

PROJETO E FABRICAÇÃO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO EXTERNA DE CICLO STIRLING

Orlando de Lima Cavalheiro¹
Fernando Mariano Bayer²
Patrícia de Andrade Paines³
Luciano Vignochi⁴

RESUMO

Este artigo tem como objetivo o projeto e fabricação de um Motor *Stirling* tipo Gama, visando sua utilização didática pelos alunos do Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, da instituição Universidade Federal de Santa Maria. O estudo teórico aborda temas termodinâmicos, utilizando-se do *software Mathcad* para o seu desenvolvimento e o dimensionamento do sistema. O projeto mecânico foi desenvolvido em software de desenho computacional em 3D (*Solidworks*), que além de realizar modelagem tridimensional também simula a montagem. Os resultados deste trabalho estão evidenciados na concepção da máquina, assim como, nos levantamentos de dados sobre o motor, no modelo adotado para o desenvolvimento e nos procedimentos de operação de usinagem realizados na construção de cada componente do conjunto do motor. Posteriormente no laboratório de motores será realizada análise através de instrumentação com o objetivo de confrontar os dados teóricos termodinâmicos relativos a este tipo de motor com os obtidos no modelo real.

PALAVRAS-CHAVE: Motor Stirling Gama, Desenvolvimento, Concepção.

ABSTRACT

This article has the objective of designing and manufactures a Gamma Stirling Engine, aiming at its didactic use by the students of Industrial Technical College in Santa Maria, the institution's Federal University of Santa Maria. The theoretical study subjects thermodynamic approach, using software Mathcad for their development and sizing system. The mechanical design was developed in computational design software 3D (*Solidworks*), who in addition to performing three-dimensional modeling also simulates the assembly. The results of this work are evident in the design of the machine, as well as the surveys of engine data, the model adopted for the development and operation procedures machining made in the construction of each component of the motor assembly. Later in laboratory engines will be performed through analysis instrumentation in order to confront the theoretical thermodynamic data for this type of engine with those obtained in the actual model.

KEYWORDS: Stirling Engine Range, Development, Design.

¹ Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Maria – UFSM.
Email: orlandocavalheiroc@ctism.ufsm.br

² Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Maria – UFSM.
Email: bayer@ctism.ufsm.br

³ Doutoranda em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.
Email: paines_sm@hotmail.com

⁴ Doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.
Email: lvignochi1@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

A demanda mundial por novas fontes de energia tem incentivado a inovação e pesquisa nesta área, tecnologias que de alguma forma melhorem materiais existentes, máquinas ou criem novas concepções tem despertado o interesse de vários grupos de pesquisa tanto acadêmicos como de empresas que desenvolvem tecnologia voltada à área de energia. A pesquisa tem se demonstrado como um dos fatores determinantes para o sucesso de novos projetos, que resolvam problemas, sanem necessidades e esclareçam questões ainda não exploradas.

Estima-se que aproximadamente um terço da população mundial, cerca de dois bilhões de pessoas, não tem acesso direto à energia elétrica (DIAS, 2000). Mesmo nos países industrializados, com altos padrões de vida, coexistem formas rudimentares de transformação e uso da energia. Porém, os esforços são no sentido de reduzir ao máximo esta parcela, conforme Tabela 01.

Tabela 01: Composição da matriz energética.

Fonte	Mundo (%)	Brasil (%)
Petróleo	35,3	43,1
Carvão mineral	23,2	6,0
Gás natural	21,1	7,5
Biomassa tradicional	9,5	8,5
Nuclear	6,5	1,8
Hidrelétrica	2,2	14,0
Biomassa moderna	1,7	23,0
Outras renováveis	0,5	0,1

Fonte: Ministério da Agricultura, pecuária e Abastecimento (2016).

A cogeração de energia vem crescendo no cenário nacional, já que o país tem investido na geração de energia através da biomassa e o plano nacional de agroenergia (2006 – 2011) tem sido um desses exemplos. Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2006, p.67), o processo de cogeração é a transformação de determinada forma de energia em mais de uma forma de energia útil, sendo as mais comuns a mecânica (para movimentar máquinas, equipamentos e turbinas de geração de energia elétrica) e a térmica (para geração de vapor, frio ou calor).

Oddone (2001) destaca “a cogeração tem alta eficiência energética, pois não há desperdício de energia térmica (como ocorre nas termelétricas puras), pois é utilizada em processos industriais como secagem, evaporação, aquecimento, cozimento e destilação”.

Segundo Paula (2007) o uso de motores Stirling vem despertado o interesse, uma vez que, avanços na tecnologia de fabricação deste tem apresentado grande melhoria, com características de motor de combustão externa, que possibilita a utilização de variadas fontes energéticas, pois este só precisa de uma fonte de alta temperatura para realizar trabalho.

Tais comentários e dados apresentados até agora são pertinentes, à medida que, alternativas energéticas como: energia eólica, de marés, de ondas oceânicas, energia solar térmica e fotovoltaica, potencial hidráulico, biomassa combustível sólida, líquida ou gasosa e sistemas geotérmicos. Estas têm apresentado tecnologias para a sua conversão em eletricidade, pois com a necessidade de redução das emissões residuais de gases e outros resíduos provenientes de fontes de energia fóssil, o motor Stirling tem se mostrado uma alternativa viável, de unidade geradora estacionária de energia a biomassa ou outro combustível renovável.

Segundo Machado (2011) os motores Stirling são aplicáveis por serem motores de combustão externa e apresentarem a possibilidade de aproveitar fontes de energia de baixa entalpia, o que permite sua utilização para conversão de energia geotérmica e solar, além de aplicações em sistemas com cogeração.

Este trabalho tem como objetivo o projeto e fabricação de um motor Stirling tipo Gama, visando sua utilização didática pelos alunos do Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, da instituição Universidade Federal de Santa Maria. Como objetivos específicos consideram-se a aplicação de uma pesquisa bibliográfica sobre o Motor Stirling, para posterior desenvolvimento qualitativo e quantitativo sobre as teorias e métodos construtivos, sendo esta a primeira parte do trabalho. A segunda parte do trabalho objetiva a modelagem das peças através do *software SolidWorks*, incluindo o detalhamento para a fabricação. Finalmente o projeto será executado, abordando técnicas de usinagem e parâmetros de construção.

O desenvolvimento, modelagem e concepção do projeto têm, por conseguinte a aprovação no trabalho final de conclusão de curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Maria. Também associado a isto a oportunidade de realizar

um trabalho que reúne conhecimentos desenvolvidos ao longo da vida acadêmica no curso de engenharia mecânica.

A delimitação do trabalho consiste na análise qualitativa de dados pertinentes ao desenvolvimento, assim como, análise quantitativa teórica segundo modelo de Schmidt, da utilização de software Mathcad 14 e seu manuseio, da modelagem com a utilização de software SolidWorks e da construção que envolverá processos de usinagem na manufatura das peças.

O processo de desenvolvimento de produto (PDP) ficou resumido à etapa preliminar e detalhado, uma vez que o modelo de produto já tinha sido estabelecido anteriormente em um projeto acadêmico, o modelo Moriya tipo gama construído por Dr. James R. Senft era o tema em questão, mas por problemas teóricos e de concepção não foi desenvolvido, sendo o mesmo substituído por um modelo didático também feito de tubo de ensaio e pistão pneumático na ocasião.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Esta fase será estabelecida a uma breve revisão da literatura da definição de motor e ciclo Stirling, assim como os tipos de configurações e o desenvolvimento do motor Stirling tipo gama.

2.1 Motor e Ciclo Stirling

Segundo Van Wylen (2009), o ciclo stirling é um ciclo de potência a ar, que opera segundo transferência de calor ao fluido de trabalho durante os processos a volume constante 2 – 3 e expansão isotérmica 3 – 4. O calor é transferido do fluido de trabalho, ou seja, rejeitado durante os processos a volume constante 4 – 1 e compressão isotérmica 1 – 2. Nestas condições este ciclo é igual a um ciclo Otto em que os processos adiabáticos são substituídos por processos isotérmicos.

Van Wylen (2009, p. 369) diz que “o ciclo padrão a ar Otto é um ciclo ideal que se aproxima do motor de combustão interna de ignição por centelha”. Uma observação muito importante, segundo Van Wylen (2009) é que o ciclo padrão Otto é função apenas da relação de compressão e o rendimento aumenta com o aumento dessa relação.

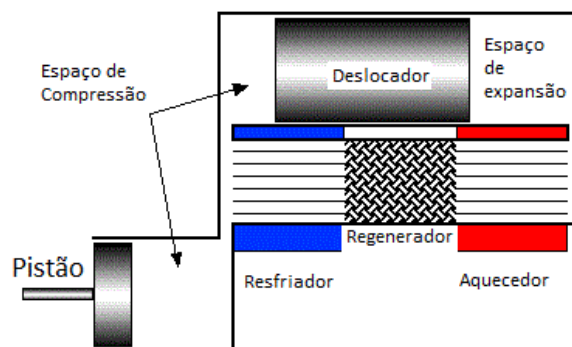
2.2 Tipos de configurações de motor Stirling

O motor Stirling é dividido em três grupos, Alfa, Beta e Gama, de acordo com a configuração dos cilindros e pistões. Os quatro processos para a geração de potência em um ciclo de Stirling são: compressão a temperatura constante, aquecimento a volume constante, expansão a temperatura constante e rejeição de calor a volume constante, sendo desta maneira, impossível executar o ciclo apenas com um pistão, Barros (2009).

O motor então tem dois espaços com temperaturas diferentes tendo gás como fluido de trabalho entre esse espaço e seu movimento se deve ao pistão deslocador (displacer) e pistão de compressão, Hirata (1997).

O motor gama é composto por dois cilindros independentes, um cilindro motor e um cilindro deslocador, com êmbolos conectados a uma árvore de manivelas com volante, sendo a fonte quente e a fria entre os extremos do curso do deslocado. Sua principal desvantagem é a baixa eficiência, devido ao espaço morto causado pela conexão dos dois cilindros Machado (2009 apud Parlak, 2011, p. 10), a ilustração da Figura 6 demonstra tal observação.

Figura 6: Esquema de um motor Stirling Gamma.



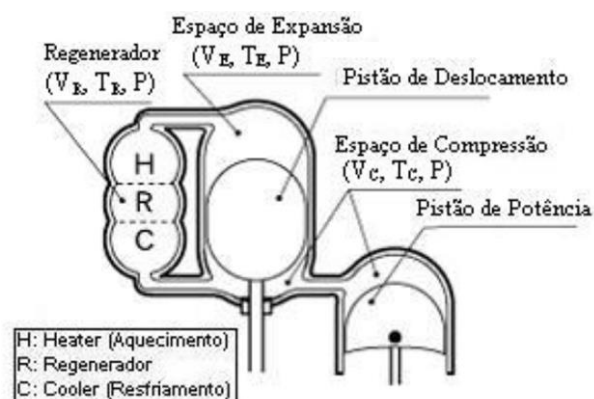
Fonte: Machado (2011).

2.3 Desenvolvimento do Motor Stirling tipo Gama

Guimarães (2012) considera sobre o modelo que, primeiramente, são determinados os volumes de expansão e de compressão para um ângulo de rotação do eixo do motor, dando sequência, é encontrado o volume instantâneo em função de ângulo do eixo – x , sendo tal ângulo do eixo definido como $x = 0$ quando o pistão de expansão está na posição superior.

O desenvolvimento da metodologia de Schmidt para motor Stirling do tipo gama é representado pelo V_E , corresponde ao volume instantâneo de expansão; V_C , volume instantâneo de compressão; V_{SE} , Volume percorrido pelo pistão de deslocamento; V_{SC} , volume percorrido pelo pistão de potência; d_x , ângulo de fase, entre o pistão de deslocamento e de potência. Com os resultados da parametrização em conjunto com as demais equações envolvidas é possível construir um gráfico $P \times V$. A representação da Figura 7 demonstra as principais variáveis do método de Schmidt para o motor Stirling tipo gama.

Figura 7: Configuração de um motor Stirling tipo Gama.



Fonte: Hirata (1997).

Os parâmetros estabelecidos pelo modelo de Schmidt servem para auxiliar na obtenção da energia indicada (área do diagrama $P - V$), para a expansão e compressão, que pode ser calculada como uma solução analítica fazendo uso dos coeficientes

encontrados acima. A energia indicada na expansão - E_E (J), é baseada na pressão média - P_{med} , na pressão mínima - P_{min} e na pressão máxima - P_{max} (GUIMARÃES, 2012).

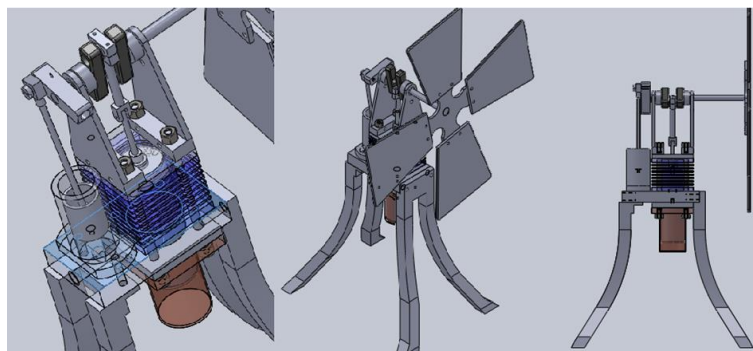
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta fase do projeto será estabelecida a metodologia de desenvolvimento, ou seja, a utilização dos métodos para o desenvolvimento computacional, modelagem tridimensional das peças e concepção do modelo proposto.

3.1 Desenvolvimento

Este estudo foi desenvolvido a partir de um motor de combustão externa Stirling tipo gama, pois um modelo proposto nestes moldes de motor já havia sido proposto em um trabalho para jornada acadêmica da UFSM – (JAI), mas como já foi mencionado nas delimitações, “o modelo Moriya tipo gama construído por Dr. James R. Senft era o tema em questão, mas por problemas teóricos e de concepção não foi desenvolvido”, sendo então retomado neste trabalho com dimensionamento alterado e com modificações na parte de troca de calor final do protótipo e introdução de mancais de rolamento na árvore. A Figura 8 traz o estado da arte do modelo Moriya tipo gama por Dr. James R. Senft.

Figura 8: Motor Stirling tipo gama Moriya.



Fonte: Autores.

3.2 Teorema de Schmidt para o tipo gama

Tomaremos agora o modelo de Schmidt para o desenvolvimento do presente projeto, motor Stirling tipo gama, que resultou no dimensionamento teórico deste motor. A parametrização foi desenvolvida empiricamente, tomando como base peças já existente, o modelo da figura 26 motor Moriya e do memorial de calculo desenvolvido no Software Mathcad 14, resultou na Tabela 2 de dimensionamento e gráfico da $P \times V$ do motor na Figura 9.

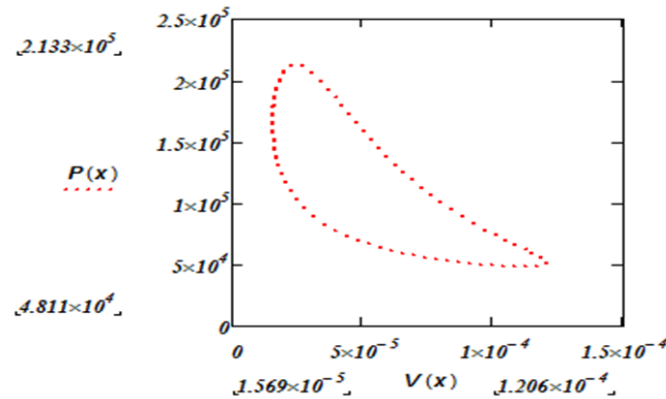
Tabela 2: Dimensionamento do motor.

DIMENSIONAMENTO		
Descrição	Dimensão	Unidades
Vdc	1.520.122	cm ³
Vde	3.053.628	cm ³
Vsc	25.335.374	cm ³
Vse	50.893.801	cm ³
Pressão média	101300	Pa
R	287	J/kg*K
Vr	0	
dx	90°	°
Lcursopower	50,01	mm
Lcursodispenser	50,01	mm
Lmorto do power	3	mm
Lmorto do dispenser	3	mm
Vpist.power	12.870	cm ³
Vpist.dispenser	124.181	cm ³
Rotação	180	RPM
Energia indicada	2.311	J
Pressão _{min}	48110	Pa
Pressão _{max}	213300	Pa
Wpotência indicada	0.726	W
Lcomprimentpower	25.4	mm
Lcomprimentdispenser	122	mm

Fonte: Autores.

Do modelo de Schmidt, obtemos a eficiência térmica teórica do motor deste projeto, sendo $n_t = 54,4\%$. Observe a Figura 9 o comportamento do modelo.

Figura 9: Gráfico PXV do motor.



Fonte: Autores.

O dimensionamento do pistão de compressão foi em cima de um pistão de moto - compressor de geladeira, assim como, o cilindro de compressão em torno de um cilindro pneumático que resultaram no $D_c = 25,4$ mm diâmetro do pistão de compressão e $L_c = 3$ mm comprimento da faixa morta de compressão, com estes valores obtém – se o volume morto de compressão $V_{dc} = 1520,1224$ mm³, já o pistão de expansão corresponde aos respectivos valores do pistão de expansão do modelo Moriya da figura 26, pois o pistão de compressão deste modelo apresentava dimensões parecidas com a do modelo do projeto, sendo $D_e = 36$ mm diâmetro de expansão e $L_e = 3$ mm comprimento da faixa morta de expansão, que resultou no $V_{de} = 3053,628$ mm³ volume morto de expansão.

Foi arbitrado empiricamente para as temperaturas de expansão e compressão 380°C e 25°C, tomando o álcool etílico 96° como fonte de calor do motor. Sendo assim os parâmetros do modelo experimental são: $D_c = 25,4$ mm, $L_c = 3$ mm, $D_e = 36$ mm, $L_e = 3$ mm, $V_{dc} = 1520,1224$ mm³, $V_{de} = 3053,628$ mm³, $T_c = 25^\circ\text{C}$ e $T_e = 380^\circ\text{C}$.

Levando também em consideração o modelo Moriya, foi estabelecido teoricamente o volume momentâneo de expansão e volume momentâneo de compressão, $V_{se} = 50893,801$ mm³ e $V_{sc} = 25335,374$ mm³, com base nestes dados e os obtidos no teorema de Schmidt, conseguimos dimensionar teoricamente o motor Stirling tipo gama deste projeto. Notamos ainda que comparando este teorema com a metodologia termodinâmica de cálculo para transferência de calor em parede plana e cilíndrica a eficiência deste método é maior o que justifica sua escolha e utilização.

3.3 Projeto preliminar do motor tipo gama

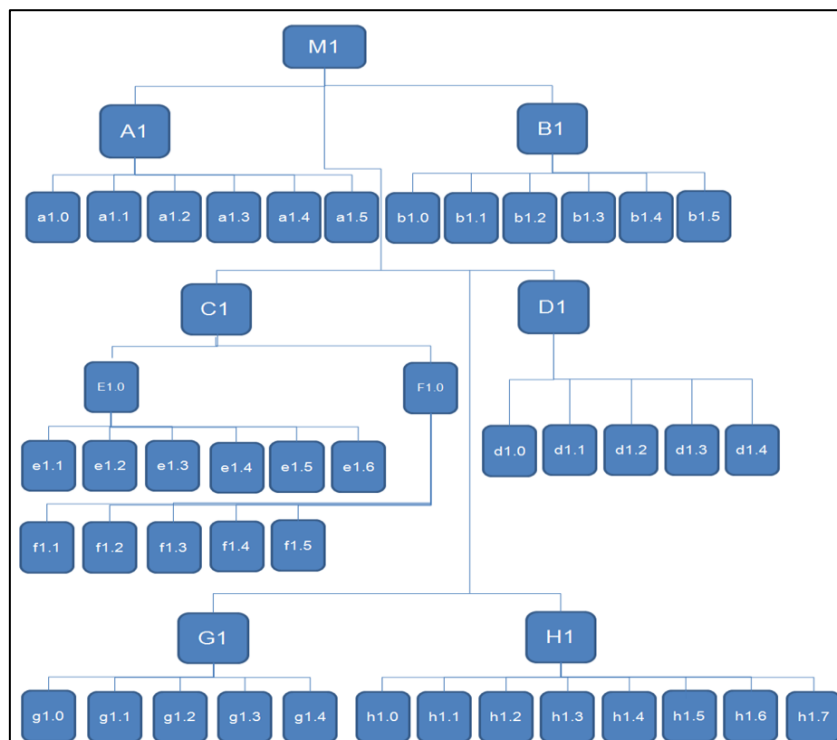
Esta fase tem por objetivo especificar detalhadamente os componentes, dimensões, matérias e funções de cada integrante do motor, assim como, uma análise técnica do mesmo.

Portanto, será realizada uma lista de materiais, segundo os componentes que formam o motor, assim como, a visualização tridimensional das peças que compõem o conjunto montado, para posterior desenvolvimento.

- Árvore genealógica do produto

Esta etapa consiste em mapear o protótipo, para se estabelecer as ligações dos componentes e seus respectivos grupos e subgrupos ao grupo principal do sistema, no caso, o motor Stirling gama. A elaboração da árvore possibilita decidir qual o sistema mais adequado para se organizar o processo, ou seja, nodular ou integrado, segundo função desempenhada pelo componente do grupo. Sendo assim, a Figura 10 retrata o organograma de funções.

Figura 10: Representação da hierarquia do produto.



Fonte: Autores.

Quadro 1: Hierarquia dos componentes.

M1: Motor Stirling gama	
A1: Arvore	
	a1.0: Eixo 1 da arvore
	a1.1: Eixo 2 da arvore
	a1.2: Eixo 3 da arvore
	a1.3: Contrapeso da arvore
	a1.4: Parafuso allen M8
	a1.5: Eixo pino do pistão potência
B1: Mancal	
	b1.0: Suporte do mancal
	b1.1: Cabeçote
	b1.2: Mancal 1
	b1.3: Mancal 2
	b1.4: Rolamenro do mancal 2
	b1.5: Rolamento do mancal 1
	b1.6: conector de entrada de água no cabeçote
C1: Pistão de expansão	
F1.0: Biela do conjunto	
	f1.1: Bucha do eixo 2
	f1.2: Suporte para rolamento biela pistão expansão
	f1.3: Rolamento biela do pistão de expansão
	f1.4: Tirante da biela pistão de expansão
	f1.5: Encaixe articulação pistão de expansão
E1.0: Pistão do conjunto	
	e1.1: Pino da bucha - Harticulação
	e1.2: Articulação do pistão de expansão
	e1.3: Haste do pistão de expansão
	e1.4: Tampa superior do pistão de expansão
	e1.5: Cilindro do pistão de expansão
	e1.6: Tampa inferior do pistão de expansão
D1: Pistão de potência	
	d1.0: Anel superior da biela do pistão de potência
	d1.1: Haste da biela do pistão de potência
	d1.2: Anel inferior da biela do pistão de potência
	d1.3: Pino da biela do pistão de potência
	d1.4: Pistão de potência
G1: Suporte do motor	
	g1.0: Porca sextavada M8
	g1.1: Tirante de sustentação do conjunto
	g1.2: Parafuso sextavado M8
	g1.3: Separador do conjunto
	g1.4: Suporte do conjunto
H1: Base do motor	
	h1.0: Base principal do conjunto
	h1.1: Cilindro de arrefecimento
	h1.2: Tampa do cilindro 2
	h1.3: Cilindro 2
	h1.4: Cilindro 4 do pistão de potência
	h1.5: Cilindro 1
	h1.6: Tampa do cilindro 1
	h1.7: Parafuso M8x1,25x12
	h1.8: conector de saída de água da base

Fonte: Autores.

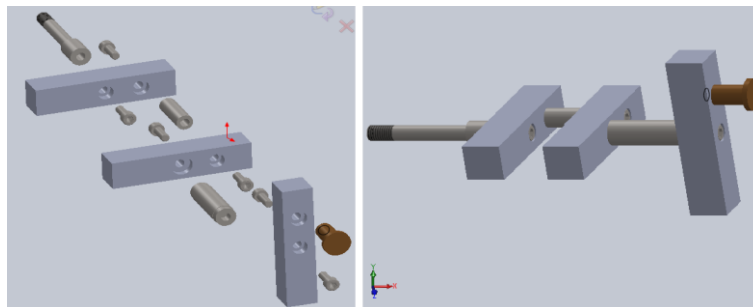
- Especificação dos conjuntos do produto e seleção de materiais

Com os conjuntos e subconjuntos pré-estabelecidos, segundo árvore genealógica, vamos abordar item a item, para melhor esclarecimento dos componentes e as funções de cada conjunto no motor.

- Conjunto da árvore (A1)

Este conjunto tem a finalidade de movimentar de forma rotativa a alternância entre os pistões e proporcionar inércia ao ciclo do motor. Segue o detalhamento das peças que compõem o conjunto da árvore (A1), com seus dimensionamentos e materiais respectivos, no apêndice B. Eixo 1, eixo 2, eixo 3 da árvore, contrapeso, parafuso allen M8x1,25x16 e eixo pino do pistão de expansão compõem esta montagem. A Figura 11 representa a geometria do conjunto da árvore em 3D.

Figura 11: Vista explodida e isométrica do conjunto (A1).



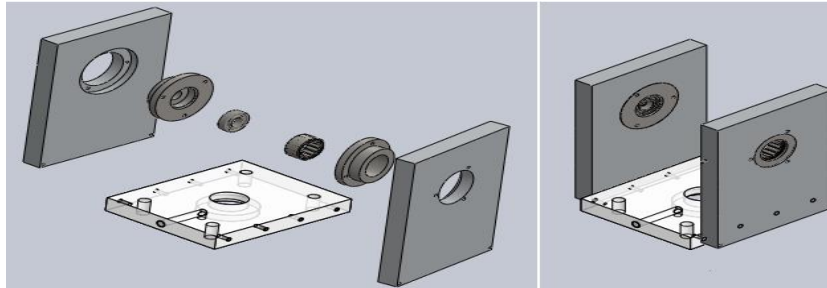
Fonte: Autores.

- Conjunto mancal (B1)

Este conjunto tem a finalidade de estabilizar, apoiar e ajustar o movimento da árvore no ciclo do motor, o movimento de rotação alternada é realizado sobre os mancais que compõem o sistema, sendo o atrito e apoio os fatores mais significativos do conjunto. Segue o detalhamento das peças que compõem o conjunto mancal (B1), com seus dimensionamentos e materiais respectivos, no apêndice B.

Suporte do mancal, mancal 1, mancal 2, cabeçote, rolamentos radial de esfera e de rolos são os componentes deste grupo. A Figura 12 representa a geometria do conjunto mancal em 3D.

Figura 12: Vista explodida e isométrica do conjunto (B1).



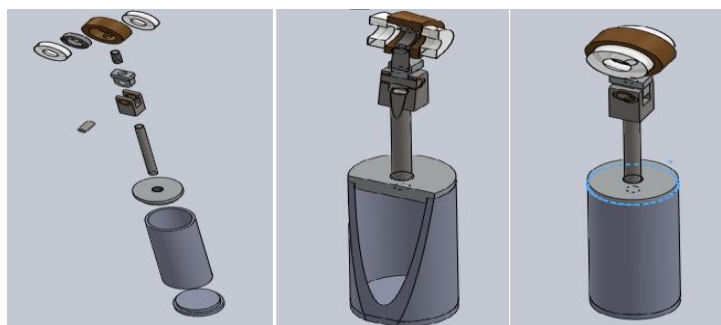
Fonte: Autores.

- Conjunto pistão de expansão (C1)

Este conjunto tem a finalidade de ajudar nas trocas de calor no interior do motor, uma vez que, a movimentação de gases quentes e frios dentro dos cilindros impulsiona o ciclo do motor que segue a ordem de movimentação do conjunto. O detalhamento das peças que compõem o conjunto pistão de expansão (C1), com seus dimensionamentos e respectivos materiais estão no apêndice B.

Bucha do eixo 2, rolamento de esferas, suporte do rolamento, tirante da biela e encaixe da articulação, compõem o subconjunto biela (F1) e pino da articulação, articulação, haste do pistão de expansão, tampa superior, cilindro do pistão e tampa inferior compõem o subconjunto pistão (E1), sendo estes dois subconjuntos a formação do conjunto pistão de expansão. A Figura 13 representa a geometria do conjunto pistão de expansão em 3D.

Figura 13: Vista explodida e isométrica do conjunto (C1).



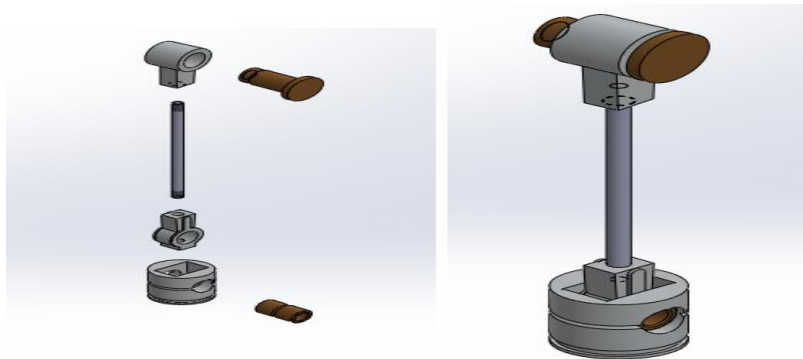
Fonte: Autores.

- Conjunto pistão de potência (D1)

Este conjunto tem a finalidade de ajudar na compressão do gás para os cilindros trocadores de calor através da diminuição da pressão interna do ciclo, ou seja, este conjunto realiza trabalho sobre o gás e conseqüentemente movimenta o conjunto (A1) do motor, à medida que a pressão alterna entre alta e baixa. Segue o detalhamento das peças que compõem o conjunto pistão de potência (D1), com seus dimensionamentos e materiais respectivos, no apêndice B.

Parte superior e inferior da biela, assim como, haste, pistão de compressão e pino compõem este conjunto. A Figura 14 representa a geometria do conjunto pistão de potência em 3D.

Figura 14: Vista explodida e isométrica do conjunto (D1).

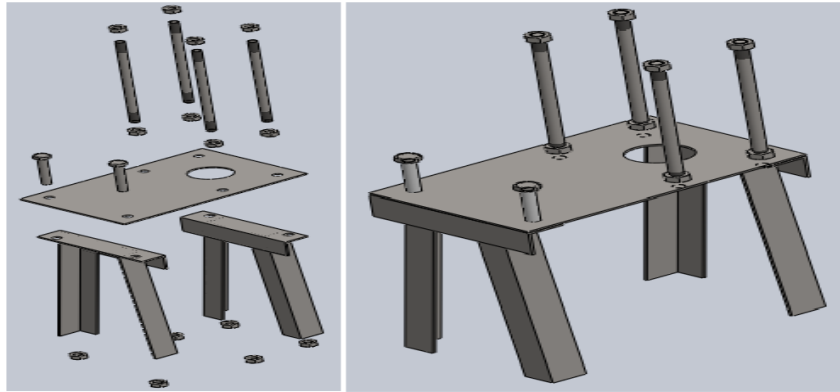


Fonte: Autores.

- Conjunto suporte do motor (G1)

Este conjunto tem a finalidade de fixar e apoiar o conjunto motor, ou seja, sustentar os demais conjuntos que formam o motor. Segue o detalhamento das peças que compõem o conjunto suporte do motor (G1) com seus dimensionamentos e materiais respectivos, no apêndice B. Tirante de sustentação M8 do conjunto, porca sextavada M8, parafuso M8, separador do conjunto e suporte do conjunto compõem esta montagem. A Figura 15 representa a geometria do conjunto suporte do motor em 3D.

Figura 15: Vista explodida e isométrica do conjunto (G1).

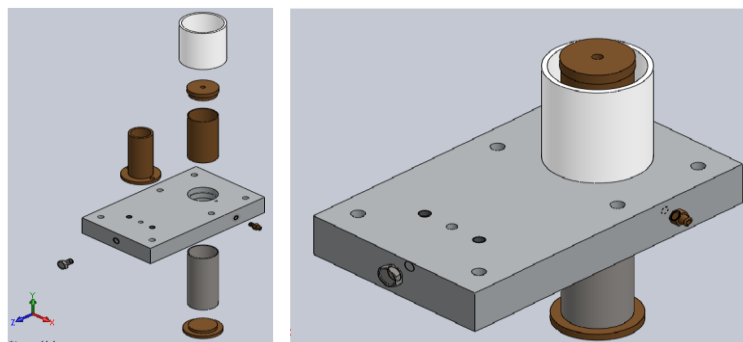


Fonte: Autores.

- Conjunto base do motor (H1)

Este conjunto tem a finalidade de apoiar os cilindros de troca de calor, assim como, interligar a câmara de expansão do gás com a de compressão, tornando o motor mais versátil e de montagem simples. Segue o detalhamento das peças que compõem o conjunto base do motor (H1) com seus dimensionamentos e materiais respectivos, no apêndice B. Base principal do conjunto, cilindro de arrefecimento, tampa do cilindro 2, cilindro 2, cilindro 4 do pistão de potência, cilindro 1, tampa do cilindro 1, conector de saída de água e parafuso M8x1,25x12 compõem este conjunto. A Figura 16 representa a geometria do conjunto base do motor em 3D.

Figura 16: Vista explodida e isométrica do conjunto (H1).

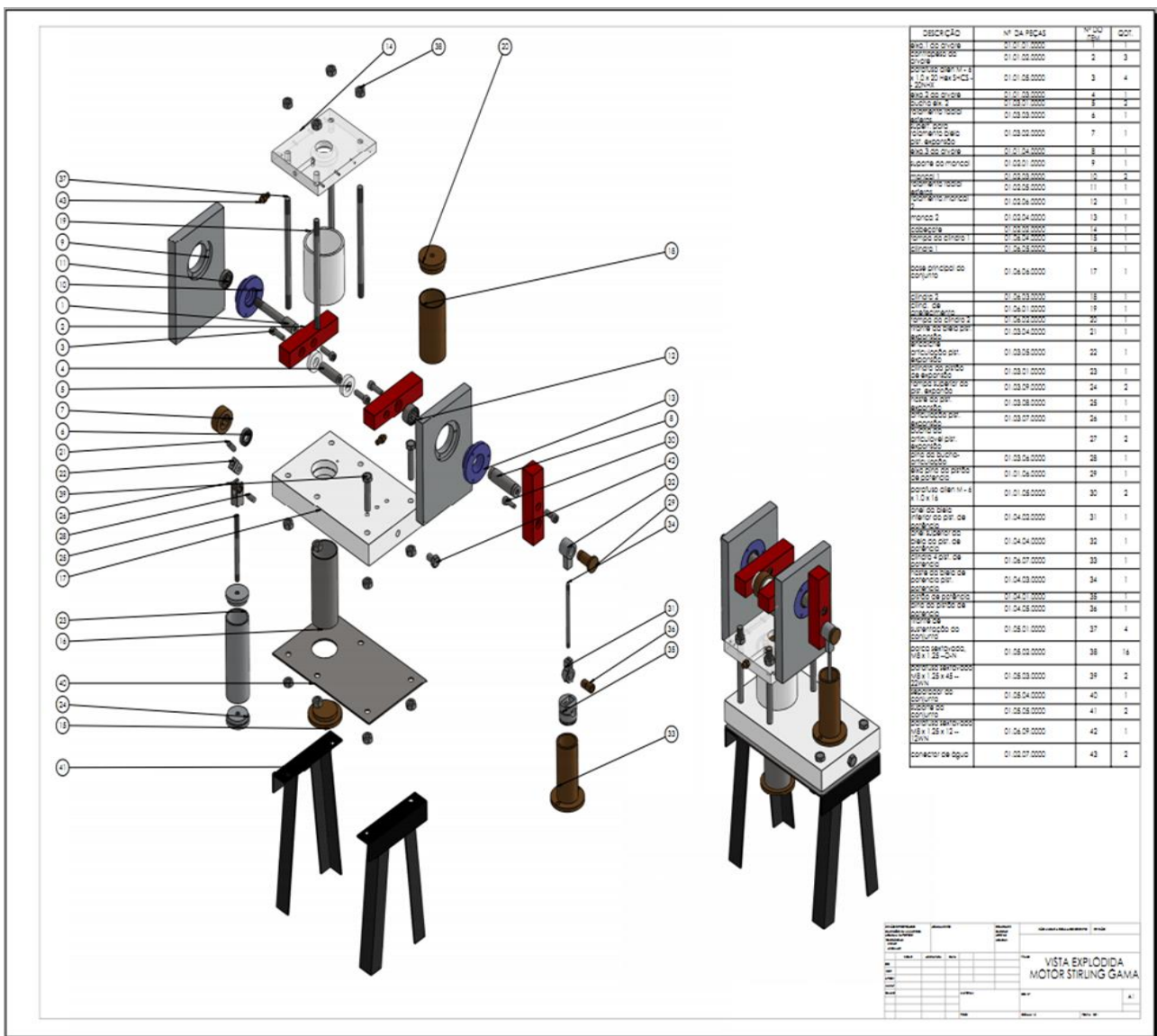


Fonte: Autores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O desenvolvimento, segundo árvore genealógica, nos conduziu a versão do projeto, que pode ser vista na representação da Figura 13. Sendo assim, com os parâmetros pré-definidos de dimensões, materiais e processos estimados, se torna mais flexível à realização da análise do processo para construção de um modelo de motor Stirling tipo gama. Segue a representação do conjunto em explosão e vista isométrica na Figura 17.

Figura 17: Vista explodida, isométrica e tabela de materiais.



Fonte: Autores.

As manufaturas das peças do protótipo foram realizadas no laboratório de Máquinas Ferramentas do CTISM, assim como, a concepção do motor no setor de manutenção da

escola técnica. Os resultados são exploratórios, à medida que, revelam partes positivas e negativas do projeto.

- Resultados satisfatórios

Confecção de uma ferramenta para fresa, que realizou a função de um alargador, uma vez que a mesma para realizar o processo de furação da peça principal, base da montagem, não existia com diâmetro desejado no laboratório de máquinas ferramentas do CTISM. Na Figura 18, modelo da ferramenta confeccionada para alargar o furo de comunicação entre os cilindros trocadores de calor.

Figura 18: Ferramenta para alargar furos.

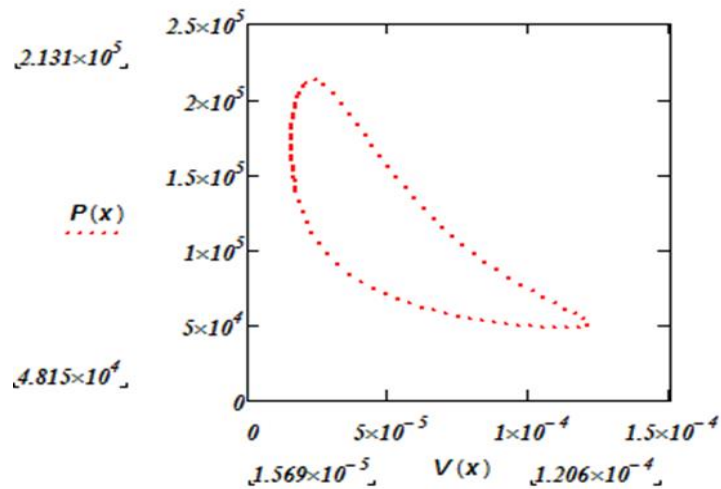


Fonte: Autores.

A escolha por um trocador de calor refrigerado a água, cilindro de resfriamento, se mostrou eficiente, no que diz respeito ao fluxo de troca de calor entre gás – água, pois a RPM oscilava para mais, à medida que a água era injetada para camará do trocador.

Com a utilização de um termo par se obteve a leitura da temperatura de entrada d'água ($T_f = 16^\circ\text{C}$) e através de infravermelho, pistola térmica, a temperatura de entrada da fonte quente ($T_h = 315^\circ\text{C}$), em conjunto com a rotação da máquina, leitura média do tacômetro 595 rpm, chegamos ao gráfico do modelo de Schmidt, Figura 19, que tem o formato do gráfico do ciclo Otto e se enquadra no diagrama PxV de Carnot.

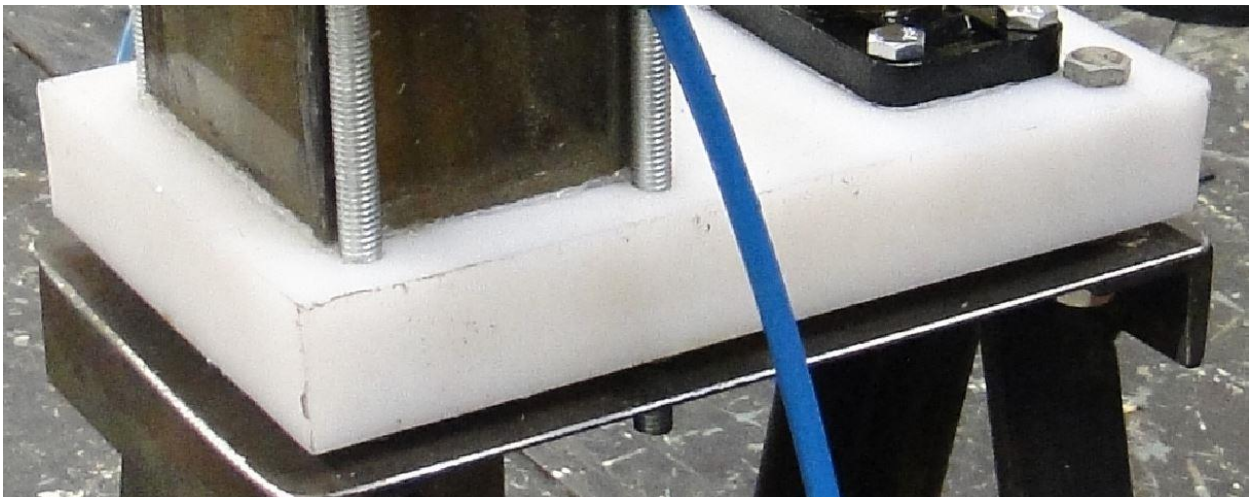
Figura 19: Gráfico PxV, com dados experimentais.



Fonte: Autores

Com os valores de temperatura e rotação, utilizou-se o software Mathcad para obter o rendimento (0,51 %), potência indicada (2,16 W) e pressões mínima e máxima de 0,048 MPa e 0,21 MPa. Tais observações demonstraram que o modelo proposto funcionou, mesmo com irregularidades de ajustes mecânicos e grande inércia nos mancais. A troca do material do conjunto base do motor (H1), de alumínio por nylon, diminuiu o custo final do processo. A Figura 20 mostra a nova configuração do conjunto (H1).

Figura 20: Conjunto (H1) - base do motor em nylon.



Fonte: Autores.

Por fim, a montagem do modelo, na Figura 21.

Figura 21: Concepção do motor Stirling em gama.



Fonte: Autores.

O funcionamento do protótipo no setor de manutenção do colégio concretizou o objetivo geral e principal deste projeto.

- Resultados não satisfatórios

Desalinhamento da árvore em relação à biela do pistão de expansão e pistão de expansão, tornou o início de funcionamento mais demorado.

Foi constatado problemas de vazamento de ar, que é prejudicial ao desenvolvimento e eficiência do motor. Não foi feita uma leitura de temperatura dentro da câmara de resfriamento e tão pouco dentro da cabeça do cilindro de entrada de calor, sendo as leituras feitas antes das entradas dos mesmos, tal procedimento não tinha sido proposto, mas tornaria mais significativo os dados obtidos.

O rendimento encontrado segundo o modelo de Schmidt, mesmo se aproximando do valor calculado empiricamente, não determinou um rendimento convincente, pois se esperava um valor menor devido às condições de funcionamento.

5 CONCLUSÃO

Portanto, o projeto teve êxito, à medida que a concepção do motor proposto, motor Stirling tipo gama, foi alcançada e os objetivos geral e específico foram atendidos, tendo a condição de teste de funcionamento com fonte térmica proveniente da chama de álcool etílico 96º a finalização do trabalho.

Então o desenvolvimento, modelagem e concepção atente o proposto pelo corpo do projeto e mesmo com resultados estimados pelo modelo proposto de Schmidt não serem tão eficientes é recomendável sua utilização em trabalhos que envolvam este tipo de motor de combustão externa.

Posteriormente este motor será utilizado didaticamente em estudos futuros de termodinâmica e instrumentação em laboratório. Recomenda – se também a utilização de CNC na manufatura das peças, com objetivo de garantir maior precisão dimensional e coordenação no funcionamento do motor. Este artigo faz parte da monografia de conclusão do curso de graduação em Engenharia Mecânica e teve como foco a criação de um motor de combustão externa para uso didático de aulas experimentais em laboratório.

6 REFERÊNCIAS

Barros, R. W. (2005). **Avaliação Teórica e Experimental do Motor Stirling Modelo Solo - Operando com Diferentes Combustíveis**. Itajubá, 143 p. (Dissertação de Mestrado em conversão de energia). Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil.

Belinnazo, H. J.; Denardin, C. B.; Belinazo, M. L. (1997). **Análise do custo de energia consumida para aquecer água em uma residência para banho de seus habitantes**. Tecnologia, Santa Maria, v. 3, n. 1/2, p. 27-36.

Figueira, R.; Cunha, A.; Marques, T. **Motor de Stirling: estudo de um motor térmico**. Lisboa, abr. 2005. Disponível em: <http://eccehomo.me/mleft/2ano/fex3/FEX3_TL2-Stirling.pdf>. Acessado em: 15 de out. 2018.

Guimarães, V. C. (2012). **Desenvolvimento experimental de um motor Stirling tipo Gama**. Paraíba, 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil.

Hirata, K. (1997). **Schmidt theory for stirling engines**. *National Maritime Research Institute*. Tokyo, Japão.

Incropera, F.P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S. (2011). **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, Editora LTC.

Machado, I. M. (2011). **Desenvolvimento de um motor Stirling tipo gama para operar com pequenas diferenças de temperatura**. 44 f. (Monografia em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Maria, Rio grande do Sul, Brasil.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. **Pecuária e Abastecimento. Plano Nacional de AGROENERGIA 2006-2011**, Brasília, 2. ed, p. 67, 2016. Disponível em:<http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Ministerio/planos%20e%20programas/PLANO%20NACIONAL%20DE%20AGROENERGIA.pdf>. Acessado em: 28 out. 2018.

Oddone, D. C. (2001). **Cogeração: uma alternativa para produção de eletricidade**. 82 f. (Dissertação de Mestrado) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Paula, R. B. (2007). **Projeto e avaliação teórica e experimental de sistemas de geração de eletricidade a partir da biomassa utilizando Stirling**. 178 f. (Dissertação de Mestrado em engenharia da energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2007.

Peron, R. **Projeto de Motor Stirling**. São Paulo: Unicamp, 2008. Disponível em: <http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2008/RenatoP-Llagostera_RF2.pdf>. Acessado em: 28 out. 2018.

Romano, L. N. **Desenvolvimento Integrado de Produtos**. 2010. 59 slides. Apresentação em PowerPoint®.

_____. Fase 1 – Projeto Informacional. 2010. 10p. Notas de aula.

_____. Fase 2 – Projeto Conceitual. 2010. 63 slides. Apresentação em PowerPoint®.

_____. Fase 3 – Projeto Preliminar. 2010. 58 slides. Apresentação em PowerPoint®.

_____. Fase 4 – Projeto Detalhado. 2010. 27 slides. Apresentação em PowerPoint®.

_____. Planejamento de Produto. 2010. 36 slides. Apresentação em PowerPoint®.

Sonntag, R. E.; Borgnakke, C. (2011). **Introdução à Termodinâmica para Engenharia**. 2. Ed. Rio de Janeiro: LTC.

Stirling, R. **Motor Stirling**. In: **ENCICLOPÉDIA LIVRE**. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Motor_Stirling#Bibliografia>. Acessado em: 28 out. 2018.

Universidade Federal de Santa Maria. **Pró- Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa. Estrutura e Apresentação de Monografias**, Dissertações e Teses: MDT. 7 ed. Santa Maria, 2010. 72p.

Van Wylen, G. J. (2009). **Fundamentos da Termodinâmica**. 7. Ed. São Paulo: Blucher.