



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GABRIEL NEVES DA MOTTA SILVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE MODELO DE ANÁLISE EXERGÉTICA PARA
MOTORES DE USINAS TERMOELETRICAS OPERANDO EM CICLO DIESEL E
OTTO**

Recife

2020

GABRIEL NEVES DA MOTTA SILVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE MODELO DE ANÁLISE EXERGÉTICA PARA
MOTORES DE USINAS TERMOELETRICAS OPERANDO EM CICLO DIESEL E
OTTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos e Sistemas Térmicos.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra.

Recife

2020

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta

S587d Silveira, Gabriel Neves da Motta.
Desenvolvimento de modelo de análise exergética para motores de usinas termoeletricas operando em ciclo diesel e otto / Gabriel Neves da Motta Silveira. - 2020.
93 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2020. Inclui Referências e Anexos.

1. Engenharia mecânica. 2. Eficiência exergética. 3. Otimização da gestão de combustível. 4. Tecnologias de conversão de motores. I. Dutra, José Carlos Charamba (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2021-41

GABRIEL NEVES DA MOTTA SILVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE MODELO DE ANÁLISE EXERGÉTICA PARA
MOTORES DE USINAS TERMOELETRICAS OPERANDO EM CICLO DIESEL E
OTTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa (Examinador Interno)
Instituto Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Yana Batista Brandão (Examinadora Externa)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dedico a minha Mãe Margarida Neves, pela força de vontade de me ver vencer e me ensinar a sempre acreditar em dias melhores

Ao meu Pai Roberto, pela paciência e vontade de viver cada dia procurando sempre ser e a ensinar o que é ser um vencedor

A minha esposa pelo companheirismo, paciência e a todos os momentos que passamos juntos.

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação de mestrado só foi possível diante o valioso apoio dado por pessoas e empresas.

Primeiramente agradecer a Deus, através da fé que sinto nEle foi que consegui ter confiança para seguir em frente diante de todas as adversidades que surgiram no mestrado, pois quando me sentia só era com Ele que buscava refúgio afinal o que é impossível ao homem é possível para Deus.

Assim como desejo agradecer igualmente aos meus pais Margarida Neves e Roberto da Motta Silveira por me ensinar mais a ir além do que é estudado em livros, sempre mostraram o poder de perseverar e ter garra para enfrentar o medo e a ter paciência e esperar por dias melhores. A minha esposa Maria Cecilia por me acompanhar nessa caminhada e aos amigos Carlos, Suellen e Sthefanny por ajudarem a vencer os autodidatas.

Ao Prof. Dr. Jose Carlos Charamba Dutra por acreditar e apoiar o trabalho ajudando a melhorar com o seu conhecimento. A Profa. Dra. Leonie Asfora Sarubbo e ao Prof. Dr. Paulo Gamma pelo apoio a pesquisa e amizade.

À EPESA pelo apoio financeiro.

À DSfofer e ao Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI) pelo apoio técnico.

A todos meu muito obrigado.

RESUMO

A matriz de energia elétrica brasileira é conhecida pela maioria da sua capacidade provém de Usinas Hidroelétricas nas quais quando seus níveis estão baixo as usinas termoelétricas são responsáveis por suprir a demanda energética da população, sendo estas com a segunda maior capacidade energética do território nacional brasileiro, dentre estas usinas estão a Pau Ferro I e a Termomanaus que pertencem a Centrais Elétricas de Pernambuco (EPESA) que contam com 912 motores PERKINS modelo 20806A-E18TAG3 para gerar a energia demandada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) através do óleo diesel, e que através da DSofer terá a possibilidade de converter seus motores, de forma reversível, para a operação com gás natural através da inovação tecnologia denominada DDR2. O estudo objetivou utilizar a eficiência exergética e energética para análise da geração diante de uma demanda a ser entregue pela usina, consistindo no mapeamento da geração diante de dois modos de operações mais eficientes dos motores, fazendo que seja localizada qual a melhores configuração de operação da usina para aquela geração, seja para diesel ou para gás natural com a inovação tecnológica. Inicialmente foi feita a validação com os modos de operação prime 50% e 75% pois apresentaram melhores resultado com eficiência exergética de 42,85% e 43,82% respectivamente para operação com o óleo diese e 37,26% e 34,57% para o gás natural. Após o cálculo das eficiências foi usado o modelo de analise desenvolvido através do MatLab/Simulink, com 1% de desvio, que mostra a melhor configuração para demandas solicitadas de 118,56 MW, 177,84MW e a demanda outorgada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) de 237,12MW, senda esta a demanda utilizada para analisar as condições atuais da usina. O modelo chegou a identificar 15 combinações para a operação de motores para um desvio de -0,019% que chegam a economizar até 2160 litro/hora de diesel, já para a operação com o gás natural devido ao uso do DDR2 foi observado um potencial de economia de 1025Nm³/hora para as mesmas condições. Se considerar a operação atual das Usinas termoelétricas utilizando o diesel, que contaria com motores operando entre 75% e 77% do Prime, para uma demanda de 237,12 MW foram identificadas 26 configurações ao validar o modelo, com um potencial de economia de combustível de 2640 Litros/hora e ao estudar o comportamento do desvio na região de melhor operação esse potencial

poderia iria ser aumentado para mais 520 litros/hora. Com isso o modelo demonstrou resultados favoráveis à sua aplicação em usinas que utilizando hidrocarbonetos como combustíveis que na usina em análise acarretaria 6076 kg/hora a menos de emissão e o uso da inovação tecnológica geraria 39,27kg/hora a menos por cada motor em operação.

Palavras-chave: Eficiência exergética. Otimização da gestão de combustível. Tecnologias de conversão de motores.

ABSTRACT

The Brazilian electric energy matrix is known for the majority of its capacity supplied by hydroelectric power plants in which, when the level of water is low the thermoelectric power plants can operate, they are responsible for supplying the population's energy demand and is the second largest amount of energy supply in the country, among these power plants are Pau Ferro I and Termomanaus, which belong to the Centrais Elétricas de Pernambuco (EPESA), which count with 912 PERKINS engines model 20806A-E18TAG3, to generate the energy demanded by the National Electric System Operator (ONS), using diesel oil, and that through the DSofer you will have the possibility of converting its engines, in a reversible way, to an operation with natural gas through the innovation in technology called DDR2. The study aimed at using exergetic and energy efficiency for the analysis of the generation in face of a demand to be delivered by the power plant, consisting of mapping the generation in face of two more efficient modes of operation of the engines, making it located which is the best configuration of operation of the power plant for that generation, either for diesel or for natural gas with technological innovation. Initially, the prime 50% and 75% operation modes were validated, as they presented the best results with exergy efficiency of 42.85% and 43.82%, respectively, for diesel and 37.26% and 34.57% for natural gas. After calculating all the efficiencies, the analysis model developed through MatLab/Simulink was used, with 1% deviation, which shows the best configuration for requested demands of 118.56 MW, 177.84MW and the demand granted by the National Electric Energy Agency (ANEEL) that is 237.12MW. The model has identified 15 combinations for the operation of engines for a deviation of -0.019% that can save up to 2160 liters/hour of diesel, while for the operation with natural gas due to the use of DDR2 a potential saving of 1025Nm³/hour was observed for the same conditions. If the current operation of the thermoelectric power plant using diesel, which would have engines operating between 75% and 77% of Prime, for a demand of 237.12 MW, 26 configurations were identified when validating the model, with a fuel saving potential of 2640 liters/hour and when studying the behavior of the deviation in the region of better operation this potential could be increased to another 520 liters/hour. Thus, the model demonstrated favorable results for its application in power plants that using hydrocarbons as fuels that in the EPESA power plant analysis would result in 6076

kg/hour less emissions and the use of technological innovation would generate 39.27 kg/hour less for each engine in operation.

Keywords: Exergy efficiency. Fuel management optimization. Engine conversion technologies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama p-v do ciclo ar-padrão Otto.....	30
Figura 2 - Válvula Borboleta para motores de combustão interna	32
Figura 3 - Transformação de energia na forma ordenada.....	34
Figura 4 - Transformação de energia de uma fonte de armazenamento desordenada.....	35
Figura 5 - Centrais Elétricas de Pernambuco S.A. – EPESA.....	42
Figura 6 - Fluxograma do analisador de Exergia para o Motor Perkins modelo 2806A-E18TAG3.....	47
Figura 7 - Função responsável pelo cálculo do fluxo molar do processo	49
Figura 8 - Função responsável pelo cálculo da Razão Estequiométrica da mistura Ar/Combustível.....	49
Figura 9 - Função responsável pelo cálculo do fluxo molar dos gases de combustão.....	50
Figura 10 - Função para cálculo da entalpia (ΔH) utilizando o meio atmosférico como referencial a 25°C e 1atm	50
Figura 11 - Função para cálculo da entropia (ΔS) utilizando o meio atmosférico como referencial a 25°C e 1atm	50
Figura 12 - Função responsável pelos cálculos da exergia contida nos gases de exaustão.....	51
Figura 13 - Função responsável pelo cálculo da exergia química e da eficiência exergética do motor.....	51
Figura 14 - Função responsável pelo cálculo da exergia associada a transferência de calor	52
Figura 15 - Função responsável pelo cálculo da exergia destruída pelo sistema.....	52
Figura 16 - Display com os dados de saída das funções para cálculo de exergia e eficiência exergética.....	52
Figura 17 - Passo a passo do funcionamento do programa analisador exergético para identificar a melhor configuração da usina termoelétrica para diante de uma solicitação de demanda	53
Figura 18 - Fluxograma do programa para geração de relatório dos arranjos capazes de atender a demanda solicitada pela ONS	54

Figura 19 - Exergias associadas a cada regime de operação do motor Perkins 2806A-E18TAG3	56
Figura 20 - Eficiência energética associada ao modo de operação do motor Perkins 2806A-E18TAG3	57
Figura 21 - Exergias associadas a cada regime de operação do motor Perkins 2806A-E18TAG3 com a Inovação tecnológica DDR2 desenvolvida pela DSofer	58
Figura 22 - Superfície de resposta da eficiência exergetica para geração entre 117MW e 237MW com motores com motores a 50% e 75% do Prime..	59
Figura 23 - Geração de energia, em MW, de acordo com o modo de operação de cada Power House	60
Figura 24 - Consumo de Diesel (L/h) de acordo com o modo de operação de cada Power House.....	60
Figura 25 - Eficiência Exergetica Global considerando o moto Perkins operando pelo Óleo Diesel.....	61
Figura 26 - Eficiência Energética Global considerando o moto Perkins operando pelo Óleo Diesel.....	61
Figura 27 - Consumo de Gás Natural (Nm ³ /h) de acordo com o modo de operação de cada Power House	62
Figura 28 - Eficiência Exergetica Global considerando o motor Perkins operando com Gás Natural	62
Figura 29 - Eficiência Energética Global considerando o motor Perkins operando com Gás Natural	63
Figura 30 - Configurações de motogeradores e consumo de Diesel (Litros/Hora) como combustível para atender a demanda solicitada de 118,56MW....	64
Figura 31 - Configurações de motogeradores e consumo de Gás Natural (Nm ³ /Hora) como combustível para atender a demanda solicitada de 118,56MW ...	64
Figura 32 - Configurações de motogeradores e consumo de Diesel (Litros/Hora) como combustível para atender a demanda solicitada de 177,84MW.....	65
Figura 33 - Configurações de motogeradores e consumo de Gás Natural (Nm ³ /Hora) como combustível para atender a demanda solicitada de 177,84MW ...	66

Figura 34 - Configurações de motogeradores e consumo de Diesel (Litros/Hora) como combustível para atender a demanda solicitada de 237,12MW.....	67
Figura 35 - Configurações de motogeradores e consumo de Gás Natural (Nm ³ /Hora) como combustível para atender a demanda solicitada de 237,12MW ...	67
Figura 36 - Eficiência exegética baseada na razão de motores operando a 75% e 50% do Prime com Diesel para uma demanda de 237,12MW.....	68
Figura 37 - Eficiência exegética baseada na razão de motores operando a 75% e 50% do Prime com Gás Natural para uma demanda de 237,12MW.....	68
Figura 38 - Razão de motores operando a 75% e 50% do Prime tendo o Diesel como combustível para uma operação com 600 motores e o comportamento do desvio e consume	69
Figura 39 - Razão de motores operando a 75% e 50% do Prime tendo o Gás Natural como combustível para uma operação com 870 motores e o comportamento do desvio e consume	70
Figura 40 - .Geração de energia, em MW, de acordo com o modo de operação de cada Power House utilizando os dados operacionais da EPESA	70
Figura 41 - Eficiência Exergetica Global considerando o moto Perkins operando pelo Óleo Diesel utilizando os dados operacionais da Epesa	71
Figura 42 - Eficiência energética Global considerando o moto Perkins operando pelo Óleo Diesel utilizando os dados operacionais da Epesa	71
Figura 43 - Consumo de óleo Diesel (L/h) de acordo com o modo de operação de cada Power House baseado nos dados operacionais da EPESA.....	72
Figura 44 - Configurações de motogeradores e consumo de Diesel (Litros/Hora) como combustível para atender a demanda solicitada de 237,12MW utilizando dados da EPESA.....	72
Figura 45 - Comportamento do desvio e a economia de combustível referente a utilização de 575 motores diante do aumento da proporção de motores operando a 75% e 77% do Prime tendo o Diesel como combustível e considerando os dados operacionais da EPESA.....	73
Figura 46 - Razão de motores operando a 75% e 77% do Prime tendo o Diesel como combustível para uma operação com 575 motores e o comportamento do desvio e consumo considerando os dados operacionais da EPESA	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados técnicos básicos do motor Perkins 2806A-E18TAG3.	43
Tabela 2 - Consumo de combustível de acordo com o regime de funcionamento. ...	44
Tabela 3 - Transferência/Balanço de energia durante o funcionamento do motor....	44
Tabela 4 - Dados de funcionamento do motor de acordo com o regime de operação.....	45
Tabela 5 - Dados de funcionamento do motor utilizando o modulo DSOFER DDR2 de acordo com o regime de operação	46
Tabela 6 - Dados de entrada relacionado ao moto gerador.....	48
Tabela 7 - Dados de entrada relacionado ao combustível.....	48
Tabela 8 - Análise exergética do motor Perkins 2806A-E18TAG3 utilizando Diesel.....	55
Tabela 9 - Análise exergética do motor Perkins 2806A-E18TAG3 utilizando DDR2 e operando com Gás Natural.....	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	MOTIVAÇÃO.....	20
1.2	OBJETIVO GERAL.....	21
1.3	OBJETIVOS ESPECIFICOS	21
2	ESTADO DA ARTE.....	22
3	FUNDAMENTAÇÃO TEORICA	26
3.1	MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA.....	26
3.1.1	Motores operando no ciclo Diesel.....	27
3.1.1.1	Energia de Ativação em Motores a Diesel	28
3.1.2	Motores operando no ciclo Otto.....	29
3.1.2.1	Energia de Ativação em Motores do Ciclo Otto	30
3.1.2.2	O controle de combustão em motores do ciclo Otto	32
3.2	CLASSIFICAÇÃO DAS FORMAS DE ENERGIA.....	33
3.3	O CONCEITO DA EXERGIA	35
3.3.1	Exergia associada a transferência de trabalho	36
3.3.2	Exergia associada a transferência de calor.....	37
3.3.2.1	Estudo da combustão	37
3.3.2.2	Mistura de reagente e produtos	38
3.3.2.3	Cálculo de perdas por calor em motores de combustão interna.	39
3.3.3	Exergia associada a transferência constante da matéria	40
3.3.4	Cálculo do balanço da taxa de exergia para volumes de controle em regime permanente	40
3.3.5	Eficiência Exergetica.....	41
4	METODOLOGIA	42
4.1	CENTRAIS ELÉTRICAS DE PERNAMBUCO S.A (EPESA).....	42
4.2	CARACTERÍSTICAS DO MOTOR PERKINS MODELO 2806A-E18TAG3 NO CICLO DIESEL	43
4.3	CARACTERÍSTICA DO MOTOR PERKINS COM A INOVAÇÃO TECNOLÓGICA DESENVOLVIDA PELA DSOFER COMPONENTES AUTOMOTIVOS PARA O MOTOR PERKINS 2806 OPERAR NO CICLO OTTO COM GÁS NATURAL	46

4.4	DESENVOLVIMENTO DA MODELAGEM PARA CONFECÇÃO DO ANALISADOR EXERGETICO	47
4.5	VARIÁVEIS DE ENTRADA.....	48
4.6	BLOCOS DE PRÉ PROCESSAMENTO.....	49
4.7	BLOCOS PARA CALCULOS DOS COEFICIENTES ESTEQUIMETRICOS, ENTALPIA E ENTROPIA.....	50
4.8	BLOCOS PARA CALCULOS DE EXERGIA	51
4.9	BLOCOS DE VISUALIZAÇÃO DE DADOS	52
4.10	MAPEAMENTO DE DEMANDA PARA CONDIÇÃO IDEAL.....	53
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1	CASO 1- ESTUDO DO MOTOR OPERANDO COM DIESEL NA SUA FORMA STANDARD.....	55
5.2	CASO 2 - ESTUDO DO MOTOR OPERANDO COM A INOVAÇÃO TECNOLOGIA (DDR2) DESENVOLVIDA PELA DSOFER.....	57
5.3	MAPEAMENTO DA DEMANDA PARA MOTORES OPERANDO A 50% E 75% DO PRIME.....	58
5.4	ESTUDO DE CASO DE MOTORES OPERANDO A 50% E 75% DO PRIME COM CICLO DIESEL E OTTO	63
5.5	ESTUDO DE CASO DE MOTORES OPERANDO A 77% E 75% DO PRIME COM CICLO DIESEL PARA ATENDER A DEMANDA OUTROGADA PELA ANEEL	70
6	CONCLUSÕES	75
7	RECOMENDAÇÕES.....	76
	REFERÊNCIAS.....	77
	ANEXO A – ANALISADOR DE EXERGIA.....	80
	ANEXO B – FUNÇÃO PARA CALCULO DO FLUXO MOLAR.....	81
	ANEXO C – FUNÇÃO PARA DO Φ.....	82
	ANEXO D – FUNÇÃO PARA CÁLCULOS DAS CONSTANTES ESTEQUIOMÉTRICAS	83
	ANEXO E – FUNÇÃO ENTALPIA	84
	ANEXO F – FUNÇÃO ENTROPIA	87
	ANEXO G – EXERGIA DOS GASES DE EXAUSTÃO	90
	ANEXO H – FUNÇÃO PARA CALCULO DE EXERGIA QUIMICA E EFICIÊNCIA EXERGETICA	91

ANEXO I – FUNÇÃO PARA EXERGIA ASSOCIADA A TRANSFERENCIA DE CALOR.....	92
ANEXO J – FUNÇÃO PARA CALCULAR DE EXERGIA DESTRUIDA.....	93
ANEXO K – MAPEAMENTO DE CONFIGURAÇÃO DA EPESA PARA MOTORES OPERANDO A 75% E 77% DO PRIME	94

1 INTRODUÇÃO

A maioria dos países do mundo, incluindo a União Europeia e os Estados Unidos, usam termoelétricas como sua maior fonte geradora de energia, são movidas basicamente por óleo combustível, Gás Natural, carvão, e em alguns casos usam energia proveniente de fissão nuclear, dependendo da disponibilidade de cada país. Se trazer essa realidade para o Brasil é entendido que a maioria da geração da energia se dá pelas usinas hidrelétricas e são complementadas pelas usinas termoelétrica (Alves Filho,2003). Mas no cenário brasileiro o que se vê muitas vezes é que usinas que geram a energia para a população, através do Gás Natural ou Óleo diesel, se tornam cada vez mais importante quando as usinas hidroelétricas não atendem a demanda devido ao baixo nível de água nos reservatórios (G1, 2018).

Na matriz energética mundial, que considera a fontes de energia disponíveis para suprir a necessidade de energia, cerca 55% de suas fontes provem do petróleo e seus derivados junto com o gás natural, já no Brasil essa fonte corresponde a cerca de 49,4% de suas fontes, já quando se fala a respeito das fontes de energia que são convertidas em energia elétrica, ou seja matriz elétrica, no território brasileiro o Gás Natural se encontra em segundo lugar como fonte mais usada perdendo apenas para a energia elétrica obtida de recursos hídricos. Um fator a ser observado mundialmente e que se reflete no Brasil é que nos últimos trinta anos o gás natural tem se tornado uma fonte mais atrativa para a produção de energia elétrica aumentando em 18,4% a sua participação como fonte em contra partida os derivados de petróleo como o óleo diesel tem sofrido uma queda de 7% na procura como combustível para essa finalidade segundo a Agencia Internacional de Energia (International Energy Agency, 2018) e isso se dá seja por motivos logísticos ou até mesmo pelo custo.

A utilização de cada usina se deve a sua localização e as formas de energias a serem convertidas em eletricidade, como discutido nos exemplos acima as usinas hidrelétricas se utilizam da energia potencial gravitacional, que consiste na energia armazenada em virtude da altitude, quanto mais alto o nível de água estiver mais será a eletricidade gerada, por isso que em períodos de seca a geração é comprometida. Já as Termoelétricas, que tem o Óleo diesel ou Gás Natural como combustíveis, utilizam a energia potencial química de seus insumos, pois consiste na energia armazenada nas ligações entre moléculas que são transformadas através da combustão em motores de combustão interna, no qual serão os objetos de estudo

dessa dissertação (FLIPPO FILHO,2018).

Os motores de combustão interna mais usados em usinas termoelétricas são diferenciados de acordo com o seu ciclo de operação, podendo ser do ciclo Otto ou Diesel, a diferença entre ele se dá na forma em que se dá a combustão de seus combustíveis. Motores que usam o diesel como insumo tem como característica a compressão do ar até o seu pistão chegar no ponto morto superior no qual o diesel é aspergido e devido a temperatura da câmara estar alta, o combustível em ignição e fornece a energia para que o pistão possa ir para o ponto morto inferior gerando um movimento rotativo. Já os motores a Gás Natural há uma mistura de ar e o combustível que precisa ser ativada através da centelha da vela de ignição, para que se possa ter a energia necessária para ativar a combustão (MORAN; SHAPIRO, 2005).

Devido ao uso da energia potencial química nas usinas termoelétricas para gerar eletricidade, espera-se que um engenheiro ao projetar um sistema vise mais eficiência técnica ao menor custo sob os aspectos técnicos, econômicos e legais, no que diz respeito às consequências éticas, ecológicas e sociais. A análise exegética é uma ferramenta útil para abordando tal impacto ambiental da utilização de recursos energéticos e além de promover um uso mais eficiente dos recursos energéticos, pois possibilita os encontrar onde, tipos e grandezas de perdas a serem determinadas. O desenvolvimento de métodos para analisar a exergia podem ajudar nas atividades e oferecer informações exclusivas sobre possíveis melhorias com ênfase especial em meio ambiente e sustentabilidade. Além disso, a análise exegética revela se é ou não possível projetar sistemas de energia mais eficientes, reduzindo as ineficiências.(KANOGLU; DINCER; CENGEL, 2009)

Projetos para essa magnitude de geração de energia envolve a aplicação de princípios da termodinâmica, mecânica de fluidos e transferência de calor, além de campos como materiais, fabricação e projeto mecânico. Projetos de sistemas térmicos também necessitam de considerações no que diz respeito a engenharia econômica, já que os custos sempre são um fator importante a ser considerado na escolha de um equipamento. O termo termoeconomia pode ser aplicado nessa área geral de aplicações que combinem exergia e economia para otimização do projeto e a operação de sistemas térmicos (MORAN; SHAPIRO, 2005).

Baseado na tendência mundial para aplicação do Gás Natural como fonte energética para as usinas termoelétricas, devido ao baixo custo operacional e de insumo, a DSofer, uma empresa de tecnologia com ênfase em sistemas embarcados

para motores a combustão interna, desenvolveu um sistema em que consiste em converter, de forma não destrutiva e reversível, um motor de ciclo Diesel em ciclo Otto com o projeto intitulado de “Sistema de Gerenciamento Eletrônico Multicombustível para Motores Perkins 2806 ” desenvolvido para os moto geradores das Centrais Elétricas de Pernambuco S.A. – EPESA do grupo EBRASIL localizada no bairro Três Ladeiras, Igarassu – Pernambuco.

1.1 MOTIVAÇÃO

No atual período de crescentes aumentos no preço dos combustíveis derivados do petróleo, dentre ele o Óleo Diesel, como sinalizado pela FECOMBUSTIVEIS (2017) a utilização de tecnologias que possam aumentar a gama operacional da usinas termoelétricas sem que prejudique a atual operacionalidade e infraestrutura já consolidadas se torna uma oportunidade de operar em tempos de crise.

Os já consolidados motores PERKINS modelo 20806A-E18TAG3 operando a óleo diesel combinado com a solução oferecida pela DSofer com o Sistema de Gerenciamento Eletrônico Multicombustível poderia oferecer outra perspectiva a operação da Usina Termo Elétrica EPESA possibilitando o uso de Gás Natural como combustível, podendo ter a possibilidade de redução de custos seja por motivos operacionais, como transporte e armazenamento, ou até mesmo pelo preço do combustível alternativo.

Nesse sentido, esta dissertação pretende desenvolver um modelo de análise de eficiência exergetica usando o Matlab/Simulink como ferramenta de apoio para um motor PERKINS modelo 20806A-E18TAG3 operando no ciclo diesel, de forma Standard e operando no Ciclo Otto com Gás Natural, para isto, o motor contará com a inovação tecnológica composta por um Sistema de Gerenciamento Eletrônico Multicombustível instalado no motor permitindo operar ou com diesel ou com Gás Natural sem haver modificações destrutivas, este equipamento foi desenvolvido pela empresa DSofer Equipamentos Automotivos. Esta inovação será apresentada no decorrer da dissertação. Os resultados deste trabalho servirão para que a Empresa EPESA possa avaliar as características de operação dos motores nos dois ciclos (Diesel e Otto).

1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um modelo em Matlab/Simulink para realizar a análise exérgica do motor PERKINS (referência 20806A-E18TAG3), operando no ciclo Diesel e no ciclo Otto com a inovação desenvolvida pela DSofer.

1.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- a) Levantar o estado da arte através de pesquisas a serem realizadas procurando identificar estudos que tratem sobre análise exérgica de motores diesel operando com combustíveis diferentes;
- b) Apresentação das características do motor PERKINS modelo 20806A-E18TAG3 e informações sobre a Inovação desenvolvida pela DSofer no motor para a sua conversão para Gás Natural;
- c) Modelagem termodinâmica baseada na primeira lei e na segunda lei do motor PERKINS modelo 20806A-E18TAG3 operando a Diesel e a Gás Natural;
- d) Desenvolvimento do **Modelo de Análise Exérgica** em Matlab/Simulink;
- e) Realizar a análise comparativa entre a **eficiência exérgica** do motor Perkins operando com diesel (standard) e operando no ciclo Otto com a inovação;
- f) Mapeamento de geração e a eficiência com diferentes arranjos do modo de operação dos motogeradores da Unidade Termoelétrica.

2 ESTADO DA ARTE

A melhoria das tecnologias e economia de energia com de baixo teor de emissão de carbono no sistema económico é a base do desenvolvimento económico sustentável. Por conseguinte, medir o enviesamento da evolução técnica na perspectiva da poupança de energia e de baixas emissões de carbono é uma condição prévia para clarificar se o crescimento económico se manifesta como sendo de baixas emissões de carbono e sustentável. Um exemplo sempre foi a China em que era conhecida por suas emissões de carbono e maquinário que não economizavam energia mas ao longo dos anos e investimentos em estudo e tecnologia é possível ver que a tendência de crescimento aumenta em contra partida que emissões e desperdício de energia veem diminuindo.(XIU; ZHANG; HU, 2019)

LI et al., (2018) destaca a importância do conhecimento das perdas de exergia para o processo em que envolve produção de energia através de equipamento que tem uma reação química como fonte de geração, o estudo foi baseado em motores do ciclo Diesel e a análise da energia interna do combustível pois é de conhecimento de todos que a exergia de motores operado a diesel é mais alta devido as poucas perdas que o combustível tem na sua reação, o autor ainda destaca que o experimento em bancada se dá para ter uma noção mas que na medida em que se vai aumentando a proporção do motor isso vai ficando cada vez mais relevante as perdas de exergia.

Outra metodologia ainda muito utilizada para análises de eficiências e emissões são programas que simulem o comportamento de um determinado dispositivo, ARMANDO et al., (2015) fez um estudo para poder validar os modelos de simulação para a realidade, destacando nesse caso o BioDiesel como um potencial substituo ao Diesel de Petróleo pois levantava dados de poluentes mas como todos os artigos sempre mostra a perca de eficiência tornando a mostrar em que o BioDiesel faz com que os motores não gerem o que se é desejado devido a mudança no Poder Calorifico do combustível que está sendo utilizado, mas a sua conclusão ainda se deu favorável pois a longo prazo iria se diminuir alguns poluentes na atmosfera, já Boretti, (2017) mostrou dados mais animadores quando se trata numa mistura, dentro da câmara de combustão, de Diesel e GLP, para este estudo se fez necessário a construção de uma entrada de GLP fazendo com que mudasse toda a característica estrutural do motor mas mostrou dados mais animadores pois além da diminuição de poluentes e até a extinção de alguns ele destacou também que a proporção máxima que chegou foi de

95% de GLP com um bom desempenho na geração de energia e em alguns casos sem a perda de torque.

Com isso, há a necessidade de se abordar os efeitos da mudança do diesel como principal combustível na geração de energia, OTHMAN et al. (2017) no seu artigo de revisão mostra o impacto de poluentes originados de motores operando com óleo pesado ou por motores a Diesel, destaca também o uso dos combustíveis verdes originados de Óleos de fritura ou até de origem vegetal (biodiesel), porém algo que mostrou um destaque para a dissertação foi o enfoque da viabilidade do uso de gás natural operando junto com o combustível fazendo com que o uso dessa alternativa diminua consideravelmente a emissão de poluentes.

Outro estudo é mostrado por YUAN et al., (2008) que na sua época já destacou o forte avanço nas pesquisas, principalmente na Europa, para arranjar um combustível que pudesse vir a ser um bom substituto para servir de combustível para motores do ciclo Diesel, no estudo foi destacado que o biodiesel tem um consumo 12% maior que o de diesel para gerar a mesma potência e destacou outros poluentes que haveria de existir junto ao processo, outro estudo que confirma o de YUAN et al., (2008) é o de RADZI; DROEGE, (2014) em que destaca a necessidade dos órgãos para regular a emissão de poluentes e da necessidade da intensificação de investimento em projeto que venha a otimizar motores com emissões baixa de poluentes de modo que não afete um ecossistema ou a própria sociedade que viva dentro do raio do que está vindo comprometer a qualidade do ar, destacando termoelétricas movidas a gás natural em que o aproveitamento da energia vem beneficiar uma sociedade sem prejudicar o seres que vivem ao redor.

Para RIVERO (1999) o estudo da Exergia é dividido no modelo dos três E's, que são: energia, economia e ecologia. Esses termos estão ligados diretamente ligados entre si devido a complexidade que envolve um projeto, no caso dele, de uma planta petroquímica. O autor destaca a importância de conhecer os componentes que faz parte de cada processo industrial para que possa saber onde se encontram cada irreversibilidade para poder identificá-las e atuar na melhor forma, o objeto de estudo do artigo é uma torre de destilação que após o estudo teve um ganho na eficiência exergetica pois houve um ganho da energia retirada da fonte que forneceria calor para a torre, esta vantagem foi listada como o primeiro 'E' pois há um melhoramento na energia que é aproveitada no processo. Para o segundo 'E' ele destaca em valores o preço do custo do combustível que diminuiria em torno de 5% devido ao uso de menos

insumos para conseguir separar os derivados de petróleo. Já a respeito da Ecologia a cada vez que uma análise é feita para diminuir as perdas e as ineficiências a planta industrial como um todo se torna mais sustentável pois o processo conseguiria gerar menos CO₂ além de outros gases nocivos ao meio ambiente.

Os ganhos de um estudo exergetico vão além de um ganho para uma planta industrial, pois a eficiência desse princípio da termodinâmica tem uma ligação direta com o impacto ambiental e com a sustentabilidade pois uma das utilidades da exergia é uma ferramenta para melhor gerir o suprimento das fontes de energia além disso esse princípio serve para localizar os pontos com maiores perdas de energia ao longo da linha de produção e poder atuar de forma a aprimorar e sanar pontos que seriam tidos como resistência para o processo. Diante desses pontos o maior percentual de exergia significa aproveitar mais a fonte de energia que está sendo usada e diminuindo seus custos fazendo com que precise de uma demanda menor por recursos naturais e fazendo com que o impacto diminua a medida em que a sustentabilidade do processo seja amplificada devido a demanda reduzida por insumos sem diminuir a produção (KANOGLU; DINCER; CENGEL, 2009).

GHANNADZADEH; SADEQZADEH (2016) utilizam a exergia como ferramenta para melhorar a produção numa indústria química, identificando as unidades onde são menos eficientes para poder atuar de forma a melhorar o processo de produção. No caso desse artigo o objeto de estudo de uma planta de produção de etileno e o estudo da exergia serviu não apenas para identificar os pontos de baixa eficiência mas sim como uma ferramenta de qualidade para identificar possíveis perdas na planta e com isso melhores meios para atuar de forma a manter a produção utilizando menos energia mantendo a qualidade e as especificações do produto final. Nesse estudo foi identificado que um compressor era responsável por 45% da exergia perdida devido e que o sistema de resfriamento a temperatura saia maior que estaria no planejamento original, com isso foi possível agir de forma cirúrgica no que diminuía a produção da planta.

Há também pontos importantes a serem destacados como observados por Aghbashlo e Rosen, (2018) que criaram um conceito de análise “exergoeconomicoambiental” ter um parâmetro do impacto do estudo da exergia em um empreendimento, indo da eficiência energética, passando pelo impacto econômico e finalmente o ambiental, dando como exemplo que em um trocador de calor o custo ecológico a cada 1 dólar investido pode chegar a 2,9 dólares de custo ecológico, porem

se olharmos apenas um equipamento esse a tendência é concluir que o impacto é pequeno mas ao expandir o olhar para uma planta industrial como um todo o impacto poderá ser muito maior do que se planejou inicialmente.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

Com o mundo cada vez mais procurando alternativas viáveis para termoelétricas conseguirem produzir energia de forma a amenizar emissões dos gases de combustão é necessário entender como pode-se melhor aproveitar os motores que fazem parte desses grandes empreendimentos, se fazendo necessário estudar os modelos mais utilizados de combustão interna como ciclo diesel e otto assim como a influência da eficiência da exercia na administração desses motores para ajudar a aumentar seu potencial para geração de energia.

3.1 MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA

Para entender as demandas técnicas sobre motores a combustão antes é importante entender os princípios físico-químicos que regem a operação destes motores que está ligado a combustão que acontece internamente.

A reação de combustão é uma reação exotérmica de oxidação de reagente que contenha energia sob forma de energia potencial química, definida como uma reação química exotérmica entre dois tipos de reagentes: o combustível (reagente que contém a energia potencial química a liberar durante a reação) e o comburente (Na maioria dos casos práticos para motores a combustão interna o comburente é o oxigênio contido no ar atmosférico). (Turns. 2013)

Para que haja início, muito menos sustentação, da reação de combustão na totalidade dos casos de interesse prático não basta apenas a presença no mesmo ambiente dos reagentes combustível e comburente. Para que se tenha a reação de combustão é necessário fornecer uma energia à mistura de reagentes, conhecida como energia de ativação. (Brown et al. 2005).

Os motores a combustão interna são aqueles cuja reação de combustão se dá dentro do motor, mais precisamente no mesmo ambiente em que se realizará o trabalho mecânico que será disponibilizado pelo motor, sendo o produto da reação de combustão o responsável por gerar o trabalho mecânico. Na indústria de motores mundial dois ciclos termodinâmicos são mais utilizado, são que são o ciclo Otto e o ciclo Diesel. Estes ciclos se diferenciam teoricamente e termodinamicamente, pelo modo que se dá o processo de combustão em cada um deles, uma importante diferenciação entre os motores que operam nos ciclos Otto e Diesel está nos métodos

para o fornecimento da energia de ativação da reação de combustão. (BRUNETTI, 2012).

No ciclo Otto, a energia de ativação é fornecida mediante a introdução de energia mediante uma fonte de ignição externa. Na esmagadora maioria dos casos, tal fonte é uma centelha, oportunamente fornecida por um elemento dedicado para tal fim, comumente denominado vela de ignição, que oferece energia de ativação a certa porção da massa de reagentes. Por este motivo, motores operando no ciclo Otto são também conhecidos como motores de ignição por centelha, já no ciclo Diesel a energia de ativação é fornecida através da temperatura do comburente, simplesmente aquecido através de sua oportuna compressão na própria câmara de combustão. Por este motivo motores operando neste ciclo são também conhecidos como motores de ignição por compressão (BRUNETTI, 2012).

3.1.1 Motores operando no ciclo Diesel

Os motores operando no ciclo Diesel modernos surgiram como resultado dos princípios de combustão interna primeiro proposto por Sadi Carnot no início do século XIX. O Dr. Rudolf Diesel aplicou os princípios de Sadi Carnot's em um ciclo patenteado ou método de combustão que se tornou conhecido como o "diesel" ciclo. Seu motor operava quando o calor gerado durante a compressão do ar causando a ignição do de combustível e conseqüentemente a ignição da mistura. O primeiro motor do Dr. Diesel funcionou com pó de carvão e usou uma pressão de compressão de 1500 psi para aumentar sua eficiência teórica. Além disso, seu primeiro motor não tinha provisões para nenhum tipo de sistema de refrigeração. Conseqüentemente, entre a extrema pressão e a falta de refrigeração, o motor explodiu e quase matou seu inventor. Depois de se recuperar de seus ferimentos, Diesel tentou novamente usando óleo como combustível, adicionando uma camisa de água de resfriamento ao redor do cilindro e abaixando a pressão de compressão para aproximadamente 550 psi que acabou sendo bem-sucedida. Os direitos de produção do motor foram vendidos a Adolphus Bush, que construiu os primeiros motores diesel para uso comercial, instalando-os em sua cervejaria St. Louis para acionar várias bombas. (MOLLENHAUER e TSCHÖKE, 2014)

Um motor a diesel é semelhante ao motor a gasolina usado na maioria dos carros. Ambos são motores de combustão interna, o que significa que eles queimam

a mistura ar-combustível dentro dos cilindros. Ambos são motores alternativos, sendo acionados por pistões movendo-se lateralmente em duas direções. A maioria de suas partes são semelhantes. Embora um motor a diesel e um motor a gasolina operem com componentes diferentes além de que um motor a diesel, quando comparado a um motor a gasolina é mais pesado devido aos materiais serem mais fortes e pesados pois são dimensionados para suportar as forças dinâmicas maiores e maiores pressões de combustão presentes no motor a diesel (MOLLENHAUER e TSCHÖKE, 2014)

No ciclo Diesel os reagentes da reação de combustão são o comburente, que é o oxigênio contido no ar de admissão e o combustível, nesse caso o hidrocarboneto com características físico-químicas específicas. Como temperatura do comburente na câmara de combustão chega a uma temperatura que o combustível utilizado deve ser capaz, a esta temperatura, de iniciar sua combustão sem requerer adicionais aportes de energia, a combustão poderá ter início apenas mediante a introdução deste combustível (BENNETT, 2014).

3.1.1.1 Energia de Ativação em Motores a Diesel

No ciclo Diesel, como já descrito, na fase final do curso de compressão do pistão, a temperatura do ar na câmara de combustão pode estar próxima de 450 °C. Se o combustível utilizado for capaz, a esta temperatura, de iniciar sua combustão sem requerer adicionais aportes de energia, a combustão poderá ter início apenas mediante a introdução deste combustível. É justamente assim que opera o motor Diesel. Como combustíveis aplicáveis ao ciclo Diesel estão combustíveis com características físicas e químicas tais que sua autoignição se dá a temperaturas iguais, ou inferiores, àqueles presentes na câmara de combustão na fase final do curso de compressão. (KATES e LUCK, 2003)

Portanto, para que o motor possa operar com ignição por compressão, após se atingir temperatura suficiente na câmara de combustão, teoricamente falando, basta introduzir o combustível para que a reação possa ocorrer.

Contudo, do ponto de vista energético, através da compressão do comburente e da oportuna escolha do combustível (com sua adequada introdução na fase final do curso de compressão) estarão reunidas todas as condições necessárias à combustão. Nos motores operando no ciclo Diesel, a energia de ativação é dada unicamente

mediante a compressão do comburentes. Tal característica está à base do conceito deste tipo de motor. Devido a essa característica apenas alguns tipos de combustíveis podem ser utilizados. (MOLLENHAUER e TSCHÖKE, 2014)

Uma grande variedade de combustíveis requer temperaturas para sua autoignição que não podem ser atingidas pela compressão do comburentes, logo, esses combustíveis não poderão, de forma alguma, serem usados em motores operando no ciclo Diesel.

3.1.2 Motores operando no ciclo Otto

O ciclo Otto recebe o nome do engenheiro alemão que o implementou com sucesso em 1876. A Figura 1 apresenta a representação do ciclo Otto ideal no diagrama p-V. Neste diagrama o eixo horizontal representa o volume instantâneo da câmara e o eixo vertical representa a pressão na câmara de combustão. (LARSON, 2008)

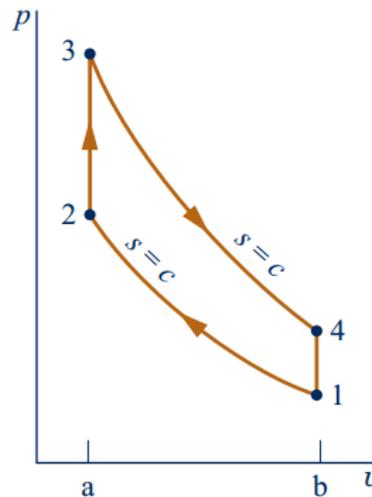
Para análise teórica do ciclo Otto ideal, pode-se iniciar no ponto 1 do gráfico. Neste ponto, uma massa de reagentes (uma mistura de combustível e comburentes) foi introduzida na câmara de combustão. O pistão é movimentado no sentido de reduzir o volume desta câmara, acarretando o aumento de pressão no seu interior, descrevendo com isso a linha 1-2 no gráfico (LIBERMAN, 2008)

Com os reagentes comprimidos no ponto 2 do gráfico, o ciclo Otto prevê a introdução de calor, por meio de combustão destes reagentes. Para desencadear tal combustão o ciclo Otto prevê a introdução, neste ponto, da energia de ativação da reação. Neste Ciclo prevê que a combustão ocorra a volume constante, ou seja, uma combustão isocórica. (LIBERMAN, 2008)

Desta forma o fluido na câmara de combustão descreve o percurso 2-3 no gráfico. Neste percurso, efetuado a volume constante, há aumento de pressão. Tal aumento de pressão gera força sobre o pistão, impulsionando-o no sentido do aumento de volume, gerando o percurso 3-4 do ciclo, no qual ocorre a expansão do fluido e a entrega de trabalho mecânico. (Heywood, 1988)

Na porção final do ciclo, do ponto 4 ao ponto 1, temos a redução de pressão a volume constante.

Figura 1 - Diagrama p-v do ciclo ar-padrão Otto



Fonte: Moran; Shapiro, 2009.

3.1.2.1 Energia de Ativação em Motores do Ciclo Otto

No ciclo Otto os reagentes da reação de combustão são:

- Comburente: o oxigênio contido no ar de admissão;
- Combustível: hidrocarboneto com características físicas e químicas distintas

daquelas oferecidas pelos combustíveis que operam no ciclo Diesel.

De forma muito distinta a quanto ocorre no ciclo Diesel, no ciclo Otto a energia de ativação não é dada pelo simples aquecimento do comburente. A combustão é iniciada mediante a introdução da energia de ativação, mais precisamente uma centelha que atinge a mistura de combustível e comburente. Esse procedimento se faz necessário pois a temperatura de autoignição dos combustíveis que operam nesse ciclo é muito maior do que a temperatura encontrada na câmara de ignição, por isso se faz necessário a introdução da energia de ativação por meio externo.

Na combustão em motores operando no ciclo Otto ainda será desejado, por uma série de razões técnicas, que haja gradualidade e controle na liberação da energia da reação de combustão. Tal demanda está à base dos mecanismos utilizados para o fornecimento da energia de ativação aos reagentes. No caso em que o fornecimento da energia de ativação se der mediante uma centelha, dita energia de ativação terá ação direta sobre uma porção dos reagentes. Será necessário que a energia liberada pela combustão desta pequena massa de reagentes (que recebeu a energia de ativação original) seja capaz de servir como energia de ativação a outra

massa, maior, fisicamente adjacente a esta primeira massa a receber a energia de ativação (WARNATZ, MAAS e DIBBLE, 2006).

Esta sucessiva massa de reagentes, que recebe a energia de ativação através da energia liberada pela primeira massa, também deverá, por sua vez, liberar energia suficiente para que ulterior massa descreva o mesmo comportamento. Temos, assim, que no ciclo Otto há a propagação da combustão na mistura de reagentes, havendo liberação sucessiva de energia que serve, também, como energia de ativação para porções ainda não queimadas dos reagentes, para que tal mecanismo possa se sustentar, os reagentes precisam formar uma mistura, com título adequado. Como será visto em maiores detalhes a seguir, o título não pode ter a ampla variação que é permitida no ciclo Diesel. A introdução dos reagentes na câmara de combustão em motores operando no ciclo Otto pode seguir diferentes mecanismos, dependendo do tipo de aparato tecnológico usado para a formação da mistura. Com isso a massa de reagentes, de forma oposta a quanto ocorre nos motores ciclo Diesel, não iniciará a reação de combustão até que uma porção dela receba energia de ativação através da centelha (WARNATZ, MAAS e DIBBLE, 2006).

O mecanismo da combustão no ciclo Otto prevê que haja a propagação gradual da reação mediante a introdução da energia de ativação para iniciar a reação em massas e sucessivas dos reagentes misturados. Conseqüentemente, o título da mistura de reagentes deverá estar dentro de uma faixa que depende do combustível. Misturas com títulos fora da faixa de valores que assegurem a sustentação da reação resultarão em combustões interrompidas ou a não oxidação por completo do combustível, fazendo com que se despedisse energia que poderia ser aproveitada na combustão (LARSON, 2008).

Na busca pela maior eficiência dos motores ciclo Otto, deseja-se que o título da mistura de reagentes possa ser o mais diluído (ou pobre) possível (ou seja, com menor quantidade de combustível), pois é dessa forma em que se pode assegurar que todo o combustível totalmente consumido.

3.1.2.2 O controle de combustão em motores do ciclo Otto

Para que haja correta propagação da reação a toda a massa de reagentes, é necessário que eles estejam em proporção adequada e oportunamente misturados. Pelo mecanismo da combustão em motores operando no ciclo Otto a simples variação da massa de combustível geraria uma variação do título da mistura, podendo acarretar o não aproveitamento da combustão do combustível, nos casos em que o título da mistura estiver fora dos limites para a sustentação da reação. Com isso a simples variação da massa de combustível presente na reação de combustão é um meio limitado para controlar a combustão em motores operando no ciclo Otto. (LARSON, 2008)

Portanto, que para que se possa controlar a combustão em motores operando no ciclo Otto (em particular para que se possa variar, de forma controlada, a energia liberada por ciclo de combustão) é necessário poder variar a massa de reagentes presentes por ciclo de combustão. Isto significa poder variar não apenas a massa de combustível presente por ciclo de combustão, mas também a massa de ar. Tal controle é obtido mediante o uso de uma válvula instalada na admissão do motor, conhecida como válvula borboleta. Uma representação gráfica de uma válvula borboleta está apresentada na Figura 2 (PETRESCU e PETRESCU, 2012).

Figura 2 - Válvula Borboleta para motores de combustão interna



Fonte: Brunetti, 2012.

A operação da válvula borboleta é intuitiva. Quanto menor a massa de ar desejada no ciclo de combustão, menor será a abertura do flap da borboleta. O movimento do pistão do motor alternativo no sentido da admissão de ar gerará um fluxo no duto de admissão. A área de passagem de ar controlada pela borboleta gerará uma perda de pressão no ar admitido, resultando em densidade menor de ar no

cilindro. Posto que o volume admitido no cilindro é fisicamente dado, a variação da densidade do ar resulta em uma equivalente variação da massa de ar presente no cilindro.

A operação do motor com cargas parciais, ou seja, com energia liberada inferior à máxima possível, resulta na necessidade de operar com a borboleta parcialmente fechada. Nestas condições o motor executa um trabalho para que o ar seja admitido através da borboleta, com a citada perda de carga. Este trabalho negativo, ou seja, tirado do trabalho mecânico que o motor poderia entregar, reduz a eficiência de um motor operando no ciclo Otto nestas condições.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DAS FORMAS DE ENERGIA

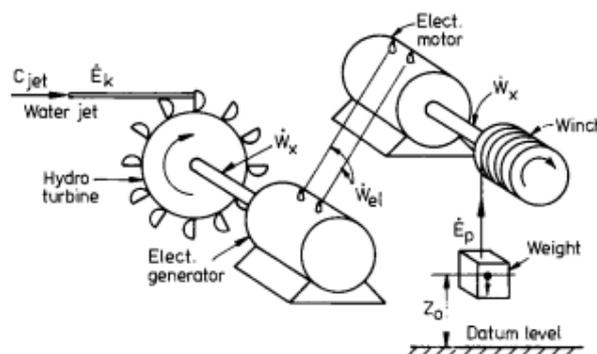
A energia se manifesta de muitas formas, cada uma com suas próprias características e sua qualidade que pode ser entendido como a capacidade de causar mudanças. Por exemplo, a capacidade de efetuar alguma mudança desejada (aquecer uma sala, comprimir gás ou promover reação endotérmica) em um sistema que forneça 100 J de energia elétrica é maior que a de 100 J de energia térmica disponível a temperatura de 1000 K e ainda maior do que a mesma quantidade de energia térmica disponível a 400 K, quando a temperatura do ambiente é de 300K. A menos que sejam levados em conta na análise, essas diferenças de qualidade pode levar a resultados enganosos ao analisar o desempenho dos processos térmicos. Isto pode, portanto, ser útil para examinar as características das diferentes formas de energia e classificá-las de acordo a obter um objetivo de estabelecer um padrão adequado de qualidade de energia.

A qualidade de uma determinada forma de energia depende do seu modo de armazenamento. Isso pode ser ordenado ou desordenados (aleatórios) no qual a entropia é uma medida microscópica aleatoriedade e a incerteza resultante sobre o estado de um sistema. Isto é também uma medida da "indisponibilidade" de uma determinada forma de energia se converter no processo proposto, nos parágrafos seguintes Kotas, (1995) destaca as principais características de cada modo de armazenamento de energia.

O sistema de armazenamento de energia ordenada pode ser ou na forma de energia potencial, que pode ser armazenado considerando um potencial gravitacional, elétrico ou campo de força magnética, ou energia cinética organizada que tem como exemplo um moinho ou uma roda com pás transformando o fluxo de um fluido em outra forma de energia. Neste caso o caminho do fluido e do movimento do componente que transforma energia são paralelos e em condições ideais a energia cinética pode ser totalmente convertida para o trabalho do eixo. Com isso o armazenamento de energia ordenada tem as seguintes características abaixo:

- A conversão de uma forma de energia ordenada em outra forma, se realizada reversível, se realizará na íntegra
- A transferência de energia ordenada entre dois sistemas se manifesta como uma interação de trabalho (sem ser por transferência de calor) na fronteira que os separa
- A transferência reversível de energia ordenada ocorre sem mudanças nas entropias dos sistemas que interagem e podem ser analisados com a ajuda da Primeira Lei da termodinâmica, ou seja, sem o uso da Segunda Lei da termodinâmica
- Os parâmetros do ambiente não são necessários para calcular o máximo de energia que pode ser transferida entre dois sistemas

Figura 3 - Transformação de energia na forma ordenada



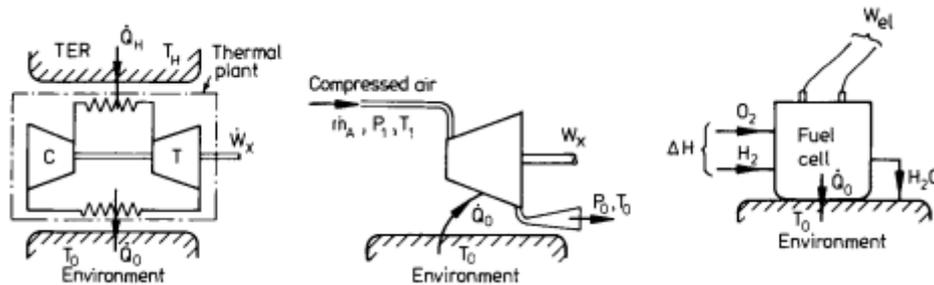
Fonte: Kotas, 1995.

Energia interna da matéria, radiação térmica e energia química são formas diferentes de energia desordenada que está associada ao movimento turbulento de

um fluido, este tipo de armazenamento está associado a forma transitória de energia através do qual tem a energia ordenada como a última instância da conversão de energia. Com isso esse tipo de armazenamento está associado ao movimento molecular aleatório (desordenado energia) devido a isso esse tipo de armazenamento deve ter as seguintes características:

- Deve ser totalmente reversível
- O limite máximo de conversão depende dos parâmetros termodinâmicos do sistema (em que a energia é armazenada) e as do ambiente
- A análise do processo deve envolver a segunda lei da termodinâmica
- Geralmente as conversões são acompanhadas pela mudança de entropia das interações do sistema

Figura 4 - Transformação de energia de uma fonte de armazenamento desordenada



Fonte: Kotas, 1995

3.3 O CONCEITO DA EXERGIA

A capacidade de converter uma energia em outra na forma de energia desordenada, caracterizada pela entropia, é variável e depende tanto da forma de energia (química, térmica, etc) quanto pelas características do meio onde há o transporte e do meio ambiente. Por outro lado, as formas ordenadas de energia, que não são caracterizadas pela entropia, têm qualidade invariável e são totalmente convertidas, através da interação do trabalho, com outras formas de energia. Para explicar a qualidade variável de diferentes formas de energia desordenada na análise de plantas térmicas e químicas, é necessário um padrão universal de qualidade, que mais natural e conveniente é o trabalho máximo que pode ser obtido de uma determinada forma de energia, usando os parâmetros do ambiente como o estado de referência. Esse padrão de qualidade de energia é chamado de exergia e um dos principais usos deste conceito está em um balanço exergético na análise de sistemas térmicos que é semelhante a um balanço energético, mas tem a diferença fundamental de que o balanço exergético pode ser visto como uma declaração da lei de degradação de energia pois é equivalente à perda irreversível de exergia devido a todos os processos reais.

Em uma região de controle três tipos de energia que podem ultrapassar a superfícies de controle que são a transferência de energia através do trabalho, calor

e transferência de massa. Da mesma forma a análise exergetica também considera os mesmos parâmetros do balanço feito no balanço de energia.

O ambiente, como um conceito para o método de análise exergetica, é um corpo ou meio muito grande no estado de perfeito equilíbrio termodinâmico. Assim, este ambiente conceitual não possui gradientes ou diferenças envolvendo pressão, temperatura, potencial químico, energia cinética ou potencial e, portanto, não há possibilidade de produzir trabalho a partir de qualquer forma de interação entre partes do ambiente. Qualquer sistema fora do ambiente que tenha um ou mais parâmetros, como pressão, temperatura, ou potencial químico, que difere do parâmetro ambiental correspondente, tem um potencial de trabalho em relação ao meio ambiente que, portanto, é um meio de referência natural para avaliar o potencial de trabalho de diferentes tipos de sistemas.

Para aplicações práticas, o ambiente consiste na atmosfera, mares, oceanos e na crosta terrestre. O ambiente pode interagir com os sistemas de três maneiras diferentes

- a) Através da interação térmica como reservatório (fonte ou um vaso de pressão) de energia térmica a temperatura T_0 por causa da grande capacidade do ambiente trocar calor com qualquer sistema inventado pelo homem sem alterar a sua temperatura;
- b) Através da interação mecânica como um reservatório que não é utilizado para produção de trabalho, essa forma de interação ocorre apenas em sistemas que sofrem alteração de volume durante o processo, por exemplo, um sistema fechado passando por um processo de expansão. Como a maioria dos sistemas ocorre no ambiente terrestre se assume que a pressão utilizada será a atmosfera P_0 , qualquer aumento no volume, ΔV , de um sistema resulta, resulta em um processo de expansão quase estático, gerando um trabalho $\Delta V P_0$ na atmosfera. Esta parte do O trabalho realizado pelo sistema é, naturalmente, indisponível para uso a que se destina, mas pode ser recuperado quando o volume do sistema retorna quase estaticamente ao seu valor original;
- c) Através da interação química como reservatório de uma substância de baixa potencial quando atinge um equilíbrio estável. Este tipo de interação ocorre sempre que um sistema libera matéria para o meio ambiente ou retira substâncias de baixo potencial químico. Presume-se que o ambiente seja constituído por tais substâncias que estão em equilíbrio químico entre si.

3.3.1 Exergia associada a transferência de trabalho

Como já foi definido que a equivalência do trabalho de uma dada forma de energia como medida de sua exergia, claramente o trabalho é equivalente a exergia em todos os aspectos. Assim, a transferência exergética pode ser especificada em magnitude e direção pela transferência de trabalho correspondente, usando o mesmo símbolo, W , para ambos. Da mesma forma, a taxa de transferência de trabalho, ou potência, e para a taxa de transferência exergética.

3.3.2 Exergia associada a transferência de calor

A exergia de uma transferência de calor na superfície de controle é determinada a partir do trabalho que poderia ser obtido a partir de um sistema e usando o ambiente como referencial. Para uma taxa de transferência de calor \dot{Q}_t e uma temperatura na superfície de controle onde a transferência de calor está ocorrendo a T_t , a taxa máxima de conversão de energias térmicas para o trabalho é dada por:

$$E_q = \dot{Q}_t \tau \quad (1)$$

$$\tau = 1 - T_0/T_t \quad (2)$$

τ é chamado de temperatura exergética adimensional e é igual à eficiência Carnot t para o caso especial quando o ambiente, à temperatura do reservatório quente, o que na literatura se chama de T_0 .

A exergia associada uma taxa de transferência de calor é chamada de fluxo exergético térmico e é denotado em análise de sistema aberto, por E_q . Na Eq 1, de acordo com o sinal convenção adotada, \dot{Q}_t é positivo quando a transferência se dá do ambiente para o sistema. Se a transferência de calor ocorre a uma temperatura superior à temperatura ambiente, τ é positivo e, portanto, uma transferência de calor para a região de controle resulta em um ganho de exergia pela região de controle

3.3.2.1 Estudo da combustão

Para um ponto de partida inicial a respeito da combustão pode-se partir de sua definição literal em que consiste na oxidação rápida gerando calor ou calor e luz. Esta definição enfatiza a importância das reações químicas para a combustão pois é possível converter a energia armazenada em ligações químicas em energia térmica que pode ser utilizada de várias formas, inclusive em motores a combustão interna. Para isso se faz entender o procedimento de como ocorre uma combustão, assim como os fatores que são necessários para que ela ocorra de forma desejável.

3.3.2.2 Mistura de reagente e produtos

A quantidade estequiométrica de oxidante é simplesmente a quantidade necessária para queimar completamente certa quantidade de combustível. Se uma quantidade de oxidante maior do que a estequiométrica é fornecida se diz que é uma mistura pobre em combustível ou simplesmente pobre, assim como se for fornecido uma quantidade menor de oxidante se diz que a mistura é rica em combustível ou simplesmente rica. A razão estequiométrica oxidante – combustível ou ar-combustível é determinada por um simples balanço atômico supondo que o combustível reage para formar um conjunto ideal de produtos (Turns, 2013). Para um combustível hidrocarboneto dado pela fórmula química genérica C_xH_y a relação estequiométrica pode ser expressa como:



Para a razão estequiométrica é possível ser encontrada através da fórmula abaixo

$$(A/F)_{esteq} = \left(\frac{m_A}{m_F} \right)_{esteq} = \frac{4,76a}{1} \frac{MM_A}{MM_F} \quad (3)$$

Já a razão de equivalência (ϕ) é usada para indicar se a mistura de oxidante e combustível é rica, pobre ou estequiométrica. Essa razão é definida como:

$$\Phi = \frac{(A/F)_{esteq}}{(A/F)} = \frac{(F/A)}{(F/A)_{esteq}} \quad (4)$$

Com essa definição é possível observar que para misturas ricas possuem $\Phi > 1$ e misturas pobre possuem $\Phi < 1$. Derivado dessa definição há também como calcular o percentual de ar estequiométrico de cada reação e que se relaciona com a razão de equivalência por:

$$\% \text{ ar estequiométrico} = \frac{100\%}{\Phi} \quad (5)$$

E o percentual de excesso de ar é possível ser obtido por:

$$\% \text{ de excesso de ar} = \frac{(1-\Phi)}{\Phi} 100\% \quad (6)$$

Essa variação na razão de ar e combustível pode acarretar numa variação de produtos de combustão, adicionando com isso mais elemento a fórmula estequiométrica. Quando mistura é rica o combustível não se oxida completamente

fazendo com que o Monóxido de Carbono apareça na nos produtos modificando a fórmula estequiométrica da seguinte forma:



Caso a mistura seja pobre o oxigênio aparece de forma abundante sendo capaz de oxidar todo o combustível e ainda sair nos gases de exaustão deixando a forma estequiométrica com um elemento a mais, como mostra abaixo:



3.3.2.3 Cálculo de perdas por calor em motores de combustão interna.

$$\frac{\dot{Q}_{VC}}{\dot{n}_C} = \frac{W}{\dot{n}_C} + \bar{h}_P - \bar{h}_R \quad (7)$$

Sendo $\bar{h}_P - \bar{h}_R$ dado pela variação de entalpia entre os produtos da combustão e o combustível para dado valor da temperatura de referência dos gases de exaustão e considerar que o combustível entra a na CNTP.

$$\bar{h}_P - \bar{h}_R = [b(\bar{h}_f^o + \Delta\bar{h})_{CO_2} + d(\bar{h}_f^o + \Delta\bar{h})_{H_2O} + 3,76a(\Delta\bar{h})_{N_2} + f(\Delta\bar{h})_{O_2}] - (\bar{h}_f^o)_{Combustivel} \quad 8 a$$

Ou

$$\bar{h}_P - \bar{h}_R = PCI_{Combustivel} - [b(\Delta\bar{h})_{CO_2} + d(\Delta\bar{h})_{H_2O(g)} + 3,76a(\Delta\bar{h})_{N_2} + f(\Delta\bar{h})_{O_2}] \quad 8 b$$

Com isso se obtém a taxa de calor que não é aproveitada pelo sistema

3.3.3 Exergia associada a transferência constante da matéria

A exergia de um fluxo constante de matéria é igual à quantidade máxima de trabalho que pode ser obtida quando o fluxo é trazido de seu estado inicial para o estado no qual esse mesmo fluxo possa interagir apenas com o ambiente. Assim, esse tipo exergia é uma propriedade de dois estados, o estado do fluxo e o estado do meio ambiente.

3.3.4 Cálculo do balanço da taxa de exergia para volumes de controle em regime permanente

Para poder calcular a exergia de um determinado volume de controle se parte do princípio do balanço de massa com várias entradas e saídas (Moran, Shapiro, 2009).

$$\left[\begin{array}{l} \text{taxa temporal de} \\ \text{mássica contida} \\ \text{do volume} \\ \text{de controle} \\ \text{no instante } t \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{taxa temporal de fluxo} \\ \text{de massa} \\ \text{atraves da entrada} \\ \text{no instante } t \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{taxa temporal de fluxo} \\ \text{de massa} \\ \text{atraves da saída} \\ \text{no instante } t \end{array} \right]$$

Assim como a massa a energia também é uma propriedade extensiva e pode também ser transferida para o interior ou exterior do volume de controle por escoamentos de matérias. O balanço de taxa de exergia poder ser abordado semelhando ao do balanço de massa, mas considerando a dedução o balanço de energia e de entropia de modo a levar em conta as transferências de exergia nas entradas e saídas do sistema (Kotas, 1995). A equação para o balando energético se dá na fórmula abaixo:

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) Q_j - (W_{VC} - p_0 \frac{dV_{VC}}{dt}) + \sum_e m_e e_{fe} - \sum_s m_s e_{fs} - E_d \quad (9)$$

Considerando a operação em regime permanente a equação será simplificada para:

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) Q_j - (W_{VC}) + \underbrace{\sum_e m_e e_{fe} - \sum_s m_s e_{fs}} - E_d \quad (10)$$

Onde e_{fe} representa a exergia por unidade de massa que atravessa a entrada e , e e_{fs} a exergia por unidade de massa que atravessa a saída s . Esses termos são conhecidos como a exergia específica de fluxo que é expressa na equação abaixo

$$e_f = h - h_0 - T_0(s - s_0) + \frac{v^2}{2} + gz + RT_0 \ln\left(\frac{y_i}{y_i^{amb}}\right) \quad (11)$$

Como toda a usina transforma uma energia potencial em outra, no caso das termoelétricas a energia potencial que é transformada é a química através da combustão de um dado combustível, com isso é possível entender o quando um dado motor é eficiente através da análise exergetica e mostrando eficiência. Com isso a fórmula abaixo mostra como é possível se calcular a Exergia Química de um dado combustível gasoso (considerando como gás ideal). (Moran, Shapiro. 2009)

$$e^{qui} = \overline{PCI} - T_0[\bar{s}_c + \left(x + \frac{y}{4}\right)\bar{s}_{O_2} - x\bar{s}_{CO_2} - \frac{y}{2}\bar{s}_{H_2O(v)} + a\bar{e}_{CO_2}^{qui} + \left(\frac{y}{2}\right)\bar{e}_{H_2O(v)}^{qui} - \left(x + \frac{y}{4}\right)\bar{e}_{O_2}^{qui}] \quad (13)$$

e com isso a exergia total é dada por

$$E_{total} = e_f + e^{qui} \quad (14)$$

3.3.5 Eficiência Exergetica

As expressões para a eficiência exergetica podem assumir muitas formas diferentes, variando de acordo com o componente a ser analisado, no caso desse trabalho se trata de um motor a combustão interna. Em todos os casos precisa-se considerar um volume de controle em regime permanente e admitir que não há transferência de calor entre o volume de controle e a vizinhança. Com isso tem-se que a eficiência exergetica para um motor a combustão interna está ligado ao tipo de combustível (exergia química) e ao trabalho em que é produzido, obtendo com isso a formulação abaixo:

$$\varepsilon = \frac{\dot{W}_{VC}/\dot{m}}{E_{total}} \quad (15)$$

4 METODOLOGIA

Este capítulo visa apresentar a empresa no qual o estudo foi feito, assim como as características do motor utilizado para a obtenção dos dados para o estudo operando a diesel (como foi originalmente projetado) e a Gás Natural (utilizando a Inovação tecnológica que será apresentada no decorrer do capítulo), em seguida é mostrado a metodologia para mapear a operação da UTE e extrair as melhores condições de operação da empresa e o mapeamento

4.1 CENTRAIS ELÉTRICAS DE PERNAMBUCO S.A (EPESA)

A EBRASIL iniciou sua história há mais de 20 anos, empreendendo seu primeiro negócio no setor industrial com uma fábrica de piso cerâmico no porto de Suape – PE. No entanto, é na geração de energia elétrica que a EBRASIL vem se destacando nos últimos anos e destacando a usina termoeletrica EPESA (figura 5), que faz parte desse estudo, com destaque de geração histórica de 1073 GWH no ano de 2014.

A empresa foi vencedora do primeiro Leilão de Energia Nova A-3 da ANEEL em junho de 2006, com PPA de 15 anos, de janeiro de 2009 a dezembro de 2023. O projeto inicial previa duas Ute em locais distintos (Termomanaus e Pau Ferro I), mais tarde concentrados numa mesma localização com uma operação unificada. A usina foi construída entre fevereiro e dezembro de 2008, em um projeto complexo envolvendo 912 unidades geradoras em uma área de 18 hectares no município de Igarassu/PE contando com mais de 800 colaboradores na fase de construção. Os motores escolhidos foram FG Wilson P675P5 (545 kW, 60 Hz, 440v) fabricados pela Caterpillar Brasil Ltda e que conta com o Motor Perkins modelo 2806A-E18TAG3. A usina entrou em operação comercial em junho de 2009. (EBRASIL, 2020)

Figura 5 - Centrais Elétricas de Pernambuco S.A. – EPESA



Fonte: EBRASIL, 2020.

4.2 CARACTERÍSTICAS DO MOTOR PERKINS MODELO 2806A-E18TAG3 NO CICLO DIESEL

Os motores Perkins modelo 2806A-E18TAG3 tem suas características disponibilizadas pelo fabricante Perkins (2014) e apresentadas nas tabelas 1 e 2 no qual a tabela 1 consiste nos dados construtivos básicos e a tabela 2 os resultados do ensaio de consumo de combustível a partir da potência líquida nominal do motor. Já as tabelas 3 e 4 consiste nos dados experimentais de Silva (2017) ao analisar o mesmo motor para análises com variação entre gás natural e diesel, porém para o estudo desta dissertação foram considerados apenas os dados do motor operando com 100% do diesel como combustível. A Tabela 3 diz respeito aos dados de testes de performance (transferência e balanço de energia durante o funcionamento do motor), enquanto a tabela 4 são os dados de funcionamento do motor de acordo com o regime de operação. Deve-se considerar que os dados do fabricante foram realizados em um ambiente controlado, onde a temperatura do ar (25°C), pressão barométrica (100 kPa), umidade relativa (30%) e temperatura do combustível (40 °C) foram pré-estabelecidos e fixados.

Tabela 1 - Dados técnicos básicos do motor Perkins 2806A-E18TAG3

Nº de cilindros	6
Arranjo dos cilindros	Vertical, em linha
Ciclo	4 tempos, ignição por compressão
Sistema de indução	Turbocompressor com <i>intercooler</i> ar/ar
Razão de compressão	14,5:1 (nominal)
Diâmetro do cilindro	145 mm
Curso do pistão	183 mm
Volume dos cilindros	18,13 l
Direção de rotação	Anti-horário, visto a partir do volante
Ordem de detonação	1,5,3,6,2,4
Cilindro #1	Mais distante do volante

Fonte: Perkins, 2014

Tabela 2 - Consumo de combustível de acordo com o regime de funcionamento.

Modo de funcionamento	50 Hz 1500 rev/min		60 Hz 1800 rev/min	
	g/kWh	litros/h	g/kWh	litros/h
Standby	197	129	208	157
Prime + 10%	198	129	208	157
Prime	198	120	209	144
75% da Prime	204	93	202	104
50% da Prime	204	62	210	72

Fonte: Perkins, 2014

Tabela 3 - Transferência/Balanço de energia durante o funcionamento do motor.

Designação	Unidades	Tipo de operação e aplicação			
		50 Hz 1500 rev/min		60 Hz 1800 rev/min	
		Prime	Standby	Prime	Standby
Energia do combustível	kW	1258	1355	1497	1637
Energia na potência total	kW	540	584	618	678
Energia transferida para a ventoinha e perdas por atrito	kW	18,1	18,8	25,3	26,2
Energia transferida para o óleo lubrificante e fluido de arrefecimento	kW	141	173	177	170
Energia transferida para o gás de exaustão	kW	434	445	515	583
Energia transferida para o cooler do compressor	kW	106	114	143	156
Energia perdida por radiação	kW	38	41	45	49

Fonte: Silva, 2017

Tabela 4 - Dados de funcionamento do motor de acordo com o regime de operação.

Designação	Unidades	Tipo de operação e aplicação			
		50 Hz 1500 rev/min		60 Hz 1800 rev/min	
		Prime	Standby	Prime	Standby
Potência total do motor	kW	539,7	583,8	617,5	678,2
Potência da ventoinha	kW		9		15
Perdas de atrito	kW	9,1	9,8	10,3	11,2
Potência útil do motor	kW	522	565	592	652
Pressão média efetiva	kPa	2381	2576	2270	2493
Fluxo do ar de combustão	m ³ .min ⁻¹	42,3	38,5	47,2	50,5
Temperatura do gás de exaustão (depois do turbo)	°C	487,8	541,2	517,6	542,8
Fluxo do gás de combustão	m ³ .min ⁻¹	100	98,7	125	135,7
Razão da pressão de sobrealimentação	-	2,9	3,1	3,1	3,4
Eficiência térmica global (líquida)	%	43,4	43,6	40,5	41,65
Perdas por atrito e bombeamento	kW		20		34
Velocidade média do pistão	m.s ⁻¹		9		11
Fluxo do líquido de refrigeração	L.s ⁻¹		6,1		7,2
Fluxo do ar de refrigeração	m ³ .min ⁻¹		702		852
Potência de saída do gerador (fator de potência = 0,8)	kWe	480	520	545	600
	kVA	600	650	681	750
Eficiência do alternador adotada	%		92		92

Fonte: Silva, 2017.

4.3 CARACTERÍSTICA DO MOTOR PERKINS COM A INOVAÇÃO TECNOLÓGICA DESENVOLVIDA PELA DSOFER COMPONENTES AUTOMOTIVOS PARA O MOTOR PERKINS 2806 OPERAR NO CICLO OTTO COM GÁS NATURAL

A inovação tecnológica desenvolvida pela DSofer trata-se de um módulo desenvolvido para o motor Perkins 2806A-E18TAG3, o qual foi projetado inicialmente para operar apenas com óleo Diesel, porém com esse equipamento, nomeado de DDR2 pela empresa criadora, é possível migrar do ciclo Diesel para o ciclo Otto (sendo o combustível para este o Gás Natural) de forma que possa ser totalmente reversível sem alterar em nada a estrutura do motor, podendo ser facilmente instalado pelo operador de área como se fosse uma manutenção de rotina e quando quisesse voltar para a operação original esse mesmo operador também seria capaz de executar. Por motivos de sigilo ao projeto apenas alguns dados de operação foram fornecidos por isso as fotos não foram liberadas. A potência de saída do motor ainda continua a mesma que é 545 kWe (Prime).

A tabela 5 mostra os dados de funcionamento do motor operando com o Gás Natural utilizando o módulo DDR2, vale destacar que não é uma operação junto com o Diesel e sim o motor operando 100% no ciclo Otto. Os dados disponibilizados abaixo se referem aos experimentos realizados pela empresa até o dia 21/07/2019, devido a confidencialidade do projeto apenas os dados com a operação 50% e 75% do prime foram disponibilizados.

Tabela 5 - Dados de funcionamento do motor utilizando o modulo DSOFER DDR2 de acordo com o regime de operação

Designação	Unidades	Tipo de operação e aplicação	
		60 Hz 1800 rev/min	
		50% Prime	75% Prime
Potência total do motor	kW	308,75	463,12
Potência de saída do gerador	kWe	275	410
Consumo de combustível	Nm ³ .hora ⁻¹	63	97
	Nm ³ .kWh ⁻¹	0,2291	0,2366
Eficiência térmica global	%	43,65	42,27

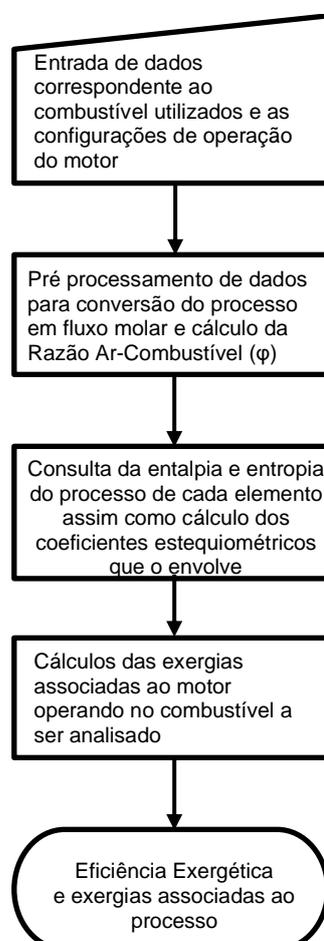
Fonte: O Autor, 2020.

4.4 DESENVOLVIMENTO DA MODELAGEM PARA CONFECÇÃO DO ANALISADOR EXERGETICO

O modelo para análise exérgica do Motor Perkins, modelo 2806A-E18TAG3 foi concebido através da ferramenta Simulink/MatLab, levando em consideração a sua condição original, ou Standard, utilizando o diesel como combustível e para o qual foi originalmente projetado, e as suas características de geração com o uso da inovação tecnológica que o permitirá usar o Gás Natural como fonte de combustível.

A modelagem do analisador foi dividida em 5 (cinco) grandes blocos, conforme fluxograma abaixo mostrado na figura 6 e apresentado no Anexo A como está configurado no MatLab/Simulink.

Figura 6 - Fluxograma do analisador de Exergia para o Motor Perkins modelo 2806A-E18TAG3



Fonte: O Autor, 2020.

4.5 VARIÁVEIS DE ENTRADA

Esta parte do analisador é constituída pelos dados de entrada do processo para que se possa dar início ao programa. A aquisição de dados é constituída por duas partes, a primeira, como mostra a tabela 6, é referente aos dados operacionais do motor (sinalizado com a cor verde no anexo A), já para a segunda parte é necessário os dados referente ao combustível em que se está utilizando para o funcionamento do mesmo, a tabela 7 mostra quais os dados e suas respectivas unidades necessários para que o analisador possa funcionar de maneira correta.

Tabela 6 - Dados de entrada relacionado ao moto gerador

Variável no MatLab	Simbologia	Descrição (Unidade)
Var	\dot{v}_{ar}	Vazão do ar para combustão (m ³ /min)
T	T_t	Temperatura dos gases de combustão (K)
LpH	\dot{v}_C	Consumo de combustível (L/h)
W	P	Geração do moto gerador (KWe)

Fonte: O Autor, 2020.

Tabela 7 - Dados de entrada relacionado ao combustível

Variável no MatLab	Simbologia	Descrição (Unidade)
C	X	Proporção molar correspondente a quantidade de Carbono na fórmula molecular
H	Y	Proporção molar correspondente a quantidade de Hidrogênio na fórmula molecular
Den	ρ_{comb}	Densidade do combustível (Kg/L)
MM	MM_{comb}	Massa Molar do combustível (Kg/Kmol)
PCI	PCI_{comb}	Poder calorífico inferior do Combustível (KJ/Kg)
Sc	\bar{s}_{comb}	Entropia absoluta do combustível (KJ/Kmol K)

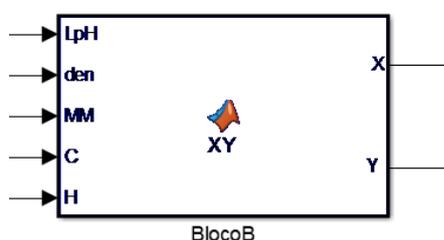
Fonte: O Autor, 2020.

4.6 BLOCOS DE PRÉ PROCESSAMENTO

Nessa parte do analisador o programa transforma os dados obtidos na entrada e os trata para que se possa ter o fluxo molar do combustível e o cálculo de razão de equivalência que será necessário para o processamento que virá.

O cálculo para se obter o fluxo molar do consumo é apresentado no bloco B (figura 7) e o código é mostrado no Anexo B. Essa parte tem como dados de entrada o consumo de combustível (L_{pH}), a massa molar do combustível (MMc), a proporção molar de Carbono (C) e Hidrogênio (H), e a densidade do combustível (T) e irá ser a base de cálculo de todo o programa pois ele irá se basear no consumo de combustível e transformá-lo em mol de hidrogênio e carbono por segundo. Vale ressaltar que o programa só analisa combustíveis baseados em hidrocarbonetos.

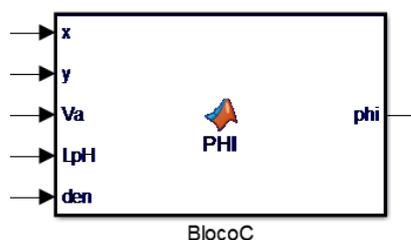
Figura 7 - Função responsável pelo cálculo do fluxo molar do processo



Fonte: O Autor, 2020.

Para a combustão ocorrer de forma que possa se aproveitar todo o combustível foi considerado que a mistura Ar/Combustível é pobre em combustível, para o cálculo da razão estequiométrica (ϕ) foi considerado a equação 4 como é mostrado no anexo C e representado na figura 8. Os dados de entrada são os fluxos molares de Carbono (x) e Hidrogênio (y) obtidos como variáveis resposta do bloco B, Vazão de Ar (V_a), consumo de combustível (L_{pH}) e densidade do combustível (den).

Figura 8 - Função responsável pelo cálculo da Razão Estequiométrica da mistura Ar/Combustível



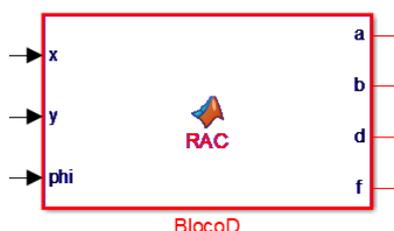
Fonte: O Autor, 2020.

4.7 BLOCOS PARA CALCULOS DOS COEFICIENTES ESTEQUIMETRICOS, ENTALPIA E ENTROPIA

Essa parte do analisador servirá de base para os cálculos de exergia que virá, pois, cada bloco servirá como um esqueleto para o processo de análise.

O Bloco D como é mostrado na figura 9 e tendo o seu código fonte no anexo D tem como objetivo calcular a vazão dos gases de combustão como N_2 , CO_2 , H_2O , O_2 , identificados na saída como a, b, d e f respectivamente

Figura 9 - Função responsável pelo cálculo do fluxo molar dos gases de combustão



Fonte: O Autor, 2020.

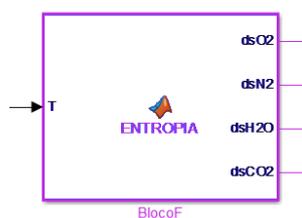
As figuras 10 e 11 mostram respectivamente os blocos para cálculo da entalpia e entropia na temperatura de saída dos gases de exaustão (T) e mostradas no anexo E e F, calculando com isso a diferença da temperatura analisada em relação a temperatura do ambiente (T_0) que na análise foi considerado $25^\circ C$ ou $298 K$

Figura 10 - Função para cálculo da entalpia (ΔH) utilizando o meio atmosférico como referencial a $25^\circ C$ e $1 atm$



Fonte: O Autor, 2020.

Figura 11 - Função para cálculo da entropia (ΔS) utilizando o meio atmosférico como referencial a $25^\circ C$ e $1 atm$



Fonte: O Autor, 2020.

4.8 BLOCOS PARA CALCULOS DE EXERGIA

Essa parte do analisador antecede a parte final da programação que mostrara as exergias associadas a cada parte a ser analisada do motor. O bloco G (figura 12) é responsável pelo cálculo da exergia física associada aos gases de exaustão e calculado conforme o anexo G.

Figura 12 - Função responsável pelos cálculos da exergia contida nos gases de exaustão



Fonte: O Autor, 2020.

A figura 13 mostra o bloco H (anexo H) responsável por calcular a exergia química do combustível analisado e conseqüentemente a eficiência de exergética do motor, ou seja, o quanto do combustível está sendo convertido em trabalho.

Figura 13 - Função responsável pelo cálculo da exergia química e da eficiência exergética do motor



Fonte: O Autor, 2020.

Há também a necessidade de saber o quanto de exergia está associada a transferência térmica, visto que a temperatura do motor está acima da considerada se tiver como referência a temperatura ambiente (T_0), como é mostrada na equação 10 e utilizada como função do Matlab contida no anexo I e mostrada na figura 14. Além do estudo da exergia associada a transferência de calor é preciso estudar a destruição de exergia devido ao processo converter uma energia armazenada de forma desordenada (química) para uma forma de energia ordenada (elétrica). A figura 15 mostra a função do MatLab e que está contida no anexo J que mostra o bloco responsável por essa análise.

Figura 14 - Função responsável pelo cálculo da exergia associada a transferência de calor



Função Calor (Bloco I)
Fonte: O Autor, 2020.

Figura 15 - Função responsável pelo cálculo da exergia destruída pelo sistema

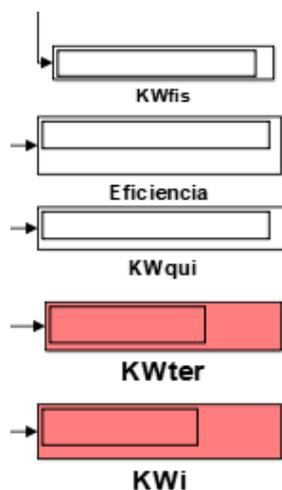


(Bloco J)
Fonte: O Autor, 2020.

4.9 BLOCOS DE VISUALIZAÇÃO DE DADOS

Nessa parte do processamento é possível visualizar todos os dados que foram calculados pelos blocos responsáveis para os cálculos de exergia. A figura 16 mostra os displays em que é possível ver a exergia física (KWfis) provenientes dos gases de exaustão, a eficiência exergética do motor nas condições analisadas (eficiência), a exergia química do combustível (KWqui), assim como a exergia associada a transferência de calor (KWter) e a destruída no processo (KWi).

Figura 16 - Display com os dados de saída das funções para cálculo de exergia e eficiência exergética



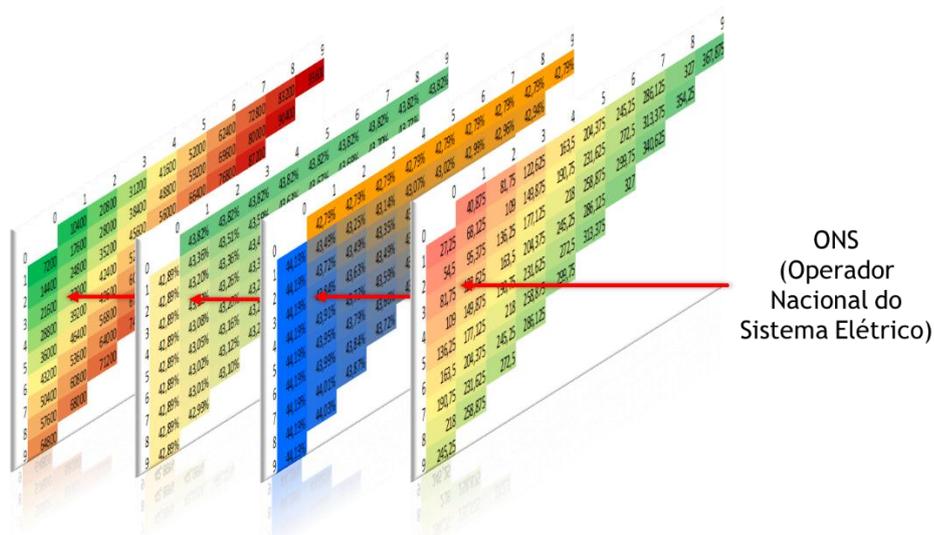
Fonte: O Autor, 2020.

4.10 MAPEAMENTO DE DEMANDA PARA CONDIÇÃO IDEAL

Como mostrado anteriormente o programa de análise exergética fornecesse a exergia específica de cada modo de operação estudado, na segunda fase do programa é necessário escolher dois modos de operação a ser estudado, com isso ele gerará mapas que baseado na demanda energética solicitada pela ONS conseguira sugerir a melhor configuração da usina (Ilustrado na figura 17). Ou seja. o programa funciona através de camada no qual primeiro se idêntica à demanda e com isso irá avançando na procura até encontrar a região de operação com melhor eficiência, assim como o consumo associado para aquela operação, mostrando com isso todas as configurações de motores possíveis para atender a demanda solicitada (nos modos de operação escolhido para análise), considerando um desvio de 1% para que não haja muita divergência na demanda solicitada.

Para saber a configuração dos motores parte dos princípios que a EPESA tem 9 Power House com uma média de 100 motores em cada uma. Tanto na coluna como as linhas são numeradas de 1 a 9, sendo a escolha do usuário qual vai representar cada modo de operação. Após a solicitação da demanda atendida pela usina o programa irá identificar (como um jogo de batalha naval) qual no número da coluna e linha para atender a necessidade de energia da matriz, após isso o programa irá refinar a configuração de forma que o que irá ser injetado na rede seja mais próximo possível ao que foi solicitado.

Figura 17 - Passo a passo do funcionamento do programa analisador exergético para identificar a melhor configuração da usina termoeétrica para diante de uma solicitação de demanda

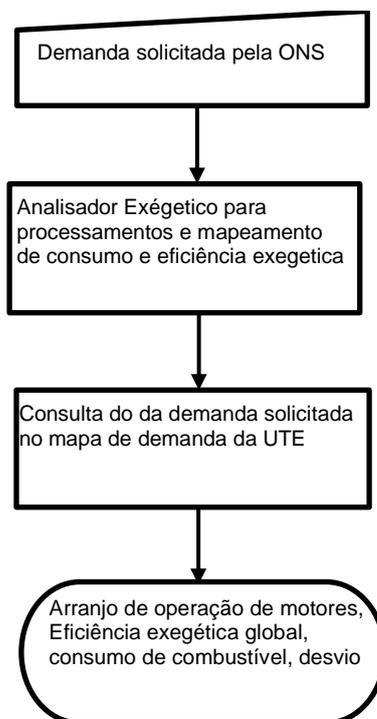


Fonte: O Autor, 2020.

Com esses resultados do mapeamento é possível utilizar o analisador exegético como uma ferramenta para auxiliar a tomada de decisão quando a demanda for solicitada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), com isso é possível analisar o melhor cenário para a operação da demanda.

Com as matrizes do potencial de geração, consumo e eficiência exegética consolidadas é possível fazer análises das configurações que podem se aproximar da demanda solicitada, para isso o programa obedece o fluxograma mostrado na figura 18, tendo como entrada a demanda que deseja que foi solicitada pela ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), com isso é consultada as matrizes, contendo os dados dos motores operando em diferentes tipos de operação, e finalmente as combinações dos motores com as diferentes cargas para atenderem à demanda solicitada, assim como o desvio, que é o percentual, para mais ou para menos, relativo a diferença da potência entregue pelo arranjo e a solicitada.

Figura 18 - – Fluxograma do programa para geração de relatório dos arranjos capazes de atender a demanda solicitada pela ONS



Fonte: O Autor, 2020.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse capítulo consiste na apresentação e discussão dos resultados obtidos pelo analisador após o cálculo de exergia associada a cada modo de operação e consequentemente o mapeamento da operação da usina.

5.1 CASO 1- ESTUDO DO MOTOR OPERANDO COM DIESEL NA SUA FORMA STANDARD

Considerando os dados fornecidos pelo fabricante foi utilizado o analisador de exergia desenvolvido no MatLab/Simulink para se obter os resultados de exergias associadas referentes ao motor Perkins 2806A-E18TAG3 (Tabela 8), nessa primeira parte foi considerada a condição em que o motor opera na sua condição original ou Standard, que consiste no Diesel como o combustível a ser utilizado.

Tabela 8 - Análise exérgica do motor Perkins 2806A-E18TAG3 utilizando Diesel

Regime de operação	Potência de operação (KWe)	Exergia referente aos gases de exaustão (KW)	Exergia química (KW)	Exergia associada a transferência de calor (KW)	Exergia destruída (KW)	Eficiência Exergetica (%)
Prime + 10%	599,5	273,71	1377,39	499,83	4,35	43,52
Prime	545,00	268,29	1263,34	445,54	4,51	43,14
Prime 75%	408,75	252,49	912,42	246,15	5,03	44,79
Prime 50%	272,5	240,89	631,67	112,83	5,45	43,13
Standby	600	319,86	1377,39	452,71	4,82	43,56

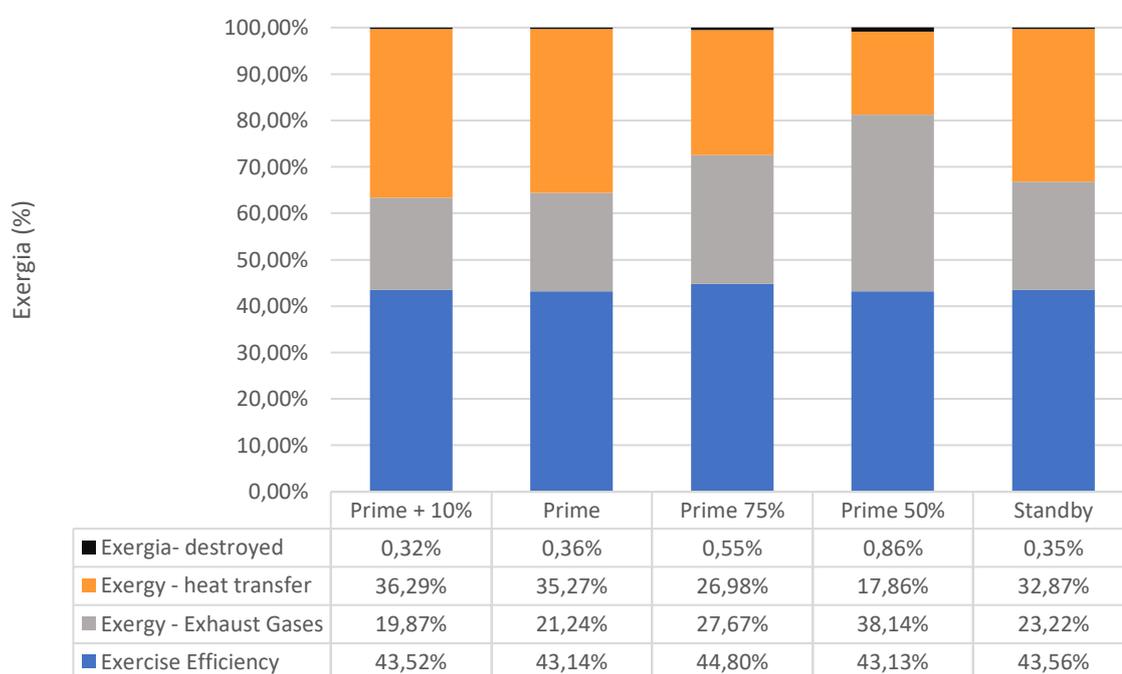
Fonte: O Autor, 2020

A figura 19 mostra de forma resumida as exergias associadas no processo de geração do motor, é possível observar que o regime de operação que tem o maior aproveitamento da energia efetiva para trabalho do combustível é a Prime 75%, porém se comparar com o regime em que o motor se encontra operando na potência nominal (Prime) a eficiência diminui, no entanto, há uma diminuição da exergia perdida referente aos gases de exaustão.

Já se comparar o motor operando no modo Prime + 10% e Standby pode-se observar que a eficiência de ambos estão próximas e mudando o percentual que iria

para o gases de exaustão, mas esses dois modos de operação são os que tem um percentual maior de exergia relacionada a transferência de calor devido ao maior fluxo de combustível que vai para as câmeras de combustão e conseqüentemente forçando mais o motor por trabalhar acima da sua capacidade nominal, o que não é muito aconselhável se considerar que a aplicação desses motores se dá de forma continua o que acarretaria na diminuição de sua vida útil e a pouca durabilidade de alguns componentes. Em contra partida a exergia ligadas aos gases de exaustão é maior a medida que o modo de operação se dá abaixo da potência nominal do moto, sendo mais expressiva no modo de operação a 50% do Prime, no entanto quando o motor está gerando 272,5kW (75% do Prime) a operação apresenta o custo benefício pois é uma faixa em que há uma boa geração e a manutenção se dá em prazo maior, comparado com o motor operando a 100% do Prime, sendo essa a faixa de operação da EPESA diante de uma demanda solicitada

Figura 19 - Exergias associadas a cada regime de operação do motor Perkins 2806A-E18TAG3



Fonte: O Autor, 2020

Dá mesma forma a figura 20 mostra o mesmo comportamento do motor relacionado a sua eficiência energética de cada modo de operação que pôde ser disponibilizado pela EPESA. Observa-se também o comportamento discreto e suscinto da eficiência energética, podendo dizer que o seu gráfico se assemelha a uma função constante e acompanhando a mesma tendência da eficiência exergética,

tendo para a condição de maior eficiência energética o modo de operação a 75% do Prime com 51,08%.

Figura 20 - Eficiência energética associada ao modo de operação do motor Perkins 2806A-E18TAG3



Fonte: O Autor, 2020

5.2 CASO 2 - ESTUDO DO MOTOR OPERANDO COM A INOVAÇÃO TECNOLOGIA (DDR2) DESENVOLVIDA PELA DSOFER

Assim como foi feito para motor Perkins 2806A-E18TAG3, operando no ciclo a Diesel no qual foi originalmente projetado, foi utilizado o analisador exegético para estudar o comportamento do motor agora operando com o sistema desenvolvido pela Dsofer, o DDR2. Para esta parte do estudo foram considerados o moto gerador operando a 50% e 75% do regime prime.

Diferentemente do motor operando com o Diesel, quando se utiliza o Gás Natural o modo de operação mais eficiente é a 50% do Prime como mostra a Tabela 9. A figura 21 mostra de forma resumida e simplificada os resultados referentes a cada exergia associada, através do analisador é possível observar que mesmo utilizando um combustível diferente para o que foi operado o motor permanece com as mesmas características , em termo energético, da sua operação tradicional, pois ainda é possível observar o aumento gradativo da exergia associada aos gases de exaustão a medida em que o moto diminui o percentual do seu modo de operação, fazendo com que na região de maior eficiência (50% do prime) tenha mais exergia associada ao gases de exaustão e a medida em que se aproxima da operação nominal há um aumento da exergia relacionada a transferência de calor. Devido a dados sigiloso da

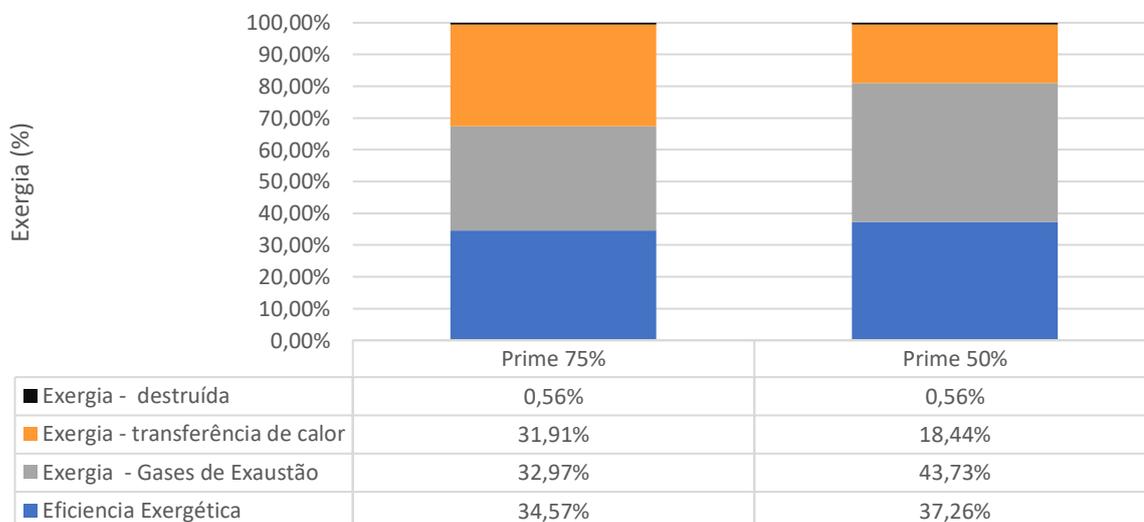
DSofer outros pontos não puderam ser estudados, apenas aqueles em que se opera com mais frequência na EPESA.

Tabela 9 - Análise exergetica do motor Perkins 2806A-E18TAG3 utilizando DDR2 e operando com Gás Natural

Regime de operação	Potência de operação (KWe)	Exergia referente aos gases de exaustão (KW)	Exergia química (KW)	Exergia associada a transferência de calor (KW)	Exergia destruída (KW)	Eficiência Exergetica (%)
Prime 75%	410	341,05	1186,16	368,5	6,61	34,57%
Prime 50%	275	322,74	738	136,1	4,16	37,26%

Fonte: O Autor, 2020

Figura 21 - Exergias associadas a cada regime de operação do motor Perkins 2806A-E18TAG3 com a Inovação tecnológica DDR2 desenvolvida pela DSofer



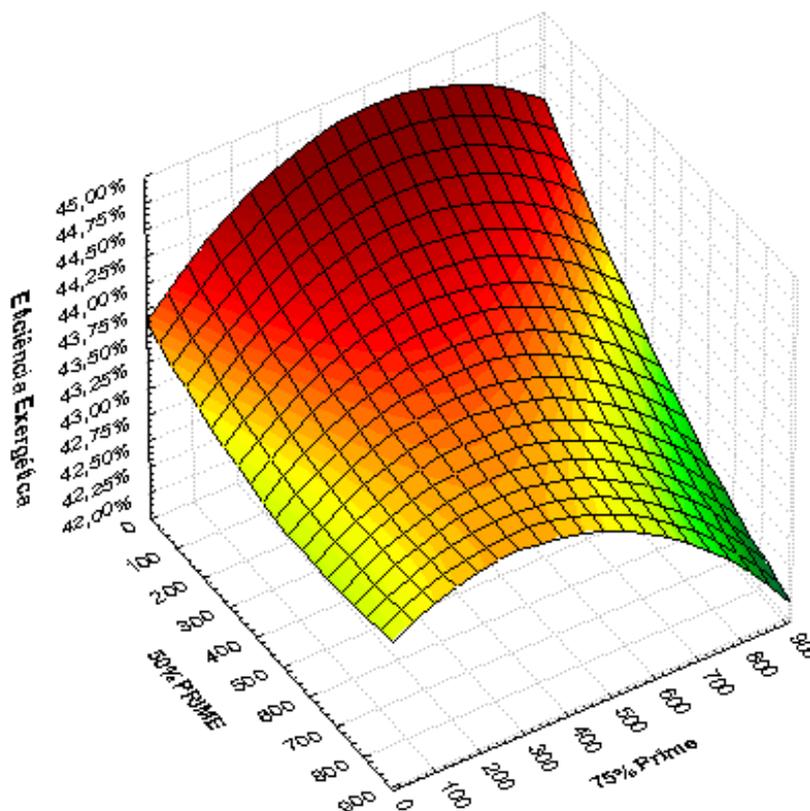
Fonte: O Autor, 2020

5.3 MAPEAMENTO DA DEMANDA PARA MOTORES OPERANDO A 50% E 75% DO PRIME

Com base nos resultados obtidos anteriormente foi feito um mapeamento da Unidade Termoelétrica considerando os modos de operação 50% e 75% do PRIME. Para isso foi necessário considerar a configuração da usina termoelétrica que possui 912 moto geradores distribuídos em 9 Power House. A figura 22 serve para mostrar o comportamento da eficiência exergetica da usina considerando uma geração entre 117MW a 237,12MW, esse procedimento serve para que ao utilizar

o programa de análise exérgica seja possível identificar as melhores regiões para que com isso possa identificar a melhor região de atuação com o intuito de diminuir o consumo de combustível, como consequência da geração da superfície é possível utilizar a equação 16 para avaliar a eficiência exérgica com o número de operação de motores que estão sendo utilizados, sendo Y o eixo para motores operando a 50% do prime e X o eixo de operação de motores a 75% do prime

Figura 22 - Superfície de resposta da eficiência exérgica para geração entre 117MW e 237MW com motores com motores a 50% e 75% do Prime.



Fonte: O Autor, 2020

$$\text{Eficiência Exérgica} = 0,4364 - 1,734E-5 * x + 4,3852E-5 * y + 1,3525E-8 * x^2 - 2,1755E-8 * x * y - 4,1343E-8 * y^2 \quad (16)$$

Com os dados da EPESA, para o combustível, foi possível mapear a geração baseada no modo operacional dos motores, como mostra a figura 23 na qual tem como objetivo identificar o potencial do geração baseado na quantidade de motores e seus modos de operação e destacando que no eixo das abscissas mostra o número de Power House operando a 75% do Prime e no eixo das ordenadas a operação de 50% do Prime, esses dois modos operacionais foram escolhidos para que pudessem haver uma equiparação do mesmo motor operando com o gás natural e também por motivos operacionais pois a usina evita operar com motores na sua capacidade nominal por questão de durabilidade dos componentes do motor.

Figura 23 - Geração de energia, em MW, de acordo com o modo de operação de cada Power House

de power house operando em 75% prime

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		40,875	81,75	122,625	163,5	204,375	245,25	286,125	327	367,875
1	27,25	68,125	109	149,875	190,75	231,625	272,5	313,375	354,25	
2	54,5	95,375	136,25	177,125	218	258,875	299,75	340,625		
3	81,75	122,625	163,5	204,375	245,25	286,125	327			
4	109	149,875	190,75	231,625	272,5	313,375				
5	136,25	177,125	218	258,875	299,75					
6	163,5	204,375	245,25	286,125						
7	190,75	231,625	272,5							
8	218	258,875								
9	245,25									

primeNº de power house operando em 50% prime

Fonte: O Autor, 2020

Como cada geração corresponde a combinações de modos diferentes de operação também foi possível mapear o consumo e a eficiência exergética conforme o combustível utilizado na planta termoelétrica e de acordo com a demanda solicitada pelo operador de energia elétrica. Como a figura 23 é uma matriz de geração comum para o motor operando no seu modo Standard com o Diesel e com a inovação tecnológica da Dsofer operando com Gás natural é possível mapear quais as áreas têm maior eficiência exergética e o menor consumo dado uma demanda solicitada. A figura 24 mostra o mapeamento do consumo do motor operando com o combustível líquido no qual foi originalmente projetado assim como a figura 25 mostra a eficiência exergética para cada operação e a figura 26 a eficiência energética global para cada demanda a ser entregue.

Fonte: O Autor, 2020

Nº de Power House a operando a 75% prime

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		10400	20800	31200	41600	52000	62400	72800	83200	93600
1	7200	17600	28000	38400	48800	59200	69600	80000	90400	
2	14400	24800	35200	45600	56000	66400	76800	87200		
3	21600	32000	42400	52800	63200	73600	84000			
4	28800	39200	49600	60000	70400	80800				
5	36000	46400	56800	67200	77600					
6	43200	53600	64000	74400						
7	50400	60800	71200							
8	57600	68000								
9	64800									

Nº de Power House operando a 50% prime

Figura 25 - Eficiência Exergetica Global considerando o moto Perkins operando pelo Óleo Diesel

Power House operando a 75% prime

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
primeNº de Power House operando a 50% prime	0	44,79%	44,79%	44,79%	44,79%	44,79%	44,79%	44,79%	44,79%	44,79%
1	43,13%	43,96%	44,24%	44,38%	44,46%	44,51%	44,55%	44,58%	44,61%	
2	43,13%	43,68%	43,96%	44,13%	44,24%	44,32%	44,38%	44,42%		
3	43,13%	43,55%	43,79%	43,96%	44,08%	44,17%	44,24%			
4	43,13%	43,46%	43,68%	43,84%	43,96%	44,05%				
5	43,13%	43,41%	43,60%	43,75%	43,87%					
6	43,13%	43,37%	43,55%	43,68%						
7	43,13%	43,34%	43,50%							
8	43,13%	43,31%								
9	43,13%									

Fonte: O Autor, 2020

Figura 26 - Eficiência Energética Global considerando o moto Perkins operando pelo Óleo Diesel

Nº de Power House operando a 75% prime

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nº de Power House operando a 50% prime	0	51,08%	51,08%	51,08%	51,08%	51,08%	51,08%	51,08%	51,08%	51,08%
1	49,19%	50,14%	50,45%	50,61%	50,70%	50,77%	50,81%	50,85%	50,87%	
2	49,19%	49,82%	50,14%	50,33%	50,45%	50,54%	50,61%	50,66%		
3	49,19%	49,66%	49,95%	50,14%	50,27%	50,37%	50,45%			
4	49,19%	49,57%	49,82%	50,00%	50,14%	50,24%				
5	49,19%	49,51%	49,73%	49,90%	50,03%					
6	49,19%	49,46%	49,66%	49,82%						
7	49,19%	49,43%	49,61%							
8	49,19%	49,40%								
9	49,19%									

Fonte: O Autor, 2020

Como o equipamento desenvolvido pela DSofer permite que o motor opere no Ciclo Otto e o combustível para esta operação é o gás natural Gás Natural, também foi possível fazer um mapeamento de consumo, que nesse caso a medição se dá em Nm³ em vez de litros, procedendo da mesma forma para o diesel e tendo como a primeira camada a figura 23 no qual irá mostrar quanto a configuração irá entregar de potência para a matriz brasileira em MW diante da demanda solicitada, com isso tem-se o quanto irá demanda de combustível para aquela configuração (figura 27), a eficiência exergetica global e a eficiência energética para aquela configuração de motores(figuras 28 e 29 respectivamente).

Nº de Power House a operando a 75% prime

		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nº de Power House operando a 50% prime	0		9700	19400	29100	38800	48500	58200	67900	77600	87300
	1	6300	16000	25700	35400	45100	54800	64500	74200	83900	
	2	12600	22300	32000	41700	51400	61100	70800	80500		
	3	18900	28600	38300	48000	57700	67400	77100			
	4	25200	34900	44600	54300	64000	73700				
	5	31500	41200	50900	60600	70300					
	6	37800	47500	57200	66900						
	7	44100	53800	63500							
	8	50400	60100								
	9	56700									

Nº de Power House a operando a 75% prime

		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nº de Power House operando a 50% prime	0		34,57%	34,57%	34,57%	34,57%	34,57%	34,57%	34,57%	34,57%	34,57%
	1	37,26%	35,92%	35,47%	35,24%	35,11%	35,02%	34,95%	34,91%	34,87%	
	2	37,26%	36,36%	35,92%	35,65%	35,47%	35,34%	35,24%	35,17%		
	3	37,26%	36,59%	36,18%	35,92%	35,72%	35,58%	35,47%			
	4	37,26%	36,72%	36,36%	36,11%	35,92%	35,77%				
	5	37,26%	36,81%	36,49%	36,25%	36,06%					
	6	37,26%	36,88%	36,59%	36,36%						
	7	37,26%	36,92%	36,66%							
	8	37,26%	36,96%								
	9	37,26%									

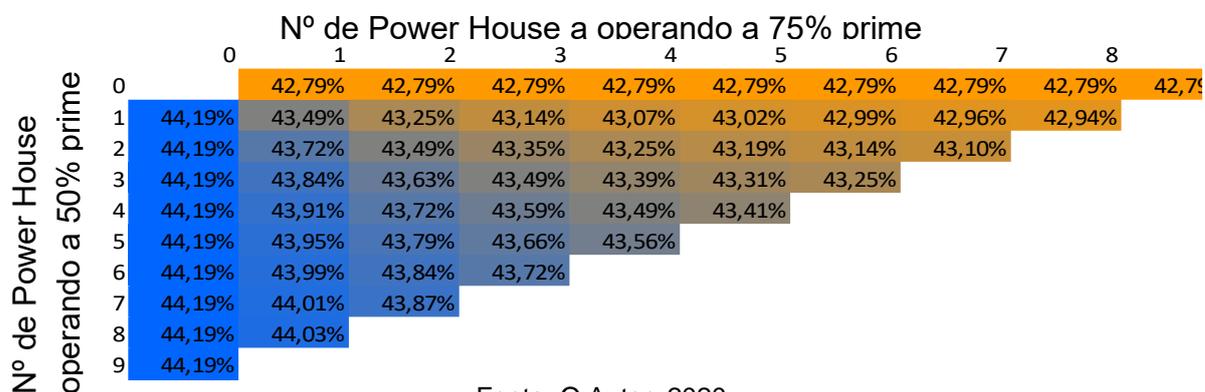
Figura 27 - Consumo de Gás Natural (Nm³/h) de acordo com o modo de operação de cada Power House

Fonte: O Autor, 2020

Figura 28 - Eficiência Exergetica Global considerando o motor Perkins operando com Gás Natural

Fonte: O Autor, 2020

Figura 29 - Eficiência Energética Global considerando o motor Perkins operando com Gás Natural



5.4 ESTUDO DE CASO DE MOTORES OPERANDO A 50% E 75% DO PRIME COM CICLO DIESEL E OTTO

Para analisar os efeitos das combinações dos modos de operação do motor Perkins foram considerados três tipos de cenários, o primeiro é baseado em 50% da potência outorgada que consta no BIG (Banco de Informações de Geração) da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), o outro cenário é considerando 75% da potência outorgada e por último o terceiro cenário que considera toda a demanda que a termoeletrica pode despachar para a rede elétrica.

O programa de tomada de decisão baseia-se na eficiência exergética e mostra todas as configurações de motores operando a 50% do prime (representado pela linha laranja) e a 75% do prime (representado pela linha verde) capazes de atender a demanda solicitada, considerando um desvio máximo de 1%, para o estudo de cada cenário foram escolhidas as configurações com o menor desvio da demanda solicitada, salientando que no final o número total de motores utilizado pela usina se dá pela soma do número de motores operando a 50% e 75% do prime. As figuras abaixo são responsáveis por validar se a configuração desejada atende à demanda solicitada (Curvas de cada modo de operação dos motores se cruzam). Considerando que o terceiro cenário é a demanda homologada pela ONS, além de validar se a configuração da usina operando com motores a 75% e 50% do Prime (tanto para o Diesel quanto para o Gás Natural).

A figura 30 mostra as possíveis configuração para uma demanda solicitada de 50% daquela outorgada pela ANEEL e os motores operando com o Diesel, o desvio é de -0,006%, o que entregaria uma potência de 118,53 MW, é possível observar que

há oito configurações diferentes e a medida em que os motores operando com 75% do regime Prime vão entrando em operação o consumo de combustível diminui sendo possível aumentar a eficiência exergética em 0,62% o que daria em economia de combustível 840 litro de Diesel por hora o que geraria em reais R\$2352 por hora, totalizando, com a soma, 330 motores. Da mesma forma foi analisado as possíveis configurações do mesmo motor Perkins mas agora operando no ciclo Otto graças a inovação tecnológica nomeada de DDR2 pela empresa DSofer, a figura 31 mostra que a medida que mais motores operando no modo de operação mais eficiente vão sendo utilizados maior é a eficiência exergética global e a economia de combustível, que nesse caso agora é o gás natural, logo é possível observar que para atender a mesma demanda que gerou a figura 23 o analisador identificou 8 configurações de motores operando a 50% e 75% do Prime com o desvio de 0,006%, tendo um potencial de economia de 525 Nm³/h (ou 1064,86 reais/hora) o que geraria uma economia 1,88% de combustível e tendo como um total de 435 motores utilizados.

Figura 30 - – Configurações de motogeradores e consumo de Diesel (Litros/Hora) como combustível para atender a demanda solicitada de 118,56MW

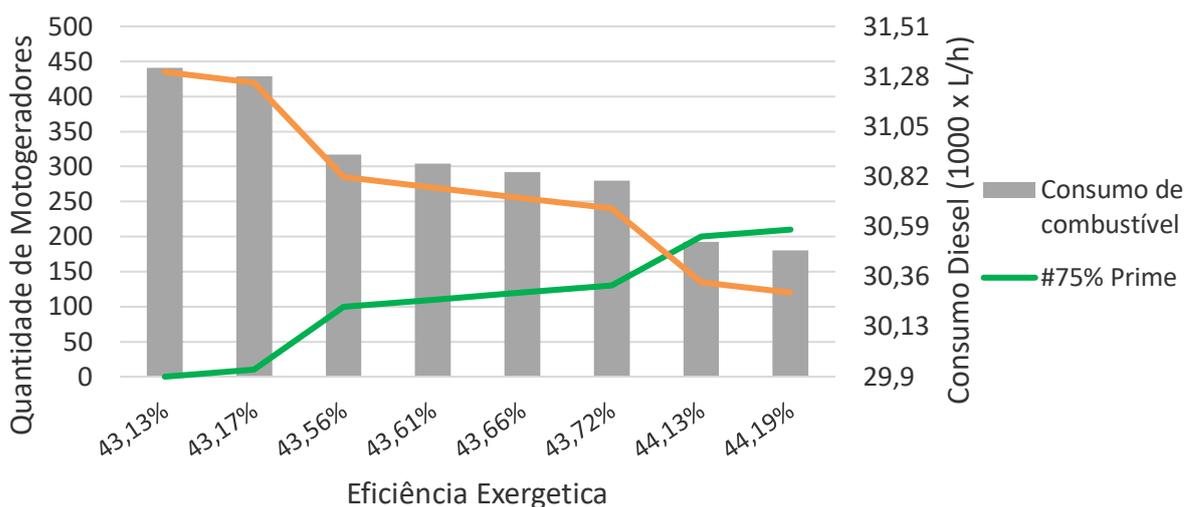
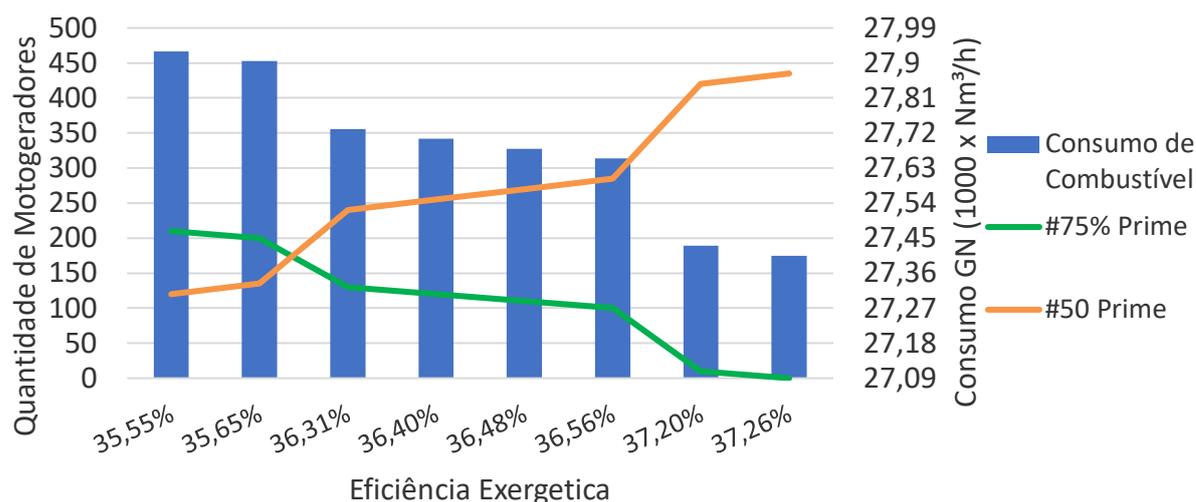


Figura 31 - Configurações de motogeradores e consumo de Gás Natural (Nm³/Hora) como combustível para atender a demanda solicitada de 118,56MW



Para o segundo cenário foi considerado uma geração da UTE de 75% da potência outorgada pela ANEEL com os motores Perkins 2806A-E18TAG3 operando no seu modo original com o motor a Diesel e com a Inovação tecnológica desenvolvida pela DSofer.

Diante da demanda proposta a figura 32 mostra que para gerar 177,84MW com os motogeradores operando com Diesel é possível identificar 14 combinações diferentes, com desvio de -0,019%, de modo que o potencial de economia do combustível pode chegar a 1640 Litro/hora ou 4592 Reais/hora apenas com o aumento da eficiência exergetica em 0,9%, o total de motores para a condição mais eficiente é de 445 unidades. Já a figura 33 mostra que o potencial de econômica, dessa vez considerando o gás natural, visto que o motor está utilizando o equipamento DDR2, o potencial de economia de combustível é de 825 Nm³/hora ou 1673,34 Reais/hora a medida em que motores operando a 50% do Prime entram em operação, pois para este caso é o motor em que há a maior eficiência, tendo na melhor condição 650 motores em operação, gerando um potencial de economia de 1,96%.

Figura 32 - Configurações de motogeradores e consumo de Diesel (Litros/Hora) como combustível para atender a demanda solicitada de 177,84MW

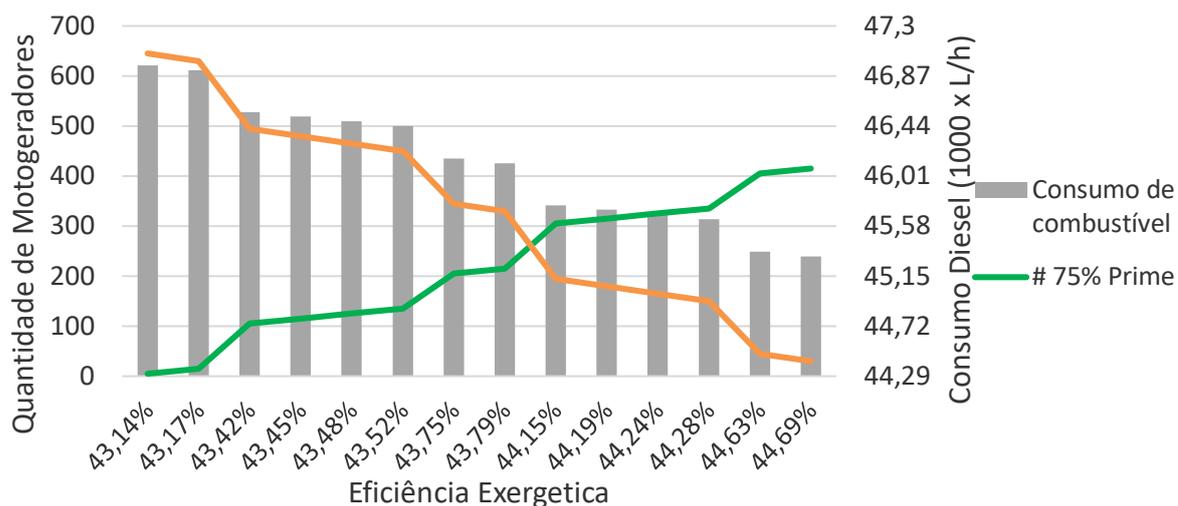
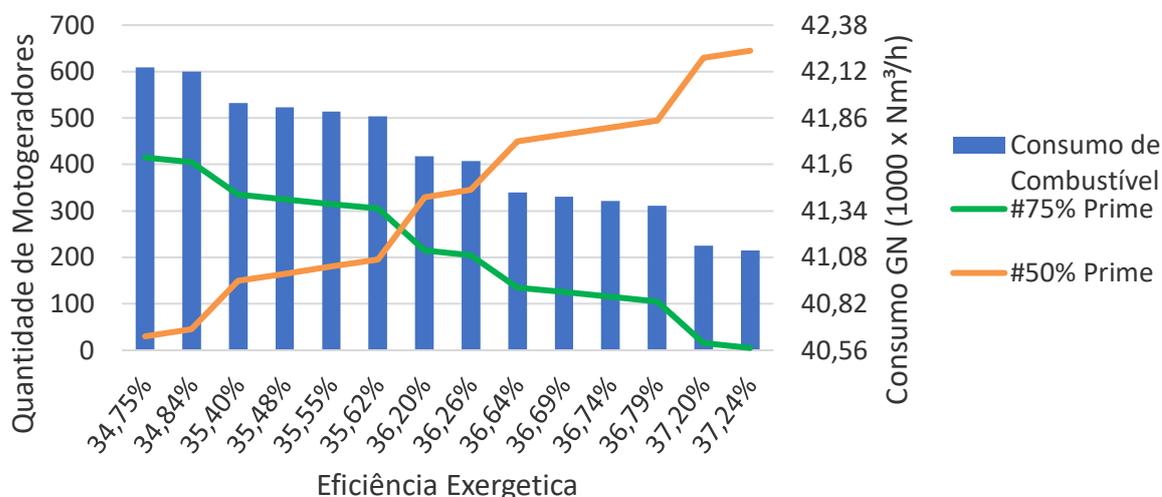


Figura 33 - Configurações de motogeradores e consumo de Gás Natural (Nm³/Hora) como combustível para atender a demanda solicitada de 177,84MW



Como a UTE tem um potencial de geração de 237,12 MW outorgada pela ANEEL foi escolhido como o terceiro cenário a ser analisado de forma mais detalhada pois nos dois cenários anteriores serviu para avaliar se as configurações atenderiam uma demanda abaixo do que está homologada. Para esta parte o procedimento será feito da mesma forma como os outros cenários com motores operando a 75% do prime e 50% do Prime, pois são configurações em que há dados para analisar tanto o motor no ciclo otto como no diesel, e além disso ainda será analisado o motor operando em 77% do prime pois é o modo que utilizam nos motores atualmente na EPESA para atender a demanda de 237,12MW, o motor operando a 75% será mantido na análise pois é o que tem maior eficiência exergética.

Neste caso, primeiro será feito a validação da demanda através do gráfico contendo o número de motores de motores operando em cada modo, para logo após será gerado o gráfico que mostra a eficiência exergética de acordo com a proporção

em que os motores a 75% do primeiro vão entrando em operação e para a o caso do estudo com os motores operando a 50% será mostrado como o consumo de combustível se comporta diante do desvio da demanda gerada para a demanda solicitada.

A figura 34 mostra que para a demanda de 237,12MW foi possível identificar 15 combinações, e desvio de -0019%, com o potencial de gerar uma economia de Diesel de 2160 Litros/hora ou 6048 Reais/hora devido ao aumento na eficiência exergética de 0,87%, em que mostra uma eficiência global de 43,72% quando operado com um total de 600 motores. Já para a operação do mesmo motor no ciclo Otto operando com o Gás Natural, apresenta o mesmo número de combinações da operação a diesel, como mostra a figura 35 podendo observar um potencial percentual de economia de combustível de 1,82% o que daria um potencial de economizar 1025Nm³/hora de Gás Natural ou 2079,01Reais/hora quando operado com um total de 870 motores.

Figura 34 - Configurações de motogeradores e consumo de Diesel (Litros/Hora) como combustível para atender a demanda solicitada de 237,12MW

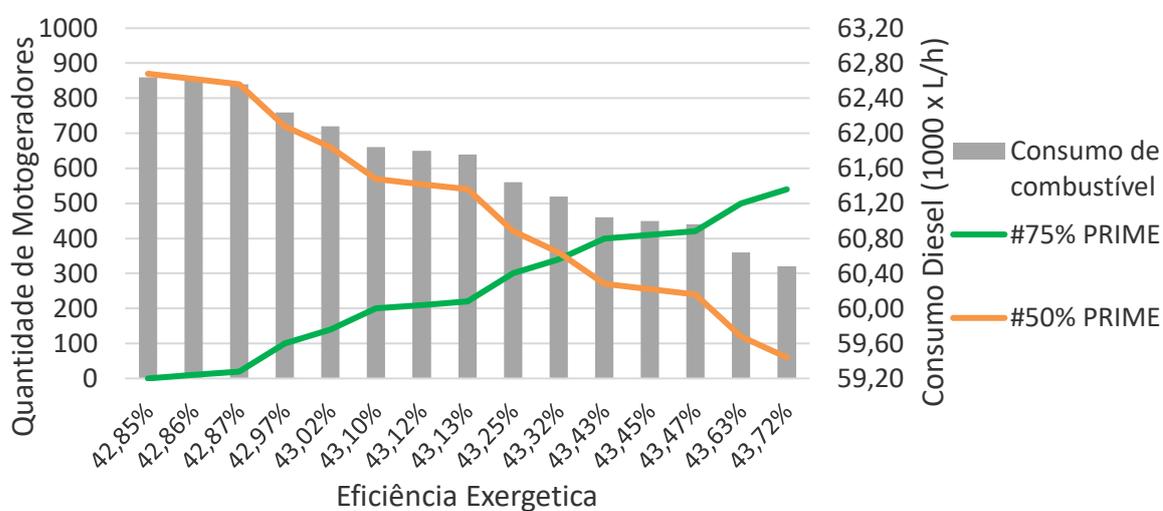
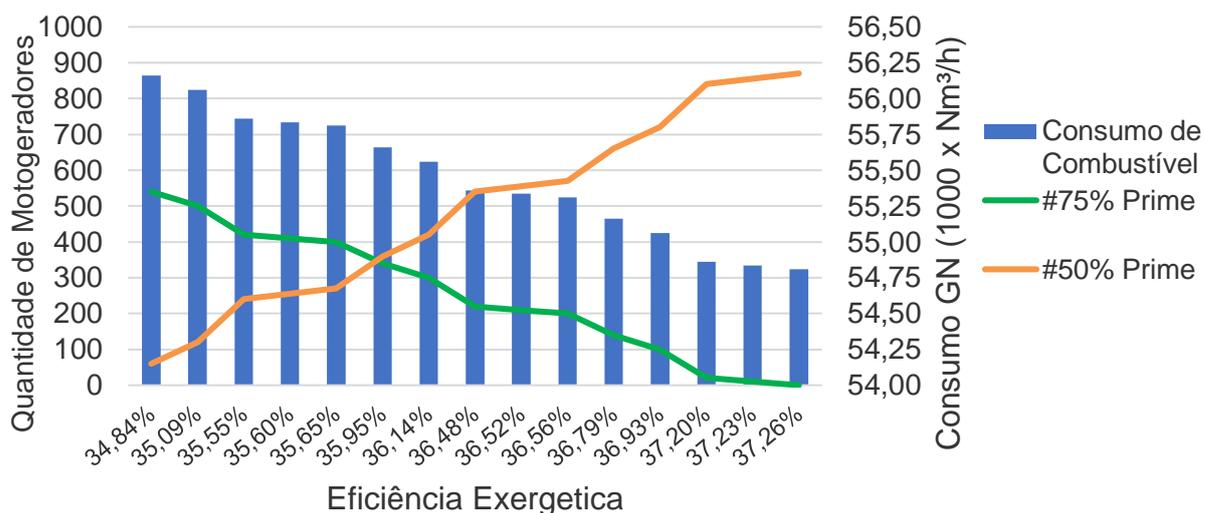


Figura 35 - Configurações de motogeradores e consumo de Gás Natural (Nm³/Hora) como combustível para atender a demanda solicitada de 237,12MW



Para melhor visualizar o comportamento do aumento da eficiência a medida que o modo mais eficientemente exegético do motor vai entrando em operação foi feito um gráfico em que mostra a razão entro o motor operando a 75% e a 50% do Prime. A figura 36 mostra esse comportamento para a operação no ciclo Diesel e a figura 37 para o ciclo Otto utilizando o Gás Natural como combustível e como foi dito anteriormente para a melhor condição o número total de motores em operação é de 600 e 870 respectivamente

Figura 36 - Eficiência exergetica baseada na razão de motores operando a 75% e 50% do Prime com Diesel para uma demanda de 237,12MW

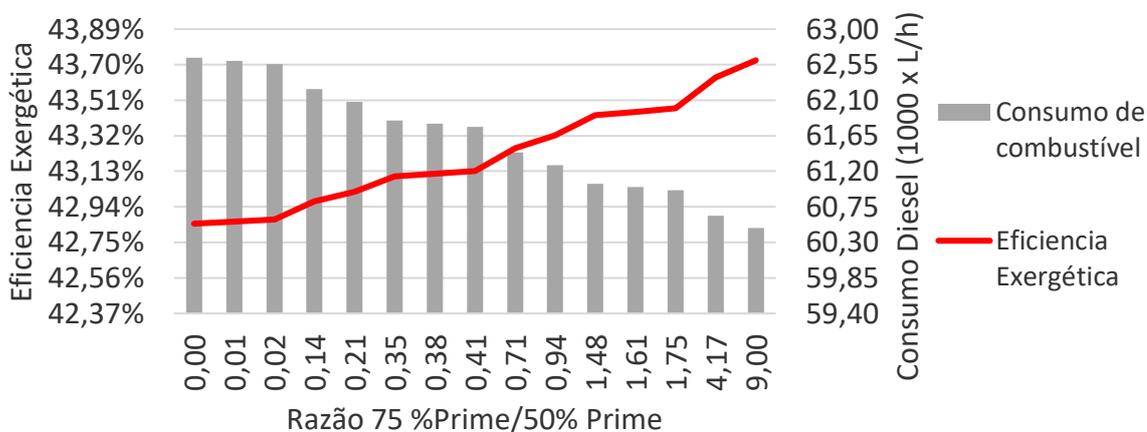
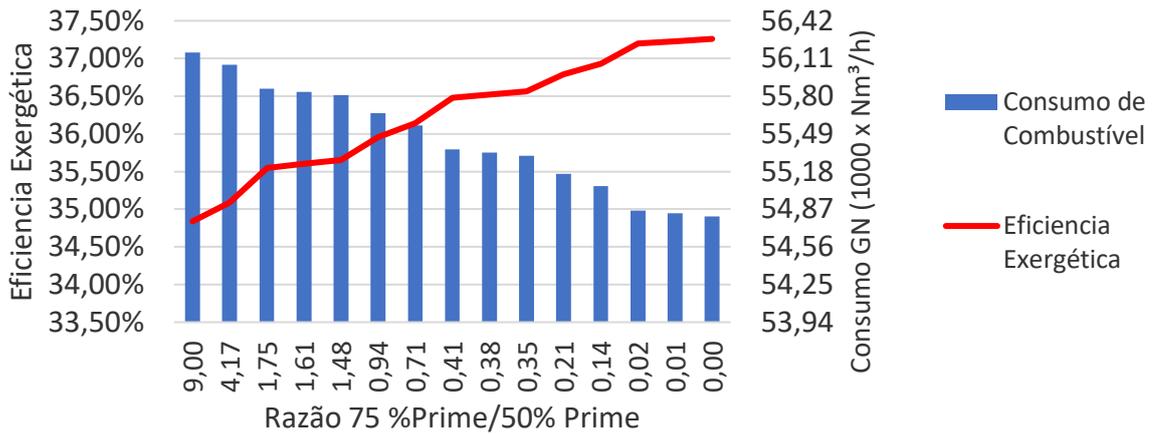
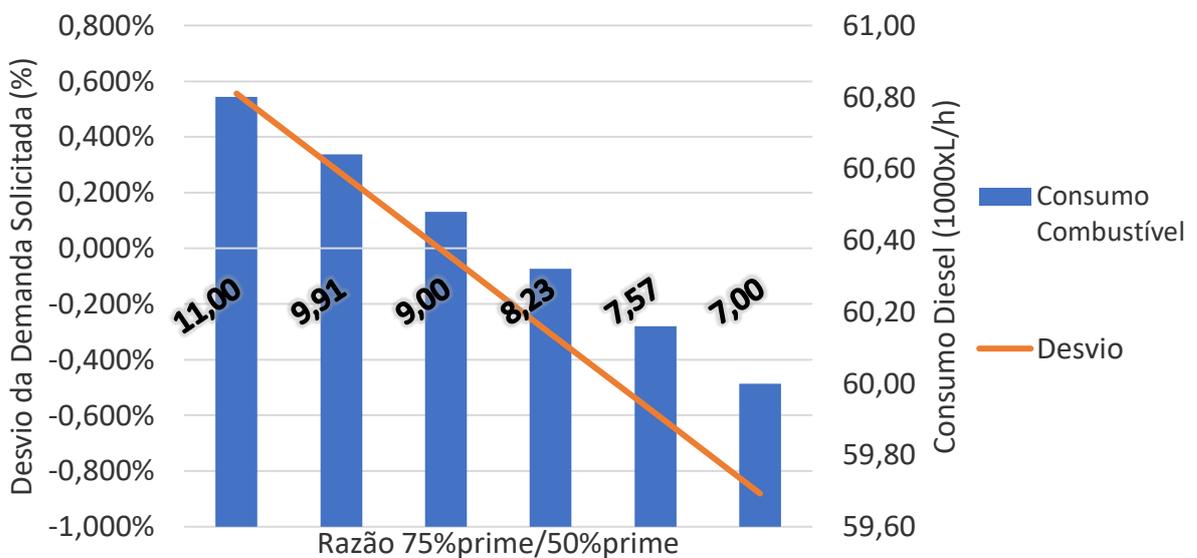


Figura 37 - Eficiência exergetica baseada na razão de motores operando a 75% e 50% do Prime com Gás Natural para uma demanda de 237,12MW



Ainda é possível observar uma economia de combustível com a mudança do desvio da demanda solicitada isso acontece pois o programa procura todas as configurações em que este desvio esteja entre 1%, a figura 38 considera o total de 600 motores (diesel) obtidos na primeira validação, o que iria variar seria a razão de motores a 75% e 50% do Prime, à medida que essa razão diminui o consumo de combustível também diminui porém com essa ação a demanda que irá ser entregue também diminuirá

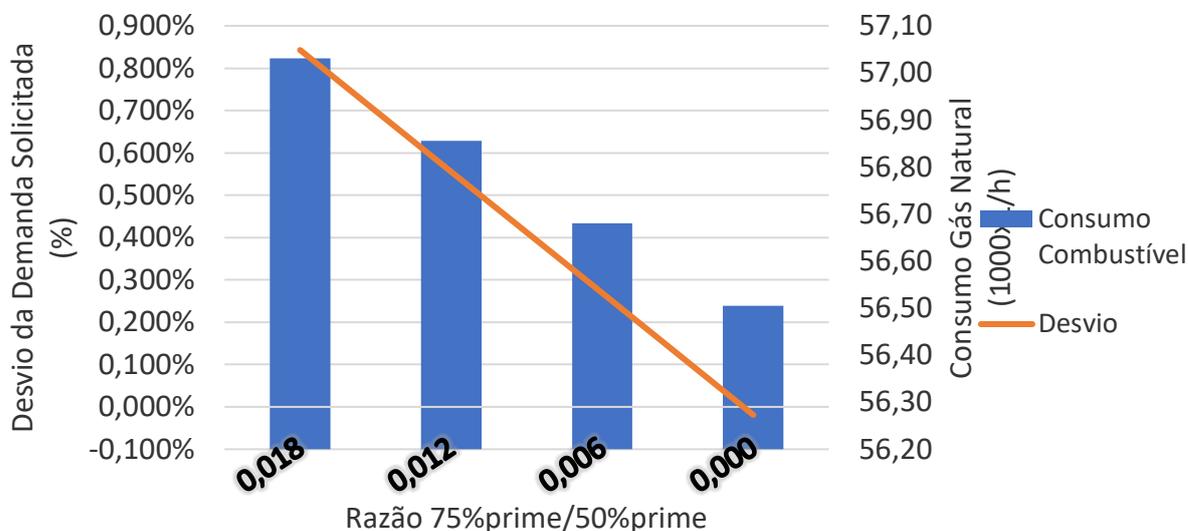
Figura 38 - Razão de motores operando a 75% e 50% do Prime tendo o Diesel como combustível para uma operação com 600 motores e o comportamento do desvio e consumo



Da mesma forma que foi feita para a operação a Diesel também foi gerado o gráfico que mostra o impacto da razão dos motores no desvio e no consumo de gás

natural, a figura 39 é baseada num total de 870 motores em operação e da mesma forma tendo um desvio máximo aceitável pelo programa de 1%.

Figura 39 - Razão de motores operando a 75% e 50% do Prime tendo o Gás Natural como combustível para uma operação com 870 motores e o compostamento do desvio e consume



5.5 ESTUDO DE CASO DE MOTORES OPERANDO A 77% E 75% DO PRIME COM CICLO DIESEL PARA ATENDER A DEMANDA OUTROGADA PELA ANEEL

Como a seção anterior ficou responsável em validar o programa nas diferentes solicitações de demanda e comparar o seu comportamento com a inovação tecnológica desenvolvida pela Dsofer, essa parte fica responsável em analisar o modo de operação atual da EPESA com motores a Diesel.

De acordo com os dados operacionais da usina termoeletrica cada motor Perkins 2806A-E18TAG3 injeta, para atender uma demanda de 237,12 MW, 420 kW, o que daria 77% do Prime, tendo um consumo por unidade geradora de 112 L/h de Diesel.

Como foi feito nos exemplos anteriores a condição de 50% do prime será substituída pela condição de 77% e fazendo a análise de mapeamento de geração baseados nas operações de 75% e 77% do Prime (sendo essa ainda a mais eficiente) gerando com isso a figura 40 que mostra o mapa de geração da configuração, sendo necessário, mesmo com percentuais próximos de geração, pois o desvio considerado da demanda solicitada ainda será de 1% como entrada do analisador exegetico.

Figura 40 - .Geração de energia, em MW, de acordo com o modo de operação de cada Power House utilizando os dados operacionais da EPESA

Nº de power house operando em 75% prime

		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nº de power house operando em 77% prime	0		40,875	81,75	122,625	163,5	204,375	245,25	286,125	327	367,875
	1	41,965	82,84	123,715	164,59	205,465	246,34	287,215	328,09	368,965	
	2	83,93	124,805	165,68	206,555	247,43	288,305	329,18	370,055		
	3	125,895	166,77	207,645	248,52	289,395	330,27	371,145			
	4	167,86	208,735	249,61	290,485	331,36	372,235				
	5	209,825	250,7	291,575	332,45	373,325					
	6	251,79	292,665	333,54	374,415						
	7	293,755	334,63	375,505							
	8	335,72	376,595								
	9	377,685									

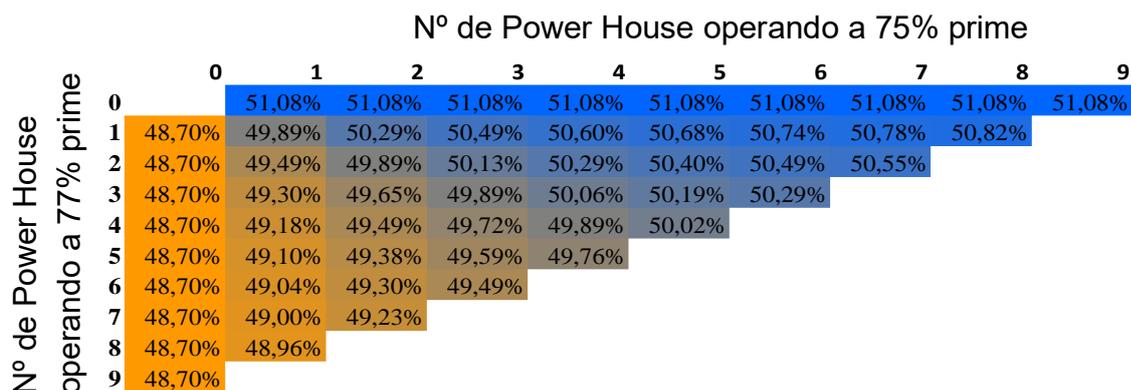
Com o mapeamento de geração é possível também ver a o comportamento da eficiência exegética (figura 41) e a eficiência energética global (figura 42) da UTE para cada demanda solicitada, de forma que seja possível identificar a zona de geração a ser estudada.

Figura 41 - Eficiência Exergetica Global considerando o moto Perkins operando pelo Óleo Diesel utilizando os dados operacionais da Epesa

Nº de Power House operando a 75% prime

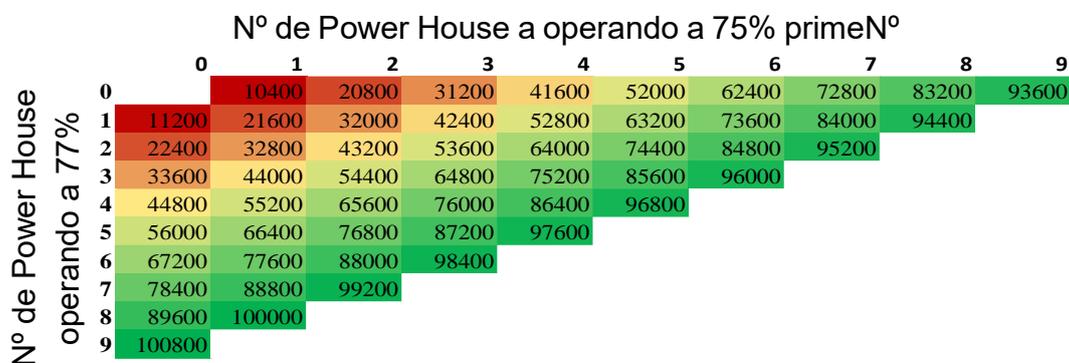
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nº de Power House operando a 77%	0		44,79%	44,79%	44,79%	44,79%	44,79%	44,79%	44,79%	44,79%	44,79%
	1	42,74%	43,77%	44,11%	44,28%	44,38%	44,45%	44,50%	44,53%	44,56%	
	2	42,74%	43,42%	43,77%	43,97%	44,11%	44,20%	44,28%	44,33%		
	3	42,74%	43,25%	43,56%	43,77%	43,91%	44,02%	44,11%			
	4	42,74%	43,15%	43,42%	43,62%	43,77%	43,88%				
	5	42,74%	43,08%	43,33%	43,51%	43,65%					
	6	42,74%	43,03%	43,25%	43,42%						
	7	42,74%	43,00%	43,20%							
	8	42,74%	42,97%								
	9	42,74%									

Figura 42 - Eficiência energética global considerando o moto Perkins operando pelo Óleo Diesel utilizando os dados operacionais da Epesa



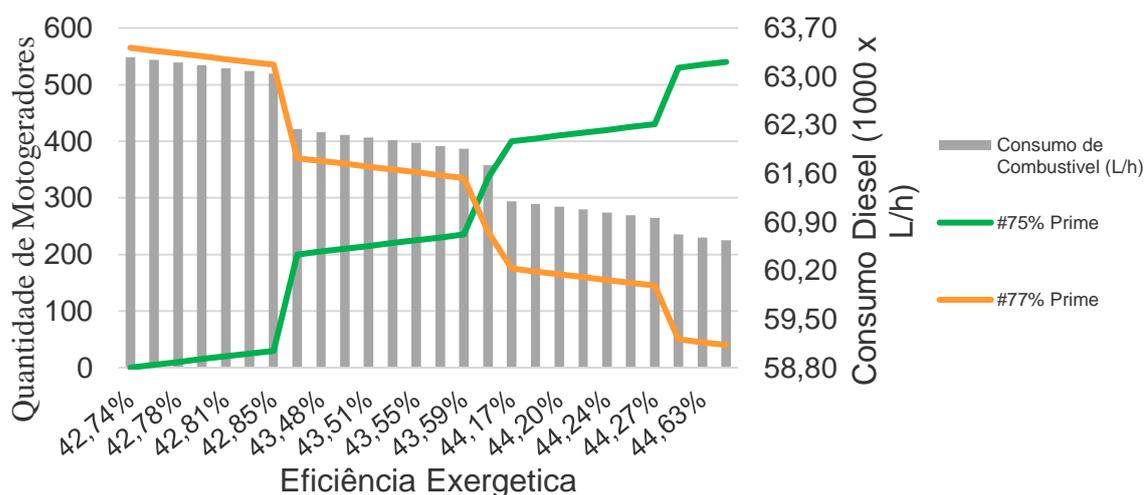
Já a figura 43 mostra o consumo em Diesel da usina para a demanda solicitada e a na eficiência localizada a medida em que o programa dá cada passo do seu processamento para localizar a melhor região de operação.

Figura 43 - Consumo de óleo Diesel (L/h) de acordo com o modo de operação de cada Power House baseado nos dados operacionais da EPESA



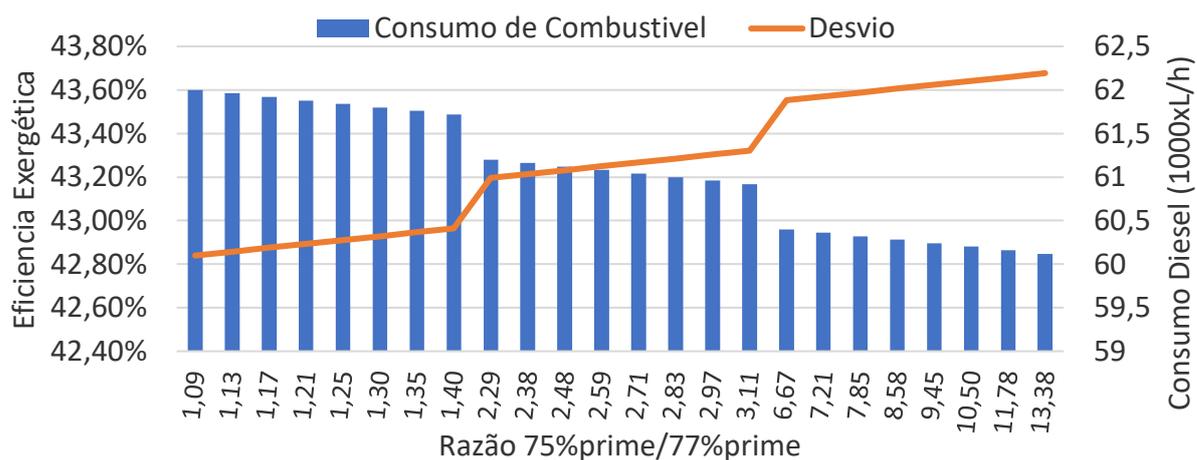
Da mesma que foi feita para as outras condições o programa identificou 26 configurações para fornecer 237,21 MW a rede com um desvio de 0,1%, o potencial de aumento teórico de eficiência é de 1,91% o que poderia gerar uma economia de 2640 litros de Diesel a cada hora e utilizando 580 motores como mostra a figura 44 no ponto em que os linhas referentes ao modo de operação dos motores se cruzam.

Figura 44 - Configurações de motogeradores e consumo de Diesel (Litros/Hora) como combustível para atender a demanda solicitada de 237,12MW utilizando dados da EPESA



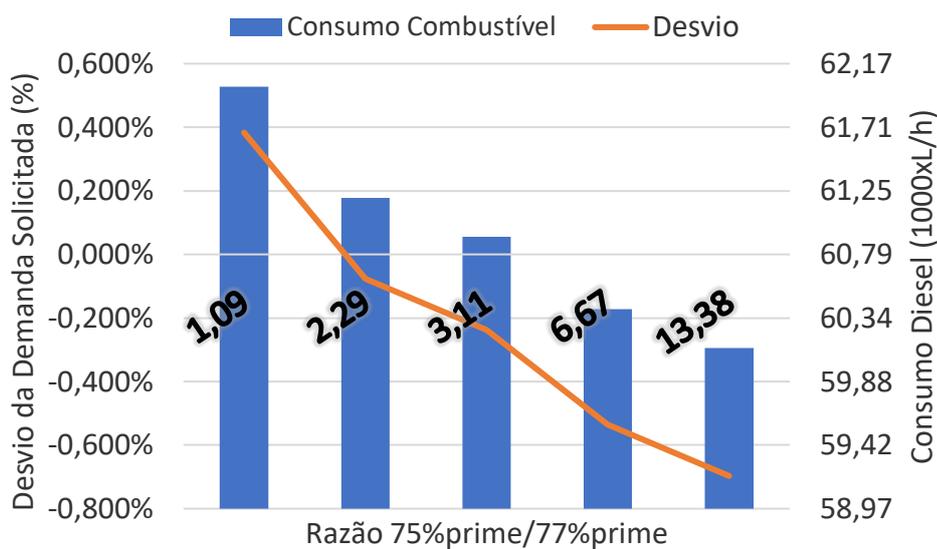
Segundo dados operacionais da rotina da EPESA, diante de uma solicitação de uma demanda de 237,12MW a operação da usina conta com o funcionamento de 570 motores, baseado nesse princípio o programa foi utilizado para poder identificar se há uma operação em que melhore o consumo de combustível sem alterar a quantidade de fornecimento de energia. Como é possível ver na figura 44 o ideal de motores está próximo de 580, o anexo K mostra mais 56 combinações possíveis se considerar o uso total de 570, 575 e 580 motogeradores, sendo a combinação de motores com 575 a com maior potencial de economia devido ao maior número de combinações possíveis, a figura 45, extraída do anexo K, mostra todas as possíveis configurações para essa quantidade de motores em operação na UTE pois além da economia mencionada anteriormente esta configuração ainda tem potencial de gerar uma economia adicional de 520 L/h.

Figura 45 - Comportamento do desvio e a economia de combustível referente a utilização de 575 motores diante do aumento da proporção de motores operando a 75% e 77% do Prime tendo o Diesel como combustível e considerando os dados operacionais da EPESA



A figura 46 mostra de forma compacta, utilizando as regiões em que a diferença de economia é maior, os dados da figura anterior no qual as figuras se baseiam na relação entre os motores de operação do motor 75% e 77% do prime e o desvio padrão entre o que é fornecido e o que é solicitado.

Figura 46 - Razão de motores operando a 75% e 77% do Prime tendo o Diesel como combustível para uma operação com 575 motores e o comportamento do desvio e consumo considerando os dados operacionais da EPESA



6 CONCLUSÕES

O uso e mapeamento da eficiência exergética e energética global contribuiu para o melhor aproveitamento dos motores da Usina Termoelétrica sem que houvesse intervenção mecânica, apenas operacional, de modo que o empreendimento pudesse localizar o melhor modo de operação, dada a demanda, e conseqüentemente reduzindo o consumo de combustível.

Com os resultados disponibilizados pela DSofer do motor Perkins equipado com seu sistema DDR2 é possível concluir, utilizando os dados iniciais da pesquisa com a inovação tecnológica, que a conversão pode ser de grande valia para a EPESA, pois como é observado ao longo de todo o estudo que a economia média de combustível, só pela mudança, pode chegar até R\$58172,11 por hora e se somar a economia com o mapeamento e localização da operação mais economia esse valor pode ser aumentado para até R\$60088,11 a cada hora..

Outro ponto a ser discutido é a descarbonização da usina. Considerando a situação atual em que a EPESA opera com seus motores a 77% do prime e usar alguns para operar com 75% o potencial de diminuição de gás carbônico (CO₂), apenas com o uso do da metodologia utilizada pelo analisador, é de 6076,19 kg/hora, além disso se considerar a conversão não destrutiva pela inovação tecnológica desenvolvida pela DSofer esse potencial aumenta para 39,27 kg de CO₂ por hora para cada motor em operação ou 22383,9 kg/hora para uma operação que vise atender uma demanda de 237MW e utilizando 570 motores.

7 RECOMENDAÇÕES

O programa poderia estender a análise a outros tipos de combustíveis utilizados em usinas termoelétrica, assim como a coleta de dados físico-químicos do combustível em períodos mais definidos e validá-los com os resultados do fornecedor para que com isso o programa consiga fazer o mapeamento que melhor represente a operação da usina.

Fazer análise com o motor operando com outros com outros modos de operação para que possa melhorar a precisão de economia do combustível.

Analisar mais os benefícios que esse programa poderá trazer para o meio ambiente atreves da descarbonização da usina devido a redução de emissões

Estudar as emissões para cada modo de operação para saber a influência dessa operação na combustão dos motores

REFERÊNCIAS

AGHBASHLO, M.; ROSEN, M. A. Exergoeconoenvironmental analysis as a new concept for developing thermodynamically, economically, and environmentally sound energy conversion systems. [s.l.] Elsevier B.V., 2018. v. 187

ALVES FILHO, J. Matriz Energetica Brasileira: da crise à grande esperança. Rio de Janeiro, RJ: MUAD, 2003

ARMANDO, P.-S. et al. Simulación en Aspen de la combustión de mezclas diesel-biodiesel. Ingeniería, Investigación y Tecnología, v. 16, n. 1, p. 83–92, 2015.

BENNETT, S. Modern Diesel Technology: Diesel Engines. Stamford: Cengage Learning, v. 2, 2014. 360 p.

BIG, Banco de Informações de Geração. Disponível em : <<https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 20 de Setembro de 2019

BORETTI, A. Numerical study of the substitutional diesel fuel energy in a dual fuel diesel-LPG engine with two direct injectors per cylinder. Fuel Processing Technology, v. 161, n. x, p. 41–51, 2017.

BRUNETTI, F. Motores de combustão interna. Vol. 1. São Paulo, SP: Blucher, 2012. 553p

EBRASIL, eletricidade do Brasil Disponível em: <<http://ebrasilenergia.com.br/site/epesa/>>. Acesso em: 18 de Novembro de 2019

FECOMBUSTIVEIS. Annual Fuel Retail Report. Rio de Janeiro: Federação Nacional do Comercio de Combustíveis e de Lubrificantes. 2017.

FLIPPO FILHO, G. Gestão de Energia: fundamentos e aplicação. São Paulos, SP: Érica, 2018.

G1, Seca atinge reservatórios de hidrelétricas e usina de Icém chega a 23% da capacidade. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sao-paulo/sao-jose-do-rio-preto-aracatuba/noticia/seca-atinge-reservatorios->

[de-hidreletricas-e-usina-de-icem-chega-a-23-da-capacidade.ghtml](#)>.

Acesso em: 20 de dezembro de 2018

GHANNADZADEH, A.; SADEQZADEH, M. Exergy analysis as a scoping tool for cleaner production of chemicals: A case study of an ethylene production process. *Journal of Cleaner Production*, v. 129, p. 508–520, 2016.

HEYWOOD J.B., *Internal Combustion Engine Fundamentals* Mc Graw Hill, New York, 1988.

International Energy Agency. Disponível em:

<<https://www.iea.org/statistics/?country=BRAZIL&year=2016&category=Energy%20supply&indicator=TPEsbySource&mode=chart&dataTable=BALANCES>>. Acesso em: 18 de Novembro de 2018

KANOGLU, M.; DINCER, I.; CENGEL, Y. A. Exergy for better environment and sustainability. *Environment, Development and Sustainability*, v. 11, n. 5, p. 971–988, 2009.

KATES, E. J.; LUCK, W. E. *Motores Diesel y de gas de alta compresión*. 2. ed. España: Reverté S. A., 2003. 535 p.

KOTAS, T. J. *The exergy method of thermal plants analysis*. Krieger, Melbourne, 1995

LARSON, L. *Dreams to Automobiles*. [S.l.]: Xlibris Corporation, 2008. 423 p.

LI, Y. et al. Comprehensive analysis of exergy destruction sources in different engine combustion regimes. *Energy*, v. 149, p. 697–708, 2018

LIBERMAN, M. A. *Introduction to Physics and Chemistry of Combustion: Explosion, Flame, Detonation*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2008. 351 p.

MOLLENHAUER, K.; TSCHÖKE, H. *Handbook of Diesel Engines*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2014. 636 p.

MORAN M. J.; SHAPIRO H. N. *Princípios de termodinâmica para Engenharia*. Rio de Janeiro. LTC 2009

OTHMAN, M. F. et al. Green fuel as alternative fuel for diesel engine: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 80, n. March, p. 694–709, 2017.

PERKINS. Datasheet: 2800 Series 2806A-E18TAG3 Diesel Engine – Publicação eletrônica. Nº PN1872B/12/14, Inglaterra, 2014

PETRESCU, F. I.; PETRESCU, R. V. *V Engine Design*. Bloomington: Booktango, 2012.

RADZI, A.; DROEGE, P. Latest Perspectives on Global Renewable Energy Policies. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, v. 1, n. 3, p. 85–93, 2014.

RIVERO, R. Application of the exergy concept in the petrochemical industry. Efficiency, costs, optimization, simulation and environmental aspects of energy systems, v. 43, p. 76–83, 1999.

SILVA, R. T. Fatores de Correção Aplicados À Medição de Volume de Óleo Diesel Em Motores. Dissertação (Mestrado em engenharia de petróleo e gás natural) – Universidade Potiguar. Natal. 2017.

T. L. BROWN, H. E. LEMAY, JR; B. E. BURSTEN, J. R. BURDGE, *Química A Ciência Central*. (tradução da 9a ed por Robson Mendes Matos). São Paulo: Pearson, 2005

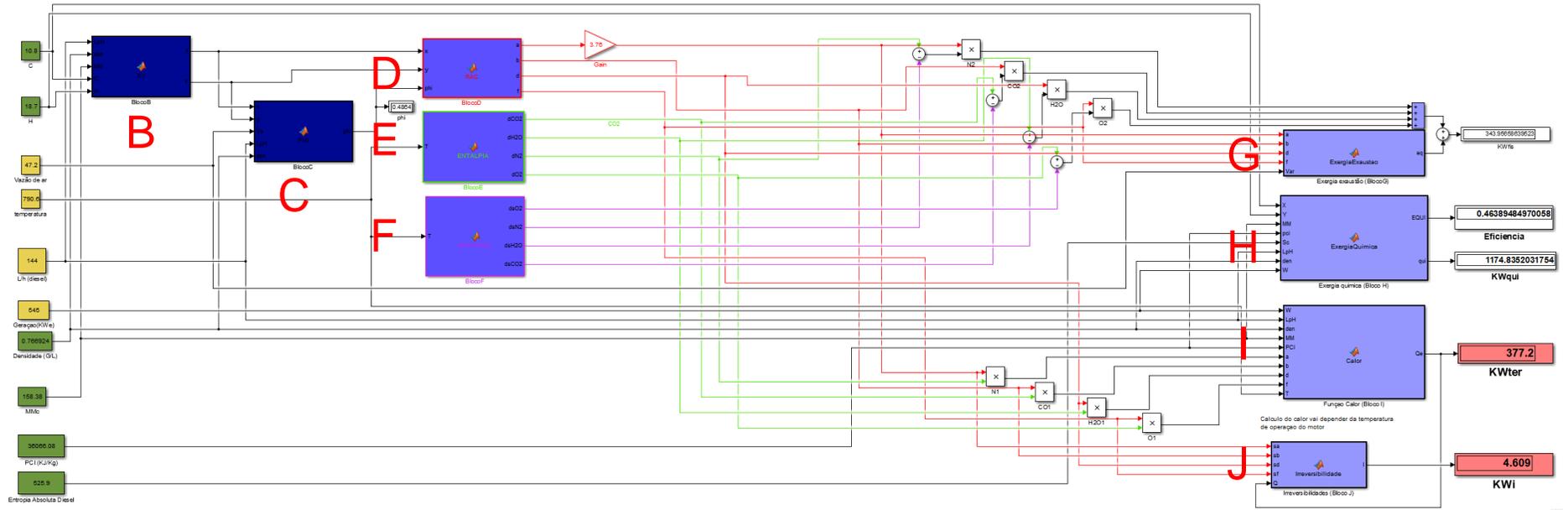
VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. *Fundamentos da termodinâmica clássica*. 4. ed. São Paulo: E.Blucher, 2008

WARNATZ, J.; MAAS, U.; DIBBLE, R. W. *Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*. 4^a. ed. [S.I.]: Springer Science & Business Media, 2006. 367 p.

XIU, J.; ZHANG, G. XING; HU, Y. Which kind of directed technical change does China's economy have? From the perspective of energy-saving and low-carbon. *Journal of Cleaner Production*, v. 233, p. 160–168, 2019.

YUAN, Y. et al. Combustion and emissions of the diesel engine using bio-diesel fuel. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, v. 3, n. 2, p. 189–192, 2008.

ANEXO A – ANALISADOR DE EXERGIA



ANEXO B – FUNÇÃO PARA CALCULO DO FLUXO MOLAR

```
function [X,Y] = XY (LpH, den, MM, C, H)
```

```
 %#codegen
```

```
Nc = ((LpH/3600)*den)/MM;
```

```
X = Nc*C;
```

```
Y = Nc*H;
```

ANEXO C – FUNÇÃO PARA DO Φ

```
function phi = PHI(x,y,Va,LpH,den)
%#codegen

ro = 1.1514; %kg/m³ de ar
a=(x+y/4);
MWa = 28.97;
MWf = 12.01*x+1.01*y;
AFe = 4.76*a*(MWa/MWf);
AF = (Va*ro)/((LpH/60)*den);
phi = AFe/AF;
```

ANEXO D – FUNÇÃO PARA CÁLCULOS DAS CONSTANTES ESTEQUIOMÉTRICAS

```
function [a,b,d,f] = RAC(x,y,phi)
%#codegen

a=(x+y/4)/phi;
b=x;
d=y/2;
f=((1-phi)/phi)*(x+(y/4));

%Ntotal = x + x/2 + ((x+y/4)/phi)*(1-phi+3.76);

end
```

ANEXO E – FUNÇÃO ENTALPIA

```

function [dCO2,dH2O,dN2,dO2] = ENTALPIA(T)

%#codegen

coder.extrinsic('xlsread')

Ttab = zeros(200,1);
htabO2 = zeros(200,1);
htabCO2 = zeros(200,1);
htabN2 = zeros(200,1);
htabH2O = zeros(200,1);

[~,~,cTtab] =
xlsread('C:\Users\gabriel.neves\Desktop\IATI\PPGEM\Dissertação\parametros\G
ases de Exaustão.xlsx','Planilha','A2:A201');

[~,~,chtabO2] =
xlsread('C:\Users\gabriel.neves\Desktop\IATI\PPGEM\Dissertação\parametros\G
ases de Exaustão.xlsx','Planilha','B2:B201');

[~,~,chtabCO2] =
xlsread('C:\Users\gabriel.neves\Desktop\IATI\PPGEM\Dissertação\parametros\G
ases de Exaustão.xlsx','Planilha','D2:D201');

[~,~,chtabH2O] =
xlsread('C:\Users\gabriel.neves\Desktop\IATI\PPGEM\Dissertação\parametros\G
ases de Exaustão.xlsx','Planilha','F2:F201');

[~,~,chtabN2] =
xlsread('C:\Users\gabriel.neves\Desktop\IATI\PPGEM\Dissertação\parametros\G
ases de Exaustão.xlsx','Planilha','H2:H201');

%[Ttab,htabO2,htabCO2,htabH2O,htabN2] = importfile('Gases de
Exaustão.xlsx','Planilha',2,201);

% Ttab = termo(:,1);
% htabO2 = termo(:,2);
% htabCO2 = termo(:,4);
% htabN2 = termo(:,8);
% htabH2O = termo(:,6);

coder.extrinsic('cell2mat')

Ttab=cell2mat(cTtab);
htabO2=cell2mat(chtabO2);
htabCO2=cell2mat(chtabCO2);
htabN2=cell2mat(chtabN2);

```

```
htabH2O=cell2mat (chtabH2O);
testeh=0;
n=1;

while testeh==0

    if T==Ttab (n)
        a=n;
        testeh=1;

    elseif T>Ttab (n) &&T<Ttab (n+1)
        a=n;
        b=n+1;
        testeh=2;

    else
        n=n+1;
    end
end
t0=0;
tq=298;
n=1;
hO20=0;hCO20=0;hN20=0;hH200=0;
while t0==0
    if Ttab (n) == tq
        hO20=htabO2 (n);
        hCO20=htabCO2 (n);
        hN20=htabN2 (n);
        hH200=htabH20 (n);
        t0=1;
    end
    n=n+1;
```

```
end

if testeh==1
hO2 = htabO2(a);
hN2 = htabN2(a);
hH2O = htabH2O(a);
hCO2 = htabCO2(a);
else
hO2= htabO2(a)+((htabO2(b)-htabO2(a))/(Ttab(b)-Ttab(a)))*(T-Ttab(a));

hN2= htabN2(a)+((htabN2(b)-htabN2(a))/(Ttab(b)-Ttab(a)))*(T-Ttab(a));

hH2O= htabH2O(a)+((htabH2O(b)-htabH2O(a))/(Ttab(b)-Ttab(a)))*(T-Ttab(a));

hCO2= htabCO2(a)+((htabCO2(b)-htabCO2(a))/(Ttab(b)-Ttab(a)))*(T-Ttab(a));
end

dO2 = hO2 - hO20;
dCO2 = hCO2 - hCO20;
dN2 = hN2 - hN20;
dH2O = hH2O - hH2O0;
end
```

ANEXO F – FUNÇÃO ENTROPIA

```

function [dsO2,dsN2,dsH2O,dsCO2]= ENTROPIA(T)

%#codegen

coder.extrinsic('xlsread')

Ttab = zeros(200,1);

stabO2 = zeros(200,1);

stabCO2 = zeros(200,1);

stabN2 = zeros(200,1);

stabH2O = zeros(200,1);

[~,~,cTtab] =
xlsread('C:\Users\gabriel.neves\Desktop\IATI\PPGEM\Dissertação\parametros\G
ases de Exaustão.xlsx','Planilha','A2:A201');

[~,~,cstabO2] =
xlsread('C:\Users\gabriel.neves\Desktop\IATI\PPGEM\Dissertação\parametros\G
ases de Exaustão.xlsx','Planilha','C2:C201');

[~,~,cstabCO2] =
xlsread('C:\Users\gabriel.neves\Desktop\IATI\PPGEM\Dissertação\parametros\G
ases de Exaustão.xlsx','Planilha','E2:E201');

[~,~,cstabH2O] =
xlsread('C:\Users\gabriel.neves\Desktop\IATI\PPGEM\Dissertação\parametros\G
ases de Exaustão.xlsx','Planilha','G2:G201');

[~,~,cstabN2] =
xlsread('C:\Users\gabriel.neves\Desktop\IATI\PPGEM\Dissertação\parametros\G
ases de Exaustão.xlsx','Planilha','I2:I201');

% [Ttab,stabO2,stabCO2,stabH2O,stabN2] = importfile('Gases de
Exaustão.xlsx','Planilha',2,201);

% termo = xlsread('Gases de Exaustão.xlsx');

% termo=termo1;

% Ttab = termo(:,1);

% stabO2 = termo(:,3);

% stabCO2 = termo(:,5);

% stabN2 = termo(:,9);

% stabH2O = termo(:,7);

coder.extrinsic('cell2mat')

Ttab=cell2mat(cTtab);

```

```
stabO2=cell2mat (cstabO2);
stabCO2=cell2mat (cstabCO2);
stabN2=cell2mat (cstabN2);
stabH2O=cell2mat (cstabH2O);
testeh=0;
n=1;

while testeh==0

    if T==Ttab (n)
        testeh=1;
        a=n;

    elseif T>Ttab (n) &&T<Ttab (n+1)
        a=n;
        b=n+1;
        testeh=2;

    else
        n=n+1;
    end
end

t0=0;
tq=298;
n=1;
sO20=0;
sCO20=0;
sN20=0;
sH2O0=0;
while t0==0
    if Ttab (n) == tq
```

```

        sO20=stabO2 (n) ;
        sCO20=stabCO2 (n) ;
        sN20=stabN2 (n) ;
        sH200=stabH2O (n) ;
        t0=1;

    end

    n=n+1;
end
if testeh==1
sO2 = stabO2 (a) ;
sN2 = stabN2 (a) ;
sH2O = stabH2O (a) ;
sCO2 = stabCO2 (a) ;
else
sO2= stabO2 (a) + ((stabO2 (b) -stabO2 (a) ) / (Ttab (b) -Ttab (a) ) ) * (T-Ttab (a) ) ;

sN2= stabN2 (a) + ((stabN2 (b) -stabN2 (a) ) / (Ttab (b) -Ttab (a) ) ) * (T-Ttab (a) ) ;

sH2O= stabH2O (a) + ((stabH2O (b) -stabH2O (a) ) / (Ttab (b) -Ttab (a) ) ) * (T-Ttab (a) ) ;

sCO2= stabCO2 (a) + ((stabCO2 (b) -stabCO2 (a) ) / (Ttab (b) -Ttab (a) ) ) * (T-Ttab (a) ) ;
end
dsO2 =298*(sO2 - sO20) ;
dsCO2 = 298*(sCO2 - sCO20) ;
dsN2 = 298*(sN2 - sN20) ;
dsH2O = 298*(sH2O - sH200) ;
end

```

ANEXO G – EXERGIA DOS GASES DE EXAUSTÃO

```

function eq = ExergiaExaustao(a,b,d,f,Var)

%#codegen

Va=Var/60;

R = 8.314; %kJ/kmol.K

T0=298; %K

tot = a+b+d+f; %N2 +CO2+H2O+O2

ro = 1.1514; %kg/m³ de ar

ae = ((Va*ro)/28.97)*0.7808;

be = ((Va*ro)/28.97)*0.0003;

de = (Va*ro*0.006)/18; % de agua/kg de ar seco

fe = ((Va*ro)/28.97)*0.2093;

tote = ae+be+de+fe;

ya = ((a/tot)/(ae/tote));

yb = ((b/tot)/(be/tote));

yd = ((d/tot)/(de/tote));

yf = ((f/tot)/(fe/tote));

eq= R*T0*(a*log(ya)+b*log(yb)+d*log(yd)+f*log(yf));

end

```

ANEXO H – FUNÇÃO PARA CALCULO DE EXERGIA QUIMICA E EFICIÊNCIA EXERGETICA

```

function [EQUI,qui] = ExergiaQuimica(X,Y,MM,pci,Sc,LpH,den,W)

PCI=pci*MM; %transformar PCI para KJ/kmol

%Sc é a entropia absoluta do diesel
SO2 = 205.03;
SCO2 = 213.69;
SH2O = 188.72;%Gasoso

eCO2 = 19870;
eH2O = 9500;
eO2 = 3970;
a = X + Y/4;
b = X;
d = Y/2;

equi= PCI - 298*(Sc +a*SO2 - b*SCO2 - d*SH2O)+b*eCO2 +d*eH2O -a*eO2;

qui = (((LpH/3600)*den)*(equi/MM));
EQUI = W/(((LpH/3600)*den)*(equi/MM));

```

ANEXO I – FUNÇÃO PARA EXERGIA ASSOCIADA A TRANSFERENCIA DE CALOR

```
function Qe = Calor(W, LpH, den, MM, PCI, a, b, d, f, T)
%#codegen

Nc = ((LpH/3600)*den)/MM;

Q = (W/3600)+Nc*(PCI*MM) - (a+b+d+f);
Qe = (1-(298/T))*Q;
end
```

ANEXO J – FUNÇÃO PARA CALCULAR DE EXERGIA DESTRUIDA

```
function I = EDestruida(sa, sb, sd, sf, Q)
%#codegen
SO2 = 205.03;
SN2 = 191.5;
SCO2 = 213.69;
SH2O = 188.72; %Gasoso

I = sa*SN2+sb*SCO2+sd*SH2O+sf*SO2 - (Q/298);
```

ANEXO K – MAPEAMENTO DE CONFIGURAÇÃO DA EPESA PARA MOTORES OPERANDO A 75% E 77% DO PRIME

