

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
ADALBERTO ADRIANO GONÇALVES

ANÁLISE EXERGOCONÔMICA DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO DE
MOTORES AUTOMOTIVOS



CURITIBA

2021

ADALBERTO ADRIANO GONÇALVES

ANÁLISE EXERGOECONÔMICA DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO DE
MOTORES AUTOMOTIVOS

Projeto de Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, no curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Professor José Viriato Coelho Vargas
Coorientador: Dr. Wellington Balmant

CURITIBA

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE – SIBI/UFPR

G635a Gonçalves, Adalberto Adriano

Análise exergoeconômica de uma linha de produção de motores
automotivos [recurso eletrônico]/ Adalberto Adriano Gonçalves
- Curitiba, 2021.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em
Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do
Paraná.

Orientador: Professor José Viriato Coelho Vargas
Coorientador: Dr. Wellington Balmant

1. Termodinâmica. 2. Automóveis - Motores. I. Vargas, José Viriato
Coelho. II. Balmant, Wellington. III. Título. IV. Universidade Federal
do Paraná.

CDD 621.31

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
MECÂNICA - 40001016040P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ADALBERTO ADRIANO GONÇALVES** intitulada: **ANÁLISE EXERGEOCONÔMICA DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO DE MOTORES AUTOMOTIVOS**, sob orientação do Prof. Dr. JOSE VIRIATO COELHO VARGAS, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 20 de Janeiro de 2021.

JOSE VIRIATO COELHO VARGAS

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

LUIZ ALBERTO DE OLIVEIRA ROCHA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS)

LUCIANO KIYOSHI ARAKI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

*A todos aqueles que de alguma forma
contribuíram para viabilizar esse projeto
e sabem o quanto o investimento
em tecnologia e educação,
fará nosso país ainda melhor.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por permitir que todos os desafios da minha vida tenham sido superados agregando ensinamentos à minha vida.

A minha Mãe por ter me dado todo o suporte possível para chegar a esse momento vitorioso.

À Universidade Federal do Paraná por ter me oferecido um ensino de Graduação em Engenharia Química, DEQ, de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PGMmec, com níveis de excelência acima da média nacional.

Ao Professor Doutor José Viriato Coelho Vargas, pela sua orientação, conselhos e sugestões que tornaram esse Projeto de Mestrado possível.

Ao *Group* Renault do Brasil que através de seus funcionários, engenheiros e técnicos tornou possível o convívio com a rotina do processo de fabricação e montagem de motores e o levantamento dos dados fundamentais para a elaboração desse Projeto.

A todos aqueles que embora não tenham sido mencionados contribuíram de alguma forma no desenvolvimento desse Projeto.

RESUMO

A economia de recursos energéticos para a produção de componentes manufaturados interessa a todos os segmentos da produção industrial. Um método interessante para gerenciar o consumo de energia e financeiro da linha de produção é denominado análise exergoeconômica. Considerando um processo de produção de motores automotivos e tendo conhecimento dos dados de entrada de energia de todas as estações da linha de produção, é possível aplicar conceitos termodinâmicos e econômicos com o objetivo de otimizar os parâmetros operacionais e de projeto da linha de produção para desempenho máximo em termos de uma taxa de lucro. A função de taxa de lucro foi definida como o valor total de mercado dos motores produzidos por dia menos o custo da eletricidade consumida no mesmo período (taxa de entrada de exergia). Uma análise exérgica foi conduzida para o processo, após a qual os custos exérgicos e não exérgicos foram incluídos no modelo para produzir a análise exergoeconômica. Os resultados numéricos mostraram uma taxa de lucro máximo de U\$438.617,18 dia⁻¹ com 887 motores produzidos por dia. O custo que mais impacta a lucratividade da linha de produção é manutenção dos equipamentos. Embora uma análise exergoeconômica de linha de produção simplificada tenha sido utilizada neste estudo, fundamentalmente, os resultados aqui obtidos demonstraram que existem parâmetros que podem ser otimizados (e.g., número de motores por dia) na linha de montagem para obter uma taxa de lucro máxima, não importando o grau complexidade do processo manufatureiro que esteja sendo analisado.

Palavras-chave: análise exergoeconômica. maximização da taxa de lucro. motores automotivos.

ABSTRACT

Saving energy resources for the production of manufactured components is of interest to all segments of industrial production. An interesting method to manage the energy and financial consumption of the production line is called exergoeconomic analysis. Considering an automotive engine production process and knowing the energy input data of all stations in the production line, it is possible to apply thermodynamic and economic concepts to optimize the operating and design parameters of the production line for maximum performance in terms of a profit rate. The profit rate function was defined as the total market value of the engines produced per day less the cost of electricity consumed in the same period (exergy entry fee). An exergetic analysis was conducted for the process, after which exergetic and non-exergetic costs were included in the model to produce the exergoeconomic analysis. The numerical results showed a maximum profit rate of US\$ 438,617.18 day⁻¹ with 887 engines produced per day. The cost that most impacts the profitability of the production line is equipment maintenance. Although an exergoeconomic analysis of a simplified production line was considered in this study, fundamentally, the results obtained here demonstrated that there are parameters that can be optimized (e.g., number of engines per day) in the assembly line to obtain a rate of maximum profit, regardless of the complexity of the manufacturing process under investigation.

Keyword: exergoeconomic analysis. profit rate maximization. automotive engines.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MOTOR 1000 c.c PRODUZIDOS NA FÁBRICA RENAULT	14
FIGURA 2 - SISTEMA DE PRODUÇÃO ENXUTO.....	24
FIGURA 3 – MODELO DE DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO ANALÍTICO. ...	34
FIGURA 4 – SETOR DE ESTOCAGEM DOS MOTORES FINALIZADOS.....	35
FIGURA 5 – <i>LAYOUT</i> DE UM CONJUNTO DE MOTO GERADORES DE <i>BACK UP</i> PARA O SISTEMA.	36
FIGURA 6 - PAINEL P.I.D. MEDIDOR BAROMÉTRICO DA LINHA DE MONTAGEM.	37
FIGURA 7 – <i>LAYOUT</i> DA LINHA DE MONTAGEM DE MOTORES 1000 c.c.....	38

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - CUSTOS DE PRODUÇÃO DISTRIBUÍDO PELOS POSTOS DE PRODUÇÃO (2020)	51
GRÁFICO 2 - LUCRO EM FUNÇÃO DA PRODUÇÃO DE MOTORES POR DIA.....	52
GRÁFICO 3 - TAXA DE LUCRO EM RELAÇÃO CUSTO DE CAPITAL INICIAL (2020).....	53
GRÁFICO 4 - EFEITO DO CUSTO DA ENERGIA SOBRE O LUCRO MÁXIMO.....	54
GRÁFICO 5 - LUCRO MÁXIMO EM FUNÇÃO DOS CUSTOS DA MANUTENÇÃO.....	55
GRÁFICO 6 - LUCRO MÁXIMO EM FUNÇÃO DO CUSTO DA MANUTENÇÃO COM	56
GRÁFICO 7 - LUCRO MÁXIMO EM FUNÇÃO DO CUSTO DA MÃO DE OBRA.	57

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - AS TRÊS CARACTERÍSTICAS PREJUDICIAIS EM UM PROCESSO INDUSTRIAL.....	25
TABELA 2 - DADOS DE INTERAÇÕES PARA ESTIMATIVA DE CUSTO PARA A COMPRA DE EQUIPAMENTOS ROBÓTICO, MÉTODO PRICE.	49
TABELA 3 - DADOS DE INTERAÇÕES PARA ESTIMATIVA DE CUSTO PARA A COMPRA DE EQUIPAMENTOS ROBÓTICO, MÉTODO PRICE.	50
TABELA 4 - DADOS DOS INSUMOS DA LINHA DE PRODUÇÃO.	51

LISTA DE ABREVIATURAS

A.G.: algoritmo genético.

A.L.B.-dois: Balanceamento de Linha de montagem Bilateral.

A_n : amortização periódica.

A.S.P.: Planejamento de Sequência de montagem.

B.L.M.: Balanceamento de Linha de Montagem.

c.c.: cilindradas.

D.E.S.: simulação de eventos discretos.

H₂O: água.

K: Unidade Kelvin de temperatura absoluta.

I: corrente elétrica, [A].

L: lucro máximo, [US\$/t].

MUDA: é o desperdício ou algo que consuma recursos sem agregar valor ao produto vendido ao cliente.

MURI: é a sobrecarga das atividades dos trabalhadores ou equipamentos.

MURA: é a irregularidade na linha de produção ou o pico de trabalho intenso intercalado com períodos de espera.

P.I.D.s: Processo e Diagramas de Instrumentação.

SALBP: balanceamento de Linha de montagem Simples.

SI: Sistema Internacional de Unidades.

t: tempo.

T: temperatura, [K]

TEPSO: Otimização de Enxame de Partículas aprimorado por Taboo.

U: tensão elétrica, [W].

R: resistência, [Ω].

S.P.C.: Sistema de Prestação Constante.

\dot{W} : taxa de trabalho realizada através do limite do sistema fechado, [w/t].

LISTA DE SIMBOLOS

α : constante de proporcionalidade, [A motores⁻¹ dia⁻¹].

\dot{C}_{Ptotal} : taxa de custo associado ao produto, [US\$/h].

\dot{C}_{Ftotal} : taxa de gastos total, [US\$/h].

\dot{C}_E : taxa de custo energético em, [US\$/h].

c_E : taxa de custo da energia elétrica fornecida pela concessionária energética à fábrica em, [US\$/kWh].

\dot{C}_i : taxa de custo associado a uma corrente de exergia i , [US\$/h].

c_i : custo unitário da energia consumida, [U\$/kW].

\dot{E} : energia útil (exergia) consumida em plena operação, [kWh dia⁻¹].

e_i : energia útil (exergia) específica consumida, [kJ kg⁻¹].

h_{in} e h_{out} entalpia específica na entrada e na saída do sistema, [kJ kg⁻¹].

J_n : juros composto.

K_1 : constante que ajusta a taxa de custo de consumo de energia na produção de motores.

K_2 : constante que ajusta a taxa de custo de consumo de manutenção na produção de motores.

K_3 : constante para a taxa de custos homem-hora para a demanda de motores.

K_4 : constante para a taxa de custos homem-hora devido ao aumento de operários com o número de motores.

\dot{m}_i : massa consumida pelo sistema em um período de tempo, [kg dia⁻¹].

\dot{m}_m : motores produzidos por um intervalo de tempo, [motores dia⁻¹].

P_n : valor da parcela, [US\$].

\dot{Q} : é a taxa de transferência de calor no limite do sistema [W]

S : entropia, [J/K.]

S_n : Para o saldo devedor.

\dot{Z} : taxa de capital de custo em, [US\$/h].

Z_0 : custo mínimo para a manutenção da linha de produção, [US\$/h].

Z_{Cl} : custo de capital investido, [US\$].

\dot{Z}_{total}^{cl} : investimento de capital, [US\$/h].

Z_{HH} : custo por funcionário por hora de trabalho, [US\$/h].

Z_{MNT} : custo de manutenção, [US\$/h].

\dot{Z}_{total}^{om} : investimento de opera

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	CONCEITOS TERMODINÂMICOS	16
2.2	A EXERGIA	17
2.3	A EXERGOECONOMIA	19
2.4	LINHAS DE PRODUÇÃO	21
2.5	MÉTODO ENXUTO DE PRODUÇÃO	22
2.6	BALANCEAMENTO DE LINHA DE MONTAGEM (BLM)	26
2.7	BALANCEAMENTO DE LINHA DE MONTAGEM (BLM) COM COMPUTAÇÃO DE CONSUMO ENERGÉTICO	29
2.8	BALANCEAMENTO DE LINHA DE MONTAGEM (BLM) COM ANÁLISE EXERGOECONÔMICA	31
2.9	DESAFIO ENCONTRADO APÓS A REVISÃO	32
3	JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS	33
3.1	JUSTIFICATIVA	33
3.2	OBJETIVO GERAL	33
3.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	33
4	MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1.	COLETA DE DADOS	35
4.2	ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS	37
4.3	MODELAGEM E SIMULAÇÃO	38
4.4	CÁLCULO DA POTÊNCIA CONSUMIDA EM EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS	39
4.5	DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DA POTÊNCIA CONSUMIDA POR DEMANDA (α)	40
4.6	ANÁLISE EXERGÉTICA E EXERGOECONÔMICA	40
4.7	TAXA DE CUSTO DE CONSUMO DE ENERGIA NA PRODUÇÃO DE MOTORES	43
4.8	TAXA DE CUSTOS HOMEM-HORA PARA A DEMANDA DE MOTORES	44
4.9	TAXA DE CUSTOS DE MANUTENÇÃO PARA A DEMANDA DE MOTORES	45
4.10	TAXA DE CUSTOS DE CAPITAL INVESTIDO	46

4.11 EQUAÇÃO TERMOECONÔMICA E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO.....	47
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1 ANÁLISE ECONÔMICA (TAXAS DE CUSTO DE INVESTIMENTO DE CAPITAL).....	49
5.2 ANÁLISE PARAMÉTRICA DOS DADOS	50
5.3 DADOS DOS INSUMOS DA LINHA DE PRODUÇÃO	51
5.4 OTIMIZAÇÃO DA LINHA DE PRODUÇÃO	52
5.5 EFEITO DO CUSTO DE CAPITAL SOBRE O LUCRO MÁXIMO.....	52
5.6 EFEITO DO CUSTO DA ENERGIA SOBRE O LUCRO MÁXIMO	53
5.7 EFEITO DA MANUTENÇÃO SOBRE O LUCRO MÁXIMO.....	54
5.8 EFEITO DO CUSTO DA MÃO DE OBRA SOBRE O LUCRO MÁXIMO	56
5.9 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	57
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
6.1 CONCLUSÕES	59
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
REFERÊNCIAS.....	61
APÊNDICE 1	64
APÊNDICE 2.....	72

1 INTRODUÇÃO

A economia na utilização de meios energéticos para a produção de componentes manufaturados é de interesse na produção industrial de todos os segmentos.

Segundo o Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Organizações das Nações Unidas ONU (2019), existiam aproximadamente 7,6 bilhões de pessoas no mundo em abril de 2019, com projeção indicando que a população mundial alcançará 10 bilhões de indivíduos no ano de 2055 e 11 bilhões no ano de 2088.

Devido à perspectiva de crescimento populacional, existe o interesse por parte das empresas e governos em atender esse mercado, oferecendo acesso a bens de consumo, conforto e praticidade na rotina desses indivíduos, causando a necessidade crescente de produtos manufaturados, com maior grau de elaboração, tecnologia agregada e consequente gasto expressivo de energia.

Cabe destacar que considerando somente a energia elétrica, subconjunto da matriz energética brasileira, no ano de 2016, a oferta interna de energia renovável foi de 79,3%, contra 24% no restante do mundo, destacando-se, energia eólica, biomassa e solar com uma fatia de 16%. Além disso, a matriz energética total brasileira é composta por: 66,2% da energia produzida por hidrelétricas, gás liquefeito de petróleo responde por 10,5%, seguido do urânio (usinas de energia nuclear) 2,6%, carvão e petróleo 7,6% (BRASIL. Ministério de Minas e Energia, 2019).

Nesse cenário, destacam-se as montadoras de veículos automotivos. É conhecido o expressivo consumo de fontes energéticas para a operação de seus equipamentos que exigem grande precisão e versatilidade no processo fabril. Dentro desse contexto, esse trabalho busca analisar o custo do consumo energético da linha de produção de motores para carros e caminhonetes.

Uma forma de gerenciar o consumo energético da linha de produção de motores automotivos é através do uso de ferramentas matemáticas e princípios de engenharia aplicados à termodinâmica. A união desses conhecimentos tem o nome de análise exergoeconômica.

A palavra certa para a potência adquirida nesses sistemas não é energia; o termo mais preciso seria exergia, que se define como a máxima quantidade de energia útil, que pode ser obtida de um desequilíbrio entre um sistema e o meio de referência estabelecido (Rojas S. P., 2007).

FIGURA 1 - MOTOR 1000 c.c PRODUZIDOS NA FÁBRICA RENAULT DE SÃO JOSÉ DOS PINHAIS, PARANÁ, BRASIL.



FONTE: O autor (2019).

Abam et al. (2012) fazem uma analogia onde energia não pode ser criada nem destruída, mas pode ser degradado em valor ou qualidade, finalmente atingindo um estado em que está em equilíbrio absoluto com o meio ambiente e conseqüentemente, sem uso adicional para tarefa. Além disso, uma análise abrangente de exergia avalia o grau de destruição exérgica, identifica a localização, a extensão e a fonte de ineficiências termodinâmicas em sistemas térmicos. Dessa forma as melhorias vêm do uso racional contínuo do processo de manufatura.

Para a linha de montagem de motores do complexo Airton Senna em São José dos Pinhais, Paraná, do *Group* Renault do Brasil, foram identificadas as principais fontes de energia para a linha de montagem: energia elétrica e ar comprimido, esses dados passaram por um tratamento matemático com base nas regras exergoeconomicas adotadas.

Embora já exista um planejamento de custo para a linha de montagem, esse material remonta à época da sua estruturação, isso nos últimos anos do século XX, sendo necessária uma nova abordagem devido às diversas modernizações e adaptações que a fábrica aplicou ao longo desse tempo.

Na elaboração desse projeto as etapas de desenvolvimento foram divididos em capítulos distintos, iniciando com um breve texto com as motivações técnicas para o desenvolvimento dessa pesquisa. No capítulo seguinte, é desenvolvida uma pesquisa histórica das origens da análise exergoeconômica no mundo, seguida do estudo analítico de documentos e pesquisas que orientará o leitor nos diferentes aspectos desenvolvidos nesse trabalho. Segue-se o capítulo três com os objetivos geral e específicos abordando questões técnicas de campo para viabilizar os dados e a matéria prima necessária para a elaboração dos estudos. No capítulo quatro são apresentadas as metodologias para essa atividade nos aspectos amplos e nos detalhes que destacam essa Dissertação. No capítulo cinco são apresentados e discutidos os resultados obtidos neste trabalho. Finalmente, no capítulo seis são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo são apresentados conceitos sobre os fundamentos da termodinâmica, exergia e análise exergoeconômica disponíveis na literatura que servirão como base para o desenvolvimento das técnicas usadas e suas origens.

2.1 CONCEITOS TERMODINÂMICOS

Os fundamentos da termodinâmica datam do século XVII quando o cientista alemão Otto von Guericke descreveu os primeiros conceitos da bomba de vácuo, demonstrada nos Capítulos II e III do Livro III, "Experimenta Nova e na Mechanica Hydraulico-pneumatica" (Marciniak, W. 2012).

Contemporâneo às pesquisas de Otto von Guericke, os cientistas ingleses Robert Hooke e Robert Boyle deduziram, através de experimentos, que existia uma relação muito próxima entre o volume de um sistema observado, a pressão exercida e a temperatura do mesmo. Foi verificado que a pressão e o volume são inversamente proporcionais à temperatura.

No final do século XVII os engenheiros ingleses Thomas Savery e Thomas Newcomen elaboraram o primeiro motor constituído de um pistão movido a vapor gerado pelo aquecimento de água confinada em um reservatório, aquecido com lenha de madeira (LANDES, D. S. 1969).

Ainda no século XVIII o cientista e engenheiro mecânico escocês James Watt melhorou a eficiência do motor criado por Thomas Savery e Thomas Newcomen usando um condensador separado. Esse equipamento permitia que parte do calor perdido no ciclo de operação fosse reaproveitado gerando economia e proporcionando eficiência ao sistema mecânico (LANDES, D. S. 1969).

A partir desse momento as indústrias de produtos manufaturados da época viram com bons olhos a oportunidade de ampliar sua produção, com qualidade e quantidade, sem que para isso tivesse que aumentar suas despesas ou aumentar de forma proporcional a quantidade de operários, pois as máquinas movidas a vapor, se aplicadas de maneira correta, poderiam suprir a demanda.

Em meados do século XIX, o engenheiro mecânico escocês William John Macquorn Rankine escreveu o livro "Manual de Mecânica Aplicada (1858)", em que

deduziu o princípio de que a máxima eficiência possível para qualquer motor térmico é uma relação das duas temperaturas máxima e mínima do sistema observado.

Nesse período do desenvolvimento industrial europeu Rankine junto com o físico alemão Rudolf Julius Emanuel Clausius e o engenheiro mecânico escocês William Thomson, entre outros estudiosos do assunto, e desenvolveram o que hoje chamamos de Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica.

Com uma diferença curta entre a publicação da Primeira Lei da Termodinâmica em 1850 por Clausius, que deu o nome de Princípio da Conservação de Energia e da Segunda Lei da Termodinâmica em 1851 por William Thomson, conhecida como o fenômeno da irreversibilidade na natureza (HESS, H. 1840).

A Primeira Lei da Termodinâmica atribui características conservativas ao sistema, a energia não é destruída e também não pode ser criada. Fundamentalmente é o calor caracterizado como energia mecânica capaz de manter um equilíbrio entre o que é energia potencial e o que é considerado energia cinética, entre outros, nas características do que pode ser observado no sistema.

Para Moran e Shapiro (2002), as postulações que definem os fundamentos da Segunda Lei da Termodinâmica são divididas em dois conceitos que se complementam:

Para um sistema isolado, é impossível operar um sistema um ciclo termodinâmico e fornecer uma quantidade líquida de trabalho para suas vizinhanças enquanto recebe energia por transferência de calor de apenas um único reservatório térmico.

Segundo Rudolf Julius Emanuel Clausius: É improvável, para um determinado sistema isolado, operar de maneira que o único resultado seria a transferência de energia sob a forma de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.

2.2 A EXERGIA

A produção industrial em todos os setores tem como sua matéria prima fundamental a energia, seja ela na forma de energia elétrica, mecânica, entre outros modais. Essa ferramenta é o insumo capaz de permitir a transformação, através de técnicas de engenharia, por exemplo, de materiais de seu estado bruto em bens de consumos duráveis e desejáveis por consumidores.

É de conhecimento que somente parte da energia fornecida que efetivamente é usada em um equipamento industrial. Segundo Rezac, P. e Metghalchi, H. (2004), o

termo que define a potência de eixo do sistema não é energia, mas sim, exergia que seria a energia útil que é transferida para a operação do sistema.

Para Rojas, S. P. (2007), exergia é a forma encontrada por engenheiros e cientista para mensurar a ineficiência energética de um sistema e para dar uma visão do que pode ser aperfeiçoado.

Scott, D. S. (2008) definiu que a exergia é o trabalho teórico máximo que pode ser fornecido colocando uma fonte de energia em equilíbrio com seu ambiente, ou seja, exergia é toda a energia produzida que pode ser efetivamente transformada em trabalho útil para um sistema.

Embora tenha recebido crédito a partir da publicação de 1956 feita por Z. Rant, vários foram os cientistas que dispuseram dos seus conhecimentos para identificar essa medida (RIVERO, MONTERO e PULIDO, 1990):

- Energia utilizável, por Gouy em 1889;
- Capacidade de trabalho técnico, por Bosnjakovic em 1935;
- Rendimento calórico, por Grigull em 1945;
- Disponibilidade, por Keenan em 1951;
- Trabalho técnico máximo, por Schmidt em 1953;
- Energia não degradada em calor, por Gibert em 1955, (DA SILVA, J. A. M., 2013).

No princípio da primeira era industrial, já era claro que não seria possível transformar toda a força oferecida em trabalho efetivo para a operação unitária desejada, para essa observação feita na época foi dado o nome de Energia Disponível ou somente Disponibilidade (DAVID S. S. 2008).

Embora ainda seja um conceito discutido mais abertamente no meio acadêmico do que na área industrial, já existiam estudos aplicados em chão de fábrica, feitos sobre a exergia ainda no século XIX.

Entre 1876 e 1878 o cientista e engenheiro norte americano Josiah Willard Gibbs escreveu uma série de artigos descrevendo diversos fenômenos termodinâmicos entre eles, descreveu seus conceitos do que viriam a ser os fundamentos da exergia (MORAN, M. J. et al. 2013).

Ainda no início do século XIX o cientista francês Nicolas Léonard Sadi Carnot escreveu: “Reflexões sobre Potência Motriz do Fogo e Máquinas Próprias para Aumentar essa Potência”, uma obra onde são postulados os primeiros conceitos da máquina térmica no meio industrial na Europa. (SRINIVASAN, J. 2001).

Desprezando as interações microscópicas que ocorrem entre os elementos de um sistema, podemos distribuir a energia total observada em quatro componentes: exergia potencial, exergia cinética, exergia física e exergia química. Em proporções que podem variar de acordo com particularidades de cada sistema, mas que podem ser generalizadas na Figura 2 abaixo.

Considerando um sistema fechado, a energia e exergia cinética e potencial são semelhantes, pois é desprezível a proporção de exergia destruída na passagem.

A exergia física é o trabalho de eixo total obtido caracterizado pela existência de equilíbrio térmico e mecânico com o meio ambiente, sem mudar sua composição (DA SILVA, J. A. M., 2013).

Segundo Silas Vieira (1998), exergia química é toda quantidade de trabalho de eixo originado de uma dada substância em estado natural por processos envolvendo transferência de calor, endotérmico ou exotérmico, e troca de matéria com o ambiente.

2.3 A EXERGOECONOMIA

A exergoeconomia objetiva a precificação dos custos envolvidos na elaboração de um determinado produto manufaturado. Essa análise é feita através da medida dos custos dos fenômenos de irreversibilidade energética ou exergia destruída.

Para avaliar os parâmetros envolvidos na análise exergoeconômica, é necessário ter ao menos o balanço de custos para cada equipamento envolvido no sistema analisado.

Partido dos conceitos fundamentais da Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica, sabemos que a energia fornecida ao sistema fechado não é totalmente transformada em trabalho útil para o processo. Existe um decréscimo da exergia causado pelo processo irreversível de cada etapa observada (SZARGUT, 1970).

Seguindo os postulados de Valero, Lozano e Muñoz (1986), envolvendo um método analítico mais rigoroso de cálculos matriciais onde são alocados, custo de

alimentação, custo operacional e custo de capital de cada etapa do processo de manufatura aos seus fluxos de produção.

Nesse método também é considerado custo exergético como a despesa, em termos de exergia, para viabilizar as características da etapa do processo, enquanto o custo exergoeconômico é o custo monetário por energia útil, da despesa para obter um fluxo de processo. Seguindo as seguintes etapas distintas constituída de um fluxo de entrada e saída para cada equipamento do sistema, propriedades do sistema global e as relações de custos individuais entre fluxos baseados nas características, finalidade e forças motrizes para cada operação unitária do sistema.

Para Lazzaretto e Tsatsaronis (2006), os custos exergéticos calculados para cada equipamento devem ser proporcionalmente contabilizados proporcionalmente com o aumento de entropia nos equipamentos que compõe o sistema, tendo como exemplo, um condensador que proporciona a diminuição da entropia do fluido circulante de trabalho do sistema.

Enquanto segundo Torres et al. (2008), a propriedade funcional de cada operação unitária do sistema tem sua exergética, sendo seus custos alocados para os componentes que aumentam a exergia do fluido de trabalho.

Para esse trabalho será usado os princípios tratados por Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996), para relações auxiliares:

Quando a definição de Produto de um componente envolve, somente, um fluxo exergético, o custo exergoeconômico unitário desse fluxo de saída é calculado mediante um balanço de custos. As relações de saída são formuladas para os restantes fluxos exergéticos, que são usados na definição de fluxo energético, associados ao componente em consideração.

Quando o fluxo energético de um componente envolve uma diferença entre os estados de entrada e de saída de um mesmo fluxo exergético, o custo exergoeconômico unitário desse fluxo será constante;

Quando o fluxo do produto de um componente envolve (m -fluxos) exergéticos, ($m-1$) relações auxiliares relacionadas a esses fluxos exergéticos serão formuladas, formando um sistema de multi variáveis.

O custo de capital investido para a linha de montagem de motores automotivos, analisada nesse trabalho, será nulo, pois se trata de um sistema existente em que os custos de implantação e partida já foram absorvidos ao longo do tempo. Aplicando na

modelagem ampla da análise exergoeconômica, a diferença relativa de custos deixa de ser uma variável termoeconômica importante para a análise dos equipamentos operacionais dos Postos da linha de montagem.

Identificando e monetizando a carga exérgica de cada item de cada Posto da linha de montagem, é possível comparar os dados coletados na linha de montagem com os dados analisados no projeto construtivo do mesmo sistema, é possível identificar as perdas energéticas do sistema para produzir soluções economicamente viáveis e considerar o fator humano frente às tecnologias robóticas aplicável para uma ou várias condições de contorno em possíveis etapas de produção onde existam comparativas perdas na produtividade.

2.4 LINHAS DE PRODUÇÃO

“Faster, Better and cheaper” (mais rápido, melhor e barato). Esse é o slogan em inglês de todo o processo moderno de manufatura e produção de bens industriais. O inglês não é acidental, já que o grande responsável pela difusão desse paradigma é ninguém menos que Henry Ford. É verdade que bem antes de Henry Ford produzir seus primeiros Ford T, a revolução industrial já tinha chacoalhado a Europa e o mundo com a introdução de máquinas a vapor, que aumentaram, consideravelmente, a produtividade de bens e serviços, conectando o mundo através de locomotivas e navios a vapor.

Contudo, antes de Henry Ford, as cadeias produtivas não tinham a capacidade de produzir com velocidade sistemas de alta de complexidade. Por exemplo, uma locomotiva era produzida uma por vez e os funcionários participavam de todas as etapas de produção em conjunto com um ou mais engenheiros. Além disso, não havia controle eficiente da qualidade, sendo comum que uma empresa fornecesse o mesmo modelo de locomotiva, mas houvesse uma significativa diferença entre os mesmos modelos produzidos na mesma fábrica. Nesta época, a capacidade de gerenciamento e projeto de um engenheiro era muito importante e pessoal. Praticamente, cada engenheiro produzia uma locomotiva diferente, sendo o componente subjetivo e pessoal muito importante na qualidade final do produto.

No entanto, como imaginado, as perdas e as ineficiências desse processo de produção eram visíveis, já que limitavam muito a produtividade e tinham custos elevados. A grande questão que se colocava era como produzir um produto complexo como um

automóvel de maneira “*Faster, Better and cheaper*”, fazendo com que cada família de americanos comuns pudesse ter um. Esse era o grande sonho de Henry de Ford. E, para implementar esse sonho, ele criou o processo de produção através de linhas de montagem.

Nesse modelo de produção, cada trabalhador ficava responsável por uma etapa ou sub-etapa de montagem de um produto. A produção era feita sequencialmente por diferentes estações de trabalho, o que permitia que todas as estações de trabalho não ficassem ociosas, resultando numa produção em série. A Ford, já em 1914, conseguia montar um Ford T em 98 minutos. E mais, cada etapa da produção era documentada e padronizada, garantindo que cada Ford T produzido fosse praticamente uma cópia do outro, removendo o fator subjetivo da produção de automóveis. Os três princípios adotados por Henry Ford eram os seguintes:

(1) Posicione as ferramentas e os homens na sequência da operação de forma que cada peça componente percorra a menor distância possível durante o processo de acabamento.

(2) Use escorregadores ou alguma outra forma de suporte para que, quando um operário conclua a sua operação, ele deixe cair a peça sempre no mesmo lugar - que deve ser sempre o lugar mais conveniente para sua mão - e, se possível, carregue a gravidade a parte para o próximo operário por conta própria.

(3) Use linhas de montagem deslizantes, pelas quais as peças a serem montadas são entregues a distâncias convenientes.

Desde 1914 até hoje, muita coisa avançou em termos de manufatura de produtos, mas os princípios e a visão de Henry Ford ainda servem de base para os avanços que se fazem hoje nesse campo.

2.5 MÉTODO ENXUTO DE PRODUÇÃO

No artigo de Rothschild et al. (2017) é apresentada uma metodologia de gestão para colaboradores em linha de montagem, chamada Gestão Enxuta ou *Lean Management* em inglês, é uma metodologia aplicada pela primeira vez na montadora

japonesa Toyota. Esse método de gestão é dividido em sete etapas distintas e tem como foco a eliminação de desperdícios na linha de montagem, os sete passos são:

- Excesso de produção (mais saída do que o necessário);
- Processamento excessivo (processos complexos);
- Transporte (fluxo ineficiente);
- Movimento (muitas atividades);
- Espera;
- Defeitos (resultando em retrabalho);
- Inventário.

No trabalho publicado por Helleno et al. (2017) o método de enxuto de processo industrial é foi dividido em três etapas distintas:

- Nível de sustentabilidade econômica;
- Nível de sustentabilidade ambiental;
- Nível de sustentabilidade social.

Esse projeto tem o objetivo de identificar meios de sustentabilidade para um sistema industrial típico brasileiro. É demonstrado que questões relacionadas às dimensões econômica, social e ambiental não são monitoradas no processo, mas em setores administrativos da indústria alheios à rotina da produção industrial.

Para Albzeirat, Hussain e Ahmad (2018) foram descritas condições mais favoráveis possíveis para o bom funcionamento de uma linha de produção industrial enxuta:

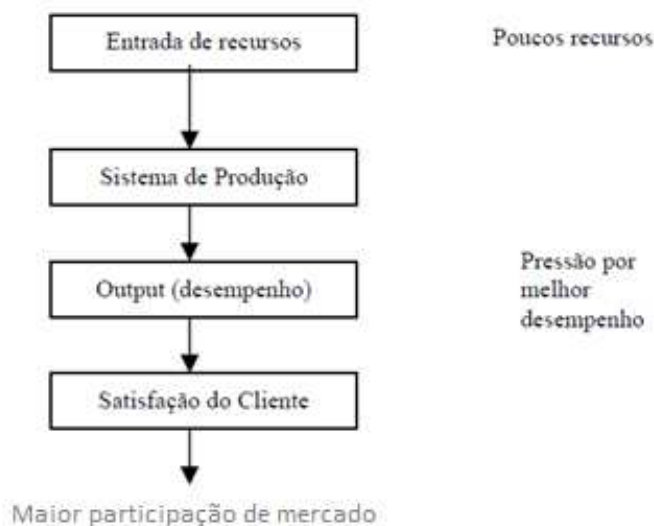
- Usar uma ferramenta para todas as posições e operações;
- Usar todas as ferramentas aleatoriamente;
- Falta de senso de ferramentas de desenvolvimento, conforme exigido pelas circunstâncias;
- Falta de habilidades apropriadas para aplicar as ferramentas de manufatura enxuta;

- Ignorar o impacto positivo das ferramentas em longo prazo;
- Uso limitado das ferramentas em momentos específicos.

No entanto, na linha de produção de motores as atividades são compartimentadas, divididas em postos de produção, e os equipamentos de montagem são individuais para cada etapa. Nesse trabalho propô-se a verificação se existe uma variedade expressiva no tipo de equipamento usado para a montagem dos motores.

No estudo em linha de montagem de carros feita por Bessa (2004), o organograma que define a forma ideal do processo enxuto de uma linha de montagem é demonstrado na (FIGURA 2), que segue abaixo:

FIGURA 2 - SISTEMA DE PRODUÇÃO ENXUTO.



FONTE: Bessa (2004).

É possível verificar a importância da característica pessoal do recurso humano na linha de produção para que ocorra a excelência planejada de produção, desenvolvido em seu trabalho.

Ainda na década de 1950 os integrantes da equipe de engenharia da montadora Toyota identificaram e classificaram em três principais características prejudiciais a um processo de fabricação, que deveriam ser eliminados com o interesse de manter a qualidade, robustez e dinamismo do sistema, como pode ser visto na (TABELA 1) abaixo.

TABELA 1 - AS TRÊS CARACTERÍSTICAS PREJUDICIAIS EM UM PROCESSO INDUSTRIAL.

Os 3 M	
<u>MUDA</u>	Desperdício Os sete desperdícios: produto defeituoso, produção em excesso, inventário, transporte, processamento, movimentação (andar), espera
<u>MURI</u>	Sobrecarregar pessoas ou máquinas acima da capacidade normal de operação. Sobrecarga física ou mental
<u>MURA</u>	Flutuação no planejamento da produção ou volume de produção. Para operadores, a variação de trabalho é comparada em relação ao padrão de produção (acima ou abaixo).

Fonte: Toyota (1996).

onde:

MUDA: é o desperdício ou algo que consuma recursos sem agregar valor ao produto vendido ao cliente;

MURI: é a sobrecarga das atividades dos trabalhadores ou equipamentos;

MURA: é a irregularidade na linha de produção ou o pico de trabalho intenso intercalado com períodos de espera.

Para Silva; O. et al. (2018), as linhas de montagem podem ser definidas como sistemas de produção orientados por fluxo presentes de bens em processo de manufatura especialmente em indústrias de grande demanda e que é necessário manter um nível de qualidade padronizado. Em geral, são constituídas por uma série de estações de trabalho, manuais ou automatizadas, ligadas por uma correia transportadora, ou mecanismo similar, através das quais um ou vários produtos são montados.

No trabalho de Silva; et al. (2018), é avaliada a questão a variação da taxa de demanda em uma linha de produção industrial e a forma como a manutenção desse sistema pode acarretar em uma menor eficiência e maior custo.

A forma adequada, em aspectos de análise exergoeconômica do sistema, é a divisão em compartimentos, chamados nesse trabalho de postos de produção que

permitem uma acréscima rápida dos pontos onde existam vazios produtivos ou excesso de uso energético pelo sistema, ou limites inferiores para (SILVA; et al. 2018).

O limite de tarefas que são programadas para cada posto produtivo também é uma característica importante para ser destacada na gestão de uma linha de montagem industrial, pois trarão benefícios em médio e longo prazo, o excesso de tarefas alocado para um posto da linha de montagem como também não trará benefícios ter um posto de produção ocioso. Nas duas possibilidades, existirá uma diminuição na eficiência do sistema causando diminuição na qualidade do produto e aumento de custo.

Para Aase (2004), deve existir um estudo ou uma condição de contorno, quanto ao valor ideal de postos de produção em uma linha de montagem.

2.6 BALANCEAMENTO DE LINHA DE MONTAGEM (BLM)

Atualmente, o projeto e otimização de linhas de montagem são feitos através de modelos matemáticos, utilizando ferramentas como balanceamento de linha de montagem (BLM). É basicamente um problema de programação linear, onde os fluxos de entrada e saída das estações de trabalho, bem como o tempo necessário para realização de cada tarefa, são agrupados e correlacionados de maneira que se possa encontrar o melhor layout da linha de produção, executando uma tarefa com menos tempo e custo. As soluções desse problema de programação linear também devem satisfazer restrições físicas e econômicas da linha de produção. De maneira simples, o balanceamento de linha de montagem é um problema de otimização multiobjetivo com restrições (RASHID et al. 2012).

As linhas de montagem são meios tradicionais e ainda atraentes de produção em série e em grande escala. Desde os primeiros tempos de Henry Ford, diversos desenvolvimentos ocorreram que mudaram as linhas de montagem de linhas de modelo único estritamente ritmadas e retas para sistemas mais flexíveis, incluindo, entre outros, linhas com estações de trabalho ou tarefas paralelas, modelos mistos orientados para o cliente e multi linhas de modelo, linhas em forma de U, bem como linhas não espaçadas com buffers intermediários. Em qualquer caso, um importante problema de decisão, chamado problema de balanceamento da linha de montagem, surge e deve ser resolvido ao (re-) configurar uma linha de montagem. Consiste na distribuição da carga de trabalho total para fabricação de qualquer unidade do produto a ser montada entre as estações de

trabalho ao longo da linha. A pesquisa de balanceamento de linha de montagem tem tradicionalmente focado no problema de balanceamento de linha de montagem simples (SALBP), que tem algumas premissas restritivas. Recentemente, muitos trabalhos de pesquisa foram realizados a fim de descrever e resolver problemas generalizados mais realistas (GALBP) (BECKER & SCHOLL, 2006).

O problema de balanceamento da linha de montagem surge e deve ser resolvido quando uma linha de montagem precisa ser configurada ou reprojeta. Consiste na distribuição da carga de trabalho total para fabricação de qualquer unidade do produto a ser montada entre as estações de trabalho ao longo da linha. O chamado problema de balanceamento de linha de montagem simples (SALBP), uma versão básica do problema geral, atraiu a atenção de pesquisadores e praticantes de pesquisa operacional por quase meio século. Neste artigo, oferecemos uma pesquisa atualizada e abrangente da pesquisa SALBP, com ênfase especial nas contribuições recentes e relevantes para o campo. (SCHOLL & BECKER, 2006).

As linhas de montagem são sistemas de produção de linha de fluxo especiais que são de grande importância na produção industrial de mercadorias padronizadas de grande quantidade. Recentemente, as linhas de montagem ganharam importância até na produção de baixo volume de produtos customizados (customização em massa). Devido aos elevados requisitos de capital ao instalar ou redesenhar uma linha, seu planejamento de configuração é de grande relevância para os profissionais. Conseqüentemente, isso atraiu a atenção de muitos pesquisadores, que tentaram apoiar o planejamento de configuração do mundo real por meio de modelos de otimização adequados (problemas de balanceamento da linha de montagem). Apesar do enorme esforço acadêmico no balanceamento da linha de montagem, ainda existe uma lacuna considerável entre os requisitos dos problemas de configuração reais e o status da pesquisa. Para facilitar a comunicação entre pesquisadores e profissionais, fornecemos um esquema de classificação de balanceamento de linha de montagem. Esta é uma etapa valiosa na identificação dos desafios de pesquisa restantes que podem contribuir para preencher a lacuna (BOYSEN et al. 2007).

Uma linha de montagem de dois lados é um tipo de linha de produção onde as tarefas são realizadas em paralelo em ambos os lados da linha. A linha é freqüentemente encontrada na produção de grandes produtos, como caminhões e ônibus. Este artigo apresenta um modelo matemático e um algoritmo genético (AG) para o balanceamento de

linha de montagem bilateral (ALB-dois). O modelo matemático pode ser usado como base para um maior desenvolvimento prático no projeto de linhas de montagem de dois lados. No GA, adotamos a estratégia de evolução localizada e reprodução em estado estacionário para promover diversidade populacional e eficiência de busca. Ao projetar os componentes de GA, incluindo esquemas de codificação e decodificação, procedimentos de formação da população inicial e operadores genéticos, levamos em consideração as características específicas de dois ALB. Por meio de experimentos computacionais, o desempenho do AG proposto é comparado ao de uma heurística e de um AG existente com várias instâncias do problema. Os resultados experimentais mostram que o AG proposto supera o AG heurístico e o AG comparado. (LIM et al., 2009)

Atividades de otimização de montagem ocorrem nos estágios de desenvolvimento e produção de bens de manufatura. Os problemas de planejamento de sequência de montagem (ASP) e balanceamento de linha de montagem (ALB) estão entre a otimização da montagem. Ambas as atividades são classificadas como NP-difíceis. Várias abordagens de computação suave usando diferentes técnicas foram desenvolvidas para resolver ASP e ALB. Embora essas abordagens não garantam a solução ideal, elas têm sido aplicadas com sucesso em muitos trabalhos de otimização de ASP e ALB. Este artigo relatou a pesquisa sobre a pesquisa em ASP e ALB que usa abordagens de computação suave nos últimos 10 anos. Para ser mais específico, apenas o problema de balanceamento de linha de montagem simples (SALBP) é considerado para ALB. A pesquisa mostra que três algoritmos de computação suave frequentemente usados para resolver ASP e ALB são Algoritmo Genético, Otimização de Colônia de Formigas e Otimização de Enxame de Partículas. Enquanto isso, a pesquisa em ASP e ALB também está progredindo para o próximo nível por meio da integração de atividades de otimização de montagem em todos os estágios de desenvolvimento de produto (RASHID et al. 2012).

Apesar de todo sucesso dessa técnica, ela possui uma grande limitação. A BLM apresenta qual seria o melhor layout para uma linha de montagem, mas não informa nada sobre a eficiência energética e exergética individual de cada processo e qual seria a velocidade ótima de produção de um bem em termos energéticos e exergéticos.

2.7 BALANCEAMENTO DE LINHA DE MONTAGEM (BLM) COM COMPUTAÇÃO DE CONSUMO ENERGÉTICO

Com essa limitação alguns trabalhos tentam incorporar ao BLM também restrições relativas ao consumo de energia. A seguir, discutem-se alguns trabalhos importantes nessa área.

Fratczak et al. (2013) consideraram o problema de modelagem do consumo de energia de um único componente da linha de montagem. A motivação é brevemente apresentada e o procedimento de pré-processamento inicial dos dados de medição é descrito. Em seguida, os modelos autorregressivos de tempo discreto convencionais são considerados e sua aplicabilidade é comparada com o método de vetor representativo sugerido (RVM). Este método é baseado no armazenamento dos dados reamostrados no vetor representativo mais curto com o nível de compressão dependendo da precisão de modelagem assumida.

As linhas de montagem de dois lados são geralmente utilizadas para produzir produtos de grande porte e alto volume. Recentemente os robôs são amplamente utilizados nesta linha para substituir o manuseio manual e gerenciar as tarefas alocadas. Para uma linha de montagem robótica, o consumo de energia é uma despesa importante e o aumento do custo da energia atrai muito mais a atenção das empresas de manufatura. Para o melhor conhecimento dos autores, não há pesquisas relatadas sobre o consumo de energia de uma linha de montagem robótica bilateral. Este artigo apresenta um novo modelo de programação inteira mista para minimizar o consumo de energia e o tempo de ciclo simultaneamente. Um algoritmo de recozimento simulado reiniciado é desenvolvido para lidar com a complexidade do modelo, que utiliza uma nova busca local com três estruturas vizinhas e fase de reinício com base no procedimento de atribuição de distância de aglomeração para obter um conjunto Pareto-ótimo bem distribuído. Casos de teste são projetados para medir o desempenho do método proposto e o algoritmo de recozimento simulado reiniciado é comparado com o algoritmo genético de ordenação não dominado elitista rápido. Os resultados computacionais demonstram que o modelo proposto é útil para reduzir o consumo total de energia e o algoritmo de recozimento simulado reiniciado supera o algoritmo genético de ordenação não dominado em ambos os critérios de convergência e dispersão (LI et al., 2016).

Uma vez que a programação sustentável está despertando cada vez mais atenção de muitas empresas de manufatura e o consumo de energia é um problema central em relação à sustentabilidade, o objetivo deste artigo é desenvolver um método de programação com eficiência energética para cumprir tarefas de entrega de material em linhas de montagem de modelo misto. Nesta pesquisa, o objetivo de minimizar o consumo de energia está integrado em conjunto com os critérios operacionais na execução das tarefas de entrega de materiais. Devido à natureza do problema considerado, um algoritmo de Otimização de Enxame de Partículas aprimorado por Taboo (TEPSO) é desenvolvido para resolver o problema multi-objetivo. Diversas estratégias de melhoria são aplicadas para melhorar o desempenho do TEPSO proposto, a fim de obter uma capacidade de busca local mais forte e maior velocidade de busca. O desempenho do algoritmo TEPSO proposto é avaliado pela comparação com dois outros métodos de otimização multi-objetivos de alto desempenho. Experimentos computacionais são conduzidos a fim de testar e verificar a eficácia e eficiência do algoritmo TEPSO proposto. As conquistas relatadas neste artigo podem ser inspiradoras para novos estudos sobre programação de produção com eficiência energética (ZHOU et al. 2018).

As indústrias transformadoras dão importância à redução do consumo de energia devido ao aumento do custo da energia e à criação de um ambiente amigável ao ambiente. A linha de montagem é considerada um dos sistemas de alto custo. Os robôs estão sendo usados recentemente para realizar as tarefas de montagem, em vez de trabalho manual. Há uma necessidade de balancear de forma eficiente a linha de montagem, alocando uma quantidade igual de trabalho para as estações de trabalho e designando o robô mais adequado para executar as tarefas alocadas para essas estações de trabalho. Os autores não encontraram nenhuma pesquisa sobre a otimização do tempo de ciclo e do consumo total de energia simultaneamente em sistemas de linha de montagem robótica até o momento. O objetivo deste artigo é propor modelos com foco duplo em tempo e energia para minimizar o tempo de ciclo e o consumo total de energia simultaneamente, um modelo (modelo baseado no tempo) com foco principal em otimizar o tempo de ciclo e o outro modelo (modelo baseado em energia) com o foco principal para otimizar o consumo total de energia. A otimização do enxame de partículas é usada como ferramenta de otimização para resolver este problema. Experimentos computacionais são conduzidos nos modelos propostos usando os problemas benchmark disponíveis na literatura aberta e os resultados são apresentados. Os dois modelos propostos neste artigo são muito bem

aplicáveis a carrocerias de automóveis com linhas baseadas em robôs. Os modelos propostos têm uma implicação gerencial significativa em sistemas reais de linha de montagem. Dependendo das prioridades da gestão, foco principal na redução do tempo de ciclo ou consumo total de energia, modelos adequados podem ser selecionados. Os modelos propostos são úteis para reduzir o consumo total de energia e o tempo de ciclo em linhas de montagem robóticas. Observa-se que o tempo de cálculo para o modelo baseado no tempo é menor em comparação com o modelo baseado na energia (MUKUND NILAKANTAN et al., 2015).

Oumer et al. (2016) apresentaram um modelo de simulação de eventos discretos (DES) para investigar e melhorar a eficiência energética na linha de montagem de veículos. A indústria automobilística é uma das que mais consome energia. Usando o pacote Rockwell Arena DES, um modelo detalhado foi construído para uma fábrica de montagem de veículos real. As fontes de energia consideradas nesta pesquisa são eletricidade e combustível; que são os dois principais tipos de fontes de energia usadas em uma típica montadora de veículos. O modelo descreve a medição de desempenho para medidas de energia específicas do processo de pintura, soldagem e processos de montagem. Um modelo sólido de eficiência energética nesta indústria tem duas vantagens: redução da emissão de CO₂ e redução de custos associados ao consumo de combustível e eletricidade. O artigo começa com uma visão geral dos desafios no consumo de energia dentro das instalações da linha de montagem automotiva e destaca os parâmetros para a eficiência energética. Os resultados do modelo de simulação indicaram melhorias para os objetivos de economia de energia e redução de custos.

Contudo, nenhum destes trabalhos discute as perdas exergéticas em linhas de produção.

2.8 BALANCEAMENTO DE LINHA DE MONTAGEM (BLM) COM ANÁLISE EXERGEOCONÔMICA

Um único trabalho foi encontrado na busca no *web of science* sobre linhas de produção onde foi feita a análise exergoeconômica. A seguir, discutem-se os detalhes do trabalho.

A análise exergoeconômica é uma ferramenta usada para identificar custos ocultos associados a uma máquina ou sistema que não podem ser identificados usando técnicas

típicas de gerenciamento de custos aplicadas na indústria. Embora a análise exergoeconômica encontre aplicações em inovações e otimização de sistemas de energia, ainda não foi aproveitada pela indústria de manufatura para reduzir os custos operacionais. O objetivo deste estudo é utilizar a análise exergoeconômica para identificar os custos ocultos nos processos de fabricação, com foco no sistema de misturador industrial de bebidas. O estudo propõe uma metodologia de identificação das perdas financeiras ocultas no sistema e recomenda a modificação do funcionamento e desenho dos sistemas como medida de redução de custos e aumento da rentabilidade. Os dados termodinâmicos e econômicos para o estudo foram obtidos nas fábricas. Uma análise de custo de exergia foi realizada usando um software de análise termoeconômica. Valores e variáveis exergoeconômicas foram obtidos por meio de equações baseadas na literatura existente. Os resultados revelam que o misturador possui um baixo fator exergoeconômico de 5,50% devido à alta irreversibilidade do reservatório H₂O, reservatório flow-mix e carbonatador. O custo total oculto do sistema foi de 733,04 \$ / h, dos quais 99,0% é a contribuição do misturador. Melhorias na técnica de desaeração do reservatório de H₂O do componente do misturador, bem como no procedimento de tratamento de H₂O, podem reduzir a irreversibilidade do reservatório de H₂O e os custos ocultos (OKEREKE et al., 2020).

Como pode ser lido no parágrafo anterior, o trabalho é recente e os próprios autores reconhecem que não é feita análise exergonomica de linhas de produção. Assim, fica demonstrado que a análise exergoeconômica é muito pouco utilizada para avaliar a eficiência de linhas de produção.

2.9 DESAFIO ENCONTRADO APÓS A REVISÃO

Como pode ser observado ao longo da revisão, embora existam muitas ferramentas para otimização de linhas de produção e toda uma literatura consolidada, a aplicação da análise exergoeconômica nesse tipo desse sistema é bastante escassa. Apenas um único trabalho foi encontrado.

A análise exergoeconômica tem a grande vantagem de permitir otimizar um sistema encontrando os pontos de maior destruição de exergia.

Logo, um grande desafio para área de planejamento e otimização de linhas de produção é adaptar a metodologia de análise exergoeconômica para este tipo de sistema.

3 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

3.1 JUSTIFICATIVA

Como pode ser observado na revisão bibliográfica, a análise exergoeconômica é pouco utilizada para analisar o desempenho de linhas de produção. Adaptar essa metodologia para esse tipo de sistema é muito importante e pode gerar resultados inéditos e relevantes para essa área de estudo.

3.2 OBJETIVO GERAL

Realizar a análise exergoeconômica de uma linha de motores automotivos.

3.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

COLETA DE DADOS: levantar os dados necessários para o desenvolvimento do projeto, diretamente do projeto de engenharia da linha de produção e em condições de plena operação e plena produção.

ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS: Desenvolver uma análise preliminar nos dados brutos coletados com base nas Leis Fundamentais da Termodinâmica. Realizar o ajuste das unidades ao sistema SI.

MODELAGEM E SIMULAÇÃO: Distribuir, em forma compartimentada posto a posto, e modelar em quatro etapas distintas a linha de montagem. Seguir a aplicação de um algoritmo de modelagem por análise exergoeconômica da linha de montagem.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram elaborados os critérios para a coleta, tratamento e forma de apresentação da informação de campo usada para o desenvolvimento desse trabalho.

Esse estudo busca usar a metodologia que resulta em menor flutuação possível nos dados coletados, pois se trata de uma linha de montagem onde interagem operários e equipamentos robotizados com dinâmica de rendimento que variam a cada momento, dessa forma, uma coleta de dados que não observe um sistema em plena operação, causaria distorções nos dados analisados.

Nesse sistema foram definidos como fontes de energia apenas a potência elétrica, necessária para a operação dos equipamentos elétricos e de controle, e a vazão de ar comprimido, também usado em ferramentas da linha de montagem, equipamentos auxiliares de segurança, e de alerta.

Os dados usados para a análise exergoeconômica da linha de montagem de motores automotivos coletados representam o comportamento médio ideal ao longo do período de tempo.

O critério de obtenção dos dados obtidos da linha de montagem de motores automotivos foi dividido em duas formas distintas. Por meio da anotação dos dados de vazão e potência em painéis de controle de cada posto de operação do sistema, também chamados de processo e diagramas de instrumentação (PIDs).

Nesse procedimento, devemos considerar que existirá uma oscilação intrínseca da dinâmica do sistema, pois existe uma inconstância própria solicitada pelos operadores que leva em consideração a necessidade operacional do momento, dessa forma, foi considerada a média de valor registrado no mostrador em um intervalo médio de três minutos.

Com a intenção de obter dados que representem a operação do sistema de forma mais plena possível de operação, o processo representativo dessa etapa pode ser representado no diagrama de blocos que está descrito na (FIGURA 3).



FONTE: O autor (2019).

4.1. COLETA DE DADOS

Nessa etapa do trabalho foram coletados os dados necessários para o desenvolvimento da pesquisa de análise exergoeconômica da linha de montagem de motores automotivos de 1000 c.c. da Renault-Nissan, sediada no Complexo Airton Senna na cidade de São José dos Pinhais, Paraná.

A (FIGURA 4) mostra as estantes em que se armazenam os motores automotivos finalizados na empresa Renault do Brasil. A modelagem incluiu todas as etapas de processo para chegar até o ponto de estocagem dos motores.

FIGURA 4 – SETOR DE ESTOCAGEM DOS MOTORES FINALIZADOS.



FONTE: O autor (2019).

Foi verificado em campo que as variáveis de entrada energética do sistema são energia elétrica para operação dos robôs e alguns equipamentos manuais operados pelos integrantes da equipe e ar comprimido, também necessário para funcionamento dos equipamentos operados além de servir de sistema auxiliar de segurança e alerta.

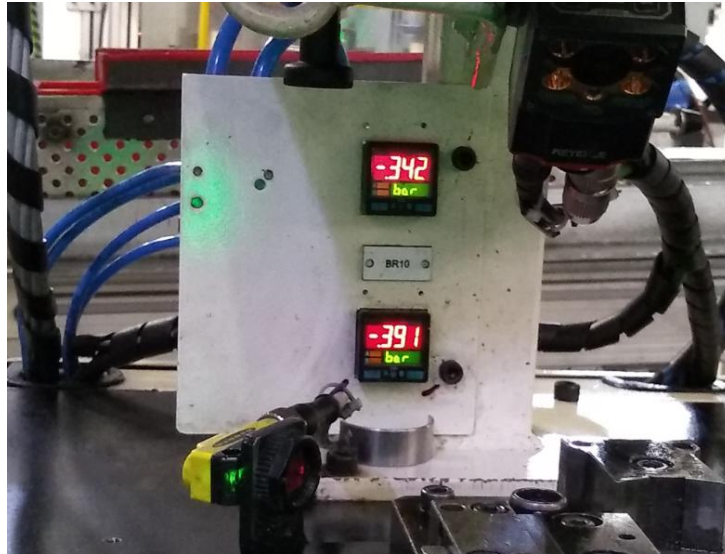
FIGURA 5 – LAYOUT DE UM CONJUNTO DE MOTO GERADORES DE *BACK UP* PARA O SISTEMA.

FONTE: O autor (2019).

As informações obtidas representam o comportamento ideal do processo ao longo do tempo.

Uma etapa distinta é a coleta de dados no chão de fábrica com o sistema em plena carga de produção. Existem painéis controladores, reguladores chamados processo e diagramas de instrumentação (PIDs) que registram a entrada energética das variáveis: potência elétrica e vazão de ar comprimido, em tempo real.

FIGURA 6 - PAINEL P.I.D. MEDIDOR BAROMÉTRICO DA LINHA DE MONTAGEM.



FONTE: O autor (2019).

Devido à oscilação inerente do sistema operacional em andamento, foi feita uma coleta dos dados médios registrados em um intervalo de três minutos no horário de pleno funcionamento do sistema e no turno de maior produção da linha de montagem.

4.2 ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS

Os dados brutos adotados na linha de produção dos motores foram passados por ajustes, conferindo unidades adequadas à modelagem proposta, correções de possíveis valores médios que não estão dentro do envelope esperado para a devida etapa da linha de montagem e eventuais arredondamentos de valores médios.

Todos os dados foram aplicados na modelagem necessária para uma posterior análise exergoeconômica.

Foi usado o Sistema Internacional de Unidades (SI) para a modelagem desse trabalho.

Ao longo do período de análise, em chão de fábrica, foi verificado que condições climáticas são consideradas no rendimento dos equipamentos. Como a região metropolitana de Curitiba está localizada abaixo do trópico de Capricórnio, numa região de clima temperado, com grande amplitude térmica ao longo do ano com invernos secos e temperaturas próximas de zero e verões com temperaturas médias próximas de 30°C e muita umidade, os equipamentos têm visível variação no seu rendimento diário,

ocasionando com relativa frequência paradas imprevistas na linha de produção para manutenção.

Para os valores coletados na linha de montagem, foi verificada a taxa de produção máxima estimada para o projeto com o objetivo de identificar a diferença do que foi dimensionado na planta o que está sendo produzido na rotina de operação.

Depois da coleta dos dados, foi aplicado um balanço global preliminar da potência elétrica e da vazão total de ar consumida no sistema, dessa forma, podemos identificar possíveis inconsistências dos dados ou falta de informação para as variáveis da modelagem proposta.

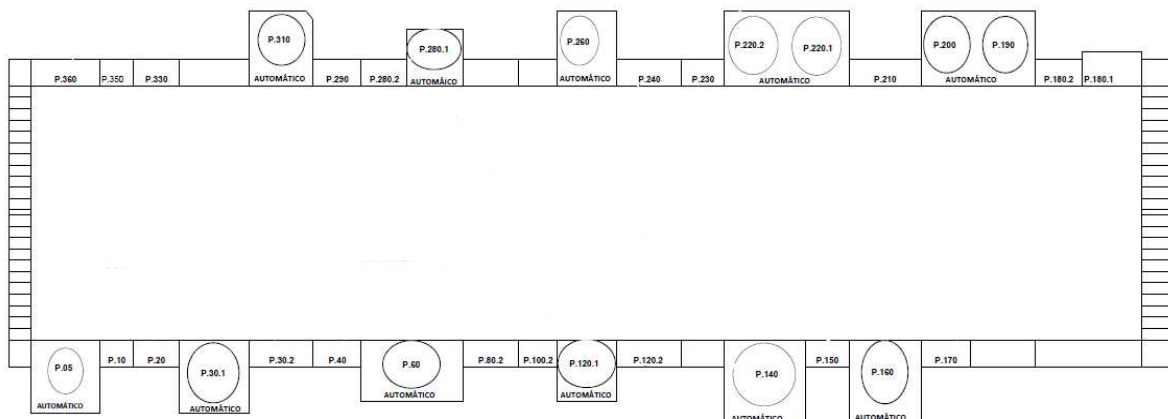
Com os dados corretamente normatizados foi feita a distribuição dessa informação às respectivas etapas subdivididas da linha de montagem.

Esse procedimento é necessário para que eventuais erros possam ser identificados e não sejam amortizados em uma análise exergoeconômica global da linha de montagem de motores.

4.3 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

A modelagem matemática de uma linha de montagem de motores automobilísticos é complexa para ser feita integralmente em uma única etapa como pode ser vista na (FIGURA 7). Dessa forma, o sistema global foi dividido em quatro etapas menores, considerando uma taxa média da entrada de carga na linha de produção e seguindo abertura e fechamentos chaves do ciclo de produção da montagem dos motores.

FIGURA 7 – LAYOUT DA LINHA DE MONTAGEM DE MOTORES 1000 c.c.



FONTE: Gropu Renault-Nissan (2015).

Nessa etapa o trabalho proposto de análise exergoeconômica da linha de montagem de motores começou de fato, pois deve existir um cuidado redobrado na aplicação correta das variáveis coletadas e tratadas na formulação proposta. Caso contrário, poderiam existir ruídos praticamente impossíveis de identificar a origem.

Através de algoritmo, foi possível construir um perfil exergoeconomico onde a identificação das perdas e mau uso de cada posto da linha de montagem do sistema analisado, foi identificado.

O objetivo dessa etapa foi fazer uma análise exergoeconômica da linha de montagem de motores e monetizar de forma correta o equipamento produzido em comparação com o gasto energético disponibilizado.

Para obter o dado mais fiel ao sistema em operação, a análise detalhada da planta deve ser realizada para cada posto, cada equipamento, balanços de massa, energia, exergia e custos (em base exergética).

4.4 CÁLCULO DA POTÊNCIA CONSUMIDA EM EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

De acordo com os fundamentos da eletromecânica, quando um equipamento elétrico é ativado por uma corrente elétrica I , causado por uma tensão elétrica U , de uma fonte de energia externa ocorre o aquecimento. Esse aquecimento, chamado de efeito Joule, em homenagem ao físico britânico James Prescott Joule, é resultado da transformação da energia que vem da fonte em energia térmica no resistor. A energia transformada em calor por unidade de tempo é a potência dissipada (SAMPAIO; CALÇADA, 2005).

Essa expressão pode ser definida da seguinte forma:

$$W = U I \quad (4.1)$$

Para a definição de tensão elétrica temos:

$$U = I R \quad (4.2)$$

Substituído a definição de tensão elétrica na definição de Potência elétrica tem-se:

$$W = I^2 R \quad (4.3)$$

A definição de potência elétrica consumida em um equipamento eletromecânico, será necessária para a modelagem da análise exergoeconômica proposta.

4.5 DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DA POTÊNCIA CONSUMIDA POR DEMANDA (α)

A demanda por energia elétrica na linha de produção, seja através da corrente necessária para o funcionamento dos equipamentos elétricos ou através da produção do ar comprimido usado na manufatura, não é fixa, varia ao longo do dia da semana e ao longo das horas de cada dia.

Dessa forma, é necessário desenvolver uma etapa de modelagem que acompanhe essa variação para atingir um maior nível de precisão.

Considerando a quantidade de motores produzidos em um intervalo de tempo m_m e a conhecendo a corrente do sistema I , pode-se definir:

$$I = \alpha \dot{m}_m \quad (4.4)$$

ou

$$\alpha = \frac{I}{\dot{m}_m} \quad (4.5)$$

4.6 ANÁLISE EXERGÉTICA E EXERGOECONÔMICA

Nessa etapa, são desenvolvidas as equações necessárias para o cálculo da taxa de custo associado à exergia fornecida (energia disponível para uso). A análise exergoeconômica foi inteiramente conduzida neste trabalho de acordo com metodologia plenamente estabelecida e documentada na literatura técnica, i.e., realiza-se inicialmente um balanço energético para quantificar as entradas e saídas de energia do sistema (Moran e Shapiro, 2013), seguido de uma análise exergética (1ª e 2ª leis da

Termodinâmica) e, finalmente, a análise exergoeconômica (Bejan et al., 1996). Assim, é necessário o cálculo dos custos exergéticos para cada corrente de exergia que entra e que sai de cada componente do sistema em análise.

O modelo é iniciado com a definição da taxa de custos associados às correntes de exergia i que cruzam cada componente do sistema, como se segue:

$$\dot{C}_i = c_i \dot{E}_i \quad (4.6)$$

considerando taxa de exergia, kW, associada ao fluxo de matéria:

$$\dot{E}_i = \dot{m}_i e_i \quad (4.7)$$

Assim, pode-se escrever:

$$\dot{C}_i = c_i (\dot{m}_i e_i) \quad (4.8)$$

onde

\dot{C}_i é a taxa de custo associado a uma corrente de exergia i , \$ dia⁻¹;

c_i é o custo exergético da corrente i , U\$ kJ⁻¹.

\dot{m}_i é a quantidade de massa que flui por unidade de tempo, kg dia⁻¹, e

e_i é a exergia específica, kJ kg⁻¹.

Para a contabilidade termoeconômica da linha de montagem com k componentes consumidores de energia, tem-se:

$$\sum_{\text{saídas}} (c_{\text{saída}} \dot{E}_{\text{saída}})_k + c_{\dot{W},k} \dot{W}_k = c_{q,k} \dot{E}_{q,k} + \sum_{\text{entradas}} (c_{\text{entrada}} \dot{E}_{\text{entrada}})_k + \dot{Z}_k \quad (4.9)$$

Omitindo o subscrito k, para a modelagem deste trabalho, assume-se que as perdas de calor são desprezíveis em cada componente com uma entrada e uma saída, portanto escreve-se a correspondente equação termoeconômica:

$$\dot{C}_{\text{saída}} + \dot{C}_{\dot{W}} = \dot{C}_{\text{entrada}} + \dot{Z} \quad (4.10)$$

onde $\dot{C}_{\text{saída}}$ é a taxa de custos dos produtos entregues pelo componente; $\dot{C}_{\dot{W}}$ é a taxa de custos de uma corrente de potência que seja entregue pelo componente, se for o caso, e $\dot{Z} = \dot{Z}^{\text{CI}} + \dot{Z}^{\text{OM}}$ representa a soma das taxas de custos não exergéticos referentes aos investimentos de capital, CI, e de operação e manutenção, OM, requeridas pelo componente.

A partir da Eq. (4.10), desenvolve-se a análise exergoeconômica da linha de montagem de motores. Assim, são acessados os custos de cada um dos produtos gerados pelo sistema, e entende-se o processo de formação e o fluxo de custos no sistema.

O custo financeiro de investimento em uma planta industrial varia de período para período analisado. Se esse período for de turnos de 8 horas de trabalho ao longo das 24 horas do dia, é possível que existam variações no resultado da análise. Dessa forma, é feita a análise média no turno estatisticamente mais produtivo em horário de plena produção para que todas as variáveis envolvidas tenham precisão aceitável.

Dentro desse ponto de vista, é aplicada uma aproximação de nivelção dos custos *cost levelization approach* para cada Posto da etapa de montagem do sistema (Tsatsaronis e Winhold, 1985a).

$$\dot{C}_{\text{P,tot}} = \dot{C}_{\text{F,tot}} + \dot{Z} \quad (4.11)$$

onde:

$\dot{C}_{\text{P,tot}}$ é a taxa de custo termoeconômico em US\$ dia⁻¹ para obter o produto pronto, daquela etapa de manufatura;

$\dot{C}_{F,\text{tot}}$ é a taxa de custo termoeconômico em US\$ dia⁻¹ da eletricidade e ar comprimido requeridos por aquela etapa de manufatura;

$\dot{Z} = \dot{Z}^{\text{CI}} + \dot{Z}^{\text{OM}}$ é a taxa de custo de capital mais custo de operação e manutenção em US\$ dia⁻¹.

4.7 TAXA DE CUSTO DE CONSUMO DE ENERGIA NA PRODUÇÃO DE MOTORES

Nesta etapa, são desenvolvidas as equações necessárias para o cálculo da taxa de custo associado à energia fornecida. K_1 é uma constante de ajuste para o consumo da corrente elétrica aplicada à linha de produção. \dot{E} é o produto do custo exergético multiplicado pela resistência ôhmica do sistema e multiplicado pela constante da potência consumida por demanda.

Sabe-se a partir das definições anteriores que:

$$\dot{C}_i = c_i \dot{E}_i \quad (4.13)$$

ou

$$\dot{C}_e = c_e \dot{E} \quad (4.14)$$

Como toda energia do sistema vem através da energia elétrica pode-se definir que $\dot{E} = \dot{W}$, substituindo a equação da potência teremos:

$$\dot{C}_e = c_e \dot{W} \quad (4.15)$$

Substituindo a potência, calculada anteriormente, obtém-se:

$$\dot{C}_e = c_e R I^2 \quad (4.16)$$

Utilizando a Eq. (4.4) para a corrente do sistema, obtém-se:

$$\dot{C}_e = c_e R (\alpha \dot{m}_m)^2 \quad (4.17)$$

Desenvolvendo a equação, tem-se:

$$\dot{C}_e = c_e R \alpha^2 \dot{m}_m^2 = K_1 \dot{m}_m^2 \quad (4.18)$$

onde foram agrupadas variáveis em uma constante, chamada constante que ajusta a taxa de custo de consumo de energia na produção de motores, dada por:

$$K_1 = c_e R \alpha^2 \quad (4.19)$$

em que o custo da energia consumida na fábrica foi contratado por $c_e = 0,0494$ U\$/kW.h. Dessa forma o valor de K_1 foi determinado como sendo $0,0016$ U\$ dia $(\dot{m}_m)^{-2}$.

4.8 TAXA DE CUSTOS HOMEM-HORA PARA A DEMANDA DE MOTORES

Há uma relação entre o número de funcionários na linha de produção necessários para atender a demanda de motores que são produzidos diariamente. Portanto, propõe-se a seguinte relação para modelar a taxa de custos homem-hora:

$$\dot{Z}_{HH} = \dot{Z}_0 + K_3 (\dot{m}_m)^{K_4} \quad (4.20)$$

Na Equação (4.20), $K_4 < 1$ é uma constante a ser ajustada, reconhecendo que o número de funcionários aumenta menos do que linearmente com o aumento da produção de motores. Com dados levantados na fábrica, pode-se definir um valor para a constante K_4 , que é inerente à linha de produção em análise.

Assim, isolando a constante K_3 , tem-se:

$$K_3 = \frac{(\dot{Z}_{HH} - \dot{Z}_0)}{(\dot{m}_m)^{K_4}} \quad (4.21)$$

onde \dot{Z}_{HH} é a taxa de custos por funcionário por hora de trabalho, considerando uma equipe de 106 funcionários que trabalham ao longo dos dois turnos de produção e Z_0 é o custo mínimo estimado para manter a linha de produção operacional, mesmo sem produção de motores, i.e., com $\dot{m}_m = 0$.

Inicialmente, neste trabalho, foi determinado $K_3 = 16,39$, para $K_4 = 1$.

4.9 TAXA DE CUSTOS DE MANUTENÇÃO PARA A DEMANDA DE MOTORES

Nesta seção, é desenvolvida uma modelagem considerando a manutenção necessária envolvida na produção dos motores. Essa modelagem tem por finalidade o cálculo da taxa de custo de consumo da manutenção em função da produção de motores para um intervalo de tempo, ou quantidade de motores produzidos por unidade de tempo, conforme se segue:

$$\dot{Z}_{MNT} = K_2 (\dot{m}_m)^2 \quad (4.22)$$

Todo equipamento mecânico sofre desgaste devido ao uso e quanto mais esse uso for intenso, maior será o desgaste. Assim, exige-se a manutenção preventiva e corretiva para garantir a eficiência plena da operação necessária. É necessário, portanto, a determinação da constante que ajusta a taxa de custo de consumo de manutenção na produção de motores (K_2).

Para a linha de montagem de motores em questão, essa constante é determinada para cada posto de serviço de acordo com a manutenção requerida acompanhando a demanda da produção. Essa é a constante que define a proporcionalidade entre o número de motores produzidos na linha de montagem e a quantidade de funcionários necessários para manter a linha de produção em condições operacionais, de acordo com as especificações mínimas necessárias.

Por envolver uma quantidade menor de funcionários, espera-se que o custo dessa mão de obra também seja menor, se comparada com os funcionários da linha de produção. Também é esperado que essa equipe seja suficiente para atender a demanda por manutenção caso o número de motores produzidos aumente diariamente.

Como a equipe de funcionários que faz a manutenção é da própria fábrica, existe um cronograma tendo como base os fornecedores e manuais de uso. Com base nessa informação, considera-se a proporcionalidade entre a quantidade de funcionários na linha de produção, a quantidade de motores produzidos e a quantidade de funcionários da manutenção, além de considerar o custo de um funcionário da manutenção semelhante ao custo de um funcionário da linha de montagem. Assim, é possível estimar que $K_2 = 0,56$, definida como constante que ajusta a taxa de custo de consumo de manutenção na produção.

4.10 TAXA DE CUSTOS DE CAPITAL INVESTIDO

Para o cálculo da taxa de custo de capital investido, \dot{Z}^{CI} , foram utilizados conceitos de análise econômica. Assim, é desenvolvido um método usado para estimar o valor mensal pago para o financiamento de um equipamento autônomo programado, robô.

Segundo Riba, Lenzi e Lenzi (2011, p. 35), a forma de calcular o valor da parcela a ser paga e amortizada é chamada de Sistema *Price* ou Sistema de Prestação Constante (S.P.C.).

Aplicando o método proposto, tem-se:

Para o valor da parcela P_n ,

$$P_n = C \left(\frac{i (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \quad (4.23)$$

Para o saldo devedor S_n ,

$$S_n = C \quad (4.24)$$

Para o cálculo do juros composto J_n ,

$$J_n = i S_0 \quad (4.25)$$

Para a amortização periódica A_n ,

$$A_n = P_n - J_n \quad (4.26)$$

Que pode ser aplicado na iteração,

$$S_1 = S_0 - A_1 \quad (4.27)$$

Desenvolvendo as iterações para a quantidade de períodos de pagamentos podem ser construídas tabelas, como as (TABELAS 2 e 3), mostradas no capítulo 5, que contêm os dados necessários para a definição das despesas contratadas ou custo de investimento, \dot{Z}^{CI} , referentes à modernização da linha de produção.

4.11 EQUAÇÃO TERMOECONÔMICA E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Com o desenvolvimento das etapas anteriores, pode-se avaliar a taxa total de custos não exergéticos da linha de produção de motores, através da seguinte equação:

$$\dot{Z} = \dot{Z}^{CI} + \dot{Z}^{OM} \quad (4.28)$$

Onde

$$\dot{Z}^{OM} = \dot{Z}_{MNT} + \dot{Z}_{HH} \quad (4.29)$$

Desta maneira, é possível calcular a taxa de custos total para a produção de motores desejada, através da seguinte equação termoeconômica:

$$\dot{C}_{P,total} = \dot{C}_{e,total} + \dot{Z} \quad (4.30)$$

Finalmente, formula-se o problema de otimização a partir da definição de uma função objetivo. Utilizando o custo de comercialização de um motor produzido na linha de produção, c_{CM} , e a quantidade de motores produzidos pode-se definir a taxa de lucro como função objetivo pela seguinte equação:

$$\dot{L} = \dot{m}_m c_{CM} - \dot{C}_{P,total} \quad (4.31)$$

O custo de comercialização de um motor fabricado na linha de produção em análise foi obtido de acordo com a Tabela 4 mostrada no capítulo 5, $c_{CM} = \text{US\$ } 670,79$.

O problema de otimização consiste em maximizar a função objetivo definida pela Eq. (4.31) para parâmetros de projeto e operação da linha de produção. Por exemplo, considerando a taxa de produção de motores da linha, quando $\dot{m}_m \rightarrow 0$, \dot{L} tende a diminuir, uma vez que sem comercialização de motores não há receita, e no outro extremo, quando $\dot{m}_m \rightarrow \infty$, \dot{L} também tende a diminuir, uma vez que $\dot{C}_{P,total}$ tende a aumentar mais do que a receita da comercialização, com o aumento da exigência sobre os equipamentos instalados, em termos de consumo energético, investimento de capital, bem como operação e manutenção. Assim, fisicamente espera-se que entre esses extremos haja uma taxa de produção de motores da linha ótima, $\dot{m}_{m,ot}$, que leve a um valor de lucro máximo para o processo, \dot{L}_{max} .

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE ECONÔMICA (TAXAS DE CUSTO DE INVESTIMENTO DE CAPITAL)

Como base de cálculo, foi estimado um valor de U\$75.000,00. Nesse valor estão somados os custos de compra, impostos, tributações, transporte, instalação e manutenção do equipamento.

Será considerado 8,15% ao ano como juros de mercado atribuído ao valor de compra do equipamento, seguindo as regras do Programa de Sustentação do Investimento do Banco Nacional de Desenvolvimento, (PSI / BNDES) (BNDES, 2020).

A amortização ou quantidade de parcelas negociadas para a quitação do valor contratado será de dez anos com cobranças anuais do valor devido calculado na sequência desse capítulo.

Segundo Riba, Lenzi e Lenzi (2011, p. 35), essa forma de calcular o valor da parcela a ser paga é chamada de Sistema de Prestação Constante (SPC) ou Sistema *Price*.

Para esse método de cálculo teremos:

Custo de aquisição, $C = U\$75.000,00$;

Taxa de juros ao ano de $i = 8,15\%$ a.a;

Numero de parcelas para a amortização $n = 10$;

Desenvolvendo as interações para a quantidade de períodos de pagamentos poderemos formar uma tabela com os dados, como encontrado na (TABELA 2).

TABELA 2 - DADOS DE INTERAÇÕES PARA ESTIMATIVA DE CUSTO PARA A COMPRA DE EQUIPAMENTOS ROBÓTICO, MÉTODO PRICE.

n	Pn	Jn	An.	Sn
0	-	-	-	75.000
1	11.252,95	6.112,50	5.140,45	69.859,55
2	10.481,68	5.693,55	4.788,13	65.071,42
3	9.763,27	5.303,32	4.459,95	60.611,47
4	9.094,10	4.939,83	4.154,27	56.457,20
5	8.470,80	4.601,26	3.869,54	52.587,66
6	7.890,22	4.285,89	3.604,32	48.983,34
7	7.349,43	3.992,14	3.357,29	45.626,05
8	6.845,70	3.718,52	3.127,18	42.498,87
9	6.376,50	3.463,66	2.912,84	39.586,03
10	5.939,46	3.226,26	2.713,20	36.872,83

Fonte: O autor (2019).

Como o interesse é desenvolver a análise exergoeconômica na condição menos favorável, pegaremos o valor de despesa do primeiro ano U\$11.252,95 que podemos dividir por 330 dias trabalhos ao longo do ano resultando numa despesa contratada diária de U\$34,10 ou $\dot{Z}_{Cl} = U\$34,10 \text{ dia}^{-1}$ para cada equipamento robótico instalado na linha de produção.

Continuando com o mesmo método aplicando outras variáveis condicionais de cálculo teremos:

Custo de aquisição, $C = U\$75.000,00$;

Taxa de juros ao ano de $i = 10,15\% \text{ a.a}$;

Número de parcelas para a amortização $n = 3$;

Desenvolvendo as interações para a quantidade de períodos de pagamentos poderemos formar uma tabela com os dados, como encontrado na (TABELA 3) abaixo.

TABELA 3 - DADOS DE INTERAÇÕES PARA ESTIMATIVA DE CUSTO PARA A COMPRA DE EQUIPAMENTOS ROBÓTICO, MÉTODO PRICE.

n	Pn	Jn	An.	Sn
0	-	-	-	75.000
1	30.238,28	7.612,50	22.625,78	52.374,22
2	21.116,09	5.315,98	15.800,10	36.574,11
3	14.745,85	3.712,27	11.033,57	25.540,54

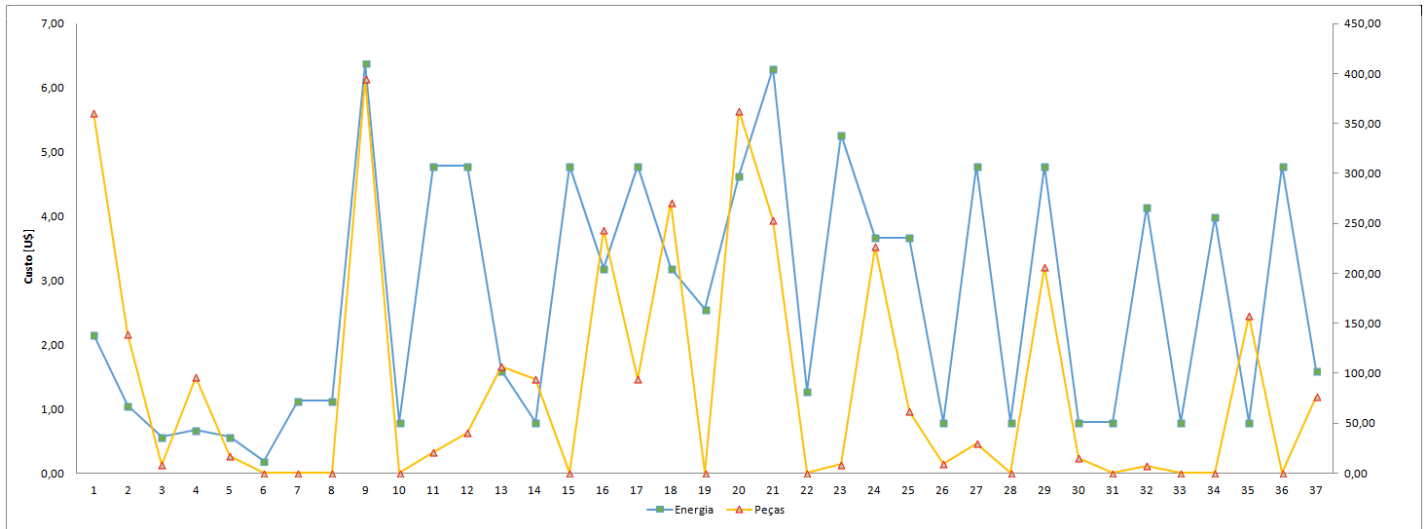
Fonte: O autor (2019).

Como o interesse é desenvolver a análise exergoeconômica na condição menos favorável, pegaremos o valor de despesa do primeiro ano U\$30.238,28 que podemos dividir por 330 dias trabalhados ao longo do ano resultando numa despesa contratada diária de U\$91,63 ou $\dot{Z}_{Cl} = U\$91,63 \text{ dia}^{-1}$ para cada equipamento robótico instalado na linha de produção.

5.2 ANÁLISE PARAMÉTRICA DOS DADOS

De posse dos dados experimentais, encontrados no apêndice 01, apêndice 02 e do gráfico 1 abaixo, foi possível identificar os custos de energia usados na linha de produção e os custos das peças usadas na montagem dos motores em cada posto de serviço da linha de produção, em condição de plena operação para a produção de 605 motores por dia.

GRÁFICO 1 - CUSTOS DE PRODUÇÃO DISTRIBUÍDO PELOS POSTOS DE PRODUÇÃO (2020)



FONTE: O autor (2019).

São dados importantes para a definição dos parâmetros de Balanço Energético, BE, e Balanço de Massa, BM, onde o BM foi considerado a quantidade de peças necessárias em cada etapa da linha de produção.

5.3 DADOS DOS INSUMOS DA LINHA DE PRODUÇÃO

Para a aplicação do modelo matemático, foi necessário o levantamento e a tabulação de alguns dados fundamentais ao funcionamento da linha de produção em suas condições normais de operação.

Na (TABELA 4) foram elencadas as principais variáveis necessárias para a modelagem.

TABELA 4 - DADOS DOS INSUMOS DA LINHA DE PRODUÇÃO.

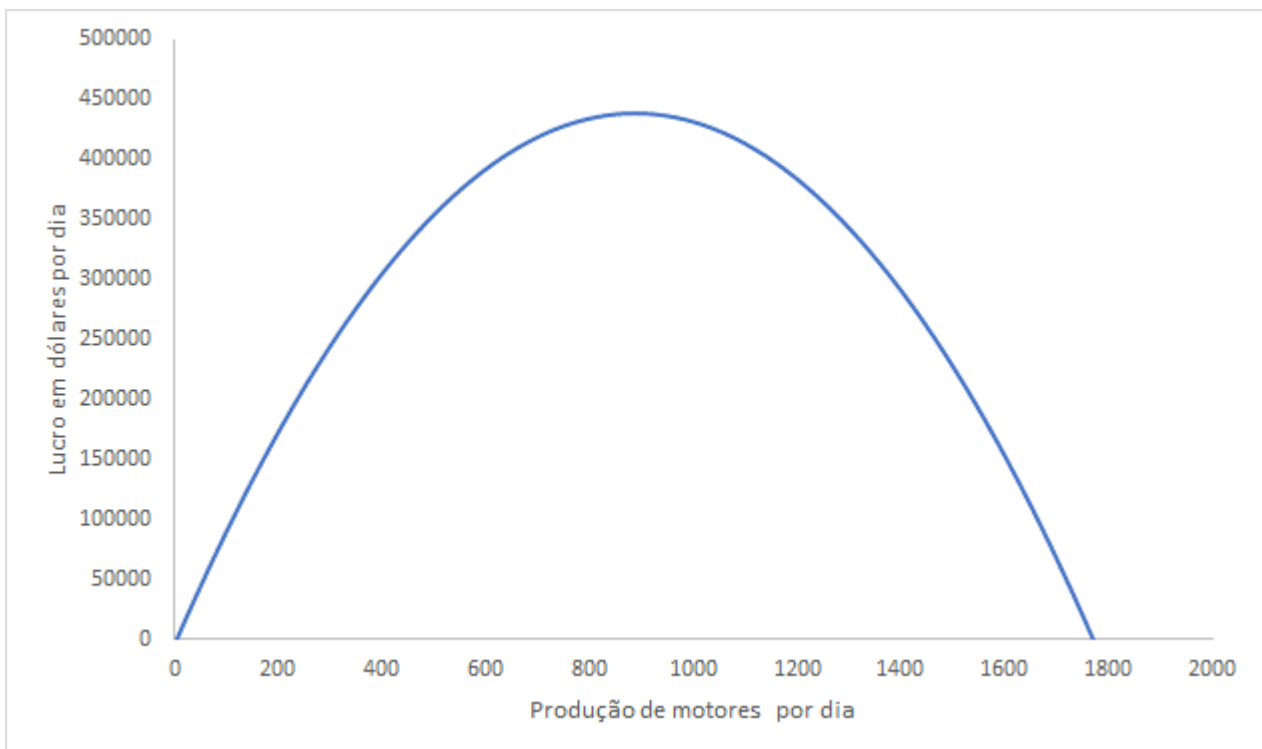
Potência total do sistema [kW]	2.197,08
Vazão de ar comprimido total do sistema [m ³ /h]	27,51
Potência total dos compressores [kW]	5400
Velocidade do ar comprimido [m/s]	10
Custo eletricidade [U\$/kW.h]	0,0494
Motores Produzidos por dia	605
Postos de serviço da linha de montagem	37
Custo por operário [U\$/h]	3,31
Equipe total de funcionários	106
Custo por motor produzido [U\$/motor]	670,79

Fonte: O autor (2019).

5.4 OTIMIZAÇÃO DA LINHA DE PRODUÇÃO

Aplicando a modelagem para uma produção variada de motores, partindo da linha de montagem parada, zero motor produzido, até a plena produção com 605 motores produzidos ao longo de dois turnos ou um dia de atividade plena, foi possível construir o GRÁFICO 2 abaixo.

GRÁFICO 2 - LUCRO EM FUNÇÃO DA PRODUÇÃO DE MOTORES POR DIA.



FONTE: O autor (2020).

Com base nos dados levantados na linha de montagem e com a aplicação desses dados na modelagem proposta nessa dissertação, foi observado um lucro máximo de U\$438.617,18 por dia para $\dot{m}_{m,ot} = 887$ motores produzidos por dia.

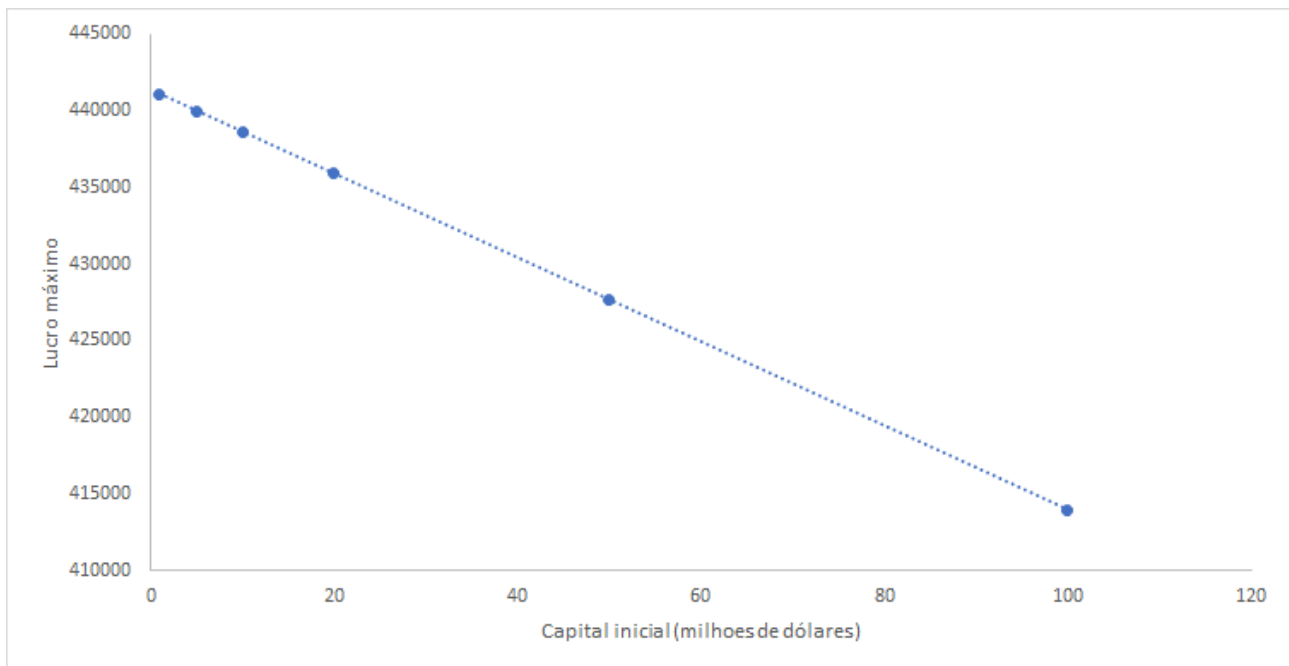
5.5 EFEITO DO CUSTO DE CAPITAL SOBRE O LUCRO MÁXIMO

O efeito do lucro máximo foi avaliado no GRÁFICO 3. Como pode ser observado, tem um efeito linear sobre o lucro máximo, ou seja, dentro de uma faixa aceitável, quanto menor o investimento inicial maior o lucro máximo.

O efeito da implementação de um capital inicial complementar não gera um acréscimo significativo no lucro máximo, haja vista que há uma limitação física para diminuição do custo de capital inicial.

Por exemplo, capital inicial próximo do valor padrão de 10 milhões de dólares apresenta pouco efeito sobre o lucro máximo. Mesmo com um capital inicial na casa dos 100 milhões de dólares o lucro máximo diminui apenas para U\$413.960,18 por dia.

GRÁFICO 3 - TAXA DE LUCRO EM RELAÇÃO CUSTO DE CAPITAL INICIAL (2020).



FONTE: O autor (2020).

5.6 EFEITO DO CUSTO DA ENERGIA SOBRE O LUCRO MÁXIMO

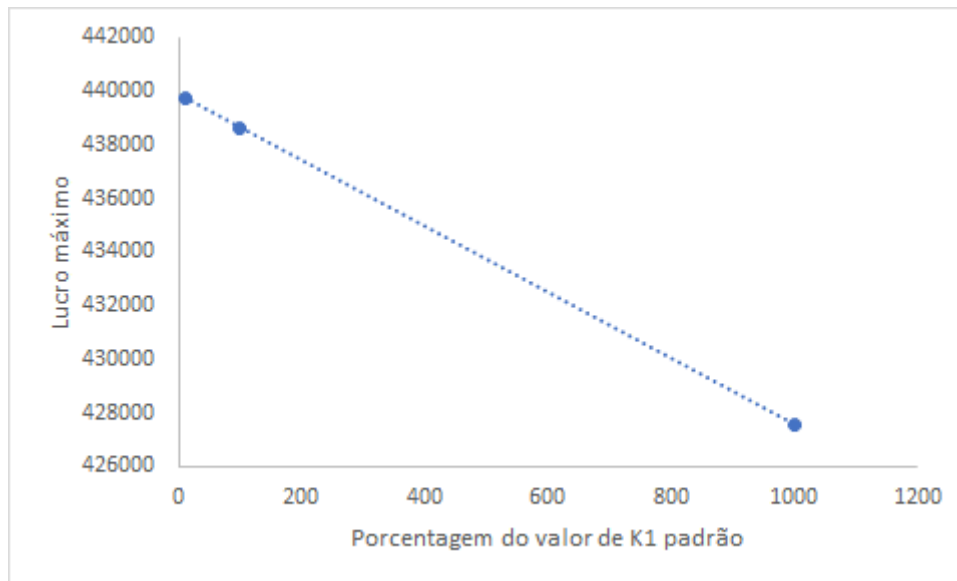
O efeito do custo na energia elétrica foi avaliado no GRÁFICO 4.

Para isso foi modificado o valor padrão da constante K_1 em 10 vezes para cima e para baixo. Nota-se pelo gráfico que o comportamento é linear e mesmo com redução ou um aumento de 10 vezes no valor da energia tem-se pouco efeito sobre o lucro máximo.

Esse custo é desenvolvido com base na demanda energética máxima projetado para o sistema, dessa forma, acredita-se que esse custo estará oscilando dentro de um envelope de demanda previsto na elaboração do projeto de engenharia.

Isso mostra que o custo da energia não gera interferência significativa para o custo do sistema.

GRÁFICO 4 - EFEITO DO CUSTO DA ENERGIA SOBRE O LUCRO MÁXIMO.



FONTE: O autor (2020).

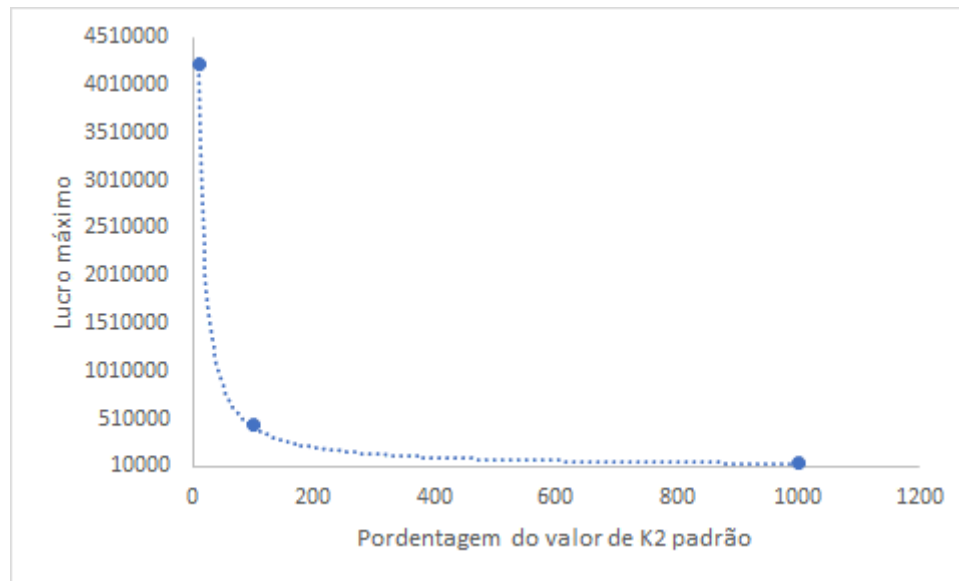
5.7 EFEITO DA MANUTENÇÃO SOBRE O LUCRO MÁXIMO

O efeito do custo da manutenção foi avaliado no gráfico 5. Para isso foi modificado o valor padrão da constante K_2 em 10 vezes para cima e para baixo.

Nota-se pelo gráfico que o comportamento não é linear e que o efeito da manutenção é muito grande sobre o lucro máximo, sendo praticamente um efeito de uma exponencial decrescente.

É perceptível a importância da proporcionalidade entre o número de motores produzidos na linha de montagem e a quantidade de funcionários necessários para manter a linha de produção em condições operacionais, identificados pela constante K_2 do gráfico. Ainda que seja um gasto não desejado pelos gestores, é a manutenção preventiva e programada que evita prejuízos e atrasos com paradas não programadas.

GRÁFICO 5 - LUCRO MÁXIMO EM FUNÇÃO DOS CUSTOS DA MANUTENÇÃO.

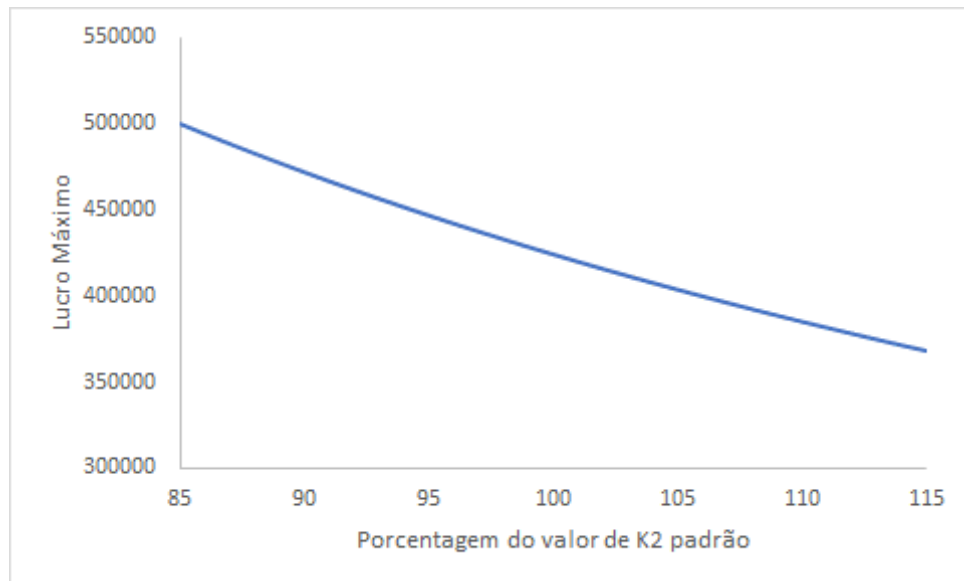


FONTE: O autor (2020).

Para uma melhor visualização desse efeito foi desenvolvido o GRÁFICO 6 onde o valor padrão da constante K_2 foi modificado em 15% para cima e para abaixo.

Como pode ser observado, uma diminuição de 15% no gasto com manutenção pode aumentar o lucro máximo para U\$499.462,18 por dia. O que implica em um aumento de 17%. Embora exista um lucro máximo evidentemente maior é necessário considerar que em longo prazo a economia com a manutenção pode gerar um desgaste do equipamento levando a um custo maior com uma manutenção corretiva, parada de produção ou atrasos que comprometem a lucratividade e a confiabilidade do sistema.

GRÁFICO 6 - LUCRO MÁXIMO EM FUNÇÃO DO CUSTO DA MANUTENÇÃO COM VARIÇÃO DE 15% NO CUSTO DA MANUTENÇÃO.



FONTE: O autor (2020).

5.8 EFEITO DO CUSTO DA MÃO DE OBRA SOBRE O LUCRO MÁXIMO

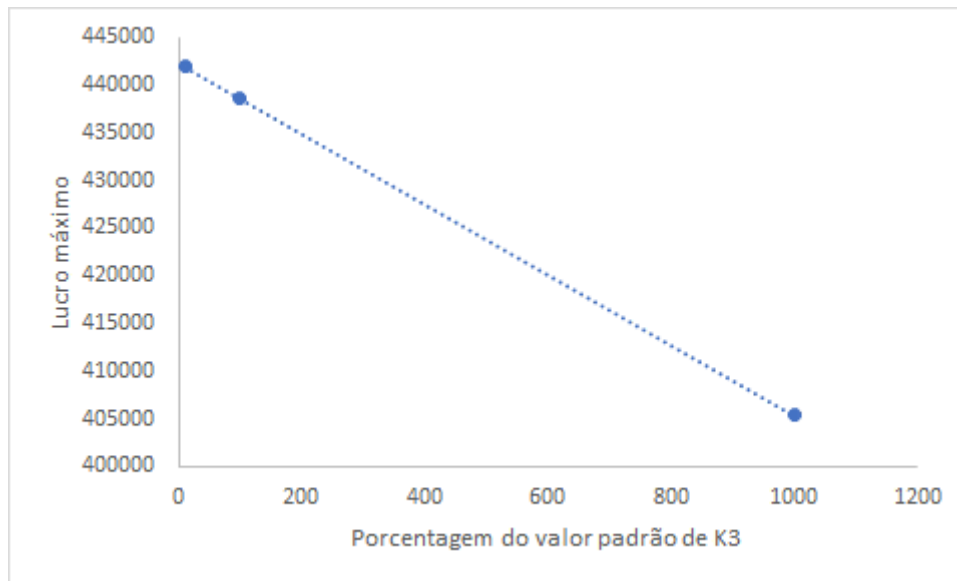
O efeito do custo da mão de obra foi avaliado no GRÁFICO 7.

Nota-se pelo gráfico que o comportamento é linear e mesmo com redução ou um aumento de 10 vezes no valor do custo com mão de obra tem pouco efeito sobre o lucro máximo.

Embora seja o elo mais importante do sistema, a despesa com funcionários não gera impacto significativo no custo de produção, pois a habilidade solicitada do profissional é manual, repetitiva e de baixo custo. Além disso, a quantidade de motores que um profissional pode produzir é maior do que a quantidade de funcionários necessários na linha de produção. Sempre haverá mais motores produzidos por dia do que funcionários na linha de produção

Isso mostra que o custo com mão de obra não gera despesa significativa se comparado com o lucro máximo.

GRÁFICO 7 - LUCRO MÁXIMO EM FUNÇÃO DO CUSTO DA MÃO DE OBRA.



FONTE: O autor (2020).

5.9 DISCUÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Como pode ser observado no GRÁFICO 2 a escolha da função objetivo foi correta pois foi possível obter um lucro máximo em função da produção diária de motores. Esse ótimo de 887 motores por dia ficou ligeiramente próximo daquilo que é utilizado na Planta de montagem de motores da fábrica Renault que é a produção de 605 motores por dia. Isso demonstra a consistência do modelo matemático e da função objetivo proposta para otimização do lucro máximo do sistema. Contudo, foram feitas algumas hipóteses de como os custos energéticos, de manutenção e de mão obra mudam conforme se aumenta a produção de motores. Essas hipóteses, embora possuam um fundamento físico e técnico para uma maior acurácia, deveriam ser obtidas a partir de dados de operação da linha de montagem de motores. Infelizmente, a Renault necessita operar com a produção de 605 motores por dia devido à demanda pela produção de veículos e não seria viável modificar essa produção. Talvez, em algum momento de férias coletivas, por exemplo, fosse possível modificar a produção de motores e avaliar o efeito sobre os custos de produção. Assim, poderiam ser validadas as hipóteses do modelo proposto nesse trabalho.

Outro resultado importante obtido foi com relação ao custo com maior impacto encontrado na análise do modelo matemático. Esse custo foi o custo de manutenção. Isso foi uma surpresa uma vez que se esperava que o impacto maior seria da mão de obra e

do custo de energia consumida na linha de montagem. Isso demonstra como um modelo matemático pode mostrar variáveis ocultas no processo e que impactam muito a eficiência do sistema.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A linha de produção de motores automotivos emprega um conjunto de atividades repetitivas de alta precisão, além de um conjunto de equipamentos auxiliares que requerem considerável consumo de energia elétrica e ar comprimido para atingir seu objetivo.

Nesse trabalho foram estudados os pontos onde existem taxas de perda da eficiência exergéticas no sistema com algumas propostas de melhoria na operação sem diminuição da qualidade, eficiência e lucro da linha de produção.

Os resultados numéricos mostraram que uma taxa de lucro máxima é de US\$377.438,76 por dia para a produção de 605 motores. Com base na modelagem proposta, é possível atingir um lucro de US\$438.617,18, 16,21% a mais na taxa de lucro máximo para uma produção de 887 motores por dia, sendo que acima dessa quantidade observa-se queda no lucro máximo.

Através da modelagem, foi possível identificar que o número máximo de motores que essa linha de produção pode produzir é de 887 motores, muito próximo dos 605 produzidos atualmente, isso traz consistência ao trabalho desenvolvido.

Embora tenha sido desenvolvida uma análise exergoeconômica simplificada para a linha de produção, os resultados aqui obtidos demonstram que existem parâmetros ideais para taxa máxima de lucro em linhas de produção de motores automotivos, não importa quão complexo o processo real possa ser.

6.1 CONCLUSÕES

1. Foi realizada a análise exergoeconômica de uma linha de produção de motores com o objetivo de identificar e qualificar as principais fontes de despesas do sistema.
2. Foi obtido um lucro máximo a partir da produção diária ótima de motores muito próxima da produção atual de motores o que permite um eventual aumento de produção sem aumentos significativos de despesas.
3. Imaginava-se que o maior custo estivesse relacionado com as despesas energéticas da linha de produção, mas foi observado que o fator que mais afeta a lucratividade da linha de produção de motores é o custo de

manutenção, e que eventuais diminuições do investimento em manutenção poderiam gerar um lucro máximo substancial em curto prazo, mas comprometeria a vida útil dos equipamentos de montagem da linha de produção.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apresentam-se as seguintes sugestões para a continuação deste trabalho:

- Informatizar o registro dos gastos energéticos da linha de produção para que através de planilhas de rendimento diários seja possível desenvolver perfil estatístico que aponte para o período de melhor produtividade e menor consumo da linha de montagem ao longo de um período.

- Desenvolver a análise de custo específica para o posto de serviço que se queira substituir por equipamento robotizado, pois as atividades desenvolvidas têm níveis de complexidade que podem encarecer a aquisição e operação.

- Validação experimental das hipóteses do modelo proposto.

REFERÊNCIAS

ABAM, F.I., UGOT, I.U., IGBONG, D.I.. Effect of Operating Variables on Exergetic Efficiency of an Active Gas Turbine Power Plant. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences* . *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS)*, , Calabar Nigeria, Volume 3, Issue 1, Jan 2012, p. 131- 136.

AASE, G. R., OLSON, J. R. & SCHNIEDERJANS, M. J. U-shaped assembly line layouts and heir impact on labor productivity: An experimental study. **European Journal of Operational Research**, London, v. 156, 698–711, jan. 2004.

ALBZEIRAT, M. K.; HUSSAIN, M. I.; AHMAD, R. A Novel Mathematical Logic for Improvement Using Lean Manufacturing Practices. **Journal of Advanced Manufacturing Systems**, Cingapura, v. 17, N. 3, p. 391–413, set. 2018.

Banco Nacional de Desenvolvimento. **Programa de Sustentação do Investimento**. Disponível em: <<https://www.tesourotransparente.gov.br/publicacoes/boletim-de-subsidios-do-tesouro-nacional-no-ambito-do-psi-e-nos-emprestimos-ao-bndes/2020/16>>. Acesso em 10 out 2020.

BEJAN, A. G. TSATSARONIS, M. J. MORAN, **Thermal Design and Optimization**, Wiley, New York, 1996.

CHANG, H. Exergy Analysis and Exergoeconomic Analysis of An Ethylene Process. **Journal of Applied Science and Engineering**, Tamsui, Taipei, Taiwan, jan. 2002.

DA SILVA, J. A. M. **Desempenho Exergo-Ambiental do Procesamento de Petróleo e seus Derivados**. Tese (Doutorado em Energia e Fluidos) - Escola Politécnica Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

Duncan, R. C. The peak of world oil production and the road to the Olduvai Gorge. **Population and Environment** 22 (5) (2001) 503–522.

GOUY, G. Sur l'énergie utilisable, **J. Phys.**, Vol. 8, 1889, pp. 501-518.

HELLENO, A.; HELLENO, L.; JOS, A. MORAES, I.; SIMON, A. T. Integrating sustainability indicators and Lean Manufacturing to assess manufacturing processes: Application case studies in Brazilian industry. **Journal of Cleaner Production**, Piracicaba, v. 153, p. 405-416, jun . 2017.

HESS, H. Thermochemische Untersuchungen. **Annalen der Physik und Chemie** . 126, p. 385-404 jan 1840.

JIANG, L.; GU, Z.; FENG, X.; LI, F. Y. Thermo-economical analysis between new absorption–ejector hybrid refrigeration system and small double-effect absorption system. **Applied Thermal Engineering**, Xi'an Jiaotong v.22, p.1027–1036, nov. 2002.

Jones D, Womack J. **Seeing the Whole**: Mapping the Extended Value Stream. Version 1.1. The Lean Enterprise Institute, 2003.

LANDES, David. S. **O Prometimento Unbound**: Mudança Tecnológica e Desenvolvimento Industrial na Europa Ocidental de 1750 até o presente . Cambridge, Nova York: Press Syndicate da Universidade de Cambridge. 1969.

LEAN INSTITUTE. Lean Thinking. Disponível em: <www.lean.org.br/pgs.htm>. Acesso em 11 abr. 2019;

MACEDO, J. C. F.; REIS, H. M.; SILVA, R. J. “Análise exergética de uma planta de evaporação de múltiplos efeitos do processo de extração de celulose pelo processo Kraft”. In: **44º CONGRESSO E EXPOSIÇÃO INTERNACIONAL DE CELULOSE E PAPEL-ABTCP 2011**, São Paulo. V. 1, 2011, P. 1-10.

MELLO Jr., A. G. **Acionamento de máquinas de fluxo por motores de combustão interna a gás natural** - Tese (Doutorado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo, 2006.

MORAN, M. J. et al. **Princípios da termodinâmica para engenharia**. São Paulo: Editora LTC, 7ª ed., 2013.

Maluf, A. B. “Exergoeconomia aplicada à cogeração e à geração no setor sucroenergético”. **Revista Ciência e Tecnologia**, [S.l.], v. 20, n. 37, p. 55-66, dez. 2017.

Otto Von Geuricke, Disponível em: <<https://www.grupoescolar.com/pesquisa/otto-von-geuricke-1602--1686.html>>. Acesso em: 06 abril 2019.

RAMASWAMY, R.; ROTHCHILD, C.; ALABI, F.; WACHIRA, E.; MUIGAI, F.; PEARSON, N. Using Value Stream Mapping to improve quality of care in low-resource facility settings. **Gillings School of Global Public Health**, Chapel Hill, v. 27599, p. 959-963, set 2018.

Ryba, A; Lenzi, E. K.; Lenzi, M. K. **Elementos de Engenharia Econômica**. Curitiba: Ibpex, 2011.

ROJAS, S. P. **Análise exergética, termoeconômica e ambiental de um sistema de geração de energia . Estudo de caso**: usina termoeletrica UTE - Rio Madeira. 2007 - Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) - Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

SAMPAIO, José Luiz. **Universo da física**. 2. ed São Paulo: Atual, 2005. 3 v., il. (Universo da física). Inclui bibliografia. ISBN 9788535705904 - v.1 (broch.).

SCOTT, D. S. (2008). Smelling Land: The Hydrogen Defense Against Climate Catastrophe. **Queen's Printer Publishing**. p. 206. ISBN 978-0-9809674-0-1.

SILVA; O. C. J.; MIRANDA; G. J.; VIEIRA; S. C. **O Problema Dinâmico de Re-Configuração de Sistemas de Montagem**. Trabalho de Graduação (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Setor de Ciências Tecnológicas Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

SRINIVASAN, J. Sadi Carnot and the Second Law of Thermodynamics. **Resonance**, Bangalore, p. 42-48, november. 2001.

STODOLA, A. "Steam Turbines (with an appendix on gas turbines and the future of heat engines)", translated by L. C. **Loewenstein, Van Nostrand**, New York, 1905, p. 402.

SZARGUT, J. Application of exergy in establishing of generalized technicaleconomical interdependences. **Arch. Bud. Maszyn**, 17, 105-108 jan. 1970.

VALERO, A., M.A. LOZANO and M. MUÑOZ, "A General Theory of Exergy Saving, Part I~III," Computer-Aided Engineering of Energy System – Second Law Analysis and Modelling, **AES** Vol.2-3, p. 1 (1986).

VIEIRA, S. **Estudo de Configurações de Sistemas Térmicos de Geração de Energia Elétrica através da Análise de Exergia e de Termoeconomia**. Dissertação (Mestrado em Energia) - Setor de Interunidades em Energia, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 1998.

APÊNDICE 1 - QUANTITATIVO DAS PEÇAS USADAS NA MONTAGEM DE UM MOTOR

Quantitativo das peças usadas na montagem de um motor, valor estimado das peças e divisão das atividades desenvolvidas nos postos de serviço da linha de produção.

ETAPA 01:

POSTO 05

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Pinos Guia carter óleo	0,46
Pinos Guia do Suporte Retentor	0,46
Pino guia tampa distribuição	0,46
Buchas Guia de Cabeçote	0,48
Pino Tensionador de Corrente	0,33
Pino guia da cx de velocidade	0,70
Bloco motor aluminio	357,49

POSTO 10

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Bronzina da Capa de Virabrequim	3,28
Virabrequim	136,00

POSTO 20

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Aneis de Encosto	2,22
Bronzina da Capa de Virabrequim	3,04
Pisset da corrente	3,05
Parafuso do pisset	0,12

POSTO 30

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Bronzina da Capa de Biela	3,75
Biela	29,40
Pistão	38,60
Raspador	7,74
Vedação	6,42
Corta fogo	10,10

POSTO 40

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Pissets	9,20
Parafuso do pisset	0,36
Sensor de cliquet	7,42
Parafuso do Sensor de Cliquetis	0,28

POSTO 50

Ajustes

POSTO 60

Ajustes

POSTO 70

Ajustes

ETAPA 02:**POSTO 80**

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Cabeçote (bruto):	153,40
Junta de Válvulas	6,10
Válvulas Admissão	16,50
Válvulas Escapamento	19,80
Molas de Válvulas	4,08
Pratos de Mola	3,12
Travinhas	0,96
Junta do cabeçote	7,66
Cabeçote usinado	171,00
Parafuso do cabeçote	9,84
Prisioneiro do Coletor	1,76

POSTO 90

Ajustes

POSTO 100

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Parafusos da Capa do Comando	4,44
Pino guia da corrente	0,33
Chaveta Pinhão	0,45
Parafuso da trava do coletor	0,28
Parafuso da valvula termostatica	0,45
Válvula Termostática	15,00

POSTO 110

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Bomba D'água	40,30

POSTO 120

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Óleo Lubrificação cabeçote	58,60
Comando de admissão	24,30
Comando de escapamento	23,80

POSTO 130

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Volante do motor	94,00

POSTO 140

Ajustes

POSTO 150

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Polia VVT de comando admissão	90,40
Polia VVT de comando escapamento	91,15
Parafuso da Polia Comando de Escapamento	0,50
Parafuso da Polia Comando de Admissão	0,50
Pinhão de Virabrequim	7,60
Corrente distribuição	37,20
Guia da corrente	2,50
Tensionador da Guia da Corrente	9,80
Guia tensionadora da corrente	3,80
Parafuso de fixação do tensionador	0,35

POSTO 160

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Silicone vedação	94,00

POSTO 170

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Trava de Coletor no Cabeçote	8,40
Velas	8,90
Suporte Retentor Lado Volante	6,70
Parafusos do Suporte Retentor Lado Volante	0,50
Silicone	246,00

POSTO 175

Ajustes

ETAPA 03:**POSTO 180**

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Tampa do Cabeçote	27,40
Parafusos da Tampa do Cabeçote	0,60
Junta carter distribuição	0,60
Junta carter distribuição	0,96
Carter Óleo	67,00
Parafuso carter oleo	0,60
Parafusos do Carter de Óleo Motor HS	0,60
Tampa de Distribuição	39,20
O'ring da Crepine	1,15
Crepine	2,03
Parafuso da Crepine	0,15
Bomba de Óleo	183,00
Parafusos da Bomba de Óleo	0,60
Silicone mamelon	1,95
Mamelon	1,10
Filtro de Óleo	4,50
Junta da Modine	0,80
Modine	28,00
Parafusos da Modine	0,50
Atuador de pressão	1,85
Junta carter oleo	0,35

POSTO 190

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Junta carter óleo	0,35

POSTO 200

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Junta líquida carter óleo, distribuidor e tampa cabeçote	250,00
Parafuso do carter de óleo	0,30
Parafusos da Tampa de Distribuição Motor HS	0,85
Parafusos da Tampa do Cabeçote	1,35

POSTO 210

Ajustes

POSTO 220

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Retentor Volante	4,80
Retentor Distribuição	4,05

POSTO 230

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Tampa VVT Admissão	13,95
Tampa VVT Escapamento	13,95
Junta tampa VVT	6,00
Bomba D'água	40,30
Parafuso da bomba d'água	0,30
Parafuso da bomba d'água	0,25
Parafusos da Tampa VVT Admissão	0,35
Parafusos da Tampa VVT Escapamento	0,35
Parafusos M8 da Tampa de Distribuição	0,95
Eletrovalvula	75,00
Injetores	53,00
Clip Injetor	1,30
Rampa de Combustível	21,00
Parafusos da Rampa de Combustível	0,25

POSTO 240

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Parafusos do Volante Motor HS	1,75
Sensor de Fase Admissão	10,80
Sensor de Fase Escapamento	10,83
Parafuso do sensor de fase	0,35
Polia do Virabrequim	36,00
Parafuso da Polia do Virabrequim	2,40

POSTO 250

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Placa termica	9,40

POSTO 260

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Parafuso da placa termica	4,00
Sonda de Oxigênio	25,55

POSTO 270

Ajustes	
---------	--

ETAPA 04:**POSTO 280**

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Óleo	33,00
Bobinas	44,00
Parafuso do Suporte Multi Função	0,35
Suporte Multi Função	2,15
Suporte da Sonda de O ₂	0,90
Gancho de elevação	0,85
Parafuso do gancho de elevação	0,50
Junta de Coletor	0,70
Coletor de escapamento	79,50
Porcas do Coletor	1,30
Parafusos do Coletor	0,60
Sonda de Oxigênio	25,55
Sensor de pressão de óleo	4,60
Mini Chicote de Injetores	11,15
Agraffe da sonda O ₂	0,50
Suporte Multi Função	0,90
Parafuso do Suporte Multi Função	0,15

POSTO 290

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Parafusos da Bobina	0,45
Placa termica	9,40
Parafuso da placa termica	4,00
Gancho de Elevação lado Distribuição	0,85
Parafusos do Gancho de Elevação lado Distribuição	0,25

POSTO 300

Ajustes

POSTO 310

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Vareta de óleo com tampão	2,90
Mini Chicote de cablage	4,35

POSTO 320

Ajustes

POSTO 330

Ajustes

POSTO 340

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Agraffe	0,10
Repartidor de ar	41,65
Parafusos do Repartidor de Ar	0,70
Parafusos do Repartidor de Ar	2,70
Injetor partida a frio (preparado):	13,65
Suporte Injetor de Partida a Frio	0,50
Parafuso do Injetor de Partida a Frio	0,20
Sensor de Pressão e Temperatura de Ar	14,45
Parafuso do Sensor de Pressão e Temperatura de Ar	0,10
Corpo de borboleta	72,80
Parafuso do corpo de borboleta:	0,80
Tubo de Entrada de Ar	9,40
Parafuso tubo de entrada de ar	0,35

POSTO 350

Ajustes

POSTO 360

Peças usadas na montagem por motor	Valor das peças de montagem [U\$/motor]
Embreagem	74,60
Parafusos da Embreagem	1,80

APÊNDICE 2 - QUANTITATIVO DAS PEÇAS USADAS NA MONTAGEM DE UM MOTOR

POSTO	CUSTO Energético	CUSTO Peças
5	2,16	360,38
10	1,05	139,28
20	0,56	8,43
30	0,68	96,01
40	0,56	17,26
50	0,19	0,00
60	1,13	0,00
70	1,13	0,00
80	6,38	394,22
90	0,80	0,00
100	4,79	20,95
110	4,79	40,30
120	1,60	106,70
130	0,80	94,00
140	4,79	0,00
150	3,19	243,80
160	4,79	94,00
170	3,19	270,50
175	2,55	0,00
180	4,63	362,94
200	6,30	252,85
210	1,28	0,00
220	5,27	8,85
230	3,67	226,95
240	0,80	62,13
250	0,80	9,40
260	4,79	29,55
270	0,80	0,00
280	4,79	206,70
290	0,80	14,95
300	0,80	0,00
310	4,15	7,25
320	0,80	0,00
330	3,99	0,00
340	0,80	157,40
350	4,79	0,00
360	1,60	76,40