280	438,72	92,17	15,89	390,32	82,50	12,04	358,32	75,87	9,77
300	415,23	88,36	14,29	377,76	80,87	11,46	336,35	72,14	8,61
310	404,39	86,61	13,60	359,34	77,43	10,27	326,29	70,43	8,11
315	399,17	85,77	13,27	354,64	76,66	10,02	321,45	69,61	7,87
320	394,08	84,95	12,96	338,33	73,38	8,98	316,76	68,82	7,65

Em suma, o objetivo geral desta pesquisa foi estabelecer uma abordagem sistêmica e comparativa que permitisse considerar as propriedades específicas do meio de transferência de calor, o FTO, para garantir uma operação segura em plantas térmicas que o utilizam em fase líquida. A abordagem foi realizada por meio de métodos analíticos de FTOs, com análise e interpretação dos efeitos destes junto aos componentes do sistema térmico, que pode ser dividido por suas necessidades de operação, consistindo em Capacidade de recalcar o fluido ou bombeamento, Segurança no uso, Eficiência e Continuidade Operacional.

As propriedades que estão relacionadas com a capacidade de recalque são a densidade, a viscosidade, o ponto de fulgor, e o residual de água (ou residual de humidade) e a pressão de vapor. Observando as curvas de densidade em função da temperatura, elas não apresentam diferenças significativas entre os três fluidos principalmente em temperaturas acima de 180 °C, portanto, olhando para esta propriedade não haveria diferença na utilização de qualquer um dos fluidos desde que fossem utilizados nas mesmas temperaturas.

Com relação à curva de viscosidade x temperatura também não se percebe diferenças significativas em temperaturas acima de 150 °C, havendo praticamente sobreposição das curvas dos três fluidos. No caso da viscosidade, haveria diferenças significativas na utilização em baixas temperaturas. Neste caso, deve haver atenção cuidadosa na orientação para a escolha do fluido quando da determinação da potência das bombas centrífugas em condição de partida dos sistemas, onde o fluido está em temperatura ambiente e será exigida uma potência maior para o fluido PH, menor para o fluido A e menor ainda para o B.

Os pontos de fulgor do fluido A, do fluido B e do fluido PH são praticamente iguais, assim como o residual de umidade para os três fluidos, que não impactam em diferenças tão significativas no comportamento de bombeamento. Assim, quando se trata dessas propriedades não se observa diferenças que tendam para a escolha de um determinado fluido. Todos os três estão com especificações adequadas para bombeamento do fluido, quando utilizado em temperaturas acima de 180 °C.

As propriedades que estão relacionadas com a segurança de uso são a temperatura de autoignição, ponto de fulgor e corrosão. As temperaturas de autoignição determinadas para os fluidos foram: A (380 °C), B (360 °C) e PH (371 °C). Esses valores não ultrapassam a diferença de 10 % toleradas em projetos de instalação de plantas e, portanto, não são consideradas significativas entre os três fluidos. Como mencionado anteriormente, o ponto de fulgor também não apresenta diferenças significativas. No entanto, o resultado da análise de corrosão faz toda a diferença quando se compara os espectros de infravermelho para os três fluidos, e observa-se que a ausência da banda em 1600  $\text{cm}^{-1}$  e 810  $\text{cm}^{-1}$  indicam que o fluido PH é mais resistente à corrosão do que os fluidos A e B.

As propriedades que estão relacionadas com a eficiência são condutividade térmica e calor específico. A condutividade térmica para os fluidos A, B e PH tem suas curvas sobrepostas em toda a extensão do gráfico. A diferença entre os valores apresentados é de 0,17 % entre o B e o A; 0,76 % entre B e o PH; e 0,59 % entre A e o PH a temperatura de 250 °C, sendo insignificante. Os valores de calor específico para os fluidos A, B e PH se superpõem em quase toda a extensão.

Para os fluidos em análise, as avaliações demonstraram que as taxas de transferência de calor apresentam reduzida influência no conteúdo de escolha, visto as vantagens obtidas nos números absolutos das propriedades termodinâmicas entre eles serem pequenas e serem absorvidas pelas tolerâncias dos componentes que compõem a instalação, além de em alguns casos, da própria ineficiência operacional da planta térmica que aumenta com o passar dos anos.

As propriedades que estão relacionadas com a continuidade operacional são ponto de fulgor, viscosidade cinemática, estabilidade térmica, insolúveis em pentano, resíduo de carbono, destilação, índice de acidez, cor e presença de elementos metálicos. Todos os itens apresentam variações insignificantes entre os três fluidos na condição de novo, porém quando se considera o ensaio de estabilidade térmica tem-se que o fluido PH apresentou grau de decomposição de 57,2 %, contra 88,6 % do fluido A e 89,7 % do fluido B. Esta condição mostra que o fluido remanescente do PH foi de 42,8 %, do A foi de 11,4 % e do fluido B de 10,3 %, ou seja, o fluido PH apresentou um remanescente em volume maior que o dobro dos fluidos A e B (Figura 8).

As alterações de estabilidade se relacionam com as alterações de propriedades dos fluidos quando estressado ou em uso, condição que expandida para o ambiente industrial pode ser interpretada como a probabilidade do fluido PH apresentar menor taxa de reposição de fluido no sistema.

Os fluidos A e B apresentam maior fração total de resíduos pesados (não vaporizados), que influenciarão no aumento da viscosidade e na produção de resíduos de carbono que conseqüentemente irão promover a redução da taxa de transferência de calor no sistema térmico, entupimento dos tubos, especialmente os de

pequeno diâmetro, além de ocasionar danos em selos de bomba. Esses fatores podem levar à perda de produção, diminuição da vida útil do equipamento, além do aumento da necessidade de reposição de FTO e de limpezas frequentes no sistema. Somando-se a todos esses inconvenientes, a deposição de lama de carbono na tubulação pode provocar superaquecimento em locais pontuais, que dependendo da temperatura localizada pode levar a rompimento dos tubos e, conseqüentemente, a possibilidade de incêndios.

O fluido PH apresenta melhor resistência a alterações permanentes causadas pelo calor, tornando-o mais eficiente (menor tendência de criar depósitos sobre superfícies de área de troca de calor) e com menor taxa de falhas (como obstrução de tubos, danos à vedação de bombas entre outras).

Após as análises dos três fluidos minerais, (A e B - parafínicos e PH - parafínico hidrogenado), obteve-se como melhor possibilidade de escolha o fluido PH, em função de: maior estabilidade térmica, menor taxa de reposição no sistema, maior segurança operacional da unidade industrial quanto às conseqüências de sua degradação e potenciais riscos de incêndio e explosão, menor probabilidade de falha ou perdas junto à produção, e maior retorno sobre a estrutura de investimento (custo total do fluido x expectativa de vida útil).

#### 4. CONCLUSÕES

Com relação à primeira etapa da pesquisa sobre o mercado de fluido térmico no Brasil, pode-se concluir que há um número de aproximadamente 3.370 empresas que utilizam o FTO como meio de transferência de calor indireto, e mais de 90 % das empresas que utilizam sistemas térmicos com fluido orgânico estão relacionados com indústria química, de asfalto, de alimentos, têxtil, de embalagem e automobilística. O FTO mais utilizado é o de base mineral parafínica e parafínica hidrogenada, com temperatura na faixa de 180 °C a 300 °C.

Com relação à segunda etapa da pesquisa, os resultados das análises dos três fluidos térmicos novos mostraram que algumas propriedades indicam a diminuição de incidência de riscos de incêndios (segurança), de continuidade operacional através de ensaios de degradação térmica e de espectroscopia na região do infravermelho.

Os ensaios de densidade e viscosidade em ampla faixa de temperatura indicam qual exigirá maior ou menor potência da bomba. Esses ensaios deveriam ser prática rotineira quando da escolha de um fluido térmico, possibilitando uma escolha mais segura, por parte do grupo envolvido no projeto de engenharia do sistema térmico.

A partir das análises, o fluido PH (parafínico hidrogenado) de forma geral apresentou-se como melhor escolha atendendo de forma satisfatória aos requisitos elencados em relação aos fluidos A e B (parafínicos), que resumem em maior estabilidade térmica, menor taxa de reposição na planta, segurança operacional da unidade industrial quanto a conseqüências de sua degradação e potenciais de vazamentos, incêndios, e explosões, aspectos de segurança e saúde quanto a contato incidental e disposição final do resíduo e maior retorno sobre a estrutura de investimento (custo total do fluido x expectativa de vida útil). Mantendo-se em similaridade com os demais fluidos nos fatores de aspecto de segurança em sua condição original quanto a risco de incêndio e explosão, taxa de transferência de calor, capacidade de bombeamento, condição de reprocessamento por ser de base mineral. Portanto, os FTOs apresentam uma compatibilidade de características onde por sua própria definição está vinculada ao fator tempo e que quando em uso nas plantas térmicas as diferenças observadas são alteradas e acentuadas, visto serem expostos a uma série de variáveis de influências adicionais, como materiais das plantas industriais, as impurezas, o acúmulo de calor durante as condições de transferência de calor entre outros fatores. Outro fato inevitável é que para os três fluidos trabalhados há similaridade de utilização para os sistemas térmicos onde são propostos, conduzindo aos mesmos cuidados quanto às características de eficiência, bombeamento e segurança no uso e continuidade operacional.

**REFERÊNCIAS**

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-D92: Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester. 2017.
- [2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D893: Standard Test Method for Insolubles in Used Lubricating Oils. 2018
- [3] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-D93: Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester. 2016.
- [4] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-D95: Standard Test Method for Water in Petroleum Products and Bituminous Materials by Distillation. 2013.
- [5] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-D189-06: Standard Test Method for Conradson Carbon Residue of Petroleum Products. Reapproved 2014.
- [6] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-D445-15a: Standard Method of Test for Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (kinematic and dynamic viscosities). 1966.
- [7] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-D664: Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration.2017.
- [8] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-D893: Standard Test Method for Insolubles in Used Lubricating Oils. 2014.
- [9] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-D1500: Standard Test Method for ASTM Color of Petroleum Products. 2017.
- [10] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2717.95 Standard Test Method for Thermal Conductivity of Liquids. Reapproved 2009.
- [11] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM-D2766: Standard Test Method for Specific Heat of Liquids and Solids. Reapproved 2009.
- [12] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-D2887.16a: Standard Test for Method for Boiling Range Distribution of Petroleum Fractions by Gas Chromatography, designation: 406. 2016.
- [13] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-D3828: Standard Test Methods for Flash Point by Small Scale Closed Cup Tester. 2016.
- [14] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-4052-16: Standard Test Method for Density, Relative Density and API Gravity of Liquids by Digital Density Meter. 2016.
- [15] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-D4055: Standard Test Method for Pentane Insolubles by Membrane Filtration. 2013.
- [16] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-D5185.13: Standard Test Method for Multielement Determination of Used and Unused Lubricating Oils and Base Oils by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES). 2013.
- [17] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-D6595: Standard Test Method for Determination of Wear Metals and Contaminants in Used Lubricating Oils or Used Hydraulic Fluids by Rotating Disc Electrode Atomic Emission Spectrometry. 2017.
- [18] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-D6743.11: Standard Test Method for Thermal Stability of Organic Heat Transfer Fluids. Reapproved 2015.
- [19] COSTA, M.G. Fluido Térmico Orgânico: Compatibilidade de Características e Similaridade de Utilização – Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Processos Industriais do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2018, 123 p.
- [20] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 51820: Testing of lubricants - Analysis of greases by infrared spectrometer - Recording and interpretation of an infrared spectrum. 2013.
- [21] DUNCKE A.C.P. Morfologia de parafinas em petróleo, sistemas modelo e emulsões água/óleo por meio de microscopia óptica. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015, 174 p.
- [22] EXXON MOBIL CORPORATION, disponível em: [synthetic\\_lubricant\\_base\\_stocks\\_formulations\\_guide\\_en\\_2019%20.pdf](https://www.exxonmobil.com/technicalpublications/synthetic_lubricant_base_stocks_formulations_guide_en_2019%20.pdf), 2019, acesso em 22/05/2020.
- [23] KIRK-OTHMER: Encyclopedia of Chemical Technology. Heat transfer media other than water. M. Howe-Grant, 4. ed., vol. 4, New York, John Wiley and Sons, 1992.

- [24] KLETZ T.A. HAZOP AND HAZAN: Identifying and assessing process industry hazards. 4. ed., New York: Taylor & Francis, 1999.
- [25] KLETZ T.A., AMYOTTE, P. Process Plants: A Handbook for Inherently Safer Design. 2. ed., Boca Raton, CRC Press, 2010.
- [26] OYEKUNLE L. O., SUSU A. A. High Temperature Thermal Stability Investigation of Paraffinic Oil. *Petroleum Science and Technology*, 23, 2, 2005, p.199-207.
- [27] SANCHES N. B., CASSU S. N., DUTRA R.C.L. TG/FT-IR Characterization of Additives Typically Employed in EPDM Formulations. *Polímeros*, 25, 3, 2015, p. 247-255.
- [28] TORRES A.A.U, D'ALMEIDA J.R.M., HABAS J.P. Avaliação do efeito de um óleo parafínico sobre o comportamento físico-químico de tubulação de polietileno de alta densidade. *Polímeros*, 20, 2010, p. 331-338.
- [29] VIGNAROUBAN K., XU X., ARVAY A., HSU K., KANNAN A.M. Heat transfer fluids for concentrating solar power systems - A review. *Applied Energy*, 146, 2015, p. 383–396.
- [30] WAGNER, W. Heat transfer technique with organic media. 2.ed., Gräfelfing : Resch, 1997.
- [31] WANG H., CAO Y., LI D., MUHAMMAD U., LI C., LI Z., ZHANG S. Catalytic hydrorefining of tar to liquid fuel over multi-metals (W-Mo-Ni) catalysts. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5, 2013, p. 053114-1-12.
- [32] WRIGHT C.I. Thermal heat transfer fluid problems following a system flush with caustic and water. *Case Studies in Thermal Engineering*, v.2, 2014, p.91-94.
- [33] WRIGHT C. I., BEMBRIDGE T., PICOT E., PREMEL J. Food processing: the use of non-fouling food grade heat transfer fluids. *Applied Thermal Engineering*, 84, 2015, p. 94-103.
- [34] WRIGHT C. I., PICOT E., BEMBRIDGE, T. The relationship between the condition of a mineral-based heat transfer fluid and frequency that it is sampled and chemically analyzed. *Applied Thermal Engineering*, vol. 75, 2015, p. 918-922.

ISBN: 978-65-86127-18-8

**BR**



9 786586 127188