

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE

Redução de consumo específico de combustível através da redução da temperatura do ar de combustão em motogeradores de ciclo Diesel

Artur Calheira de Freitas ¹
Manoel Teodoro Belitardo Pereira ²

Salvador -BA, 2021

Resumo: Este artigo técnico apresenta um estudo de caso de redução do consumo específico de combustível *HFO- Heavy Fuel Oil* em 120 motogeradores HYUNDAI HiMSEN 9H25/33 instalados em duas usinas termoelétricas pertencentes a um mesmo empreendimento composto por duas casas de máquinas com capacidade total de geração de energia elétrica de 298 MW localizadas no Estado da Bahia, Brasil. Devido à necessidade de redução dos custos operacionais, em abril de 2013, foi proposto um projeto que objetivava a redução do consumo específico de combustível através da redução de temperatura de ar de admissão dos turbocompressores para melhorar a eficiência do processo de combustão dos motogeradores supracitados. O projeto foi embasado em informações contidas no manual técnico dos equipamentos, o qual apresenta a fórmula de correção do consumo específico de acordo com as condições operacionais dos motogeradores HYUNDAI HiMSEN 9H25/33, tendo como variáveis: o consumo específico de combustível na condição padrão conforme ISO 3046/1; o consumo específico de combustível na condição de operação; o desvio do consumo específico de combustível; a temperatura do ar ambiente na condição de operação; a temperatura da água

¹Engenheiro Mecânico (UFBA, 2009), Pós-graduado em Project Management (Envirotech Institute of Education, 2019) e Pós-graduando em Engenharia de Confiabilidade (SENAI CIMATEC). E-mail: eng.arturfreitas@gmail.com

²Orientador: Mestre, Eng^a Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG/PB). E-mail: belitardo@gmail.com

de resfriamento do ar de carga na condição de operação; o poder calorífico inferior (PCI) do óleo combustível e a pressão ambiente na condição de operação. Após a implantação do projeto de redução de temperatura do ar de combustão verificou-se a redução da temperatura máxima de admissão dos turbocompressores de 45,0°C para 35,9 °C, gerando um delta de temperatura de 9,1 °C, o que viabilizou a redução de consumo específico de combustível *HFO- Heavy Fuel Oil* equivalente a 0,915 kg/MWh e, conseqüentemente, para um cenário de geração contínua de 280 MWh propiciou reduções significativas de custos operacionais com a aquisição de combustível.

Palavras-chave: Consumo específico de combustível. Temperatura do ar de admissão. Moto geradores de ciclo Diesel.

Reduction of specific fuel consumption by reducing the combustion air temperature in diesel cycle motor generators

Abstract: This technical article presents a case study on the reduction of the specific consumption of HFO-Heavy Fuel Oil fuel in 120 HYUNDAI HiMSEN 9H25/33 motor generators installed in two thermoelectric power plants belonging to the same enterprise comprising two engine rooms with full capacity to generate electricity. 298 MW electrical power located in Bahia, Brazil. Due to the need to reduce operating costs in April 2013, a project was proposed that aimed to reduce specific fuel consumption by reducing the intake air temperature of turbocharges to improve the efficiency of the combustion process of the aforementioned motor generators. The project was based on information contained in the technical manual of the motor generators, which presented the formula for correcting the specific consumption according to the operating conditions of the motor generators, having as variables the Specific Fuel Consumption in the standard condition according to ISO 3046/1; Specific Fuel Consumption in operating condition; Deviation of Specific Fuel Consumption; Ambient air temperature in operating condition; Cooling water temperature of charge air in operating condition; Low Calorific Value (LCV) of the fuel oil and the Ambient Pressure in the operating condition. After the implementation of the combustion air temperature reduction project, there was a reduction in the maximum intake temperature of turbocharges of 45.0°C to 35.9 °C, generating a temperature delta of 9.1 °C, which enabled the reduction of specific consumption of HFO-Heavy Fuel Oil fuel equivalent to 0.915 kg/MWh and, consequently, for a scenario of continuous generation of 280 MWh, it could provide significant reductions in operating costs with disbursements for the acquisition of fuel.

Keywords: Specific fuel consumption. Intake air temperature. Diesel cycle Motorgenerators.

1 Introdução

A busca por melhoria contínua é boa prática adotada por empresas com o objetivo de garantir vantagens competitivas e redução de custos operacionais, é uma necessidade inerente aos processos produtivos identificar alternativas para alcançar melhores resultados consumindo-se menos recursos.

Consumo específico de combustível em processo de geração de energia elétrica através de MCI-Motor de Combustão Interna é a relação entre a quantidade de combustível consumida e a potência elétrica gerada em um determinado intervalo de tempo, geralmente, expressa nas unidades do sistema internacional de medidas [kg/kWh]. A redução de consumo específico de combustível através da redução da temperatura do ar de combustão em motogeradores de ciclo Diesel é uma alternativa a ser avaliada quanto à sua viabilidade para redução de custos operacionais em termoelétricas que utilizam como combustível o Diesel, ou o *HFO-Heavy Fuel Oil* (óleo combustível pesado).

A “tropicalização” de um equipamento é a sua preparação ou adaptação para que o mesmo possa operar em condições ambientais diferentes das ideais de temperaturas e pressão de 25 °C e 101,32 kPa respectivamente. Em termoelétricas à MCI-Motor de Combustão Interna, instaladas na região Norte e Nordeste do Brasil, onde as temperaturas do ar aspirado para câmara de combustão podem ultrapassar 40 °C, é boa prática de engenharia a verificação da influência destas temperaturas no consumo específico de combustível, com o objetivo de estimar a redução de custos operacionais com a implantação de projetos de ventilação forçada para reduzir as temperaturas do ar aspirado para combustão, conseqüentemente, reduzindo o consumo de combustível da planta industrial, o qual, representa em torno de 65% dos custos diretos de operação em termoelétricas à MCI.

Para atender a demanda de redução de custos operacionais de duas usinas termoelétricas pertencentes a um mesmo empreendimento, em abril de 2013, foi proposto um projeto que objetivava a redução do consumo específico de combustível através da redução de temperatura de ar de admissão dos turbocompressores dos motogeradores.

Cada uma das duas usinas é formada por 60 motogeradores da Hyundai Heavy Industries Co., Ltd., modelo 9H25/33 (4 tempos com turbocompressor), de potência nominal unitária de 2.610 kWm a 900 rpm (ISO 3046-1), equivalente a 2.480 kW elétricos em 13,8 kV. Em cada usina, os motogeradores e sistemas auxiliares diretos (bombas booster de óleo, filtragem de óleo lubrificante, etc), encontram-se instalados em um galpão tratado

acusticamente, agrupados em 4 ilhas de potência de 15 motores, sendo 30 motores instalados de cada lado das duas *power houses* denominadas neste trabalho como PH-01 e PH-02.

O projeto proposto de redução do consumo específico de combustível através da redução de temperatura de ar de admissão dos turbocompressores foi sugerido pela identificação de altas temperaturas nas PH-01 e PH-02 onde os motogeradores estão instalados e que chegaram a atingir picos de temperatura do ar de admissão de 45 °C nos meses de janeiro, fevereiro e março de 2013.

Um estudo de levantamento de cargas térmicas nas duas *power houses*, PH-01 e PH-02, foi realizado para caracterizar as condições térmicas operacionais da UTE através dos dados do INMET e medições da estação meteorológica da própria UTE, que identificou o perfil da variação de temperatura ambiente nas duas casas de máquinas. Também foram identificadas as temperaturas do ar aspirado para combustão para cada motor e a diferença de temperatura entre sua admissão no turbocompressor e a temperatura ambiente.

O presente estudo tem como objetivo apresentar um caso de redução do consumo específico de combustível *HFO- Heavy Fuel Oil* em 120 motogeradores HYUNDAI HiMSEN 9H25/33 instalados em duas usinas termoelétricas pertencentes a um mesmo empreendimento no estado da Bahia, no Brasil, com potência instalada de 298 MW, através da redução da temperatura do ar de admissão para combustão.

2 Revisão da Literatura

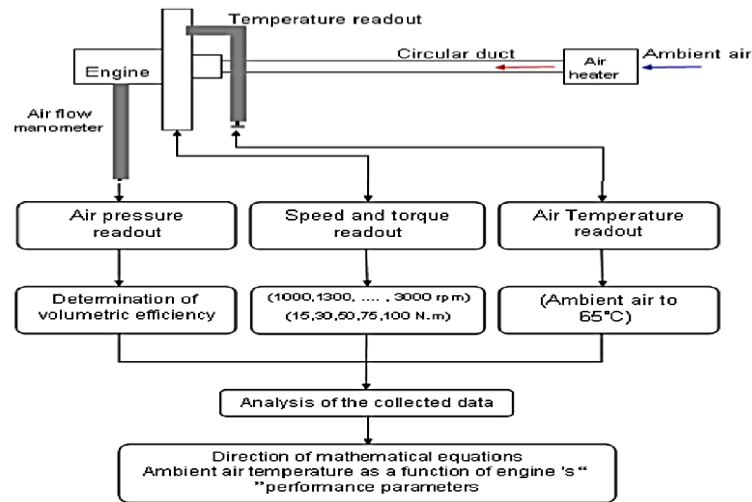
Estudos técnicos demonstram que o consumo específico de combustível de um motor de combustão interna de ciclo Diesel, dentre outras variáveis, também depende da temperatura do ar ambiente aspirado para a câmara de combustão.

Birtok, et al (2017) afirmaram que a temperatura controlada da entrada de ar é um dos métodos possíveis para promover maiores eficiência e estabilidade de combustão, e também que a temperatura de admissão do ar de combustão é importante para garantir uma maior quantidade de combustível envolvida no processo de combustão.

Os resultados apresentados neste referido artigo, demonstram que o consumo específico de combustível diminui à medida que a temperatura de admissão de ar diminui e que o período de atraso da ignição de combustão é reduzido com menor temperatura de entrada de ar devido à maior disponibilidade de oxigênio.

Hindren, et al (2013) projetaram e apresentaram um sistema munido com um aquecedor de ar para avaliar a performance do consumo específico de combustível de um motor a ciclo Diesel, variando-se a temperatura do ar aspirado para combustão entre 10 °C e 65 °C, conforme Figura 01.

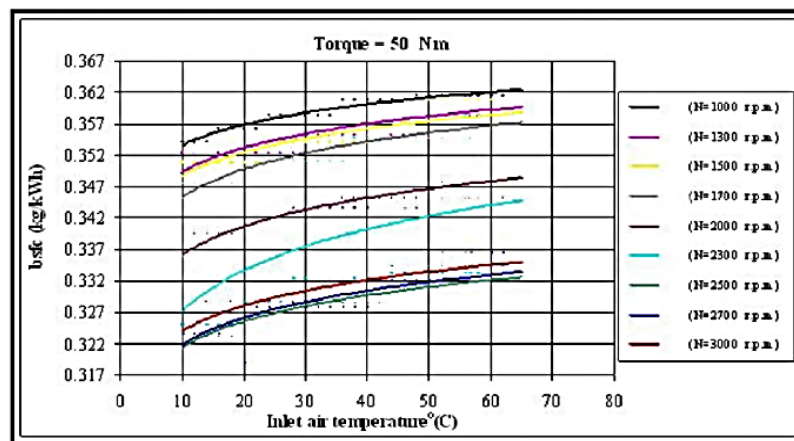
Figura 01- Representação do processo para avaliação da performance do motor a Diesel.



Fonte: Hindren, et al (2013).

Os resultados dos testes realizados por Hindren demonstraram que o consumo específico de combustível aumentou em média 0,012 kg/KWh para diferentes faixas de rotação entre 1000 RPM e 3000 RPM testadas mantendo-se o torque constante a 50 Nm e aumentando-se de forma controlada as temperaturas do ar de admissão de 10 °C para 60 °C conforme apresentado na Figura 02:

Figura 02 – Efeito da temperatura do ar de admissão no consumo específico de um motor ciclo Diesel a um torque constante de 50 Nm a diferentes rotações

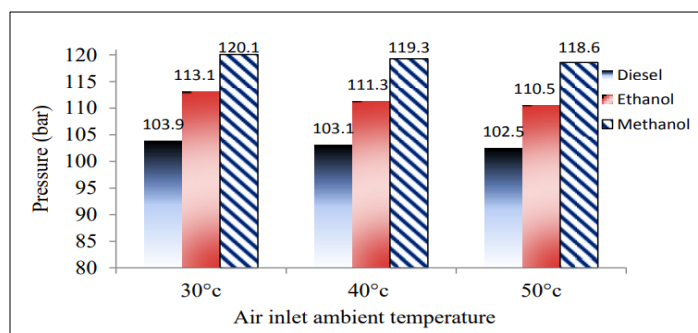


Fonte: Hindren, et al (2013).

Lin e Jeng (1996) apresentaram um estudo sobre o efeito da umidade e temperatura de ar de admissão sobre o desempenho e a emissão características dos motores Diesel. De acordo com este estudo, o torque do eixo e a presença de óxido de nitrogênio nos gases de exaustão diminuíram, enquanto que, o consumo específico de combustível, os teores de monóxido de carbono e de dióxido de enxofre aumentaram com o aumento da temperatura e da umidade do ar de combustão.

Em artigo técnico publicado, Akasyah et al (2015) apresentaram um estudo que objetivou identificar a influência da temperatura ambiente no processo de combustão de um motor de ciclo Diesel, operando com o Diesel e também com diferentes combustíveis da cadeia do biodiesel, como o metanol e o etanol. Neste estudo, as temperaturas do ar aspirado para câmara de combustão foram controladas em 30 °C, 40 °C, e 50 °C e utilizando-se o software GT-Power foram analisados os parâmetros de pressão interna nos cilindros e a taxa de calor liberada pelo processo de combustão em um motor a Diesel Mitsubishi 4D68 de 4 cilindros. Os resultados do estudo demonstraram que a pressão originada pelo processo de queima do combustível dentro do cilindro é maior para todos os três combustíveis, etanol, metanol e diesel, quanto menor foi a temperatura do ar de combustão dentre as temperaturas de teste de 30 °C, 40 °C, e 50 °C conforme apresentado na Figura 03 abaixo.

Figura 03 – Variação das pressões internas nos cilindros provocado pela variação da temperatura do ar de combustão na queima dos combustíveis Diesel, Etanol e Metanol.



Fonte: Akasyah et al (2015).

No trabalho, Akasyah et al (2015), dentre outros pontos que eram objetos de estudo de comparação do desempenho do motor referente à alimentação com diferentes combustíveis, também afirmaram que a pressão no cilindro diminuiu com o aumento da temperatura do ar de

admissão em todos os resultados de simulação utilizados, e que, essa diminuição da pressão no cilindro resulta em menor desempenho do motor.

Por sua vez, Kahandagamage et al (2013) realizaram um estudo comparando o desempenho de um motogerador Wartsila 18V46, 17MW, operando durante o dia e à noite, coletando as variações de temperatura do ar para combustão durante estes dois períodos e comparando com a variação do consumo específico de combustível durante os períodos diurno e noturno. Neste estudo, verificou-se que o consumo específico do motogerador variou conforme as variações de temperatura do ar aspirado para a câmara de combustão e que o consumo específico de combustível foi 66,66 kg/h maior durante o dia, período no qual a temperatura do ar apresentou os maiores valores coletados conforme apresentado na Figura 04. Os resultados obtidos neste trabalho de pesquisa demonstraram redução de 1.9% no consumo específico de combustível no turno da noite em relação ao turno do dia.

Figura 04- Resultados da variação do consumo específico de combustível em relação ao período diurno e noturno de operação.

Time	Energy meter export MWh/hr	Energy export MJ/hr	Fuel consumption kg/hr
Day	16.85	60660	3573.33
Night	16.85	60661	3506.67

Fonte: Kahandagamage et al (2013).

3 Método

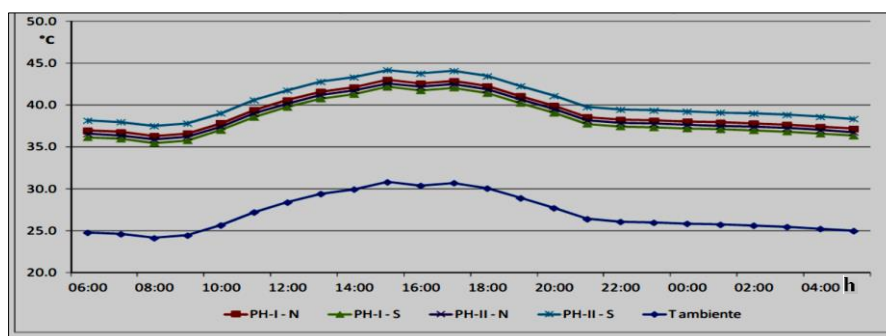
O estudo de levantamento de cargas térmicas nas duas *power houses*, PH-01 e PH-02, foi realizado para caracterizar as condições térmicas operacionais da UTE através dos dados do INMET e medições da estação meteorológica da própria UTE, que identificou o perfil da variação de temperatura ambiente nas duas casas de máquinas. Também foram identificadas as temperaturas do ar aspirado para combustão para cada motor e a diferença de temperatura entre sua admissão no turbocompressor e a temperatura ambiente.

Para tal caracterização, foram utilizados os seguintes conjuntos de medições:

- Dados históricos de temperatura ambiente e umidade relativa do ar coletados do INMET dos anos de 2010, 2011 e 2012;
- Dados das medições de temperatura do ar atmosférico na área externa das casas de máquinas e próximo da admissão dos turbocompressores coletados durante o período de 09/01/2013 a 05/04/2013.

Dessa forma, foi construído um mapa de temperatura do ar de admissão, identificando o perfil de temperatura ambiente típico para cada motogerador. A seguir são apresentados as médias das temperaturas do ar de admissão nas PH-01 e PH-02 durante o período 09/01/2013 a 05/04/2013 na Figura 05.

Figura 05 - Média das Temperatura de ar de admissão nas PH-01 e PH-02 durante o período 09/01/2013 a 05/04/2013.



Fonte: Relatório interno da empresa (2013).

Após estudo de levantamento de cargas térmicas nas *power houses*, foram identificadas as temperaturas médias e máximas, a seguir, para a execução de simulações de cenários distintos de geração de energia e respectivos cálculos de consumo específico de combustível:

- Temperatura do ar ambiente média (área externa a *power house*): 26,3 °C;
- Temperatura do ar ambiente máxima (área externa a *power house*): 34,1 °C;
- Temperatura máxima do ar insuflado para dentro das casas de máquinas: 35,9 °C;
- Temperatura média do ar na admissão dos turbocompressores dos motores: 40,2 °C;
- Temperatura máxima do ar na admissão dos turbocompressores dos motores: 45,0 °C.

Segundo o fabricante dos motogeradores instalados nas termoelétricas em estudo, através do manual de operação dos motogeradores HYUNDAI HiMSEN 9H25/33, o consumo específico de combustível dos motores de modelo 9H25/33 pode ser calculado para as condições ambientais de operação através das equações 01 e 02 apresentada na figura 06 a seguir:

Figura 06 – Seção retirada do manual de operação dos motogeradores HYUNDAI HiMSEN

HiMSEN		All type	Page 1/1
Engine Design Outline & Operating Data	Correction of Fuel Consumption	Section No. G01310	Rev. 1A
엔진 설계 개요 및 운전 데이터	연료 소모의 보정		
<p>주변 조건에 대한 보정</p> <p>일반적으로 연료소모율(SFOC)은 ISO 3046/1의 표준 조건을 기준으로 한다.</p> <p>그러나, ISO 3046/1을 제외한 다른 조건에 대해서는 최대 정격 출력에서 연료소모율은 아래에 언급된 식에 따라 추정할 수 있다.</p> $SFOC_{amb} = SFOC_{iso} * dSFOC$ $dSFOC = [100 + (T_{amb}-25)*0.05 - (P_{amb}-1000)*0.007 + (T_{cw}-25)*0.07 - (LCV-42700)/427] / 100$	<p>Correction for Ambient Condition</p> <p>Specific fuel oil consumption (SFOC) is referred to the ISO 3046/1 standard condition normally.</p> <p>However, for the condition other than ISO 3046/1 standard condition, the SFOC at MCR can be estimated according to the below mentioned formula.</p> $SFOC_{amb} = SFOC_{iso} * dSFOC$ $dSFOC = [100 + (T_{amb}-25)*0.05 - (P_{amb}-1000)*0.007 + (T_{cw}-25)*0.07 - (LCV-42700)/427] / 100$		

Fonte: Manual de operações dos motogeradores HYUNDAI HiMSEN

Equação 01 – Correção do consumo específico de combustível conforme condições ambientais de operação.

$$SFOC_{amb} = SFOC_{iso} * dSFOC \quad (01)$$

Fonte: Manual de operações dos motogeradores HYUNDAI HiMSEN

Onde:

SFOC_{amb} = Consumo específico de combustível na condição de operação;

SFOC_{iso} = Consumo específico de combustível na condição padrão conforme ISO 3046;

dSFOC = Desvio do consumo específico de combustível.

Equação 02 – Desvio do consumo específico de combustível.

$$dSFOC = \frac{[100 + (T_{amb}-25)*0,05 - (P_{amb}-1000)*0,007 + (T_{cw}-25)*0,07 - \left(\frac{LCV-42700}{427}\right)]}{100} \quad (02)$$

Fonte: Manual de operações dos motogeradores HYUNDAI HiMSEN

Onde:

dSFOC = Desvio do consumo específico de combustível;

Tamb = Temperatura ambiente na condição de operação [°C];

Pamb = Pressão ambiente na condição de operação [mbar];

Tcw = Temperatura da água de resfriamento do ar de carga na condição de operação [°C];

LCV = Poder Calorífico Inferior (PCI) do óleo combustível [kJ/kg].

Utilizando-se a plataforma do MS Excel, foi programado um simulador para cálculo do consumo específico de combustível utilizando-se as Equações 01 e 02. Para avaliação da influência da temperatura do ar de admissão [Tamb] no consumo específico de combustível na condição de operação [SFOCamb] as variáveis Temperatura da água de resfriamento do ar de carga na condição de operação [TCW]; Poder Calorífico Inferior (PCI) do óleo combustível [LCV] e Pressão ambiente na condição de operação [Pamb] da Equação 02 foram mantidas com valores médios de operação para os motogeradores em estudo.

As condições ambientais e operacionais identificadas para as quais o consumo específico de combustível na condição de operação [SFOCamb] foi calculada, antes da implantação do projeto de ventilação forçada ter sido instalada, são apresentadas abaixo:

Tamb = 45,0°C;

TCW = 41,63°C;

Pamb = 1.014,50 mbar;

LCV = 42.280,91 kJ/kg;

SFOCiso = 201,30 kg/MWh.

Para esses valores o consumo específico de combustível na condição de operação [SFOCamb] calculado foi de 207,198 kg/MWh conforme Tabela 01.

Tabela 01 – Consumo específico calculado para temperatura do ar aspirado para combustão de 45,0°C.

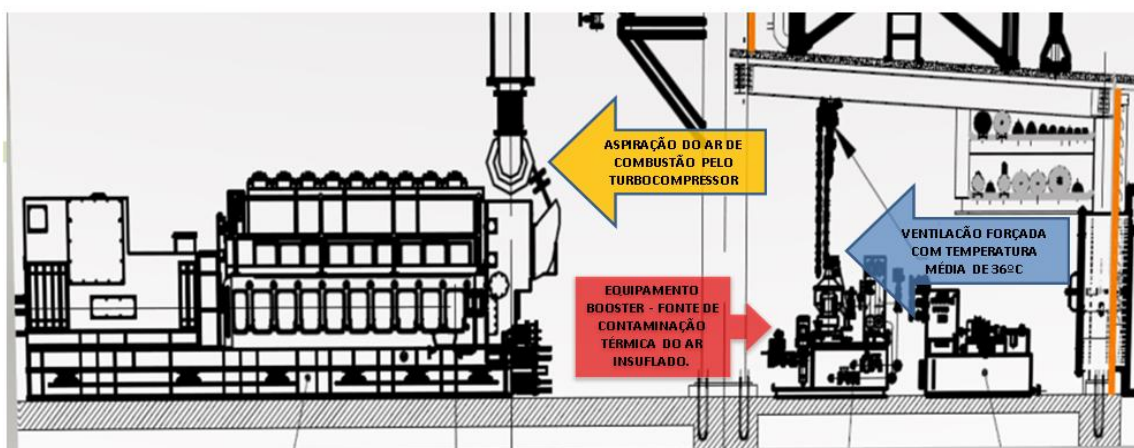
Variáveis Mensuradas			Variáveis Controladas		Desvio	Consumo Específico
SFOC iso (Kg/MWh)	Pamb (mbar)	LCV (KJ/Kg)	Tamb (°C)	Tew (°C)	dSFOC (a/a)	SFOC amb (Kg/MWh)
201,30	1.014,50	42.280,91	45,00	40,00	1,03	207,198

Fonte: O autor

4 Resultados

O projeto de redução da temperatura do ar de admissão dos turbo-charges consistiu em captar a vazão de ar demandada para combustão nos motogeradores com a menor temperatura disponível dentro da casa de máquinas. Tal vazão de ar captado foi provido por ventiladores axiais já instalados nas paredes das *power houses* e direcionado para a admissão dos turbocompressores através da instalação de dutos flexíveis. Com a implantação deste projeto foi possível diminuir a contaminação térmica do ar proveniente de equipamentos como a do sistema dos *boosters*, os quais, são aquecidos por linhas de vapor e devido a estarem instalados entre os ventiladores axiais e os motogeradores contaminavam termicamente o ar aspirado para combustão conforme apresentado nas Figuras 07 e 08. A Figura 09 apresenta o ventilador axial e a montante do duto flexível instalado.

Figura 07: Layout de instalação de equipamentos na casa de máquinas.



Fonte: O autor

Figura 08-Duto flexível instalado.



Fonte: O autor

Figura 09-Ventilador axial e montante do duto flexível.



Fonte: O autor

Após a instalação dos dutos flexíveis foi verificada uma redução média de 9,1 °C na temperatura do ar aspirado pelos turbo-charges e um aumento na velocidade de escoamento do ar em 6,42 m/s como evidenciado nas Figuras 10 e 11, onde a temperatura do ar nas adjacências do motorgerador medida foi de 45,0 °C e a temperatura do ar insuflado diretamente na admissão do turbo-charges foi de 35,9 °C.

Figura 10 - Temperatura do ar de 45,0°C e velocidade de escoamento 1.32m/s.



Fonte: O autor

Figura 11- Temperatura do ar de 35,9°C e velocidade de escoamento 7.74m/s.



Fonte: O autor

O consumo específico de combustível na condição de operação [SFOC_{amb}] foi recalculado após a implantação do projeto de ventilação forçada, mantendo-se os valores da temperatura da água de resfriamento do ar de carga na condição de operação [TCW], poder calorífico inferior do óleo combustível [LCV] e pressão ambiente na condição de operação [P_{amb}] constantes e admitindo a temperatura do ar de admissão [T_{amb}] com novo valor de 35,9°C. Nestas condições, o valor do consumo específico de combustível na condição de operação [SFOC_{amb}] recalculado foi de 206,282 kg/MWh conforme Tabela 02, onde se observou uma redução de 0,916 kg de combustível para cada megawatt hora gerado em relação ao consumo específico de 207,198 kg/MWh calculado anteriormente, utilizando-se como dado de entrada a temperatura do ar de 45,0°C.

Tabela 02- Consumo específico recalculado para temperatura do ar aspirado de 35,9°C.

Variáveis Mensuradas			Variáveis Controladas		Desvio	Consumo Específico
SFOC iso (Kg/MWh)	Pamb (mbar)	LCV (KJ/Kg)	Tamb (°C)	Tcw (°C)	ΔSFOC (a/a)	SFOC amb (Kg/MWh)
201,30	1.014,50	42.280,91	35,90	40,00	1,02	206,282

Fonte: O autor

Para avaliação da relevância da redução do consumo específico no processo de geração de energia das duas termoelétricas foram feitas simulações com cenários distintos onde os resultados podem ser observados nas tabelas 03, 04, 05e 06 e Quadros 01 e 02.

O primeiro cenário de geração, para as duas usinas, simula a temperatura de ar de admissão dos turbo-charges de 45,0°C, a geração contínua total de 280 MWh durante 12h por dia e 30 dias no mês. O valor do combustível *HFO- Heave Fuel Oil* vigente em 2013 utilizado nesta simulação foi de R\$ 2,10 (dois reais e dez centavos). Para esta simulação de campanha operacional, o total de combustível consumido seria de aproximadamente 20.886 t (vinte mil, oitocentos e oitenta e seis) toneladas de *HFO- Heave Fuel Oil*, originando custos operacionais com a aquisição de combustível na ordem de R\$ 43.860.000,00 (quarenta e três milhões, oitocentos e sessenta mil reais) conforme apresentado no Tabela 03.

Tabela 03 – Simulação para cálculo de consumo de combustível com temperatura de ar aspirado para combustão de 45°C.

Simulação de consumo de combustível para a temperatura do ar de admissão do turbocharger à 45,0°C						
SFOC amb (Kg/MWh)	Geração em MWh	Horas por dia	Dias por mês	Preço do HFO (R\$/Kg)	Total de HFO consumido (Kg)	Desembolso com combustível
207,198	280,00	12,00	30,00	2,10	20.885.562,91	R\$ 43.859.682,12

Fonte: O autor

Para o segundo cenário de simulação de geração de energia das duas usinas foram mantidos os valores de 280 MWh, durante 12h por dia e 30 dias por mês e valor do *HFO- Heave Fuel Oil* à R\$ 2,10 (dois reais e dez centavos), entretanto, foi considerado a temperatura de admissão do ar nos turbo-charges de 35,9°C. Para esta simulação de campanha operacional, o total de combustível consumido seria de aproximadamente 20.793 t (vinte mil, setecentos e noventa e três) toneladas de *HFO- Heave Fuel Oil* , originando custos operacionais na ordem de R\$ 43.666.000,00 (quarenta e três milhões, seiscentos e sessenta e seis mil reais) conforme apresentado no Tabela 04.

Tabela 04 – Simulação para cálculo de consumo de combustível com temperatura de ar aspirado para combustão de 35,9°C.

Simulação de consumo de combustível para a temperatura do ar de admissão do turbocharger à 35,9°C						
SFOC amb (Kg/MWh)	Geração em MWh	Horas por dia	Dias por mês	Preço do HFO (R\$/Kg)	Total de HFO consumido (Kg)	Desembolso com combustível
206,282	280,00	12,00	30,00	2,10	20.793.238,68	R\$ 43.665.801,23

Fonte: O autor

A primeira simulação de redução de custos com a aquisição de combustível *HFO-Heave Fuel Oil* para a campanha mensal de geração de energia de 280MWh devido a redução do consumo específico de 0,916 kg/MWh proveniente da diminuição da temperatura do ar de admissão dos turbo-charges de 45,0°C para 35,9°C seria de R\$ 193.880,89 (cento e noventa e três mil, oitocentos e oitenta reais e oitenta e nove centavos) caso as condições da simulação fossem mantidas durante todo o mês conforme apresentado no Quadro 01 a seguir:

Quadro 01 – Economia na aquisição de combustível HFO devido à redução de consumo específico de 0,916 kg/MWh para campanha mensal de geração de energia de 280MW/h.

Resultado da simulação da economia mensal com combustível HFO para redução de consumo específico de 0,916 kg/MWh	
R\$	193.880,89

Fonte: O autor

A segunda simulação para avaliação na redução de custos operacionais com desembolso para aquisição de combustível *HFO- Heave Fuel Oil* foi realizada identificando o valor do consumo específico de combustível, considerando a temperatura do ar aspirado para combustão referente ao valor médio de 40,2°C e mantendo os valores das demais variáveis da Equação 01 das simulações anteriores.

O valor calculado para o consumo específico de combustível referente a temperatura do ar de 40,2°C foi de 206,715 kg/MWh, conforme apresentado na Tabela 05, onde se observa uma redução de 0,433 kg de combustível para cada megawatt hora gerado, em relação ao consumo específico de 206,282 kg/MWh calculado anteriormente utilizando-se como dado de entrada a temperatura do ar de 35,9°C.

Tabela 05- Consumo específico de combustível calculado para temperatura do ar aspirado de 40,2°C.

Variáveis Mensuradas			Variáveis Controladas		Desvio	Consumo Específico
SFOC iso (Kg/MWh)	Pamb (mbar)	LCV (KJ/Kg)	Tamb (°C)	Tew (°C)	ΔSFOC (a/a)	SFOC amb (Kg/MWh)
201,30	1.014,50	42.280,91	40,20	40,00	1,03	206,715

Fonte: O autor

Para a segunda simulação, o total de combustível consumido seria de aproximadamente 20.836 t (vinte mil, oitocentos e trinta e seis) toneladas de *HFO- Heave Fuel Oil*, originando custos operacionais na ordem de R\$ 43.757.000,00 (quarenta e três milhões, setecentos e cinquenta e sete mil reais) conforme apresentado na Tabela 06.

Tabela 06 – Simulação para cálculo de consumo de combustível com temperatura de ar aspirado para combustão de 40,2°C.

Simulação de consumo de combustível para a temperatura do ar de admissão do turbocharger à 40,2°C						
SFOC amb (Kg/MWh)	Geração em MWh	Horas por dia	Dias por mês	Preço do HFO (R\$/Kg)	Total de HFO consumido (Kg)	Desembolso com combustível
206,715	280,00	12,00	30,00	2,10	20.836.864,42	R\$ 43.757.415,28

Fonte: O autor

Na segunda simulação realizada, a economia com a aquisição de combustível *HFO- Heave Fuel Oil* para a campanha mensal de geração de energia de 280MWh devido a redução do consumo específico de 206,715 kg/MWh para 206,282 kg/MWh proveniente da diminuição da temperatura do ar de admissão dos turbo-charges de 40,2°C para 35,9°C seria de R\$ 91.614,05 (noventa e um mil, seiscentos e quatorze reais e cinco centavos), conforme Quadro 02.

Quadro 02 – Economia na aquisição de combustível HFO devido à redução de consumo específico de 0,433 kg/MWh para campanha mensal de geração de energia de 280MW/h.

Resultado da simulação da economia mensal com combustível HFO para redução de consumo específico de 0,433 kg/MWh	
R\$	91.614,05

Fonte: O autor

A segunda simulação realizada de redução de custos operacionais apresentou valores muito próximos da redução de consumo específico de combustível de 0,433 kg/MWh e redução de custos operacionais com aquisição de combustível de R\$ 91.614,05 (noventa e um mil, seiscentos e quatorze reais e cinco centavos) observados nos meses seguintes à instalação do projeto de redução da temperatura do ar de combustão, o qual, teve o seu comissionamento no período de inverno entre os meses de junho e julho de 2013. A eficácia e a viabilidade econômica do projeto foram comprovadas através do *payback* do projeto de aproximadamente cinco meses.

5 Conclusão

Com o presente estudo de caso de redução de consumo específico de combustível através da redução da temperatura do ar de combustão em motores de ciclo Diesel foi possível confirmar os resultados obtidos de estudos prévios apresentados no item 2 - Revisão da Literatura, cujos dados indicavam que a temperatura do ar de admissão para combustão influenciava o consumo específico de combustível do motor de combustão interna de ciclo Diesel.

Adicionalmente, demonstrou-se através das simulações de campanhas operacionais mensais nas termoelétricas, que variações relativamente pequenas do consumo específico de combustível na ordem de 0,916 kg/KWh, ou mesmo 0,433 kg/KWh, podem propiciar reduções de custos operacionais significativos com a aquisição de combustível na ordem de valores de R\$ 193.880,89 ou R\$ 91.614,05, respectivamente, para as reduções de consumo específico supracitadas, quando o volume de combustível *HFO- Heavy Fuel Oil* utilizado no processo de geração de energia mensal é relativamente grande, como referência, acima de 20.000 toneladas de *HFO- Heavy Fuel Oil*.

Alguns pontos devem ser explicitados neste contexto, pois é fato que as condições climáticas interferem diretamente nos resultados de reduções dos custos operacionais devido a variabilidade das temperaturas ambientes de acordo com as condições climáticas de chuva ou sol e diferentes estações do ano. Outro ponto a ser observado é que, para uma mesma variação de temperatura do ar de combustão, o consumo específico de combustível apresenta diferentes sensibilidades, sendo mais sensível quanto maiores forem as temperaturas máximas envolvidas e isso deve ser levado em consideração na análise da alternativa de se reduzir as temperaturas do ar de combustão com o objetivo de se reduzir custos operacionais com aquisição de

combustível. Para contextualizar esta afirmativa, uma variação de temperatura de 5°C reduzindo-se a temperatura do ar de combustão de 45°C para 40°C pode apresentar resultados significativos para redução de custos com a aquisição de combustível, mas a mesma variação de 5°C, reduzindo a temperatura do ar de combustão de 30°C para 25°C, pode apresentar uma redução de custos operacionais não significativos. Por este motivo, é imprescindível fazer uma avaliação das condições operacionais dos motogeradores, contemplando todas as estações do ano, para identificar se a alternativa de se reduzir a temperatura do ar de combustão de motogeradores de ciclo diesel é justificável sob o ponto de vista econômico.

Por fim, considerando-se o contexto atual em que o valor dos combustíveis teve uma alta bastante acentuada em relação ao ano de 2013, projetos como esse assumem importante relevância pelo seu potencial de redução de custos da atividade operacional em termoelétricas a MCI- Motor de Combustão Interna, contribuindo para o aumento da lucratividade da empresa.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR 14724 – Trabalhos Acadêmicos**, agosto 2020.

AKASYAH, M. K.; MAMAT, R.; ABDULLAH, A.; AZIZ, A.; YASSIN, H. M. (2015). Effect of ambient temperature on diesel engine combustion characteristics operation with alcohol fuel. **International Journal of Automotive and Mechanical Engineering**, v. 11, pp. 2373-2382. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/281676316_Effect_of_ambient_temperature_on_diesel-engine_combustion_characteristics_operating_with_alcohol_fuel. Acessado em: 21/09/2021.

BIRTOK, Băneasă; RAȚIU, S.; HEPUȚ, T. (2017). **Influence of intake air temperature on internal combustion engine operation**. International Conference on Applied Sciences (ICAS2016) - IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 163. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/163/1/012039/pdf>. Acessado em: 18/08/2021.

HINDREN, A.; RAMZI, R.; ZIYAD, J. (2013). Effect of Ambient Air Temperature on Specific Fuel Consumption of Naturally Aspirated Diesel Engine. **Journal of Science and Engineering**. v. 1 (1), pp. 1-7. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=en&lr=&id=9cboAQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Effect+of+Ambient+Air+Temperature+on+Specific+Fuel+Consumption+of+Naturally+Aspirated+Diesel+Engine&ots=bV5yekA1I_&sig=6eB19Tz7U72HSTICktvR6g4YX5c#v=onepage&q=Effect%20of%20Ambient%20Air%20Temperature%20on%20Specific%20Fuel%20Consumption%20of%20Naturally%20Aspirated%20Diesel%20Engine&f=false. Acessado em: 10/09/2021.

KAHANDAGAMAGE, G.; SENANAYAKE, N.; JATUNARACHCHI, T. (2013). Effect of Charge Air Temperature on Specific Fuel Consumption in Intercooled Direct Injection Diesel Engines Used for Power Generation. **International Review of Mechanical Engineering (IREME)**, 7 (7), pp. 1446-1450. Disponível em: <https://www.praiseworthyprize.org/jsm/index.php?journal=ireme&page=article&op=view&path%5B%5D=14167>. Acessado em: 11/08/ 2021.

LIN, C. Y.; JENG, Y. L. (1996). Influences of charge air humidity and temperature on the performance and emission characteristics of diesel engines. **Journal of Ship Research**. v. 40 (02), pp. 172-177. Disponível em: <https://onepetro.org/JSR/article-abstract/40/02/172/174823/Influences-of-Charge-Air-Humidity-and-Temperature?redirectedFrom=fulltext> Acessado em: 10/08/2021.