

Fábio Beckmann de Almeida Neves

**Estudo da viabilidade técnica da utilização de
nanofluidos em sistemas de trigerção**

Projeto de Graduação

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Rio de Janeiro
Junho de 2016

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Fábio Beckmann de Almeida Neves

**Estudo da viabilidade técnica da utilização de nanofluidos
em sistemas de trigeriação**

Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica

Trabalho apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. José Alberto dos Reis Parise

Rio de Janeiro
Junho de 2016

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer ao meu orientador e amigo Prof. José Alberto dos Reis Parise, pelos ensinamentos que foram muito além do âmbito acadêmico. Pela sua disponibilidade e dedicação integral na elaboração deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, irmão e irmã, por todo incentivo e disposição em ajudar.

Agradeço a minha namorada Paula Laureano, por trazer emoção nas minhas racionais decisões, e por me surpreender positivamente em todas as etapas da vida. Amo você.

Um agradecimento especial aos meus amigos de faculdade, principalmente à Kim Oliveira, que esteve sempre presente em todos os momentos dessa longa jornada.

Resumo

Neves, Fábio Beckmann de Almeida. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de nanofluidos em sistemas de trigerção**. Rio de Janeiro, 2016. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Vivemos em um século em que pesquisas estão direcionadas para atender demandas mundiais em reduzir as emissões de gases poluentes e também por desenvolver sistemas e processos mais eficientes que gerem custos menores e que sejam autossustentáveis. Tal cenário motivou o presente trabalho, que propõe o estudo de substituir fluidos comuns por seus equivalentes nanofluidos em sistemas de trigerção.

Aplica-se a substituição dos fluidos base pelos nanofluidos na arquitetura de trigerção com chiller de compressão de vapor, com as demandas de eletricidade, aquecimento e refrigeração de um centro comercial em Hong Kong. Foi utilizada, para melhor compreensão, a análise energética baseada no cálculo de EUF “*energy utilization factor*”, um dos parâmetros de estudo disponíveis na literatura para avaliar a performance desse tipo de sistema.

Ao analisar a viabilidade técnica, verifica-se a eficácia dessa substituição pelo fato de o consumo primário de combustível ter reduzido, além de menores emissões de gases poluentes, conjuntamente a algumas melhorias referentes ao motor de combustão interna, como tempo de ignição menor.

Palavras-chave

Trigerção; nanopartícula; nanolubrificantes; nanocombustíveis; nanofluidos.

Abstract

Neves, Fábio Beckmann de Almeida. **Study of technical viability of using nanofluids in trigeneration system**. Rio de Janeiro, 2016. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nowadays most researches aspire to both attend the international demand for green house gas emissions reduction and to develop systems and processes that are energetically efficient and cause less environmental impact. In this respect, this paper put forward the study of the replacement of base fluids by nanofluids in trigeneration systems.

The replacement of base fluids by nanofluids is applied in a trigeneration architecture with vapor compression chiller, with the demands of electricity, refrigeration and heating of a commercial complex in Hong Kong. In order to have a better understanding, the energy balance calculations are based on the EUF “energy utilization factor”, one of the parameters available in the literature to evaluate the performance of that system.

Finally, the analysis of the viability of the project confirmed the efficacy of this replacement because the amount of primary fuel consumption was reduced. Likewise lower gas emissions, along with some improvements for the internal combustion engine, such as lower ignition delay.

Keywords

Trigeneration; nanoparticles; nanolubricants; nanofuels; nanofluids.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivo	9
1.2 Cogeração e trigeriação	9
1.3 Nanofluido	10
1.3.1 Nanolubrificantes.....	12
1.3.2. Nanocombustíveis	12
1.4 Organização do trabalho	13
2. Referencial teórico	14
2.1 Trigeriação com chiller de compressão a vapor	14
2.2 Componentes do sistema	15
2.2.1 Motor de combustão interna.....	15
2.2.2 Geradores	16
2.2.3 Chiller de compressão de vapor.....	16
2.2.4 Caldeira	17
2.3 Fabricação das nanopartículas	17
2.3.1 Nanocombustíveis	17
2.3.2 Nanolubrificantes.....	17
3. Estudo de Caso - Centro comercial em Hong Kong	19
4. Modelo matemático	20
4.1 Trigeriação com chiller de compressão a vapor	20
4.2 Parâmetros	21
4.2.1 Padrão.....	21
4.2.2 Com utilização do nanofluido.....	21
4.2.2.1 Efetividade	21
4.2.2.2 Coeficiente de Performance	25
5. Resultados	27
5.1 Motor de combustão interna	27
5.1.1 Nanocombustível.....	27
5.1.1.1 Ignição do motor	27
5.1.1.2 Torque e Força do motor	29
5.1.1.3 Consumo de combustível.....	30
5.1.1.4 Emissões.....	32
5.1.1.4.1 NOx (Óxido de nitrogênio)	32
5.1.1.4.2 HC (Hidrocarbonetos)	33
5.1.1.4.3 CO (Monóxido de carbono)	34
5.1.1.4.4 CO2 (Dióxido de carbono)	35
5.1.2 Nanolubrificante.....	36
5.2 Global	37
5.2.1 Consumo de combustível.....	38
5.2.2 Fator de utilização de energia.....	38
6. Conclusões	40
7. Referências Bibliográficas	42

Lista de figuras

Figura 1 - Esquemas de sistemas de a) Cogeração e b) Trigerção	10
Figura 2- Número de publicações em "journal papers" sobre nanofluidos por ano. Fonte : web of Science	11
Figura 3 - Trigerção com chiller de compressor de vapor. Fonte: COELHO, 2014.	15
Figura 4 - Motor TCG 2020 V12 da MWM utilizado em plantas de cogeração. Fonte: MWM - Energy, Efficiency, Environment.....	16
Figura 5 - Demanda mensal esperada de um centro comercial em Hong Kong. Fonte: Lai e Hui, 2009	19
Figura 6 - Efetividade para o trocador de calor para diferentes frações volumétricas. Fonte: Nitsas et al (2016).....	24
Figura 7 - Incremento da efetividade para diferentes frações volumétricas. Fonte: Nitsas et al (2016).....	24
Figura 8 - Coeficiente de performance versus fluxo de massa do fluido secundário, para diferentes frações volumétricas e para uma temperatura interna de 35 °C. Fonte: Parise at al (2016).....	26
Figura 9 - Ignição de diesel puro, Al ₂ O ₃ /diesel e CuO/diesel para diferentes temperaturas. Fonte: Gumus at al (2016).....	27
Figura 10 – Variação no torque e força do motor em várias rotações para diesel puro, Al ₂ O ₃ /diesel e CuO/diesel. Fonte: Gumus at al (2016).....	29
Figura 11 - Consumo de combustível em várias rotações para diesel puro, Al ₂ O ₃ /diesel e CuO/diesel. Fonte: Gumus at al (2016).....	30
Figura 12 - Variação do consumo de combustível para diferentes cargas para diesel puro e TIO ₂ . Fonte: D'Silva at al (2015)	31
Figura 13 - Variação de emissões de NO _x em diferentes cargas para diesel puro e TIO ₂ . Fonte: D'Silva at al (2015)	32
Figura 14 - Variação nas emissões de HC em diferentes cargas para diesel puro e TIO ₂ . Fonte: D'Silva at al (2015)	33
Figura 15 - Variação de monóxido de carbono para diferentes cargas e para diesel puro e TIO ₂ . Fonte: D'Silva at al (2015)	34
Figura 16 - Variação de dióxido de carbono para diferentes cargas e para diesel puro e TIO ₂ . Fonte: D'Silva at al (2015)	35
Figura 17 - Medida de concentração de CO, HC e NO em diferentes pontos do motor para o óleo base (azul) e para o óleo com nanolubrificante (vermelho) em várias temperaturas de resfriamento da água (40 °C, 60 °C, 80 °C e 95°C, do escuro para o claro). Fonte: Castillo et al (2014).....	36
Figura 18 - Consumo de combustível em taxa de energia por mês para sistemas sem nanofluido e com nanofluido – complexo comercial em Hong Kong. Fonte: elaborado pelo autor	38

Figura 19 - EUF por mês para sistemas sem nanofluido e com nanofluido – complexo comercial em Hong Kong. Fonte: elaborado pelo autor 39

Lista de tabelas

Tabela 1 - Condutividade Térmica de líquidos e sólidos a 298 K. Fonte: Engineering toolBox 12

1. INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo estudar a viabilidade da utilização de nanofluidos (nano-óleos e nanocombustíveis) em sistemas de trigerção e cogeração. Será realizada uma pesquisa bibliográfica e serão mostrados os resultados mais recentes obtidos com a substituição dos fluidos base por nanolubrificantes e nanocombustíveis.

Trata-se de uma análise preliminar, porém inédita, do desempenho de sistemas de trigerção operado com nanofluidos, análise esta baseada em resultados específicos dispostos na literatura.

1.2 Cogeração e trigerção

Cogeração é a geração de dois produtos finais a partir da mesma fonte de energia (combustível). Em outras palavras, é a produção simultânea de energia elétrica e térmica a partir da energia da queima do combustível. Esses combustíveis são preferencialmente carvão, gás natural, energia solar, material nuclear e geotérmica. A trigerção, que será o objeto de estudo do presente trabalho, se dá pela produção simultânea de eletricidade e energia térmica, com a adição de produção de frio, para atender às demandas de refrigeração, Figura 1.

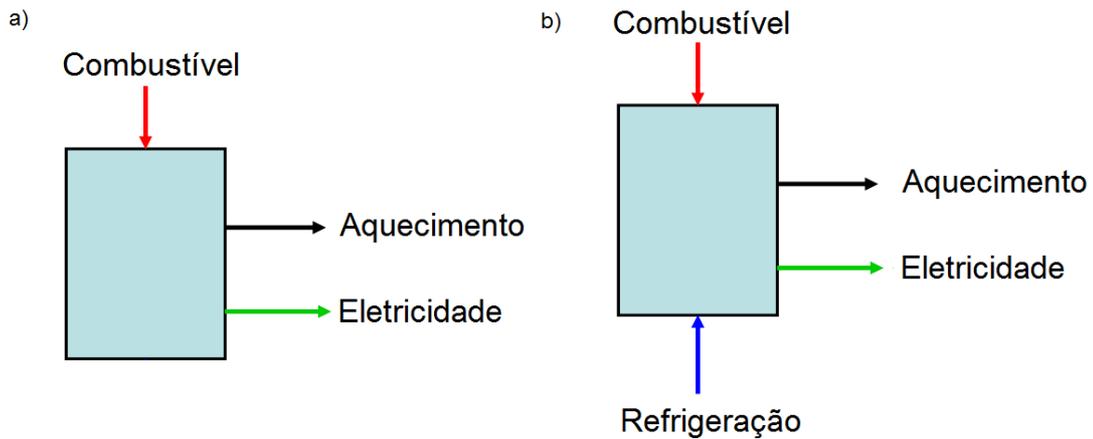


Figura 1 - Esquemas de sistemas de a) Cogeração e b) Trieração

1.3 Nanofluido

No âmbito de pesquisas e estudos sobre nanopartículas, *Choi* (1995) foi o precursor e também o responsável pela invenção do termo `Nanofluidos`. Geralmente, este tipo de fluido se dá pela inserção de partículas sólidas suspensas com média de tamanho de 1-100 nm (*Yu et al*, 2011) em fluidos base, como água, óleo e etileno glicol. Os nanofluidos têm várias propriedades únicas que fazem com que apresente potencial utilização em várias aplicações. Entre outras aplicações, os nanofluidos são utilizados como fluidos de resfriamento em trocadores de calor. Estes são usados para controlar a temperatura de um sistema ou substância, valendo-se da adição ou remoção de energia térmica.

Pesquisas sobre aplicações em nanofluidos vem crescendo intensamente nos últimos anos, como é mostrado na Figura 2, abaixo:

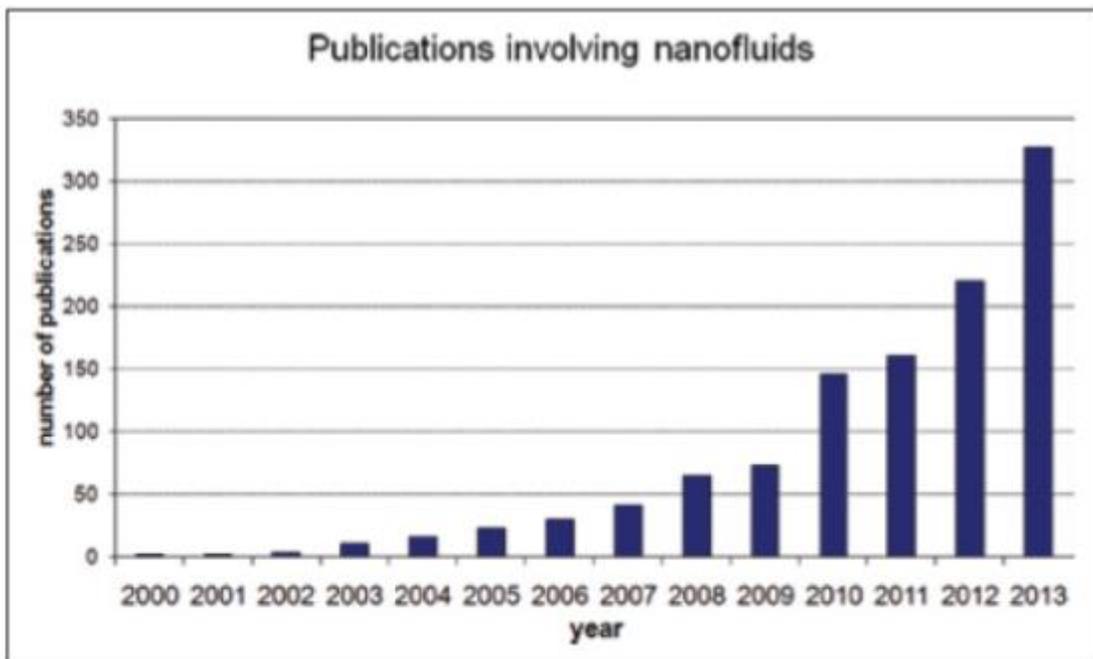


Figura 2- Número de publicações em "journal papers" sobre nanofluidos por ano. Fonte : web of Science

Esse crescimento no número de trabalhos publicados é entendido, quando percebemos que a maneira mais convencional para melhorar a taxa de transferência de calor é utilizando um aumento da área de troca do equipamento. Mas como em muitos casos isso não é possível, ou por problemas de limitação de espaço ou simplesmente pelo aumento do consumo de energia, a busca por alternativas desse problema tem se evidenciado. Para sanar esse obstáculo, estão sendo feitas pesquisas sobre fluidos térmicos que apresentem maiores condutividades térmicas. Esses fluidos caracterizam-se por apresentarem propriedades termodinâmicas favoráveis, como baixo impacto ambiental, serem não inflamáveis, compatíveis com matérias, terem boa estabilidade química e baixa toxicidade.

Sabe-se que metais sólidos possuem alta condutividade térmica quando comparados aos fluidos. Por esse fato, é esperado que ao se utilizar fluidos com partículas sólidas suspensas, sua condutividade térmica efetiva, entre outros pontos, seja superior à do fluido base, Tabela 1.

	Material	Condutividade Térmica (W/m K)
Sólidos	Prata	426
	Cobre	398
	Alumínio	237
	Ferro	80,3
Líquidos	Água	0,61
	Sódio (398K)	86
	Mercúrio	8,3

Tabela 1 - Condutividade Térmica de líquidos e sólidos a 298 K. Fonte: Engineering toolBox

1.3.1 Nanolubrificantes

Fluidos lubrificantes são usados em quase todos campos da atividade tecnológica humana e seu propósito é multiuso. Eles reduzem a resistência ao atrito, protegem a superfície de contato de máquinas contra desgaste, reduzem o calor e contribuem para seu resfriamento, e ainda promovem economia de combustível e redução de emissões. (Castillo et al (2014)).

Nanomateriais inovadores, aplicados a esses lubrificantes, mostraram que são muito promissores, já que alguns estudos (Rapoport (1999 e 2003) e Wang (2005)) mostram que contribuem para uma substancial redução no consumo de energia, reduzem a manutenção nos equipamentos e aumentam a vida útil das máquinas.

1.3.2. Nanocombustíveis

O esgotamento de combustíveis fósseis, aumento do preço dos combustíveis e questões ambientais, encorajaram engenheiros e cientistas a desenvolver alternativas para esses combustíveis e aprimorarem a eficiência dos sistemas. Com isso, metais aditivos (nanocombustíveis) começaram a ser produzidos e adicionados aos combustíveis com objetivo

de ampliar a eficiência e reduzir emissões. A adição desses metais promovem algumas melhorias, como: (i) diminuição do atraso da ignição, (ii) ação estabilizante e antioxidante, e (iii) ação como tensoativos (substâncias que diminuem a tensão superficial).

A redução da emissão de poluentes se dá por dois motivos. Inicialmente, os metais reagem com a água e produzem um radical de hidroxila, a qual melhora a oxidação da fuligem. Em segundo lugar, reagem diretamente com átomos de carbono na fuligem, diminuindo a temperatura de oxidação.

Essa preocupação de se diminuir a quantidade de poluentes, principalmente das partículas de diesel, se dá pela suspeita de que essas partículas podem penetrar e facilmente se instalar nos alvéolos pulmonares e causar sérios problemas de saúde. (*Lenin et al, 2013*)

1.4 Organização do trabalho

No capítulo 2 do presente trabalho é apresentado o referencial teórico utilizado. No capítulo 3, é descrito o estudo de caso que será aplicado. No capítulo 4, está presente o desenvolvimento matemático. No capítulo 5, chegamos aos resultados encontrados. Finalmente no capítulo 6 as conclusões são apresentadas.

2. Referencial teórico

2.1 Trigerção com chiller de compressão a vapor

Existem algumas arquiteturas possíveis de trigerção, entre as quais, a configuração de trigerção com chiller de compressão a vapor será a analisada no presente trabalho. Nesta arquitetura (Figura 3), o calor disponível tanto na água de arrefecimento, α_{ec} , quanto nos gases de exaustão do motor, α_{ex} , como também o calor rejeitado pelo condensador do chiller de compressão de vapor, \dot{Q}_{cd} , todos são utilizados integralmente para suprir as demandas de aquecimento. Cada parcela de calor rejeitado tem um trocador de calor respectivo, pois são eles que realizarão a recuperação desses rejeitos. As efetividades dos trocadores para arrefecimento, exaustão e rejeito do condensador do chiller, são ε_{ec} , ε_{ex} e ε_{cd} , respectivamente. A caldeira (boiler) só será utilizada caso o calor recuperado não seja suficiente para atender à demanda de aquecimento. Se isto acontecer, acarretará em queima de combustível adicional.

A demanda de refrigeração será totalmente atendida pelo chiller de compressão de vapor, que será acionado pela energia elétrica produzida no gerador.

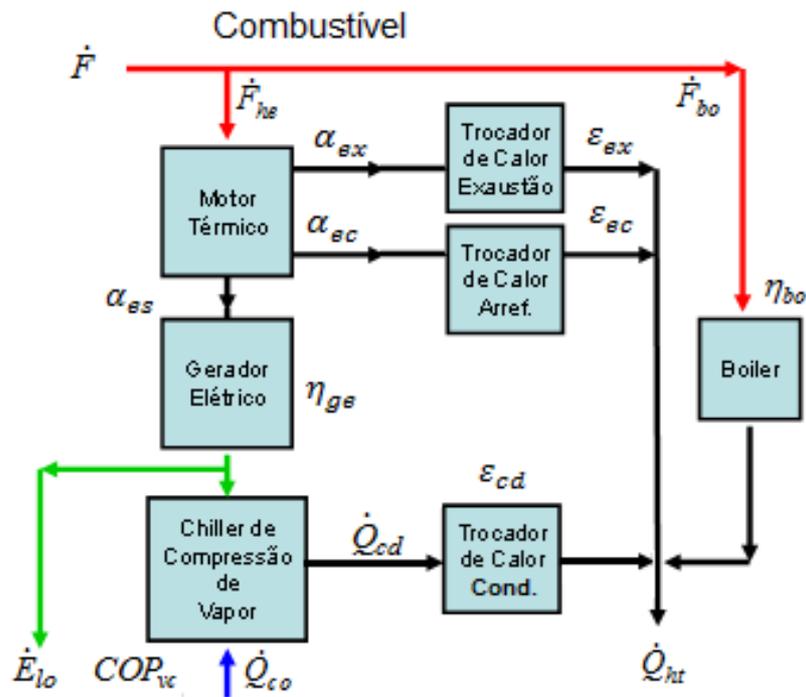


Figura 3 - Trigeração com chiller de compressor de vapor. Fonte: COELHO, 2014.

2.2 Componentes do sistema

2.2.1 Motor de combustão interna

O motor de combustão interna é uma máquina que promove a transformação da energia química do combustível em: i) energia térmica (por meio das perdas relativas ao processo), ii) potência do eixo. É sabido que toda máquina térmica não apresenta rendimento de 100%. Isto faz com que a energia proveniente do combustível seja aplicada em diferentes partes, tais como: arrefecimento da jaqueta, troca de calor com óleo lubrificante, potência de eixo do motor, entre outras.

Devido a esta distribuição de energia, é possível gerar água quente para atender uma demanda de aquecimento. Temos que os gases de exaustão de motores de combustão interna podem atingir temperaturas em torno de 500 °C e que a temperatura da água utilizada para

resfriamento da jaqueta do motor e de seu óleo de lubrificação podem atingir em média 90 °C e 55 °C, respectivamente. (Ashrae, 2000).



Figura 4 - Motor TCG 2020 V12 da MWM utilizado em plantas de cogeração. Fonte: MWM - Energy, Efficiency, Environment

2.2.2 Geradores

São equipamentos que produzem energia elétrica a partir de uma fonte de energia mecânica. No presente caso, a máquina de acionamento será o motor de combustão interna. A energia elétrica criada será utilizada tanto para acionar o chiller de compressão de vapor, quanto para atender à demanda de eletricidade.

2.2.3 Chiller de compressão de vapor

Os chillers de compressão de vapor promovem a troca de calor entre a fonte quente (meio externo) e a fonte fria (fluido refrigerante na fase líquida passando pelo evaporador) para atender à demanda de refrigeração.

2.2.4 Caldeira

A caldeira, do inglês “boiler”, é um equipamento no qual ocorre uma troca de calor gerado a partir de fontes de energia térmica (no presente caso combustíveis) para um fluido (água ou óleo). A caldeira será utilizada quando o calor recuperado pelos trocadores de calor não for suficiente para atender à demanda de aquecimento.

2.3 Fabricação das nanopartículas

2.3.1 Nanocombustíveis

A estabilidade das partículas em suspensão é crucial para as pesquisas e aplicações práticas. Em recente trabalho, (Gumus et al, 2016) indicaram a produção de dois tipos de nanocombustíveis, um deles o CuO (com partículas entre 30 e 50 nanômetros) e outro Al_2O_3 (com partículas entre 27 e 42 nanômetros). A produção destes se dá primeiramente pela mistura direta do combustível, como fluido base, e as nanopartículas e, em seguida, pela aplicação de ultrassom por uma hora numa frequência de 40Hz.

Lenin et al (2013), por exemplo, propuseram dois métodos de preparo em seu estudo. Um deles é chamado de método “Sol-gel” e o outro de “*powder mixing*”. O custo de produção do nanopowder é bem maior que os convencionais, por isso ele não é usado. Em seu trabalho, os autores exemplificam toda metodologia de preparo desses métodos.

2.3.2 Nanolubrificantes

Um importante fator para aplicar nanopartículas em óleos lubrificantes é a compatibilidade com os substratos que aparecem no pós-tratamento. Marcano et al (2014) focaram seu estudo em nanopartículas de MoS_2 . Foi desenvolvido por eles uma técnica de preparo que tem um processo mais simples e com custo menor de reagentes, pois não utiliza

reações complexas na produção, essa técnica se dá pela preparação de uma solução aquosa de molibdênio que facilita a produção do MoS_2 .

3. Estudo de Caso - Centro comercial em Hong Kong

Usou-se, no presente trabalho, as demandas reais de um centro comercial em Hong Kong como estudo de caso. Seus valores de referência foram disponibilizados pela literatura

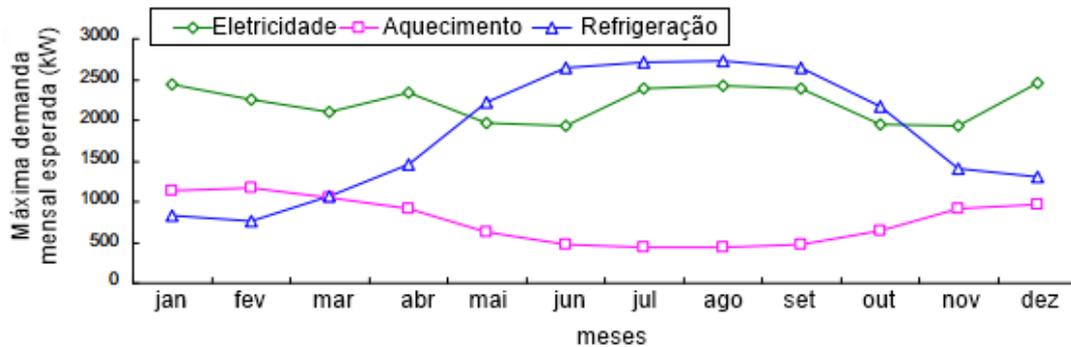


Figura 5 - Demanda mensal esperada de um centro comercial em Hong Kong. Fonte: Lai e Hui, 2009

A Figura 5 ilustra as demandas de aquecimento, refrigeração e eletricidade que variam ao longo de 12 meses. Pode-se notar que a demanda de refrigeração é alta no verão (de maio a outubro) e baixa no inverno (novembro a abril). Também é percebido que a demanda de eletricidade (refrigeração excluída) não tem relação com as mudanças de temperatura sazonais. Essas demandas serão utilizadas para chegarmos a um resultado sobre a utilização do nanofluido.

4. Modelo matemático

Efetua-se o cálculo da taxa de consumo de energia primária (combustível) para o estudo de caso descrito anteriormente, a partir das demandas previamente divididas em demandas distintas de eletricidade, aquecimento e refrigeração.

São definidos os parâmetros de desempenho energético do sistema, i) padrão (sem aplicação das nanopartículas) e ii) com aplicação do nanofluido. Eles servirão para analisar se a aplicação do nanofluido é adequada ou não (motivo do desenvolvimento do presente trabalho).

4.1 Trigeração com chiller de compressão a vapor

A taxa de consumo de energia primária nesta arquitetura, \dot{F} , é igual à soma dos consumos do motor térmico, \dot{F}_{he} , e do sistema de aquecimento, \dot{F}_{bo} . Se a demanda de aquecimento for menor que o calor recuperado pelos trocadores instalados, $\dot{Q}_{ht,rec}$, esta taxa de consumo se torna nula.

Segundo Coelho (2014) a taxa de consumo total de combustível é, portanto:

$$\dot{F} = \dot{F}_{he} + \dot{F}_{bo} \quad (1)$$

onde:

$$\dot{F}_{he} = \left(\dot{E}_{lo} + \frac{\dot{Q}_{co}}{COP_{vc}} \right) \frac{1}{\eta_{ge} \alpha_{es}} \quad (2)$$

É natural, em alguns estudos, encontrar o produto $\eta_{ge}\alpha_{es}$ escrito como η_{pgu} , que é a eficiência do gerador elétrico e motor.

$$\dot{Q}_{ht,rec} = \dot{F}_{he}(\alpha_{ec}\varepsilon_{ec} + \alpha_{ex}\varepsilon_{ex}) + \dot{Q}_{co}\left(1 + \frac{1}{COP_{vc}}\right)\varepsilon_{cd} \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_{ht} \leq \dot{Q}_{ht,rec} \rightarrow \dot{F}_{bo} = 0 \\ \dot{Q}_{ht} > \dot{Q}_{ht,rec} \rightarrow \dot{F}_{bo} = \frac{\dot{Q}_{ht} - \dot{Q}_{ht,rec}}{\eta_{bo}} \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left. \begin{array}{l} \dot{Q}_{ht} > \dot{Q}_{ht,rec} \rightarrow \dot{F}_{bo} = \frac{\dot{Q}_{ht} - \dot{Q}_{ht,rec}}{\eta_{bo}} \end{array} \right\} \quad (5)$$

4.2 Parâmetros

4.2.1 Padrão

Após pesquisas bibliográficas (J. Wang (2014) , Li (2013) e Handbook of heat transfer applications), foram utilizados os seguintes dados característicos do sistema:

- $\alpha_{ec} = 0,33$
- $\alpha_{ex} = 0,25$
- $\varepsilon_{ec} = 0,8$
- $\varepsilon_{ex} = 0,8$
- $\varepsilon_{cd} = 0,8$
- $\eta_{pgu} = 0,24$
- $COP_{vc} = 4$

4.2.2 Com utilização do nanofluido

4.2.2.1 Efetividade

Segundo o Incropera (2001), a efetividade pode ser expressa como:

$$\epsilon = 1 - \exp(-NTU) \quad (6)$$

ou

$$NTU = -\ln(1-\epsilon) \quad (7)$$

Expressando a Eq 6, para o nanofluido e para o fluido base, surge a razão NTU_{nf}/NTU_f .

Com isso, tem-se a equação a seguir:

$$\epsilon_{nf} = 1 - (1 - \epsilon_f)^{\frac{NTU_{nf}}{NTU_f}} \quad (8)$$

Considerando a definição de Number of Transfer Units (NTU), e assumindo que a adição de nanopartículas não altera substancialmente o fluxo de massa, a razão NTU_{nf}/NTU_f , pode ser escrita como:

$$\frac{NTU_{nf}}{NTU_f} = \left(\frac{\varphi}{1 - \varphi} \gamma + 1 \right) \cdot \frac{U_{nf}}{U_f} \quad (9)$$

Sendo:

U	Coefficiente de transferência de calor global
φ	Fração volumétrica de nanopartículas
γ	Razão entre a densidade da nanopartícula e fluido base

Com o objetivo de encontrarmos o coeficiente de transferência de calor global, encontrado na equação (9), foi implementado o procedimento que se segue:

$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{h_A} + \frac{1}{h_f} \quad (10)$$

Na eq. (10), a variável A se refere ao fluxo que flui na parte de fora do tubo e f para o fluxo do fluido base que flui internamente do tubo.

O coeficiente de transferência de calor global para o nanofluido segue da mesma forma:

$$\frac{1}{U_{nf}} = \frac{1}{h_A} + \frac{1}{h_{nf}} \quad (11)$$

Fazendo a substituição para obtermos a razão U_{nf}/U_f :

$$\frac{U_{nf}}{U_f} = 1 + \frac{U_{nf}}{h_{nf}} \left(\frac{h_{nf}}{h_f} - 1 \right) \quad (12)$$

Uma expressão mais simples é encontrada, quando assumimos que a resistência térmica convectiva é uma fração, chamada de α , do total de resistência térmica. Com isso:

$$\frac{U_{nf}}{U_f} = 1 + \alpha \cdot \left(\frac{h_{nf}}{h_f} - 1 \right) \quad (13)$$

Combinando as Equações (8), (9) e (12), conseguimos chegar a uma expressão final para a efetividade do trocador de calor com nanofluido.

$$\epsilon_{nf} = 1 - (1 - \epsilon_f)^{\left(\frac{\varphi}{1-\varphi} \gamma + 1 \right) \cdot \left[1 + \left(\alpha \cdot \left(\frac{h_{nf}}{h_f} - 1 \right) \right) \right]} \quad (11)$$

Com a equação em questão, Nitsas et al (2016) realizaram testes e chegaram a resultados para a efetividade do trocador com o nanofluido.

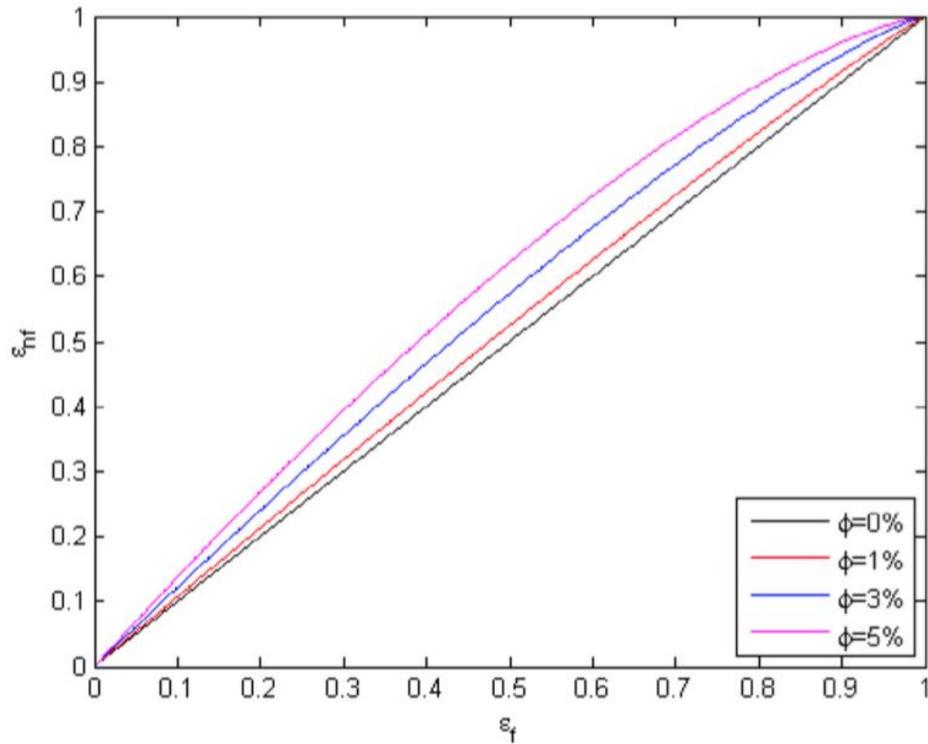


Figura 6 - Efetividade para o trocador de calor para diferentes frações volumétricas. Fonte: Nitsas et al (2016)

A Figura 6 nos mostra a efetividade do trocador de calor quando o nanofluido é aplicado, mesmo para a mais baixa fração volumétrica, a efetividade é mais elevada.

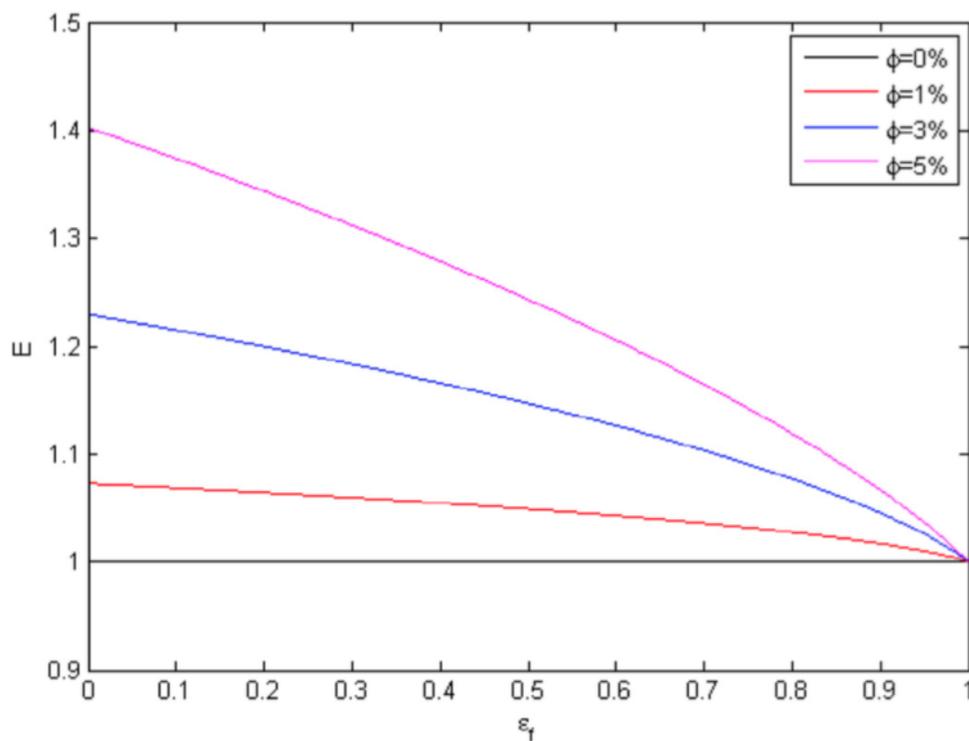


Figura 7 - Incremento da efetividade para diferentes frações volumétricas. Fonte: Nitsas et al (2016)

A Figura 7 demonstra os benefícios para a utilização do nanofluido em trocadores de calor em questão da efetividade. Para qualquer efetividade do fluido base, observou-se melhorias.

Para o caso do estudo em questão, entrando no gráfico com a efetividade padrão sendo 0,8 como mostrado anteriormente, conseguiremos encontrar as novas efetividades para os trocadores, como abaixo:

- $\varepsilon_{ec,nf} = 0,917$
- $\varepsilon_{ex,nf} = 0.917$
- $\varepsilon_{cd,nf} = 0.917$

4.2.2.2 Coeficiente de Performance

Parise et al (2016), realizaram procedimentos experimentais utilizando SWCNT-water (single walled carbono nanotube) como nanofluido. Os testes foram realizados com o aparelho experimental operando para diferentes faixas de frações volumétricas de nanopartículas (0 até 0,21%), bem como para fluxos de massa de 40 a 80 g/s.

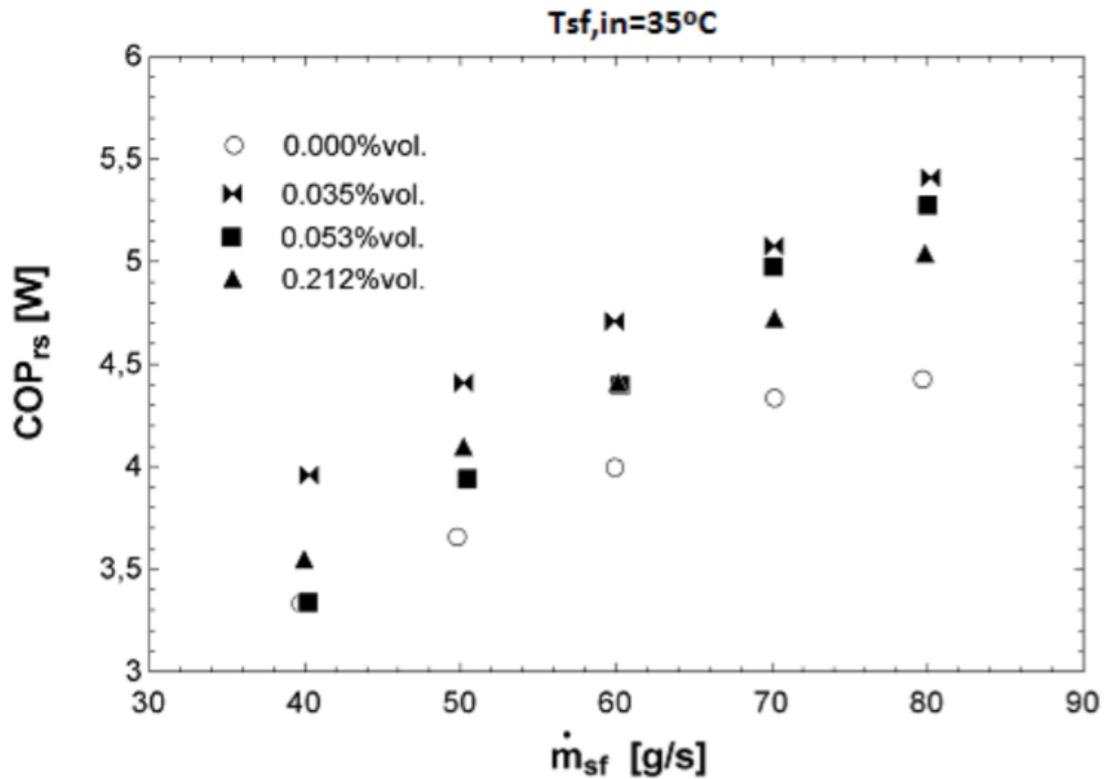


Figura 8 - Coeficiente de performance versus fluxo de massa do fluido secundário, para diferentes frações volumétricas e para uma temperatura interna de 35 °C. Fonte: Parise et al (2016)

Pela Figura 8, vemos que o coeficiente de performance é incrementado em todas as concentrações de nanofluido para todos os fluxos de massa. Com o gráfico acima, podemos chegar ao coeficiente de performance para o nanofluido. Temos que o coeficiente de performance sem a utilização do nanofluido é quatro, então, para um fluxo de massa de 60 g/s e para uma concentração de nanofluido média de 0.212%, temos que:

- $COP_{vc,nf} = 4,45$

5. Resultados

Nesta seção, primeiramente, apresentam-se os resultados da aplicação de nanocombustíveis e nanolubrificantes no motor de combustão interna, e em seguida reúne-se as alterações de parâmetros já apresentadas anteriormente para concluirmos sobre a viabilidade do sistema proposto.

5.1 Motor de combustão interna

5.1.1 Nanocombustível

5.1.1.1 Ignição do motor

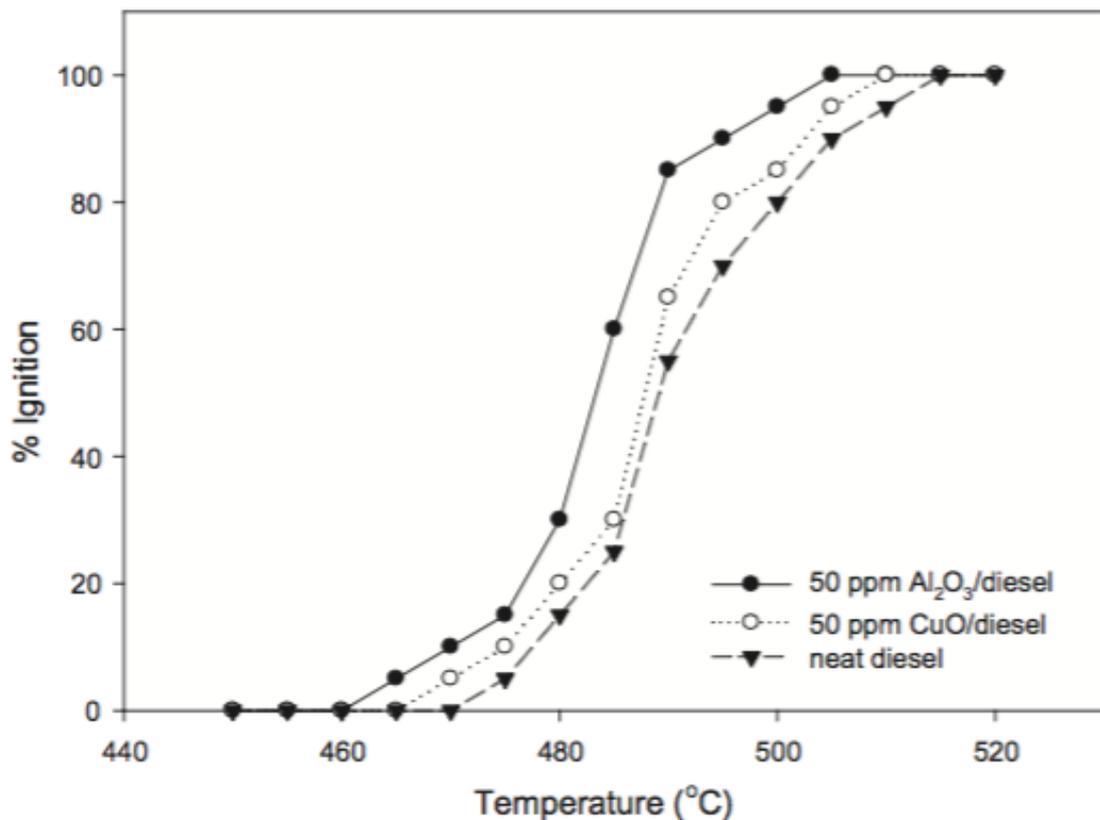


Figura 9 - Ignição de diesel puro, Al_2O_3 /diesel e CuO /diesel para diferentes temperaturas. Fonte: Gumus et al (2016)

A Figura 9 mostra as curvas de ignição de diesel puro, Al_2O_3 /diesel e CuO/diesel nanodiesel. Para o diesel puro, em temperaturas abaixo de 475 °C é observado ignição de 0%, e em temperaturas acima de 575 °C ignição de 100%. Para Al_2O_3 /diesel e CuO/diesel, 0-100% de ignição está entre 455 e 510 °C, o que indica que a temperatura de ignição (AITs – temperatura em que os combustíveis entram em combustão) desses nanocombustíveis reduz, comparado aos combustíveis comuns.

Comparando os dois nanocombustíveis, observamos que o AITs do CuO/diesel é ligeiramente maior que do Al_2O_3 /diesel, pois o CuO/diesel começa a ignição em 465 °C e atinge 100% em 505 °C (variação de 40 °C), enquanto Al_2O_3 /diesel inicia a ignição em 455 °C e atinge 100% em 510 °C (variação de 55 °C).

Com isso, Gumus et al (2016) mostraram evidências de que a ignição das misturas de combustível contendo nanopartículas é mais indicada do que as tradicionais de diesel puro. Esse resultado segue a linha de (Tyagi et al, 2008).

5.1.1.2 Torque e Força do motor

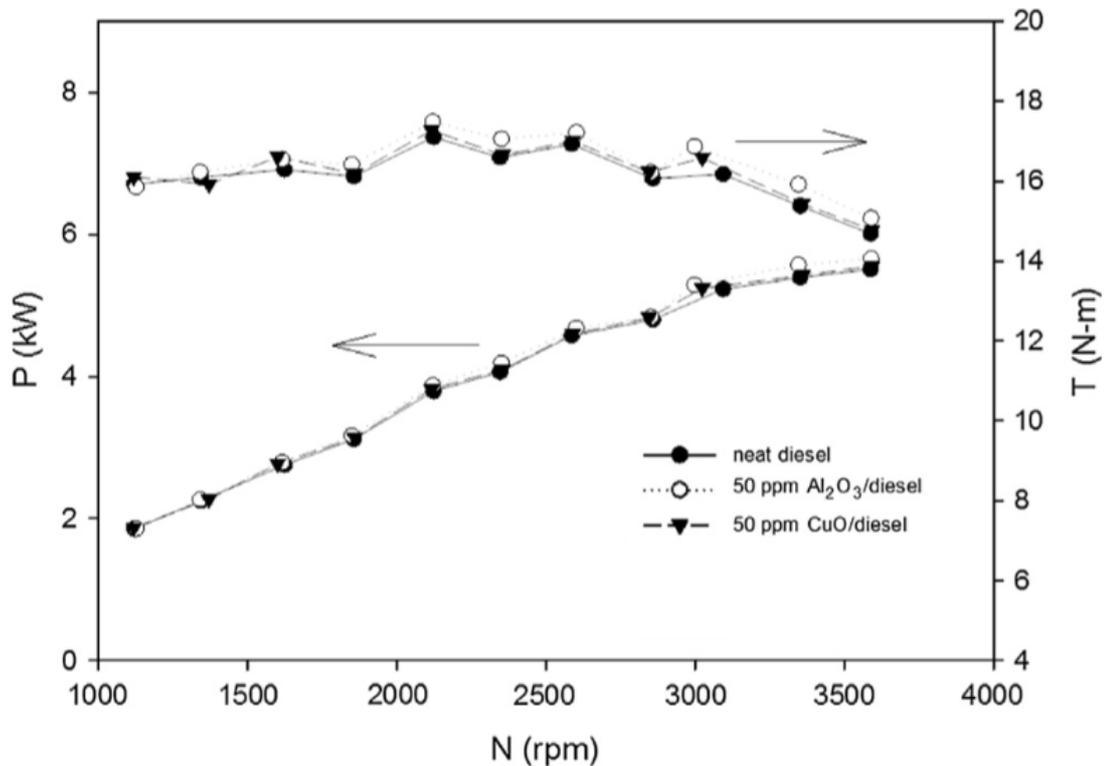


Figura 10 – Variação no torque e força do motor em várias rotações para diesel puro, Al_2O_3 /diesel e CuO/diesel. Fonte: Gumus et al (2016)

Gumus et al (2016), segundo a Figura 10, chegaram à conclusão de que para todos os combustíveis testados, a potência aumenta com o aumento da velocidade de rotação. E também que para as nanopartículas o aumento é ainda maior, principalmente para velocidades de rotação maiores. O maior aumento de torque, comparando com o diesel puro, é de 1% e 3,28% para CuO e Al_2O_3 , respectivamente. Esse resultado segue também o que Lenin et al (2013) encontraram.

5.1.1.3 Consumo de combustível

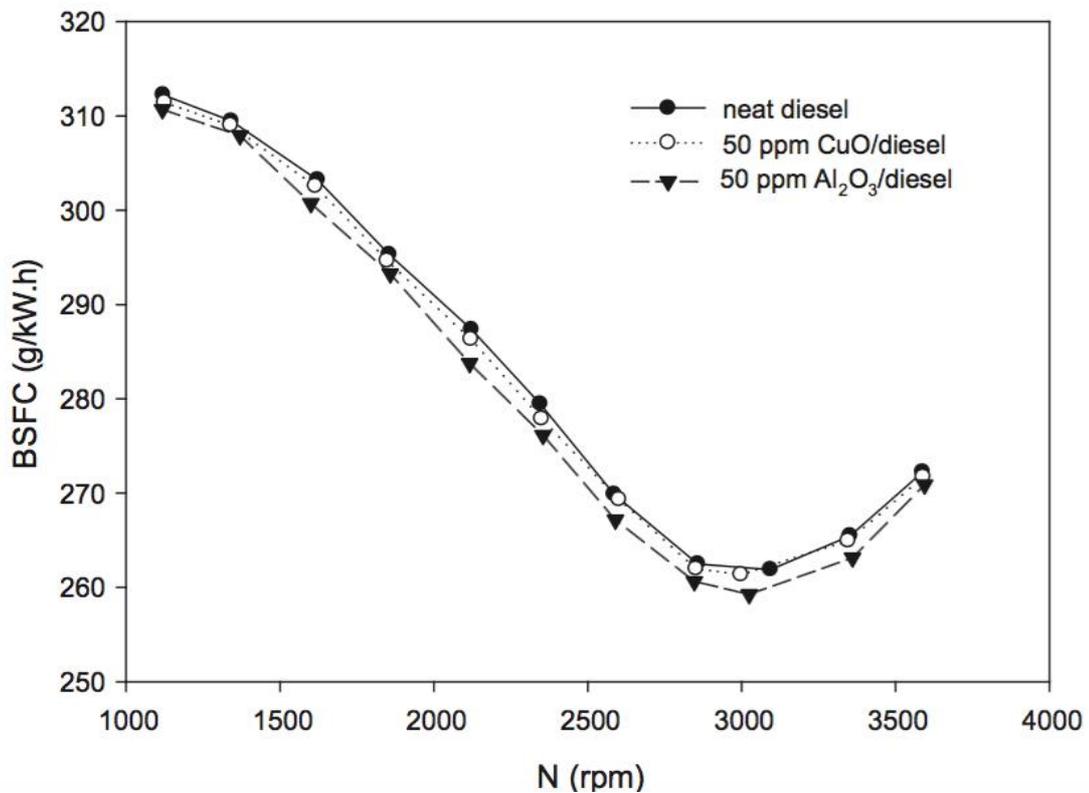


Figura 11 - Consumo de combustível em várias rotações para diesel puro, Al_2O_3 /diesel e CuO/diesel. Fonte: Gumus et al (2016)

Gumus et al (2016) mostram, na Figura 11, que o BSFC (consumo de combustível) da sigla em inglês (*Brake specific fuel consumption*) é menor para os nanocombustíveis em todas as rotações do motor. O BSFC é reduzido em até 0,5% com o CuO e até 1,2% com o Al_2O_3 . A maior presença de oxigênio e o efeito positivo das nanopartículas nas propriedades físicas do combustível, causam um aumento da eficiência da combustão, e isso gera uma redução do consumo de combustível.

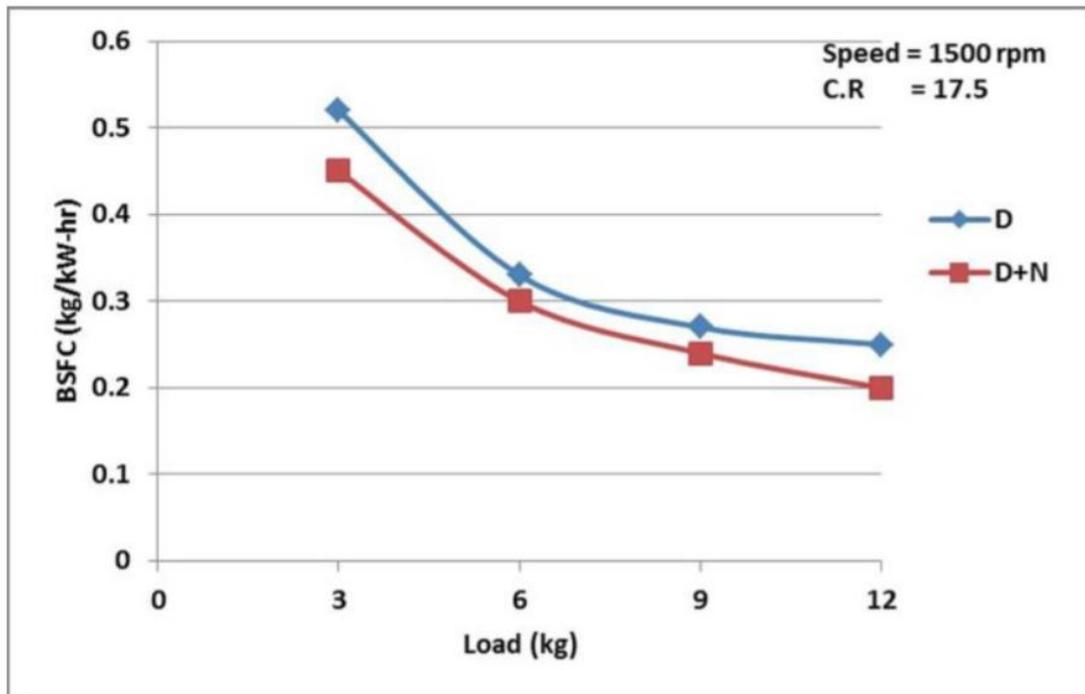


Figura 12 - Variação do consumo de combustível para diferentes cargas para diesel puro e TiO_2 . Fonte: D`Silva et al (2015)

A Figura 12, apresentada por D`Silva et al (2015), mostra a curva de consumo de diesel (D) e do Diesel com nanopartículas (D+N) para diferentes cargas. Para isso, os autores fixaram a rotação do motor em uma velocidade de 1500 rpm. D`Silva (2015) também chegou à conclusão de que o consumo de combustível é significativamente reduzido com a adição de nanopartículas ao combustível (neste caso nanopartículas de titânio, TiO_2). Na maior carga é verificada uma redução de 21,28% do BSFC comparando com o diesel puro. Isso se dá pela melhor mistura do ar e combustível, o que acarreta em uma melhor combustão.

5.1.1.4 Emissões

5.1.1.4.1 NO_x (Óxido de nitrogênio)

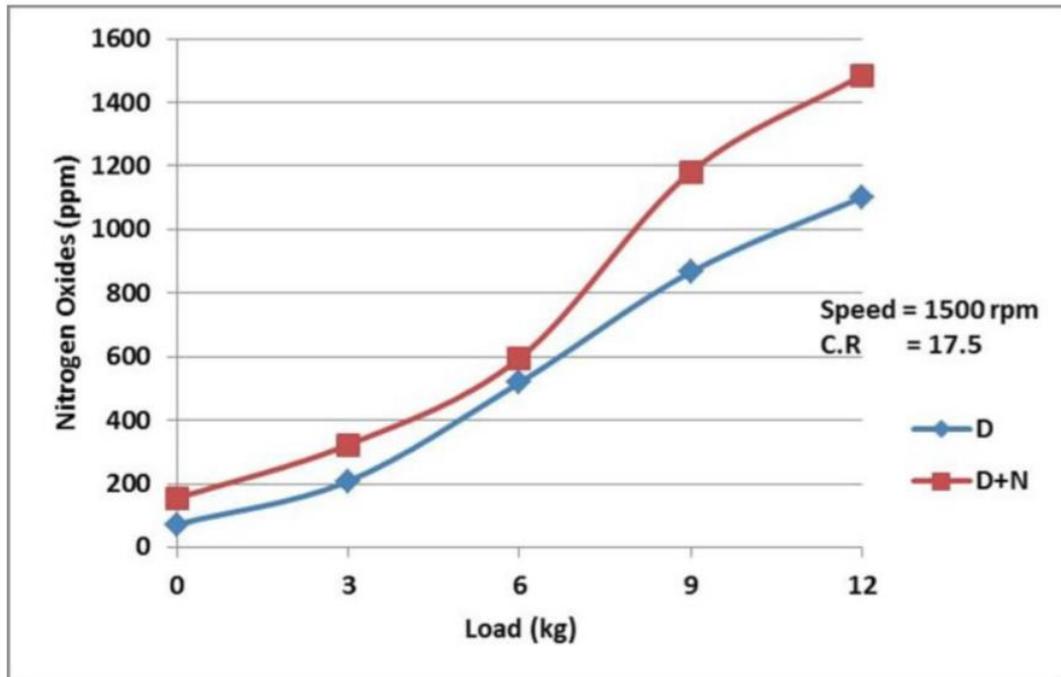


Figura 13 - Variação de emissões de NO_x em diferentes cargas para diesel puro e TIO₂. Fonte: D'Silva et al (2015)

D'Silva et al (2015), na Figura 13, mostram que, quanto maior a carga, maior é a emissão de NO_x, se mostrando como um prejuízo para a aplicação do nanofluido. Isso se dá devido ao aumento de temperatura nas maiores cargas. Altas temperaturas e a disponibilidade de oxigênio são as duas principais razões para a formação de NO_x, já que nitrogênio e oxigênio reagem em altas temperaturas. NO_x aumentou também pela melhor combustão. Pelo gráfico, na maior carga, o aumento de NO_x foi de 32,2%.

5.1.1.4.2 HC (Hidrocarbonetos)

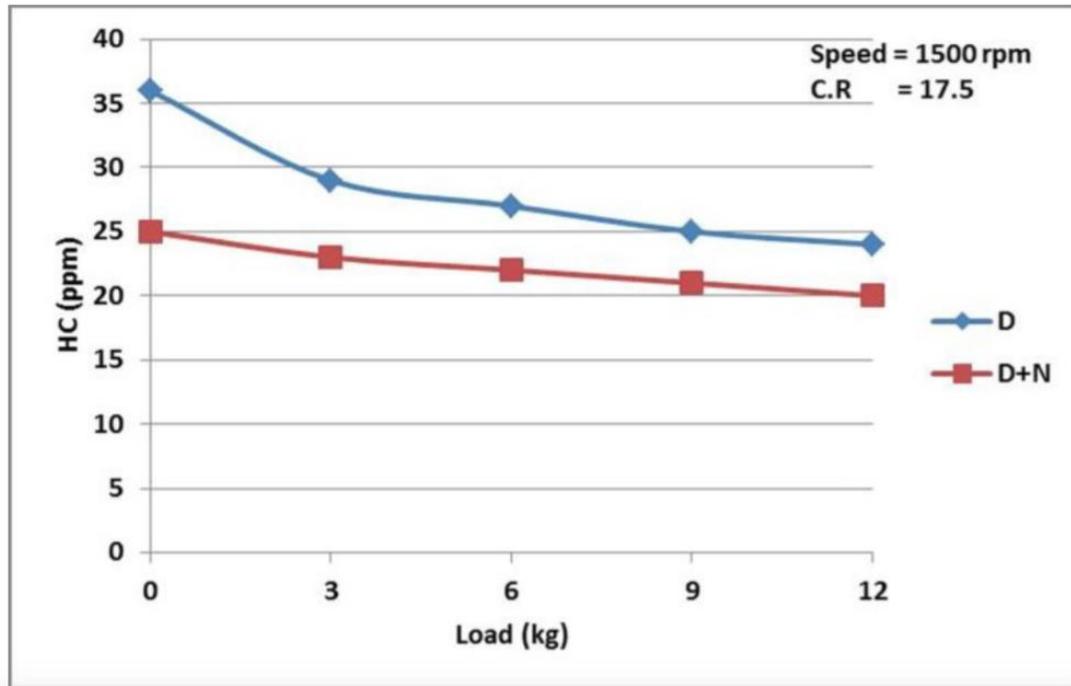


Figura 14 - Variação nas emissões de HC em diferentes cargas para diesel puro e TiO_2 . Fonte: D'Silva et al (2015)

Na Figura 14, D'Silva et al (2015) mostram que quanto maior for a carga, menores são as emissões de hidrocarbonetos. Podemos perceber também que as emissões de HC são menores com a adição de partículas do que com diesel puro. Uma redução de 18,36% é observada na maior carga. Segundo o autor o motivo para isso pode ser devido à nanopartícula melhorar a combustão nas regiões onde a combustão é extinta ("crevices").

5.1.1.4.3 CO (Monóxido de carbono)

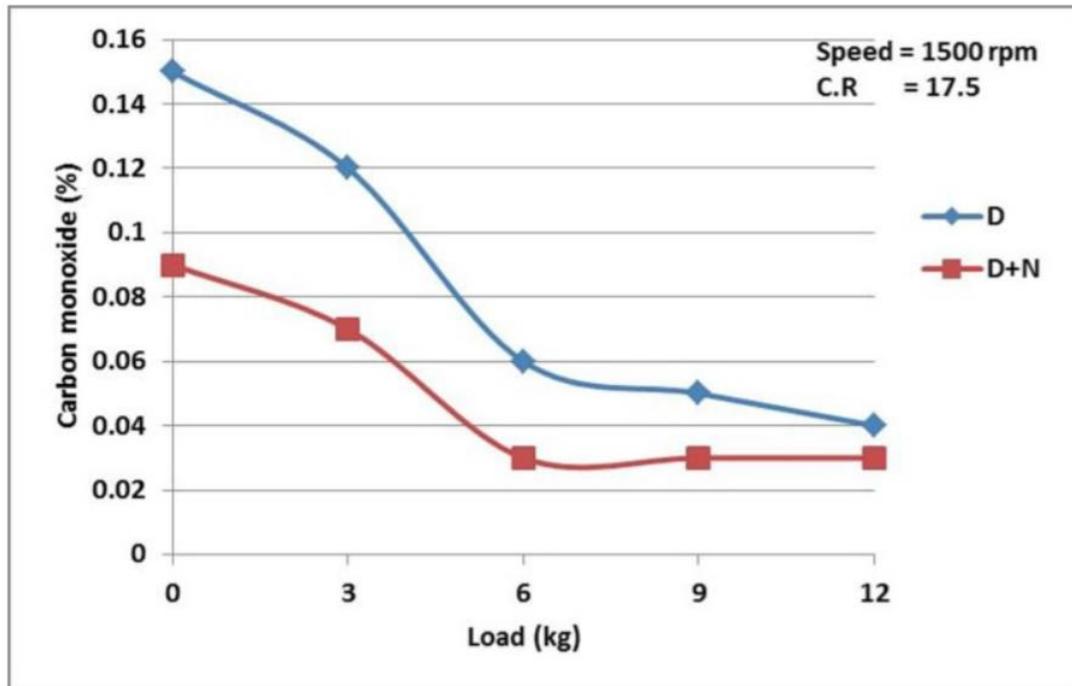


Figura 15 - Variação de monóxido de carbono para diferentes cargas e para diesel puro e TiO_2 . Fonte: D'Silva et al (2015)

D'Silva et al (2015) relataram na Figura 15, que, para aumentos de carga no motor, as emissões de CO reduzem. E o motivo já foi mencionado anteriormente, pois, quanto maior a carga, maior é a temperatura, logo melhor é a combustão. As emissões para o nanocombustível são menores do que com a utilização de diesel puro. Na maior carga é observada uma redução de 25% da emissão de CO.

5.1.1.4.4 CO₂ (Dióxido de carbono)

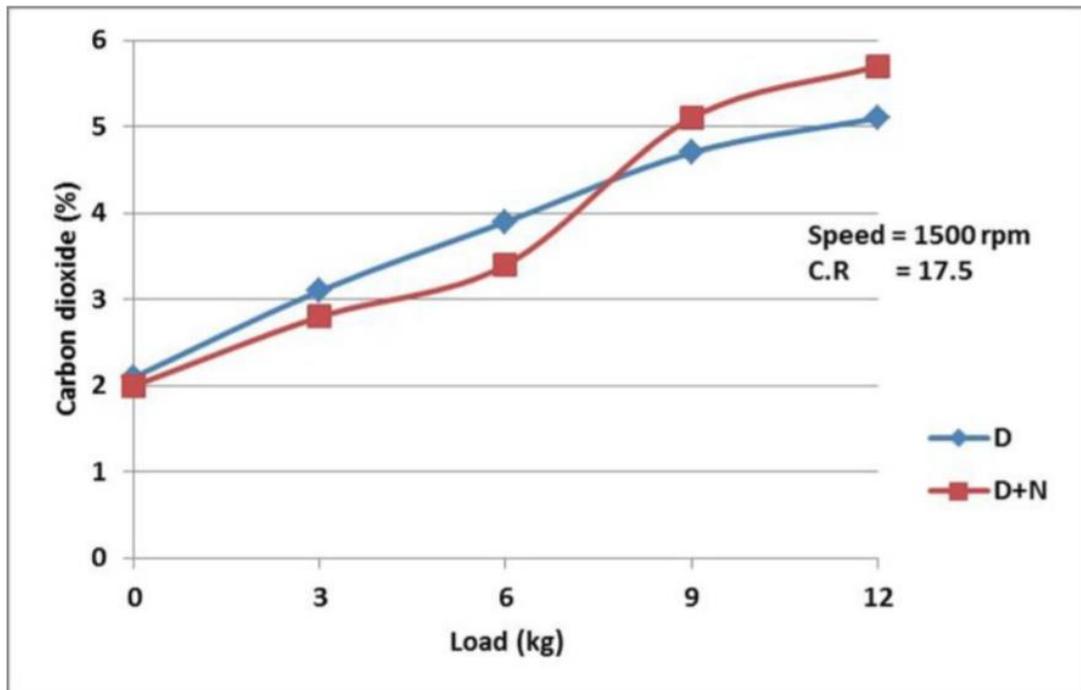


Figura 16 - Variação de dióxido de carbono para diferentes cargas e para diesel puro e TiO_2 . Fonte: D'Silva et al (2015)

D'Silva et al (2015), na Figura 16, observaram que para maiores cargas, maior é a emissão de CO₂. Um fato interessante ocorreu nesse caso. Nas menores cargas, a emissão é maior para o diesel puro, mas para cargas maiores a emissão do nanocombustível é bem superior. Na maior carga, o aumento de emissão é de 16%.

5.1.2 Nanolubrificante

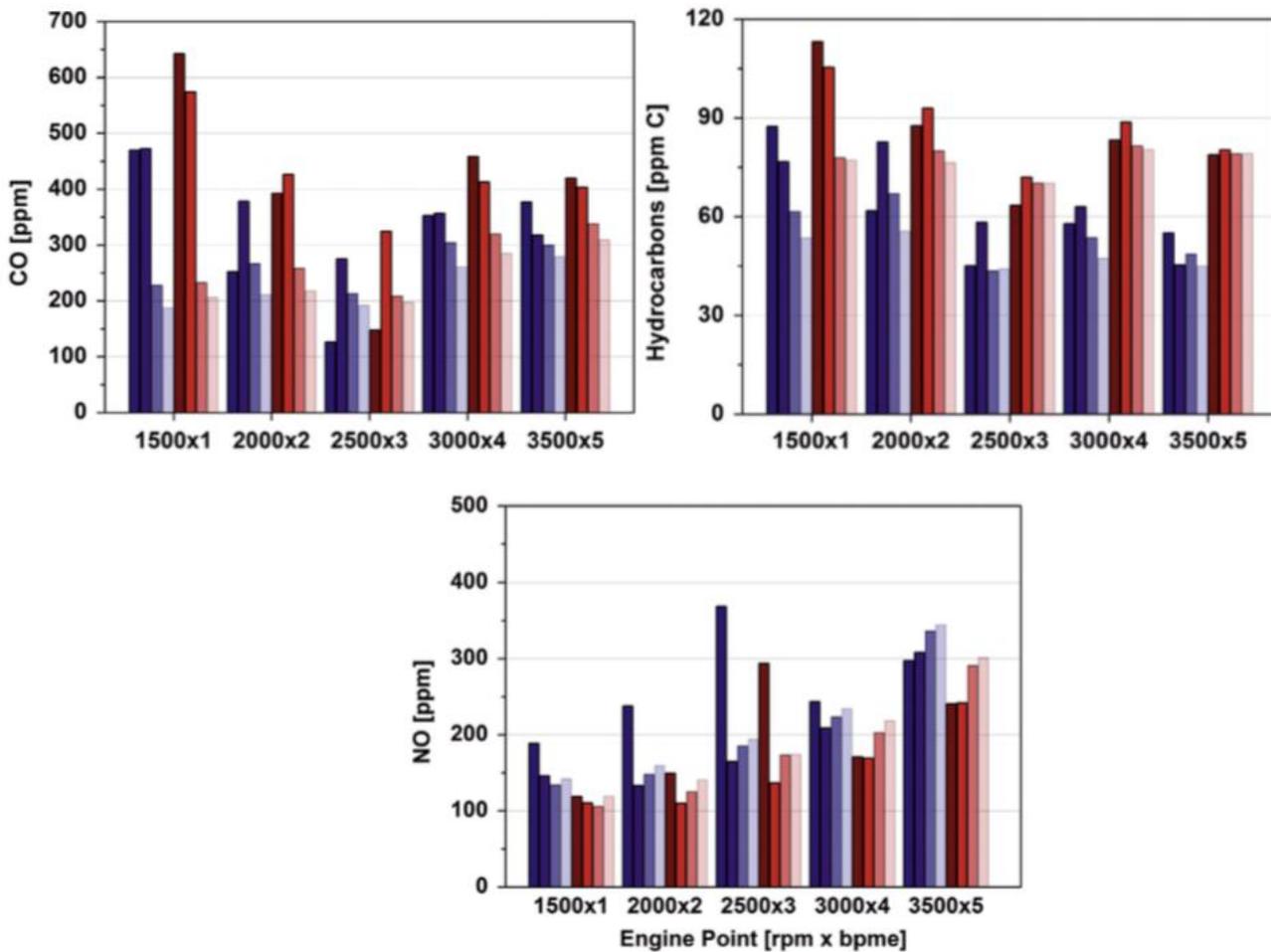


Figura 17 - Medida de concentração de CO, HC e NO em diferentes pontos do motor para o óleo base (azul) e para o óleo com nanolubrificante (vermelho) em várias temperaturas de resfriamento da água (40 °C, 60 °C, 80 °C e 95°C, do escuro para o claro). Fonte: Castillo et al (2014)

Castillo et al (2014) analisaram, na Figura 17, primeiramente as emissões de monóxido de carbono e de hidrocarboneto. Foi observado que são maiores para ambos os pontos de menor rotação do motor (devido a sua baixa eficiência) e também para as maiores rotações (devido ao consumo maior de combustível, e por isso emissões maiores). Enquanto isso, para os pontos intermediários a emissão é menor (devido a sua melhor eficiência e por evitar que aconteça uma combustão incompleta). Podemos observar também que aumentando a temperatura da água, as emissões tendem a reduzir principalmente para o CO. Observando agora a presença de

nanolubrificante, pode-se notar que as emissões são maiores quando as nanopartículas são adicionadas.

Enquanto as emissões de CO e HC aumentam com o nanolubrificante, para o NO, a implicação é reversa, as emissões de monóxido de nitrogênio são menores com a aplicação das nanopartículas. É analisado, que quanto maior a rotação, maior é a emissão de NO. Isso se dá devido à maior disponibilidade de oxigênio, o que acarreta na formação de NO, já que nitrogênio e oxigênio reagem em altas temperaturas. Quanto mais eficiente for a combustão, maior será a emissão de NO. Por isso é observado um pico da emissão para a rotação intermediária.

5.2 Global

Nessa etapa, serão demonstradas as melhorias citadas anteriormente no motor de combustão interna, nos trocadores de calor e também no chiller de compressão de vapor. Para isso, foi desenvolvido nesse trabalho de conclusão de curso um código computacional no software MATLAB para evidenciar os benefícios da utilização do nanofluido.

O código MATLAB utiliza as equações de (1) a (5), referentes ao sistema de trigerção com chiller de compressão de vapor, juntamente com os dados da demanda de um centro comercial em Hong Kong. Vale ressaltar que, nesta etapa, foram utilizados diferentes nanofluidos na aplicação, já que os estudos existentes sobre os diversos aspectos de aplicação não tinham o mesmo nanofluido como base.

5.2.1 Consumo de combustível

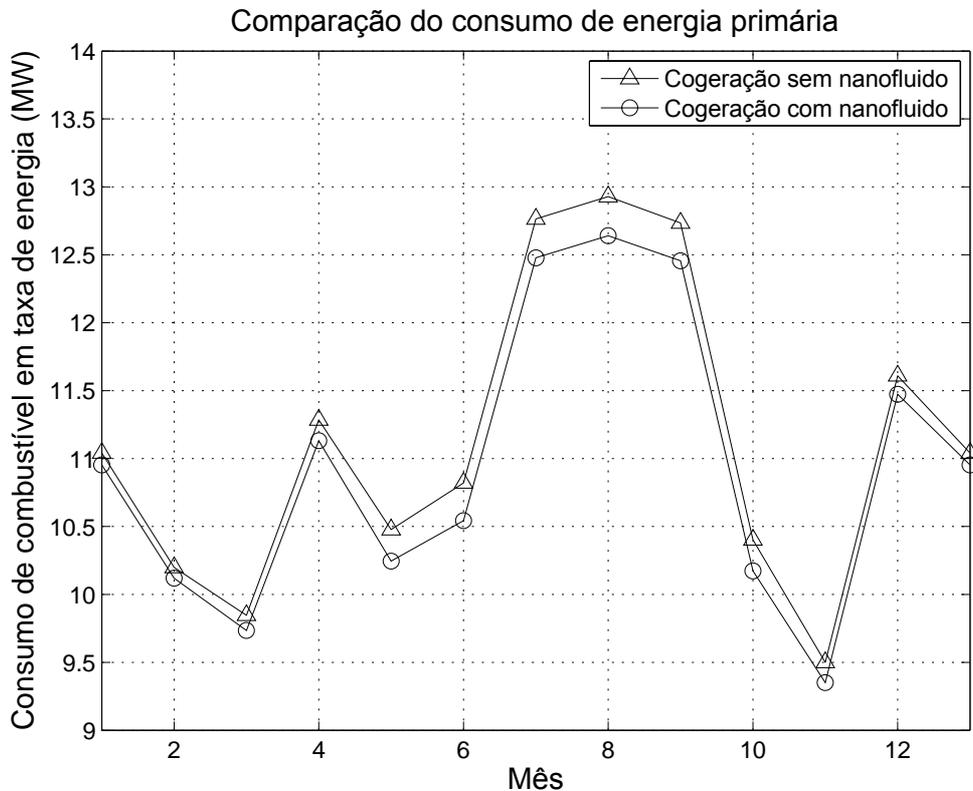


Figura 18 - Consumo de combustível em taxa de energia por mês para sistemas sem nanofluido e com nanofluido – complexo comercial em Hong Kong. Fonte: elaborado pelo autor

Com base na Figura 18, observa-se que, para todos os meses do ano, o consumo de combustível do sistema é menor ao se utilizar o nanofluido. Para o maior consumo de combustível (mês de agosto), uma melhoria de aproximadamente 3% é verificada.

5.2.2 Fator de utilização de energia

É o somatório dos produtos energéticos dividido pelo somatório dos consumos energéticos. Os produtos energéticos em questão são as demandas de eletricidade, refrigeração e aquecimento (\dot{E}_{lo} , \dot{Q}_{co} e \dot{Q}_{ht} , respectivamente), já os consumos energéticos são as taxas de consumo de combustível no motor (\dot{F}_{he}) e nos boilers (\dot{F}_{bo}). O que nos dá:

$$EUF = \frac{\sum \text{Produtos energéticos}}{\sum \text{Consumos energéticos}} = \frac{\dot{E}_{lo} + \dot{Q}_{co} + \dot{Q}_{ht}}{\dot{F}_{he} + \dot{F}_{bo}} \quad (12)$$

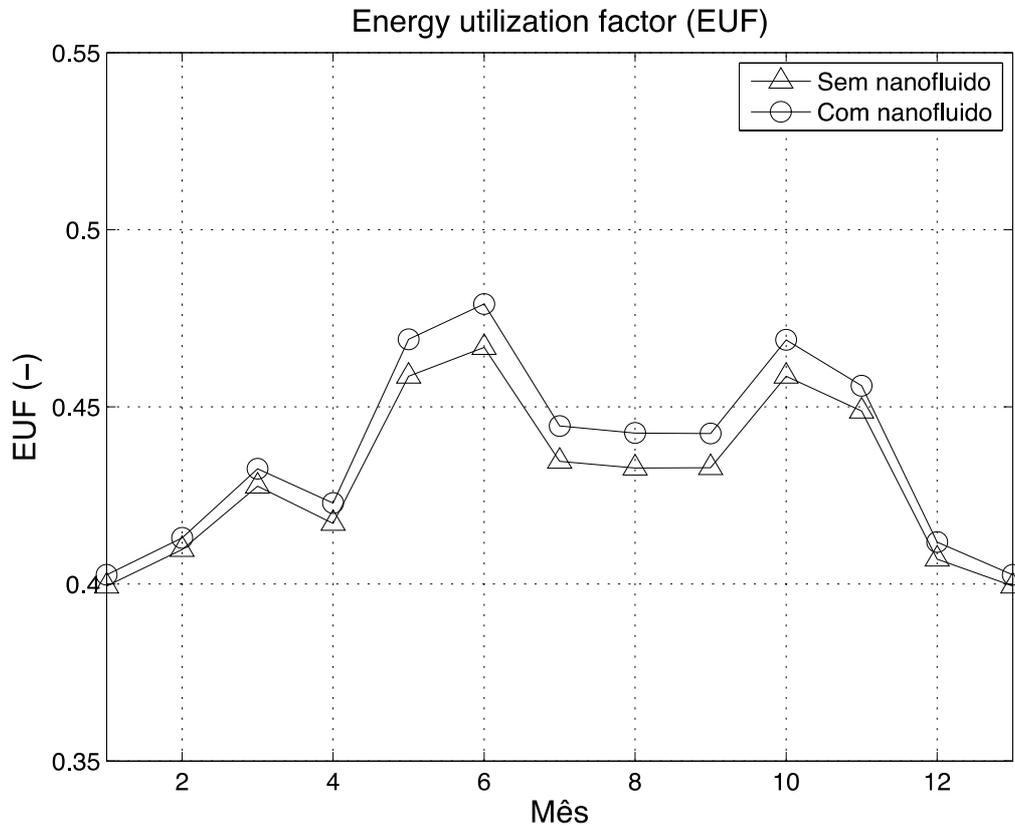


Figura 19 - EUF por mês para sistemas sem nanofluido e com nanofluido – complexo comercial em Hong Kong (Lai e Hui, 2009). Fonte: elaborado pelo autor

Pela Figura 19, os meses com maior fator de utilização de energia, são maio, junho, outubro e novembro. Ou seja, nestes meses a relação entre o somatório das demandas e o somatório dos consumos é a mais proveitosa. Podemos concluir também que a utilização de nanofluidos também é indicada neste caso. Já que para todos os meses o fator de utilização de energia, para o sistema com nanofluido, é maior. Para o EUF em junho, foi verificada uma melhoria de aproximadamente 2,6%.

6. Conclusões

Nos casos da aplicação de nanocombustível no motor de combustão interna, foi verificado que existe um efeito de redução das emissões de gases poluentes, excetuando-se apenas o caso do NO_x . Além disso, a performance do motor é incrementada para todos os casos. Foi verificada uma melhoria: i) da temperatura de ignição do motor em até 20°C , ii) no aumento de torque do motor de 1 a 3%, e iii) do consumo de combustível em até 1%.

Na questão da utilização dos nanofluidos nos equipamentos utilizados na trigeriação, foi averiguado que tanto para a efetividade, quanto para o coeficiente de performance ocorrem melhorias. No caso da efetividade, a análise nos mostra que a presença das nanopartículas contribuem para uma melhor troca de calor, assim como para o caso do coeficiente de performance.

Para os casos da aplicação do nanofluido no sistema de trigeriação em questão, também foi verificado melhorias, tanto para o caso do consumo de combustível, como também para o fator de utilização de energia. No caso do consumo de combustível, foi verificado uma melhoria de até 3% e para o EUF um aumento de até 1%.

No estudo do presente trabalho, conseguiu-se mostrar a importância de estudos no âmbito da nanotecnologia. Portanto, pode-se concluir que a utilização de nanofluidos em sistemas de trigeriação é recomendada, devido a todas melhorias já citadas anteriormente.

A contribuição do presente trabalho foi a de reunir informações sobre a aplicação recentíssima de nanofluidos em equipamentos separadamente (motor, chiller e trocadores de calor), e propor sua implementação em sistemas de trigeriação.

Como temas para futuras pesquisas podem ser nomeados: a investigação mais a fundo do o aumento da emissão de NO_x , análise da influência dos nanofluidos na distribuição energética do motor, quantificação dos custos adicionais pela utilização dos nanofluidos, como também

suas economias no consumo de combustível.

7. Referências Bibliográficas

Ashrae, Ashrae Handbook—HVAC Applications, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 2000 (Chapter 7).

Castillo, S.J, Marcano, S. Bensaid, F.A Deorsola, N. Russo, D. Fino. Nanolubricants for diesel engines: Relates emissions and compatibility with after-treatment catalysts. **Tribology International** **72** (2014) 198-207

Choi, S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. In: Developments and applications of non-newtonian flows. **ASME FED 231/MD 66**; 1995. p. 99–103.

Coelho, V. M. E., Parise, J.A.R., **Mercofrio 2014** - 9º Congresso Internacional de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação, Estudo de diferentes arquiteturas para sistemas de trigerção com aplicação em um caso de centro comercial, 2014, Porto Alegre.

Incropera, F., D. Dewitt, **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**, 5th ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2001.

Gumus, Soner Hakan Ozcan, Mustafa Ozbey, Bahattin Topaloglu. Aluminum oxide and copper oxide nanodiesel fuel properties and usage in a compression ignition engine. **Fuel** **163** (2016) 80-87.

Handbook of Heat Transfer Applications, W.M. Rohsenow, J.P. Hartnett, E.N. Ganic.

Lenin M.A., M.R Swaminathan, G. Kumaresan. Performance and emission characteristics of a DI diesel engine with nanofuel additive. **Fuel** **109** (2013) 362-365

Li, M., Mu, H., Li, H., Analysis and Assessments of Combined Cooling, Heating and Power Systems in Various Operation Modes for a Building in China, **Dalian, Energies** **2013**, 6, 2446-2467

Nitsas M.T., I.P. Koronaki, **Applied Thermal Engineering** **100** (2016), 577-585

Parise J.A.R., A.K Vasconcelos, A.O.C. Gómez, E.P.B Filho, Experimental Evaluation of SWCNT-Water Nanofluid as a Secondary Fluid in a Refrigeration System, 2016

Rapoport L, Feldman Y, Homyonfer M, Cohen H, Sloan J, Hutchison JL, et al. Inorganic fullerene-like material as additives to lubricants: structure–function relationship. **Wear** **1999**;225–229:975–82.

Rapoport L, Leshchinsky V, Lapsker I, Volovik Y, Nepomnyashchy O, Lvovsky M, et al. Tribological properties of WS2 nanoparticles under mixed lubrication. **Wear** **2003**;255:785–93.

D`Silva, Rolvin, Binu K.G, Thirumaleshawa Bhat. Performance and Emission characteristics of a C.I. Engine fuelled with diesel and TiO₂ nanoparticles as fuel additive. **Materials Today: Proceedings 2** (2015) 3728-3735

Tyagi H, Phelan PE, Prasher R, Peck R, et al. Increased hotplate ignition probability for nanoparticle-laden diesel fuel. **Nano Lett 2008**;8:1410–6

Wang, J. Wu, C. Zheng, Analysis of tri-generation system in combined cooling and heating mode, **Energy and Buildings 72** (2014) 353–360

Wang HD, Xu BS, Liu JJ, Zhuang DM. Characterization and anti-friction on the solid lubrication MoS₂ film prepared by chemical reaction technique. **Sci Technol Adv Mater 2005**;6:535–9.

Yu W, Xie H, Li Y, Chen L. Experimental investigation on thermal conductivity and viscosity of aluminum nitride nanofluid. **Particuology 2011**;9:187–91.

Engineering tool box, Thermal Conductivity of some common Materials and Gases

<http://www.mwm.net/mwm-chp-gas-engines-gensets-cogeneration/gas-engines-power-generators/gas-engine-tcg-2020/>