

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

ERISON BELLESE DURANTE

**ANALOGIA ELÉTRICA DE CICLOS TERMODINÂMICOS APLICADOS
AOS CICLOS DE CARNOT E STIRLING**

**CURITIBA
Agosto – 2017**

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

ERISON BELLESE DURANTE

**ANALOGIA ELÉTRICA DE CICLOS TERMODINÂMICOS APLICADOS
AOS CICLOS DE CARNOT E STIRLING**

Dissertação apresentada como requisito parcial
à obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica, Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da Escola Politécnica,
Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Luís Mauro Moura

**CURITIBA
Agosto – 2017**

Dados da Catalogação na Publicação
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR
Biblioteca Central

D951a Durante, Erison Bellese
2017 Analogia elétrica de ciclos termodinâmicos aplicados aos ciclos de Carnot e Stirling / Erison Bellese Durante ; orientador, Luís Mauro Moura. -- 2017
95 f. : il.; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná,
Curitiba, 2017
Bibliografia: f. 93-95

1. Engenharia mecânica. 2. Circuitos elétricos. 3. Máquinas térmicas. 4.
Termodinâmica. 5. Queima de gases. I. Moura, Luís Mauro.
II. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD 20. ed. – 620.1

TERMO DE APROVAÇÃO

Erison Bellese Durante

Analogia Elétrica de Ciclos Termodinâmicos Aplicados aos Ciclos de Carnot e Stirling

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

S-bj-co

Prof. Dr. Saulo Finco
CTI Renato Archer

Velásquez

Prof. Dr. José Antonio Andrés Velásquez Alegre
UTFPR

Luís Mauro Moura

Prof. Dr. Luís Mauro Moura
PUCPR, Orientador



Curitiba, 28 de agosto de 2017

AGRADECIMENTOS

Ao Deus criador do universo e de todas as coisas, meu Senhor e meu Deus. A ti meu reconhecimento, respeito e minha adoração.

A minha Mãe Wal Bellese Durante que sempre fez e continua fazendo tudo por mim.

Ao meu pai Mario Durante (*In memoriam*), que sempre fez tudo por mim.

A minha esposa Eleni Durante, por tanta dedicação, apoio e carinho.

Aos amigos Marno Iockheck e Saulo Finco, pelos conhecimentos passados, pela amizade e dedicação.

Ao professor Luís Mauro Moura, meu grande respeito pela sua orientação e amizade, evidenciando sua dedicação e seu profissionalismo.

A PUCPR (Pontifícia Universidade Católica do Paraná), que me proporcionou realizar este estudo.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) que financiou esta pesquisa de estudo.

RESUMO

Este trabalho compreende no desenvolvimento de circuitos elétricos construídos de maneira tal que sirvam para demonstrar a existência de analogia entre as grandezas elétricas e mecânicas em máquinas térmicas.

Demonstra-se de forma matemática e numérica, as analogias entre as grandezas mecânicas e elétricas, que podem ser utilizadas em substituição analogamente para estudos e desenvolvimentos.

Para análise foram escolhidos os ciclos termodinâmicos de Carnot e Stirling.

A máquina térmica Stirling ideal trabalha em ciclos em circuito fechado e em câmaras de gás em recipiente fechado, operando com fonte quente e fria externas alternadamente. Não acontece neste caso a fagulha ou outro tipo de ignição para que ocorra a queima do gás, como motores convencionais Otto, Diesel, e outros, mas sim pelo aquecimento e resfriamento do gás através dessas fontes externas a essas câmaras.

O estudo demonstra que o uso desta analogia permite trabalhar com mais facilidades, com menores custos, com menor tempo e também com menos outros recursos. Também mostra que através deste método de analogia, poder se ter uma melhor eficiência e melhorias para o desenvolvimento das máquinas mecânicas, além de se ter um melhor entendimento do ciclo termodinâmico para a construção de máquinas térmicas operando por estes ciclos.

Assim, a existência de analogia permite a construção de um circuito elétrico que seja de funcionamento análogo aos ciclos termodinâmicos de Carnot e Stirling.

Através de simulações numéricas em condições definidas de temperatura, perdas e características do regenerador, são apresentados resultados de comparação da analogia elétrica aplicada ao ciclo Stirling.

PALAVRAS CHAVE

Circuitos elétricos.

Analogias entre grandezas elétricas e mecânicas.

Maquinas térmicas.

Ciclos termodinâmicos de Carnot e Stirling.

Ciclos em circuito fechado

Câmeras de gás em recipiente fechado.

Fontes externas.

Eficiência e melhorias para o desenvolvimento.

Melhor entendimento.

Simulações numéricas.

ABSTRACT

This work includes the development of electrical circuits constructed in such a way as to demonstrate the existence of an analogy between electrical and mechanical magnitudes in thermal machines.

The analogies between mechanical and electrical quantities are shown in mathematical and numerical form, which can be used analogously for studies and developments.

For these studies the thermodynamic cycles of Carnot and Stirling were chosen.

The ideal Stirling thermal machine works in closed circuit cycles and gas chambers in a closed container, operating alternately hot and cold outside sources. In this case there is no spark or other type of ignition for gas to burn, such as conventional Otto, Diesel, and other engines, but rather by the heating and cooling of the gas through these sources external to these chambers.

The study demonstrates that the use of this analogy allows working with more facilities, with lower costs, with less time and also with fewer resources. It also shows that through this method of analogy, it is possible to have a better efficiency and improvements for the development of the mechanical machines, besides to have a better understanding of the thermodynamic cycle for the construction of thermal machines operating by these cycles.

Thus, the existence of analogy allows the construction of an electric circuit that is functioning analogously to the thermodynamic cycles of Carnot and Stirling.

Through numerical simulations under defined conditions of temperature, losses and regenerator characteristics, results of comparison of the electric analogy applied to the Stirling cycle are presented.

KEYWORDS

Electric circuits.

Analogies between electrical and mechanical magnitudes.

Thermal machines.

Thermodynamic cycles of Carnot and Stirling.

Closed circuit cycles

Gas cameras in a closed container.

External sources.

Efficiency and improvements for development.

Better understanding.

Numerical simulations.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Modelo Elétrico do Ciclo de Carnot (Chen) | 22 |
| Figura 2 - Esfera Metálica do Ciclo Eletrostático de Gillispie e Pisano..... | 23 |
| Figura 3 - Diagrama Pressão x Volume de um Ciclo Termodinâmico..... | 30 |
| Figura 4 - Ciclo de Carnot com Transformações | 31 |
| Figura 5 - Diagrama Pressão x Volume de um Ciclo Otto | 33 |
| Figura 6 - Diagrama Pressão x Volume de um Ciclo Diesel | 35 |
| Figura 7 - Diagrama de uma Máquina a Vapor – Ciclo Rankine..... | 36 |
| Figura 8 - Diagrama Temperatura x Entropia de um Ciclo Rankine..... | 37 |
| Figura 9 - Composição da Máquina e Diagramas PV e TS de um Ciclo Brayton | 38 |
| Figura 10 - Diagrama Pressão x Volume de um Ciclo Stirling..... | 40 |
| Figura 11 - Posições do Pistão nas Fases de um Ciclo Stirling com Regenerador..... | 40 |
| Figura 12 - Fluxo de calor de uma máquina térmica ideal (teórica) e real | 42 |
| Figura 13 – Diagrama (Pressão x Volume) de um Ciclo Termodinâmico de Carnot e Diagrama (Potência Elétrica x tempo) de um Análogo Elétrico | 44 |
| Figura 14 – Diagrama (Temperatura x Entropia) de um Ciclo Termodinâmico de Carnot e Diagrama (Tensão Elétrica x Entropia Elétrica) de um Análogo Elétrico..... | 49 |
| Figura 15 - Analogia entre o Taxa de Transferência de Calor e a Corrente Elétrica..... | 51 |
| Figura 16 - Análogo elétrico de um Ciclo de Carnot – Expansão Isotérmica..... | 53 |
| Figura 17 - Diagrama Potência Elétrica x Tempo de um Análogo Elétrico – Expansão Isotérmica.... | 54 |
| Figura 18 - Análogo elétrico de um Ciclo de Carnot – Adiabáticas..... | 54 |
| Figura 19 - Diagrama Potência x Tempo de um Análogo Elétrico – Expansão e Compressão Adiabáticas..... | 55 |
| Figura 20 - Análogo elétrico de um Ciclo de Carnot – Compressão Isotérmica..... | 55 |
| Figura 21 - Diagrama Potência Elétrica x Tempo de um Análogo Elétrico – Compressão Isotérmica | 56 |
| Figura 22 - Análogo elétrico de um Ciclo Stirling – Expansão Isotérmica | 59 |
| Figura 23 - Análogo elétrico de um Ciclo de Stirling – Compressão Isotérmica..... | 60 |
| Figura 24 – Ciclo Termodinâmico Análogo | 64 |
| Figura 25 – Fator de Perda x Rendimento para as Simulações do Ciclo Stirling..... | 65 |
| Figura 26 - Esquema Elétrico Carnot 20V/10V | 66 |
| Figura 27 - Simulação Carnot 20V/10V | 67 |
| Figura 28 - Esquema Elétrico Carnot 40V/10V | 68 |
| Figura 29 - Simulação Ciclo de Carnot 40V/10V | 68 |
| Figura 30 – Diagrama Rendimento x V_q de um Ciclo de Carnot | 69 |
| Figura 31 - Esquema Elétrico Stirling 20V/10V (Grandes Perdas)..... | 70 |
| Figura 32 - Simulação Stirling 20V/10V (Grandes Perdas)..... | 70 |
| Figura 33 - Esquema Elétrico Stirling 20V/10V (Pequenas Perdas)..... | 72 |
| Figura 34 - Simulação Stirling 20V/10V (Pequenas Perdas)..... | 72 |
| Figura 35 - Esquema Elétrico Stirling 40V/10V (Grandes Perdas)..... | 73 |
| Figura 36 - Simulação Stirling 40V/10V (Grandes Perdas)..... | 74 |
| Figura 37 - Esquema Elétrico Stirling 40V/10V (Pequenas Perdas)..... | 75 |
| Figura 38 - Simulação Stirling 40V/10V (Pequenas Perdas)..... | 75 |
| Figura 39 – Diagrama Rendimento x V_q de um Ciclo Stirling (Pequenas e Grandes Perdas) | 77 |
| Figura 40 - Esquema Elétrico Stirling 20V/10V (Grandes Perdas com Regenerador)..... | 78 |
| Figura 41 - Simulação Stirling 20V/10V (Grandes Perdas com Regenerador)..... | 79 |
| Figura 42 - Potência Motor Stirling 20V/10V (Grandes Perdas sem Regenerador) | 79 |

| | |
|--|----|
| Figura 43 - Potência Motor Stirling 20V/10V (Grandes Perdas com Regenerador)..... | 80 |
| Figura 44 - Esquema Elétrico Stirling 20V/10V (Peq. Perdas com Regenerador Eficiente)..... | 80 |
| Figura 45 - Simulação Stirling 20V/10V (Peq. Perdas com Regenerador Eficiente)..... | 81 |
| Figura 46 - Esquema Elétrico Stirling 20V/10V (Peq. Perdas com Regenerador Fraco)..... | 82 |
| Figura 47 - Simulação Stirling 20V/10V (Peq. Perdas com Regenerador Fraco)..... | 82 |
| Figura 48 – Diagrama Rendimento x V_q de um Ciclo Stirling (Com e Sem Regenerador)..... | 84 |
| Figura 49 – Rendimento x Fator de Perda (FP) Regenerador Análogo Stirling..... | 84 |
| Figura 50 - Regenerador Pequenas Dimensões Stirling..... | 86 |
| Figura 51 – Diagrama Coeficiente de transferência de calor por convecção x Constante de tempo térmica..... | 86 |
| Figura 52 – Diagrama Capacitância x Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção..... | 87 |
| Figura 53 - Aumento de Potência x Frequência [Hz] Regenerador Análogo Stirling..... | 88 |
| Figura 54 – Variação da Potência x Rotação de um Regenerador Stirling..... | 89 |
| Figura 55 – Diagrama Resistência x Frequência para o Regenerador Análogo Stirling..... | 90 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Fases Ciclo Eletrostático x Fases Ciclo de Carnot..... | 24 |
| Tabela 2 - Quadro comparativo entre a Termodinâmica e a Máquina Eletrostática..... | 25 |
| Tabela 3 - Quadro comparativo entre os Ciclos de Carnot e Stirling..... | 41 |
| Tabela 4 - Quadro comparativo das analogias entre as partes mecânicas e elétricas..... | 52 |
| Tabela 5 - Quadro comparativo das analogias entre as grandezas mecânicas e elétricas..... | 63 |
| Tabela 6 - Simulações Realizadas..... | 65 |

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

| Símbolo | Definição | Unidade |
|----------------|---------------------------------------|-------------------------|
| η | Rendimento | Adimens. |
| C | Capacitância | [F] |
| c_p | Calor específico a pressão constante | [J/(kg.K)] |
| c_v | Calor específico a volume constante | [J/(kg.K)] |
| E | Energia | [J] |
| Fp | Fator de Perda | Adimens. |
| H | Entalpia | [J] |
| h | Coeficiente de transferência de calor | [W/(m ² .K)] |

| | | |
|----------|------------------------------------|----------------------|
| I | Corrente elétrica | [A] |
| M | Massa molar | [g/mol] |
| n | Número de mol | [mol] |
| P | Pressão | [Pa] |
| Pt | Potência | [W] |
| q | Taxa de transferência de calor | [W] |
| Qe | Carga elétrica | [C] |
| Q | Transferência de energia térmica | [J] |
| R | Constante universal dos gases | [J/(mol.K)] |
| R | Resistencia elétrica | [Ω] |
| ρ | Massa específica | [kg/m ³] |
| S | Entropia | [J/K] |
| Tq, T1 | Temperatura da fonte quente | [K] |
| Tf, T2 | Temperatura da fonte fria | [K] |
| U | Energia interna do sistema | [J] |
| V | Volume | [m ³] |
| Vcc | Tensão elétrica | [V] |
| W | Trabalho | [J], [N.m] |
| γ | Razão de calores específicos cp/cv | adimens. |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 13 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 2.1 CICLO STIRLING..... | 17 |
| 2.2 ANALOGIA DE CICLOS TERMODINÂMICOS COM CIRCUITOS ELÉTRICOS..... | 21 |
| 3. CONCEITOS E FUNDAMENTOS..... | 26 |
| 3.1 TERMODINÂMICA | 26 |
| 3.1.1 Entropia e Entalpia..... | 26 |
| 3.1.2 Transformações Termodinâmicas..... | 27 |
| 3.1.3 Ciclos Fechados e Abertos | 27 |
| 3.1.4 Processos Irreversíveis e Reversíveis..... | 27 |
| 3.1.5 Motores de Combustão Interna e Externa..... | 28 |
| 3.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS LEIS DA TERMODINÂMICA | 28 |
| 3.3 CICLO TERMODINÂMICO..... | 30 |
| 3.4 CICLO DE CARNOT | 31 |
| 3.5 MÁQUINAS TÉRMICAS EXISTENTES..... | 32 |
| 3.5.1 Ciclo Otto..... | 33 |
| 3.5.2 Ciclo Diesel..... | 34 |
| 3.5.3 Ciclo Rankine | 35 |
| 3.5.4 Ciclo Brayton..... | 38 |
| 3.5.5 Ciclo Stirling..... | 39 |
| 4. ANÁLOGO ELÉTRICO | 44 |
| 5. DEMONSTRAÇÃO DE ANALOGIA ENTRE OS CIRCUITOS ELÉTRICOS E UMA MÁQUINA TÉRMICA DE CARNOT | 52 |
| 5.1 DEMONSTRAÇÃO TEÓRICA DA ANALOGIA ELÉTRICA PARA O CICLO DE CARNOT..... | 52 |
| 5.2 DEMONSTRAÇÃO TEÓRICA DA ANALOGIA ELÉTRICA PARA O CICLO STIRLING | 58 |
| 6. DEMONSTRAÇÃO PRÁTICA DA ANALOGIA ELÉTRICA COM A MECÂNICA (SIMULAÇÕES ELÉTRICAS)..... | 64 |
| 6.1 SIMULAÇÕES PARA VERIFICAÇÃO DO ANÁLOGO ELÉTRICO PARA O CICLO DE CARNOT..... | 66 |
| 6.1.1 Simulação Carnot 20/10V..... | 66 |
| 6.1.2 Simulação Carnot 40/10V..... | 67 |
| 6.2 SIMULAÇÕES PARA VERIFICAÇÃO NA PRÁTICA DO ANÁLOGO ELÉTRICO PARA O CICLO STIRLING... | 69 |
| 6.2.1 Simulação Stirling 20/10V – Grandes Perdas | 69 |
| 6.2.2 Simulação Stirling 20/10V – Pequenas Perdas | 71 |
| 6.2.3 Simulação Stirling 40/10V – Grandes Perdas | 73 |
| 6.2.4 Simulação Stirling 40/10V – Pequenas Perdas | 75 |
| 6.2.5 Simulações com Regenerador Stirling | 77 |
| 6.2.5.1 Simulação Stirling 20/10V - Grandes Perdas com Regenerador..... | 77 |
| 6.2.5.2 Simulação Stirling 20/10V - Pequenas Perdas com Regenerador | 80 |
| 6.3 REGENERADOR STIRLING ANÁLOGO ELÉTRICO | 85 |
| 6.4 AUMENTO DE POTÊNCIA DE UM REGENERADOR EM DIFERENTES FREQUÊNCIAS DE OPERAÇÃO | 88 |
| 7. CONCLUSÃO | 91 |
| 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 93 |

1. INTRODUÇÃO

A partir do desenvolvimento industrial, com o aparecimento dos motores, o homem desenvolveu automóveis, trens, navios, aviões, submarinos, e outros, que até este momento tiveram como elemento motor, basicamente, o motor de combustão interna.

A questão essencial sempre foi o de se conseguir motores com maior eficiência e menor consumo. Com o passar do tempo com a tecnologia se desenvolvendo cada vez mais rápido, na mecânica com programas de desenvolvimento 3D e simuladores cada vez mais sofisticados, na eletrônica passa-se a ter instrumentações melhores e cada vez mais aprimoradas, sendo assim, portanto desta maneira, mais e mais se consegue ter um motores cada vez melhores, com menores desgastes, consumos e também maiores rendimentos.

A seguir será feito um breve relato da história, contando sobre e como foram os desenvolvimentos dos principais motores e/ou seus ciclos termodinâmicos, mostrando a trajetória do início do primeiro ciclo até hoje, com o objetivo também de comparar com o funcionamento dos ciclos com os quais será tratado neste estudo.

Segundo USHER, A. P (1929), a história da máquina a vapor com o ciclo Rankine estende-se desde o século I A.C., quando foi descrito um motor a vapor pelo matemático grego Heron de Alexandria, denominado por “aeolipila”: era um motor de reação parecido com um foguete. Já nos séculos XVII e XVIII surgiram as primeiras turbinas a vapor, seguidas do digestor de Papin e do primeiro motor que usava pistões. O primeiro uso prático foi a bomba de água surgida em 1698. Em 1712 apareceu o primeiro motor a vapor com sucesso comercial, inventado por Thomas Newcomen. Este motor, bastante ineficiente, era apenas usado para bombear água.

Watt desenvolveu então, em 1769, um novo tipo de máquina, na qual o vapor era liberado para a atmosfera através da abertura de uma válvula, o que evitava as desvantagens da condensação do vapor por ação de um jato de água fria, dobrando a eficiência da máquina de Newcomen, sendo difundida rapidamente.

O ciclo de Carnot foi proposto em 1824 e consiste no ciclo ideal mais importante da termodinâmica até o momento. O físico francês Nicolas Leonard Sadi Carnot, estudando as possibilidades de transformação de calor em trabalho chegou ao desenvolvimento deste ciclo, o Ciclo de Carnot.

Concebido por Beau de Rochas em 1860, o ciclo Otto é o mais utilizado em veículos desde sua criação até os nossos dias. Foi construído no ano de 1866 por Nikolaus August Otto, um comerciante de nacionalidade Alemã nascido em Holzhausen an der Haid e interessado em ciências das mais diversas, que teve contato na época com outros inventores e cientistas que ao mesmo tempo e até antes de Otto já trabalhavam em projetos semelhantes. O motor de Otto obteve inúmeras vantagens em relação ao motor a vapor. Uma delas é o baixo peso, já que o motor a combustão interna não precisava de um reservatório de água para ser aquecido, muito menos um combustível para ser queimado e aquecer a água, sendo na época comum utilizar a lenha ou o carvão. Outra vantagem era o baixo consumo de combustível se comparado ao grande volume de lenha ou carvão utilizado em uma máquina a vapor. A potência dos motores de combustão interna ciclo Otto também superava, em eficiência e dimensões bem menores, a do motor a vapor. Apenas a pressão do vapor empurrava os pistões e bielas para gerar força e movimento rotativo enquanto no motor de ciclo Otto uma explosão de combustível, um poder térmico e um deslocamento de gases assumia o papel do vapor com muito mais eficiência, gerando maior potência.

Quanto a utilização de gasolina, que antes de ser empregada nos motores era um subproduto do petróleo descartado, passou a ser um combustível com maior poder de explosão, alimentando os motores. O motor de combustão interna de ciclo Otto com todas essas vantagens, sendo mais leve e compacto oferecendo maior versatilidade em comparação com os motores a vapor, logo se consagrou como a força motriz que se estenderia até os dias atuais nas mais diferentes aplicações que pudesse servir com a sua força de trabalho ao homem. Os automóveis, as embarcações, os ônibus, os caminhões, as máquinas de trabalho rural e de canteiros de obras, assim como na indústria em geral e até mesmo na aviação utilizam ainda o princípio de funcionamento, em motores de combustão interna, de mais de 150 anos atrás.

O motor funcionando no ciclo Brayton, foi desenvolvido por George Brayton, em meados de 1870. O ciclo Brayton foi usado em alguns dos primeiros motores de combustão interna utilizados para entregar força motriz. Atualmente é o ciclo utilizado nas turbinas propulsoras e de geração a gás.

Em 23 de fevereiro de 1893, o engenheiro alemão Rudolf Diesel recebe a patente para seu motor de autoignição trabalhando no ciclo denominado Diesel. Entretanto ele foi implementado somente no começo de 1897, quando foi construído o primeiro motor diesel do

mundo. Para aquela época, foi considerado com um alto grau de rendimento (um verdadeiro recorde), conseguia-se aproveitar para o movimento um quarto da energia do combustível. O motor diesel passou a ser largamente usado na indústria de construção naval, automobilística e aeronáutica (na época, dirigíveis). O motor diesel se destaca ainda hoje pela sua economia de combustível.

O ciclo Stirling, foi inventado por Robert Stirling, um clérigo escocês, que nasceu a 25 de Outubro de 1790, em Cloag Farm. Em 1818, o primeiro motor Stirling foi construído para bombear água em uma pedreira e, ao longo dos anos, foi aperfeiçoado, sendo que em 1843 foi utilizado para mover máquinas numa fundição. De concepção simples e elegante do engenho de Stirling foi explicada em 1850 e, em 1950, Rolf Meijer, batizou este motor como “Motor de Stirling”, generalizando todos os engenhos regenerativos do circuito e com aquecimento externo. Para além destas vantagens que a invenção proporcionou, é também importante citar que este motor contém um regenerador ou economizador que permite obter uma eficiência superior ao dos motores de ciclo Otto, diesel e máquinas a vapor.

Atualmente os estudos estão concentrados em ciclos termodinâmicos com menores custos de desenvolvimento, menores consumos de energia e com maiores rendimentos. Serão mostrados na revisão bibliográfica alguns trabalhos de pesquisas e desenvolvimentos, onde o ciclo Stirling está sendo intensamente estudado e é onde tem se conseguido os melhores resultados neste sentido. Portanto é um ciclo que tem um grande potencial de vir a ser utilizado em um futuro bem próximo em decorrência da enorme quantidade de estudos e desenvolvimentos por atingirem essas características em uma ampla faixa de operação.

Existe pouco material na literatura e publicações sobre o assunto de analogia elétrica com ciclos termodinâmicos, que será comentado na revisão bibliográfica, mas nenhum traz uma visão completa e comprobatórias análises que demonstram essa existência. O mais interessante é que até Carnot tinha a ideia da analogia da eletricidade com o seu ciclo termodinâmico.

O trabalho que será desenvolvido aqui é de um estudo da analogia existente entre as grandezas físicas mecânicas e as grandezas físicas elétricas, com o intuito de que após serem demonstradas essas analogias, com a construção de circuitos eletrônicos análogos a máquinas térmicas operando em ciclo termodinâmico, possa vir a ajudar a ter uma melhor compreensão dos processos, e então a partir deste ponto, vir a ser utilizada esta técnica para estudos e também para ajudar nos desenvolvimentos de motores, devido a sua fácil construção e

entendimento como também dos baixos custos para a sua utilização. Esta metodologia será aplicada mais especificamente no ciclo Stirling, o qual se tem o interesse de desenvolvê-lo tecnologicamente, em função de sua alta eficiência, embora ainda com pouco uso comercial atualmente.

Este estudo ganha relevância com o surgimento de novas máquinas térmicas, onde pode haver a independência do ciclo termodinâmico do ciclo mecânico, exigindo assim adição de robótica para controle da operação do motor.

Assim se for construído um modelo elétrico análogo ao modelo mecânico, fica simplificado o desenvolvimento do sistema de controle eletrônico por simulação elétrica. De outra forma seria necessário a simulação multifísica que é mais complexa, morosa e conseqüentemente mais custosa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ciclo Stirling

Desde sua concepção em 1818, o ciclo Stirling tem sido aprimorado. Por se tratar de um ciclo de alto rendimento térmico, necessita ainda de aperfeiçoamento tecnológico. O motor Stirling é tanto na prática como na teoria um dispositivo de funcionamento simples, , teoricamente, confiável e seguro, que foi reconhecido por todo o século seguinte após a sua invenção por Robert Stirling em 1816. O motor opera em um ciclo termodinâmico fechado, o qual é reversível. Hoje os sistemas baseados no ciclo de Stirling estão sendo pouco usados comercialmente, porém encontra-se algumas aplicações como a bomba de calor, a refrigeração criogênica e liquefação do ar. Os ciclos Stirling continuam a ser objeto de pesquisa e desenvolvimento por seu potencial rendimento.

Park e Lee (1993), neste artigo os autores aproximam os fenômenos de transporte em um regenerador de motores Stirling para auxiliar seu design prático. As taxas de fluxo de massa são simplificadas por uma função de onda quadrada e as variações de pressão, por uma função de dente de serra com uma diferença de fase. As soluções analíticas aproximadas obtidas neste estudo concordam bem com as soluções numéricas disponíveis. Usando as soluções aproximadas dos fenômenos de transporte, as taxas de geração de entropia em um regenerador são formuladas e calculadas de forma analítica, que provêm de perda de condução axial, regeneração de calor imperfeita e queda de pressão devido à fricção do fluido. A geometria da taxa mínima de geração de entropia pode representar os ótimos parâmetros de projeto do regenerador.

Blank, Davis, e Wu (1994) conduziram uma análise de ótima potência em um ciclo Stirling endoreversível com regeneração perfeita. Um ciclo endoreversível é aquele em que os processos de transferência de calor externos são os únicos processos irreversíveis do ciclo. A potência máxima e a eficiência em potência máxima são obtidas para o ciclo com base em limites de temperatura mais altos e mais baixos. Esses resultados fornecem critérios adicionais para uso no estudo e avaliação de desempenho de motores Stirling.

Blank, e Wu (1995) conduziram um estudo a fim de aperfeiçoar a potência e a eficiência térmica em um motor Stirling. O modelo termodinâmico adotado é um ciclo Stirling regenerativo acoplado a uma fonte de calor e dissipador de calor por transferência de

calor radiante. Tanto a fonte de calor como o dissipador, são considerados como tendo infinitas taxas de capacidade de calor. As expressões foram obtidas para ótimas potências e eficiências, com o ciclo trabalhando tanto em temperaturas mais altas como também com temperaturas mais baixas.

Thombare e Verma (2008) afirmaram que o desempenho dos motores Stirling atende as demandas do uso eficiente de energia e segurança ambiental e, portanto, eles são um assunto de interesse muito grande atualmente. Por isso, o estudo e desenvolvimento de motores Stirling tem tido a atenção de muitos institutos científicos e empresas. O objetivo deste trabalho foi fornecer informações fundamentais e apresentar uma revisão detalhada dos últimos esforços feitos para o desenvolvimento do motor de ciclo de Stirling e técnicas utilizadas para a análise do motor. Muitas tentativas têm sido feitas por pesquisadores para construir e melhorar o desempenho de motores Stirling. Visto que para uma operação bem-sucedida de um sistema de motor com boa eficiência, é essencial e necessário um cuidadoso projeto de trocadores de calor, seleção adequada do mecanismo de comando e configuração do motor. Este estudo indicou que um motor de ciclo Stirling trabalhando com temperaturas relativamente baixas com o gás hélio como fluido de trabalho é um atrativo em potencial para os motores do futuro, especialmente movidos à energia solar e de baixa temperatura diferencial, motores Stirling verticais, de dupla ação, e configuração gama.

Timoumi, Tlili, e Nasrallah (2008) estudaram o aumento do desempenho de motores Stirling e analisaram sua operação, em um modelo Stirling, incluindo as perdas térmicas, e trabalharam para o aperfeiçoamento dos parâmetros de desempenho e design do motor. Este modelo tem sido testado usando os dados experimentais obtidos a partir de um protótipo de motor Stirling da General Motors, o GPU-3. O modelo também foi utilizado para investigar o efeito dos parâmetros geométricos e físicos sobre o desempenho do motor Stirling e determinar os parâmetros ideais de pressão operacional aceitável para o gás. Quando os parâmetros de projeto ideais são introduzidos no modelo, a eficiência do motor sobe de 39% para 51%. A potência do motor é acrescida em aproximadamente 20%, enquanto que no motor a pressão média aumenta levemente.

Hu, Zhong Jun, [Li, Zheng Yu; Li Qing e Li Qiang] (2010) um ciclo termodinâmico transferindo calor e trabalho foi executado em motores termo-acústicos, quando os ressonadores acústicos substituem os componentes mecânicos em movimento dos motores térmicos tradicionais. Com base na integração progressiva da onda não estacionária e a

transferência de calor reversível, teoricamente os motores Stirling termo acústicos poderiam alcançar 70% da eficiência de Carnot, contando-se com a energia nos ressonadores. Salienta-se de que houve um erro na avaliação da eficiência nas literaturas precedentes. Mais de 70% da produção de energia acústica foi consumida pelo ramo lateral do ressonador, que era essencial para a configuração da construção de um motor Stirling termo acústico. O resultado foi em que na melhor das hipóteses, com os vários testes feitos, na melhor das configurações, a eficiência chegou a no máximo 10% a mais sobre os motores Stirling convencionais. Os motores Stirling termo-acústicos, trabalharam de uma forma mais eficaz quando foi eliminado o ramo lateral do ressonador. Para conseguir uma melhor potência e um melhor rendimento, os motores termo acústicos de ondas estacionárias levaram vantagem sobre os motores termo-acústicos de ondas não estacionárias.

Cullen, Barry e McGovern, Jim (2010) estudaram a viabilidade da utilização de um motor ciclo Stirling como um dispositivo de recuperação de calor dos gases de escape de um motor de combustão interna (ICE), operando em ciclo Otto, em um automóvel. O arranjo híbrido iria produzir um aumento de potência para o mesmo consumo de combustível quando comparado com o ICE sozinho. O estudo exigiu avaliação experimental das características de um motor de ciclo Otto e a modelagem matemática do motor de ciclo de Stirling com base nos parâmetros de ICE de desempenho de saída. Chegou-se a conclusão que esse sistema híbrido composto de um motor de ciclo Stirling aproveitando o calor gerado pelos gases de exaustão de um ICE no ciclo Otto, pode ter cerca de 30% a mais de potência.

Tursunbaev, Orda, Korobkov, e Semyannikov (2010) desenvolveram um protótipo de um motor Stirling de quatro cilindros construído com um receptor de calor do fluxo radiante solar concentrado e com uma unidade de plataforma cilíndrica. Nos testes realizados foram feitos esforços para aperfeiçoar as unidades individuais do motor. Os testes foram conduzidos no modo de arrefecimento do sistema e no modo de funcionamento do motor com uma câmara de combustão de gás natural. Os resultados obtidos demonstraram que a eficiência do motor aumentou.

Puech, e Tishkova (2011) apresentaram uma investigação teórica sobre a análise termodinâmica de um motor Stirling com variações lineares e senoidais do volume. O regenerador em um motor Stirling é um trocador de calor interno que permite alcançar melhor eficiência. Utilizou-se um modelo isotérmico para analisar o trabalho e o calor armazenado no regenerador durante um ciclo completo. Mostrou-se que a eficiência do motor

com uma regeneração perfeita não depende do volume morto do regenerador, mas esse volume morto amplifica fortemente o efeito de regeneração imperfeito. Uma expressão analítica para estimar a melhoria devido ao regenerador foi proposta, incluindo os efeitos combinados de volume morto e regeneração imperfeita. Isso pode ser usado na fase preliminar do processo de projeto do motor.

Cheng, Chin-Hsiang e Yang, Hang-Suin (2011)(a) fizeram um estudo destinado à análise teórica dos efeitos dos parâmetros geométricos sobre o eixo de trabalho dos motores Stirling. A combinação ótima do ângulo de fase com o curso do pistão levou a maximização do trabalho no eixo do motor, e foram obtidos sobre vários ensaios em diferentes condições. Efeitos da eficácia do mecanismo, a relação de volume morto, e a variação de temperatura sobre o eixo de trabalho do motor, bem como a combinação ótima do ângulo de fase e a curso do pistão, foram avaliados. A análise teórica do desempenho em três tipos de motores Stirling, tipos α , β , e γ , foi também realizada, bem como uma comparação entre estes três tipos de motores. Em geral, o motor do tipo γ deveria ter o mecanismo bem mais eficaz de modo a entregar o maior trabalho. Os resultados mostram que para os casos particulares considerados neste estudo, o motor Stirling do tipo β , produziu mais trabalho no eixo do motor que o motor do tipo γ .

Cheng, Chin-Hsiang e Yang, Hang-Suin (2011)(b) apresentaram neste trabalho o estudo da relação entre a velocidade de funcionamento e a potência do eixo dos motores Stirling. As variações de temperatura na expansão e os espaços de compressão, bem como a saída de potência do eixo correspondente às diferentes velocidades de funcionamento foram investigadas usando um modelo transiente. Os efeitos dos principais parâmetros operacionais sobre a potência foram estudados. Os resultados mostraram que à medida que a velocidade de funcionamento é aumentada, a diferença de temperatura entre os espaços de expansão e de compressão foi reduzida e, como resultado, o rendimento diminuiu. Quando a velocidade de operação foi elevada, a potência de saída do eixo atingiu o máximo a uma velocidade de operação crítica. Acima da velocidade crítica de operação, a potência de saída do eixo diminuiu. Além disso, ou pela diminuição das resistências térmicas ou pelo aumento nas eficiências do regenerador, levou a um aumento da potência do motor.

Toghyani, Kasaeian e Ahmadi (2014) afirmaram que nos últimos anos houve notável atenção para o motor Stirling devido às suas visíveis vantagens, como por exemplo, o fato de poder usar biomassa, combustíveis fósseis e energia solar como fonte de calor. Cada vez é

maior o número de estudos que está sendo realizados em motores Stirling. Neste estudo, a diminuição da eficiência e a perda de potência devido à queda de pressão nos permutadores de calor são melhoradas para um sistema Stirling usando análises adiabáticas não ideais e por um segundo método chamado “Seleção de Algoritmo Genético Não Dominado”. Foram escolhidos três métodos de melhores resultados e comparados entre si de modo a poder ser tomada a decisão do melhor entre eles.

2.2 Analogia de Ciclos Termodinâmicos com Circuitos Elétricos

Existe pouca bibliografia na literatura referente a comparação dos Ciclos termodinâmicos com a eletricidade. Na maioria dos casos onde foi feito algum tipo de estudo nesse sentido, a demonstração é apenas teórica, nada foi comprovado na prática, ou seja, não foram feitos protótipos ou simulações comprovando a existência dessa analogia com estes modelos. Neste presente estudo de mestrado, a proposta é a comprovação de analogia entre os motores funcionando com os ciclos de Carnot e Stirling e circuitos elétricos simulando estes ciclos, através de cálculos e também pelas simulações elétricas.

Feynman, Leighton, e Sands (1977) não chegaram a apresentar um modelo análogo elétrico, mas para a melhor compreensão do leitor compararam a pressão P com a tensão elétrica V_{cc} e a energia armazenada Q na câmara com a energia elétrica Q_e armazenada em uma bateria elétrica para o Ciclo de Carnot.

Chen (1989) apresentou um modelo bem simples, comparando-o ao Ciclo de Carnot, com um dispositivo simulando um capacitor de placa móvel conforme a Figura 1.

V_1 é a tensão elétrica simulando a fonte quente;

V_2 é a tensão elétrica simulando a fonte fria;

S_1 e S_2 são chaves;

q_1 e q_2 são as carga elétricas;

C_1 e C_2 são capacitâncias.

Quando fechada a chave S1 então a tensão elétrica V_{cc} no capacitor é $V_1 = \frac{q_1}{C_1}$ e quando fechada a chave S2 então a tensão no capacitor é $V_2 = \frac{q_2}{C_2}$.

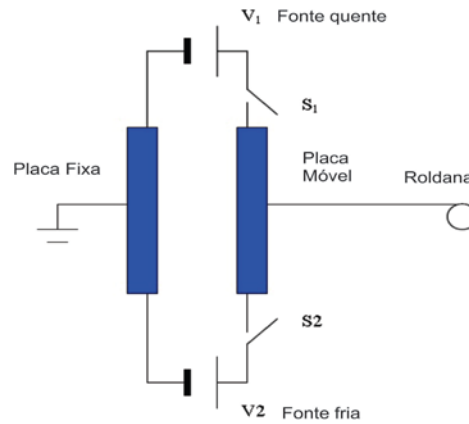


Figura 1 - Modelo Elétrico do Ciclo de Carnot (Chen)

Fonte: Chen, "The Physics Teacher", (1989).

Chen considerou a energia U_1 que entra no circuito elétrico, sendo igual à energia U_2 que sai, e conhecido que $dU = Vdq$, então:

$$U_1 = \oint V_1 dq = V_1 \oint dq = V_1 (q_2 - q_1) \quad (1)$$

E

$$U_2 = \oint V_2 dq = V_2 \oint dq = -V_2 (q_2 - q_1) \quad (2)$$

Fazendo-se

$$\frac{U_2}{U_1} = -\frac{V_2}{V_1} \quad (3)$$

Tem-se a equação do rendimento para esse modelo segundo Chen:

$$\eta = \frac{(U_1 + U_2)}{U_1} = 1 + \frac{U_2}{U_1} = 1 - \frac{V_2}{V_1} \quad (4)$$

Análogo à equação do rendimento de Carnot :

$$\eta = \frac{(T_1 - T_2)}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (5)$$

Organ (2010) menciona que é notável que ninguém tenha explorado os recursos paralelos entre o Ciclo Stirling e o circuito elétrico. Há algumas analogias convincentes entre o circuito elétrico e o circuito de gás da máquina de Stirling. Ambos têm efeitos dissipativos e efeitos capacitivos (armazenamento).

Gillispie e Pisano (2013) exploraram a ideia de que Sadi Carnot trabalhava com a hipótese da existência de analogia do seu ciclo com o circuito elétrico da bateria de Alessandro Volta. Eles compararam a teoria da termodinâmica com a teoria da eletricidade, fazendo uma analogia entre o modelo da Figura 2 de um ciclo eletrostático composto de uma esfera que dilata e contrai dentro de um campo elétrico entre dois capacitores carregados com tensões elétricas V_{cc} diferentes e constantes, e o ciclo de Carnot.

A seguir apresenta-se o modelo e os equacionamentos que estes autores utilizaram para essa analogia. A Figura 2 mostra uma esfera metálica que se dilata e se contrai entre dois capacitores carregados com tensões elétricas diferentes V_1 no capacitor A e V_2 no Capacitor B, onde $V_1 > V_2$.

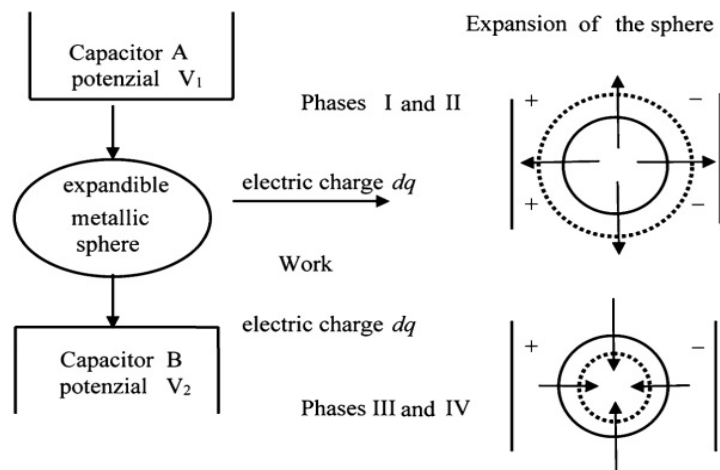


Figura 2 - Esfera Metálica do Ciclo Eletrostático de Gillispie e Pisano

Fonte: Gillispie e Pisano ,“Lazare and Sadi Carnot - History of Mechanism and Machine Science”, (2013)

Na tabela 1, apresentam-se as analogias entre as fases do Ciclo eletrostático de Gillispie e Pisano com as fases do Ciclo de Carnot:

| FASES CICLO ELETROSTÁTICO | FASES CICLO DE CARNOT |
|--|--------------------------|
| 1ª Fase: No capacitor A o qual tem tensão elétrica V_1 constante, a esfera recebe carga elétrica Δq e expande devido às repulsões elétricas. | Transformação Isotérmica |
| 2ª Fase: Depois a esfera é isolada e continua expandindo até a tensão elétrica V_2 . | Transformação Adiabática |
| 3ª Fase: No capacitor B, a esfera se contrai pela tensão elétrica V_2 , transferindo Δq para ele. | Transformação Isotérmica |
| 4ª Fase: Depois a esfera é isolada, e continua a contração até atingir a tensão elétrica V_1 . | Transformação Adiabática |

Tabela 1 - Fases Ciclo Eletrostático x Fases Ciclo de Carnot

Fonte: Gillispie e Pisano, "Lazare and Sadi Carnot - History of Mechanism and Machine Science", (2013)

Ao se estabelecer de que os princípios elétricos são análogos aos princípios da termodinâmica, tem-se:

$$\frac{\frac{\Delta q \cdot V_2}{2}}{V_2} = \frac{\frac{\Delta q \cdot V_1}{2}}{V_1} \approx \frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1} \quad (6)$$

Onde Δq é a variação da carga elétrica e V_1 e V_2 são as tensões elétricas ou também chamadas de diferença de potencial V_{cc} .

E a equação da eficiência:

$$\eta = \frac{\frac{\Delta q \cdot (V_1 - V_2)}{2}}{\frac{\Delta q \cdot V_1}{2}} = \frac{(V_1 - V_2)}{V_1} \approx \frac{W}{Q_2} = \frac{(T_1 - T_2)}{T_1} \quad (7)$$

Algumas correspondências das grandezas da termodinâmica comparadas às grandezas elétricas feitas por esses autores podem ser vistas na tabela 2.

| | Termodinâmica | Máquina Eletrostática | |
|--|---------------------------------------|--|---|
| <i>Temperatura</i> | T_1, T_2 | V_1, V_2 | <i>Tensão Elétrica</i> |
| <i>ΔS – Variação de Entropia</i> | $2 \frac{Q}{T} = 2 \cdot \Delta S$ | $\frac{\Delta_q \cdot V}{2}$ | <i>Δ_q - Variação de Carga Elétrica</i> |
| <i>Q - Calor</i> | Q_1 | $\frac{\Delta_q \cdot V_1}{2}$ | <i>Análogo Calor Q_1</i> |
| <i>Q_2 – Entra Q_1 – Sai</i> | Q_2 | $\frac{\Delta_q \cdot V_2}{2}$ | <i>Análogo Calor Q_2</i> |
| <i>Trabalho</i> | W | $\frac{\Delta_q \cdot (V_1 - V_2)}{2}$ | <i>Análogo Trabalho</i> |
| <i>Rendimento Mecânico</i> | $\eta_\tau = \frac{(T_1 - T_2)}{T_1}$ | $\eta_{ME} = \frac{(V_1 - V_2)}{V_1}$ | <i>Rendimento Elétrico</i> |

Tabela 2 - Quadro comparativo entre a Termodinâmica e a Máquina Eletrostática

Fonte: Gillispie e Pisano ,“Lazare and Sadi Carnot - History of Mechanism and Machine Science”, (2013)

3. CONCEITOS E FUNDAMENTOS

3.1 Termodinâmica

Therme, significa calor e dynamis, significa potência, é o ramo da ciência que lida com a relação entre calor e outras formas de energia, incluindo trabalho.

Segundo Van Wylen (2003), a termodinâmica é a ciência da energia e da entropia. A termodinâmica é a ciência que trata do calor, do trabalho e daquelas propriedades das substâncias relacionadas ao calor e ao trabalho. A base da termodinâmica, como a de todas as ciências, é a observação experimental. Na termodinâmica, essas descobertas foram formalizadas através de leis básicas, conhecidas como zero, primeira, segunda e terceira leis da termodinâmica.

Segundo Cengel (2011), a termodinâmica pode ser definida como a ciência da energia. A energia pode ser considerada como a capacidade para provocar alterações. Uma das leis mais importantes e fundamentais da natureza é o princípio de conservação da energia.

3.1.1 Entropia e Entalpia

Entropia e Entalpia são grandezas fundamentais na termodinâmica.

Segundo Cengel (2011), a entropia pode ser vista como uma medida de desordem molecular ou aleatoriedade molecular. Quando um sistema se torna mais desordenado, as posições das moléculas são menos previsíveis e a entropia aumenta, por isso não é surpreendente que a entropia de uma substância seja mais baixa na fase sólida e maior no gás.

Variação de Entropia ΔS define-se por:

$$\Delta S = \oint \frac{\delta Q}{T} = 0 \quad (8)$$

Onde T é a temperatura e Q é a energia interna do sistema.

Entalpia absoluta ou simplesmente Entalpia, H, define-se por:

$$H = U + P.V \quad (9)$$

Onde: U é a energia interna do sistema, P é a pressão e V o volume do sistema.

3.1.2 Transformações Termodinâmicas

A seguir serão citadas algumas das transformações termodinâmicas mais comumente estudadas e utilizadas na termodinâmica:

- Transformação isobárica: é aquela em que, num processo termodinâmico, a pressão permanece constante durante o processo.

- Transformação isocórica: é aquela em que, num processo termodinâmico, o volume permanece constante durante o processo.

- Transformação isotérmica: é aquela em que, num processo termodinâmico, a temperatura permanece constante durante o processo.

- Transformação adiabática: é aquela em que, num processo termodinâmico, o processo ocorre sem perda ou ganho de calor.

- Transformação isentrópica: é aquela em que, num processo termodinâmico, um processo reversível adiabático ocorre a uma entropia constante.

- Transformação isentálpica: é aquela em que, num processo termodinâmico de um gás ideal, a entalpia permanece constante durante o processo.

3.1.3 Ciclos Fechados e Abertos

Nos ciclos fechados, o fluido de trabalho retorna para o estado inicial, no final do ciclo e reciclado. Ocorre o ciclo termodinâmico.

Nos ciclo abertos, o fluido de trabalho é renovado no final de cada ciclo, em vez de reciclado. Nesse ciclo não ocorre o ciclo termodinâmico.

3.1.4 Processos Reversíveis e Irreversíveis

Um processo reversível, para um sistema, e definido como aquele que, tendo ocorrido, pode ser invertido e depois de realizada esta inversão, não se notara algum vestígio no sistema e no meio.

Fatores que tomam um processo irreversível: Atrito, expansão não resistida ($W = 0$), transferência de calor com diferença finita de temperatura, corrente elétrica através de uma resistência, combustão, restrição no escoamento, etc.

3.1.5 Motores de Combustão Interna e Externa

Em motores de combustão externa, o calor é fornecido ao fluido de trabalho a partir de uma fonte externa, tal como um queimador, um poço geotérmico, um reator nuclear, uma fonte solar, etc.

Nos motores de combustão interna, isso é feito através da explosão do combustível dentro dos limites do sistema.

3.2 Considerações Sobre as Leis da Termodinâmica

São quatro as leis da termodinâmica, Lei Zero, Primeira, Segunda e Terceira. Estas leis definem grandezas físicas fundamentais (temperatura, energia e entropia), que caracterizam sistemas termodinâmicos.

Lei Zero da Termodinâmica: Segundo Cengel (2011), A lei zero da termodinâmica afirma que, se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro, eles estão em equilíbrio térmico uns com os outros.

Primeira Lei da Termodinâmica: Segundo Van Wylen (2003), a primeira lei da termodinâmica estabelece que, durante qualquer ciclo percorrido por sistema, a integral cíclica do calor é proporcional a integral cíclica do trabalho.

$$J \oint \delta Q = \oint \delta W \quad (10)$$

Onde J é um fator de proporcionalidade, Q é o calor e W o trabalho.

É chamada de lei da conservação de energia.

A primeira lei da termodinâmica estabelece que, para um sistema que efetua um ciclo, a integral cíclica do calor é igual a integral cíclica do trabalho. No entanto, a primeira lei não impõe nenhuma restrição quanto às direções dos fluxos de calor e trabalho.

Segunda Lei da Termodinâmica: Segundo Van Wylen (2003), existem dois enunciados clássicos da segunda lei, conhecidos como enunciado de Kelvin - Planck e enunciado de Clausius.

Enunciado de Kelvin - Planck: é impossível construir um dispositivo que opere num ciclo termodinâmico e que não produza outros efeitos além do levantamento de um peso e troca de calor com um único reservatório térmico. Esse enunciado estabelece que é impossível construir um motor térmico que opere segundo um ciclo que receba uma determinada quantidade de calor de um corpo a alta temperatura e produza uma igual quantidade de trabalho. A única alternativa é que alguma quantidade de calor deve ser transferida do fluido de trabalho a baixa temperatura para um corpo a baixa temperatura. Dessa maneira, um ciclo só pode produzir trabalho se estiverem envolvidos dois níveis de temperatura, e o calor ser transferido do corpo a alta temperatura para o motor térmico e também do motor térmico para o corpo a baixa temperatura. Isso significa que é impossível construir um motor térmico que apresente eficiência térmica igual a 100%.

Enunciado de Clausius: É impossível construir um dispositivo que opere, segundo um ciclo, e que não produza outros efeitos, além da transferência de calor de um corpo frio para um corpo quente.

Pode-se dizer que a segunda lei da termodinâmica (como qualquer outra lei da natureza) se fundamenta na evidência experimental. Todas as experiências já realizadas tem, direta ou indiretamente, confirmado a segunda lei da termodinâmica. A base da segunda lei é, portanto, a evidência experimental. A outra observação é que esses dois enunciados da segunda lei são equivalentes. Os dois enunciados são equivalentes se a verdade de cada um implicar na verdade do outro, ou se a violação de cada um implicar na violação do outro.

Terceira Lei da Termodinâmica: Segundo Van Wylen (2003), esta lei trata da entropia de substâncias a temperatura zero absoluto e em essência estabelece que a entropia de um cristal perfeito, é zero a temperatura zero absoluto.

3.3 Ciclo Termodinâmico

Um ciclo termodinâmico se constitui de qualquer série de processos termodinâmicos onde no transcurso dos processos o sistema regresse a seu estado inicial.

Um fato característico dos ciclos termodinâmicos é que a lei da conservação de energia, que afirma que a soma de calor e trabalho recebidos pelo sistema deve ser igual à soma de calor e trabalho realizados pelo sistema.

Num ciclo termodinâmico, o trabalho (W) realizado é, por definição, equivalente à área interna de um ciclo num diagrama pressão x volume conforme a Figura 3:

$$W = \oint P \cdot dV \quad (11)$$

O trabalho equivale à diferença entre o calor absorvido e o calor dissipado no ciclo (considerando Q_{1-4} e Q_{2-3} adiabáticos):

$$W = Q_1 - Q_2 \quad (12)$$

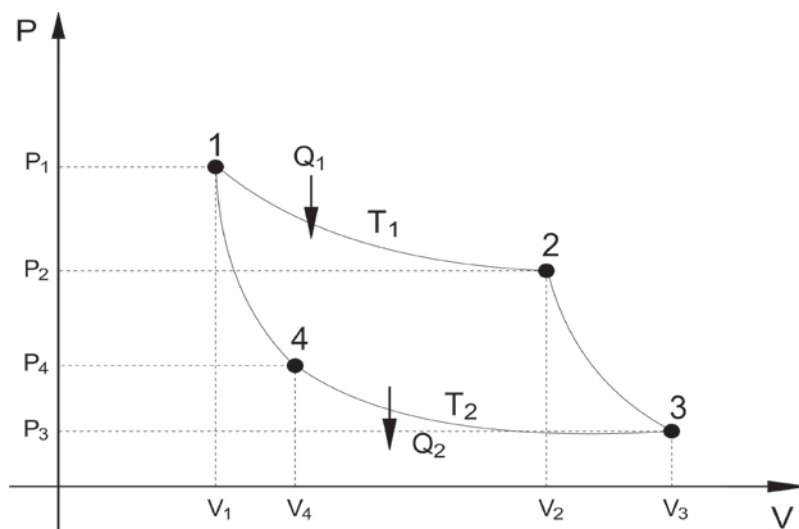


Figura 3 - Diagrama Pressão x Volume de um Ciclo Termodinâmico

O rendimento é o principal parâmetro que caracteriza um ciclo termodinâmico e é definido como o trabalho líquido, obtido dividido pelo calor gasto no processo, em um mesmo tempo de ciclo completo, se o processo é contínuo.

$$\eta = \frac{W}{Q} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (13)$$

3.4 Ciclo de Carnot

Segundo Van Wylen (2003), o ciclo de Carnot tem esse nome em homenagem ao engenheiro francês Nicolas Leonard Sadi Carnot (1796-1832) que estabeleceu as bases da segunda lei da termodinâmica em 1824.

Segundo Cengel (2011), é provável que o ciclo reversível mais conhecido seja o ciclo Carnot, proposto em 1824 pelo engenheiro francês Sadi Carnot. A máquina térmica teórica que opera no ciclo de Carnot é chamada de máquina térmica de Carnot, cujo ciclo consiste em quatro processos reversíveis, dois isotérmicos e dois adiabáticos. Assim, conforme a Figura 4 pode se ver estas quatro transformações:

- Primeira transformação: Expansão isotérmica do gás a uma temperatura T_1 , durante a qual recebe uma quantidade de calor Q_1 ;
- Segunda transformação: Expansão adiabática (não há trocas de calor) com descida de temperatura de T_1 para T_2 ;
- Terceira transformação: Compressão isotérmica à temperatura T_2 com dissipação de uma quantidade de calor Q_2 ;
- Quarta transformação: Compressão adiabática com subida da temperatura até ao estado inicial T_1 .

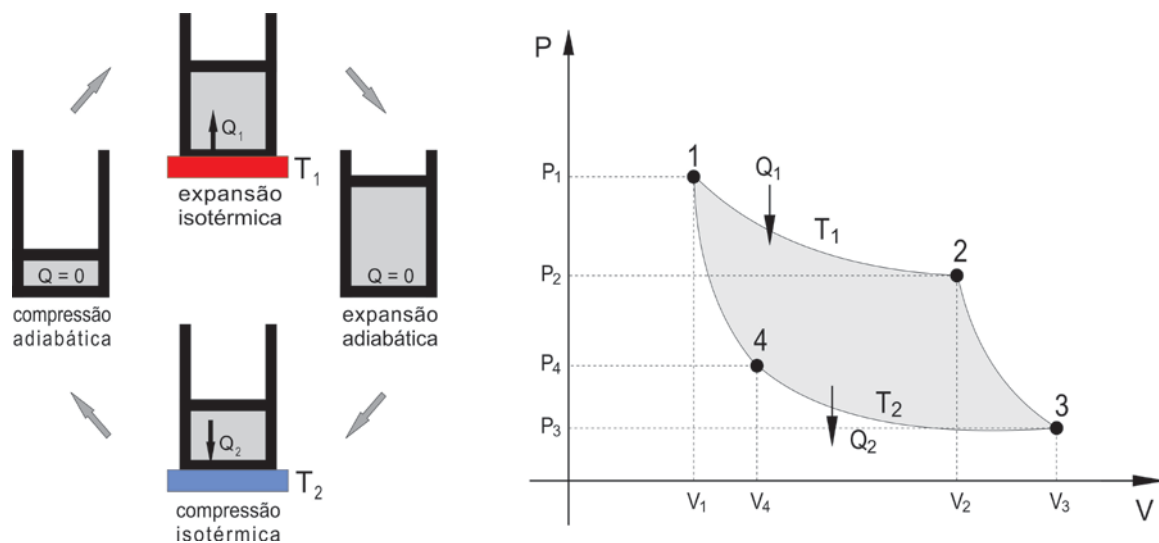


Figura 4 - Ciclo de Carnot com Transformações

Pela 1ª. Lei, o trabalho W obtido neste ciclo é igual a $Q_1 - Q_2$ e o rendimento de qualquer máquina térmica reversível, de acordo com o princípio de Carnot, depende apenas do intervalo de temperaturas a qual ela trabalha.

Em qualquer máquina reversível, o rendimento η é o quociente entre o trabalho W e a quantidade de calor fornecida Q_1 , ou seja:

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{(Q_1 - Q_2)}{Q_1} \quad (14)$$

Da escala termodinâmica de temperaturas, vem que o rendimento é igual a:

$$\eta = \frac{(T_1 - T_2)}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (15)$$

Segundo o Teorema de Carnot, o rendimento da Máquina de Carnot é o máximo possível que uma máquina térmica apresenta quando trabalha entre duas temperaturas da fonte quente e da fonte fria.

3.5 Máquinas Térmicas Existentes

Atualmente na indústria, são vários os tipos de máquinas térmicas, as quais operam nos variados ciclos termodinâmicos. Relacionar-se-á aqui somente a título de conhecimento os ciclos termodinâmicos com seus rendimentos, sem se preocupar em explicar os detalhes de funcionamento de cada ciclo e nem tampouco como se chegou à formulação dos rendimentos, por não fazer parte do objetivo deste trabalho. O único entre eles que faz parte deste trabalho, o Ciclo Stirling, será estudado mais detalhadamente nos capítulos seguintes.

Os ciclos mais comuns são:

- Ciclo Otto: Motores a combustão com gasolina, álcool e GNV;
- Ciclo Diesel: Motores a combustão com diesel, diesel + gás;
- Ciclo Rankine: Motores a Vapor;
- Ciclo Brayton: Motores a combustão com querosene (turbinas de propulsão);
- Ciclo Stirling: Motores a combustão com fontes externas.

3.5.1 Ciclo Otto

Segundo Cengel (2011), o ciclo de Otto é um ciclo termodinâmico usado pelo funcionamento de motores de combustão interna. Foi definido por Alphonse Beau de Rochas e implementado com sucesso pelo engenheiro alemão Nikolaus Otto em 1876, e posteriormente por Étienne Lenoir e Rudolf Diesel. Para esta aplicação, é possível construir motores de quatro tempos mais eficientes e menos poluentes em comparação aos motores de dois tempos, apesar do maior número de partes móveis, maior complexidade, peso e volume, comparando motores de mesma potência.

O ciclo Otto ideal se constitui dos seguintes processos na figura 5:

- Processo 1-2 - Compressão isentrópica;
- Processo 2-3 - Adição de calor a volume constante;
- Processo 3-4 - Expansão isentrópica;
- Processo 4-1 - Retirada de calor a volume constante.

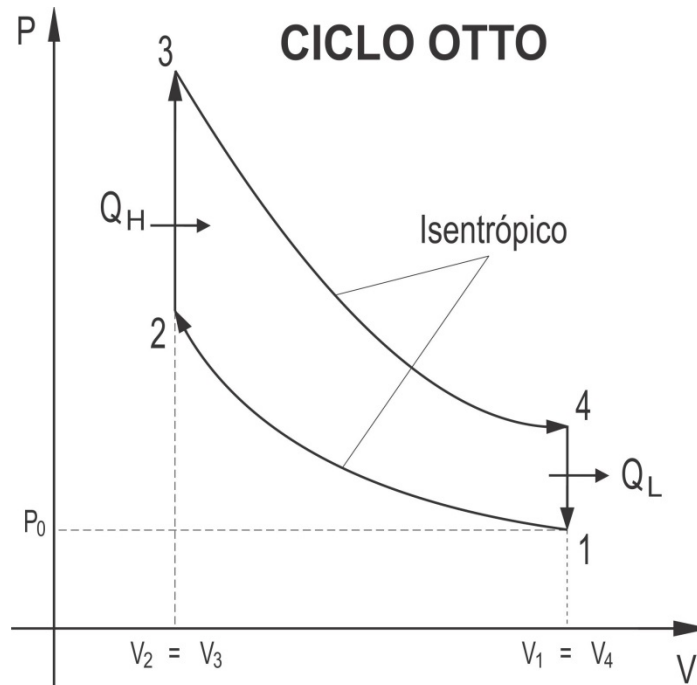


Figura 5 - Diagrama Pressão x Volume de um Ciclo Otto

O rendimento térmico do ciclo reversível é definido por:

$$\eta = 1 - \frac{1}{r_v^{\gamma-1}} \text{ (análise com base no ar frio)} \quad (16)$$

Onde:

$$r_v \text{ é a taxa de compressão volumétrica: } r_v = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$$

$$\gamma \text{ é razão de calores específicos } = \frac{c_p}{c_v} \approx 1,4 \text{ (ar temperatura ambiente).}$$

3.5.2 Ciclo Diesel

Segundo Cengel (2011), o ciclo Diesel é o ciclo ideal para as máquinas alternativas ECOM. O motor ECOM, proposto pela Rudolph Diesel na década de 1890, é muito similar ao mecanismo Otto estudado na última seção. A principal diferença consiste no método de iniciar a combustão. Nos motores de ignição comandada, também conhecidos como motores a gasolina, no ciclo Otto, a mistura ar-combustível é comprimida a uma temperatura abaixo da temperatura de ignição do combustível e o processo de combustão começa quando uma vela de ignição é acesa. Nos motores ECOM, também conhecidos como motores diesel, o ar é comprimido a uma temperatura superior à temperatura de ignição do combustível, e a combustão começa no contato quando o combustível é injetado neste ar quente. Em motores diesel, portanto, a vela de ignição e o respiro são substituídos por um injetor de combustível.

A Figura 06 mostra um diagrama PV para o ciclo Diesel ideal; em que P é a pressão e V é o volume. O ciclo Diesel ideal segue os quatro processos distintos:

- Processo 1-2 - Compressão isentrópica;
- Processo 2-3 - Adição de calor a pressão constante;
- Processo 3-4 - Expansão isentrópica;
- Processo 4-1 - Retirada de calor a volume constante.

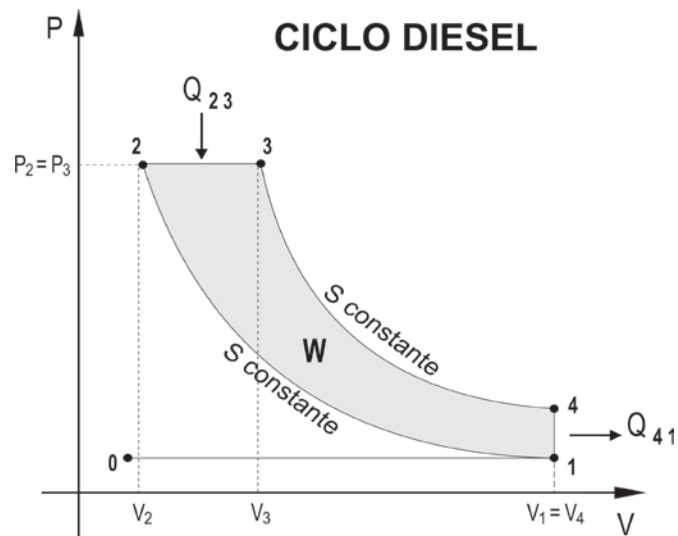


Figura 6 - Diagrama Pressão x Volume de um Ciclo Diesel

A eficiência térmica de um ciclo Diesel é dependente da taxa de compressão e a taxa de corte. Tem a seguinte fórmula:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \cdot \left(\frac{\alpha^{\gamma}-1}{\gamma(\alpha-1)} \right) \quad (17)$$

onde:

η_{th} é a eficiência térmica

α é taxa de corte $\frac{V_3}{V_2}$ (razão entre volume final e do começo para a fase de combustão)

r é a taxa de compressão $\frac{V_1}{V_2}$

γ é razão de calores específicos $= \frac{C_p}{C_v} \approx 1,4$ (ar temperatura ambiente).

3.5.3 Ciclo Rankine

Segundo Cengel (2011), o ciclo Rankine é o ciclo ideal para os ciclos de potência de vapor. A água entra na bomba no estado 1 como um líquido saturado e é condensada isentropicamente até a pressão de operação da caldeira. A temperatura da água aumenta

ligeiramente durante este processo de compressão isentrópica devido a uma ligeira diminuição no volume específico da água.

A distância vertical entre os estados 1 e 2 no diagrama de T-s é exagerada consideravelmente para maior clareza. A água entra na caldeira como um líquido comprimido no estado 2 e sai como vapor superaquecido no estado 3. A caldeira é basicamente um grande permutador de calor onde o calor que se origina nos gases de combustão, reatores nucleares ou outras fontes, É transferido para a água essencialmente a pressão constante. A caldeira, juntamente com a seção (superaquecedor) onde o vapor está superaquecido, é chamada de gerador de vapor. O vapor superaquecido no estado 3 entra na turbina onde é expandido isentropicamente e produz trabalho girando o eixo conectado a um gerador elétrico. A pressão e a temperatura do vapor diminuem durante este processo para os valores no estado 4, onde o vapor entra no condensador. Neste estado, o vapor geralmente é um vapor húmido com alta qualidade. O vapor é condensado a pressão constante no condensador, que é basicamente um grande permutador de calor, rejeitando o calor em direção a um meio de refrigeração, como um lago, rio ou atmosfera. O vapor sai do condensador como um líquido saturado e entra na bomba, completando o ciclo.

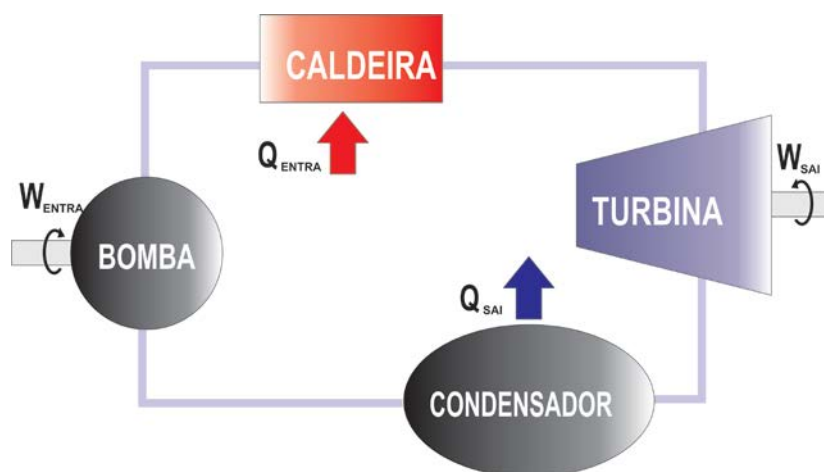


Figura 7 - Diagrama de uma Máquina a Vapor – Ciclo Rankine

Tem o nome de seu inventor, William John Macquorn Rankine, escocês, professor da Universidade de Glasgow. O ciclo Rankine descreve o processo de geração de energia, pelo qual os motores a vapor são utilizados para geração de energia térmica. Atualmente as fontes de calor usadas nestas usinas são geralmente fissão nuclear ou da queima de combustíveis

fósseis, como carvão, gás natural e petróleo. Também existem trabalhos para operar o ciclo Rankine com temperaturas menores: Rankine orgânico.

Existem quatro processos no ciclo de Rankine ideal:

Processo 1-2 - Compressão isentrópica em uma bomba;

Processo 2-3 - Adição de calor a pressão constante em uma caldeira;

Processo 3-4 - Expansão isentrópica em uma turbina;

Processo 4-1 - Retirada de calor a pressão constante em um condensador.

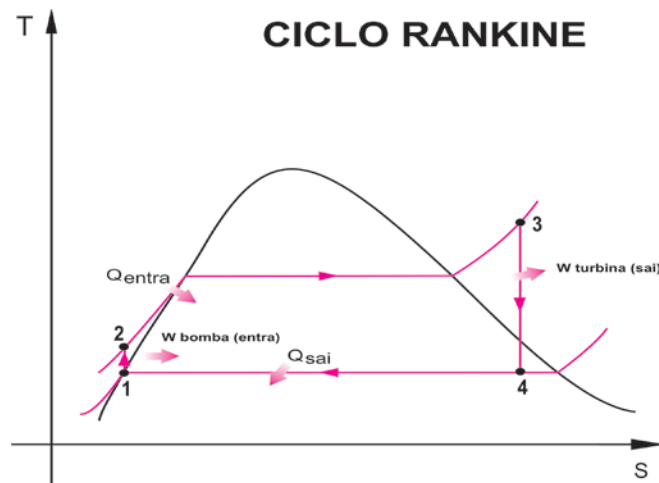


Figura 8 - Diagrama Temperatura x Entropia de um Ciclo Rankine

Num ciclo de Rankine ideal a bomba e turbina são consideradas isentrópicas, ou seja, a bomba e turbina não geram aumento de entropia e, por conseguinte, maximizam a capacidade de trabalho líquido. Processos de 1-2 e 3-4 seriam representados por linhas verticais no diagrama TS conforme a Figura 8.

Em geral a eficiência de um ciclo Rankine simples pode ser definido por:

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{W_{\text{turbina}} - W_{\text{bomba}}}{Q_{\text{entrada}}} \quad (18)$$

3.5.4 Ciclo Brayton

Segundo Cengel (2011), o ciclo de Brayton foi proposto pela primeira vez por George Brayton para uso no motor alternativo de óleo queimado desenvolvido por ele em torno de 1870. Atualmente é usado em turbinas a gás onde ambos os processos de compressão e expansão ocorrem em máquinas rotativas. As turbinas a gás geralmente operam em um ciclo aberto. O ar a temperatura ambiente é introduzido no compressor, onde a temperatura e a pressão aumentam. O ar de alta pressão continua até a câmara de combustão, onde o combustível é queimado a pressão constante. Os gases de alta temperatura resultantes entram na turbina, onde se expandem para a pressão atmosférica, produzindo energia. Os gases de escape que saem da turbina são ejetados para fora (não recirculados), fazendo com que o ciclo seja classificado como um ciclo aberto.

A turbina a gás do ciclo de Brayton é composto por três componentes: Um compressor de gás, um queimador (ou câmara de combustão) e uma turbina de expansão.

Os processos do ciclo Brayton são:

Processo 1-2 - Compressão isentrópica (em um compressor);

Processo 2-3 - Adição de calor a pressão constante;

Processo 3-4 - Expansão isentrópica (em uma turbina);

Processo 4-1 - Retirada de calor a pressão constante.

Pode-se ver na Figura 9 a composição da máquina e os diagramas PV e TS do ciclo Brayton.

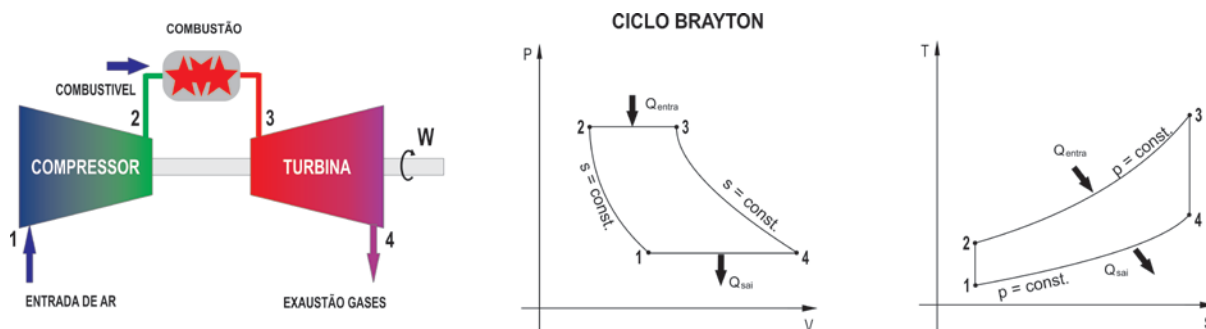


Figura 9 - Composição da Máquina e Diagramas PV e TS de um Ciclo Brayton

O rendimento ou eficiência no ciclo Brayton é dado por:

$$\eta_b = 1 - \frac{1}{\rho^{(\gamma-1)/\gamma}} \quad (19)$$

Onde, $\rho = \frac{P_2}{P_1}$ e γ é a razão de calores específicos. O fator de expansão isentrópico, $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$, relativo.

3.5.5 Ciclo Stirling

Segundo Sier (1995), teoricamente, o motor Stirling é uma máquina térmica com eficiência igual ao de Carnot. Alguns protótipos construídos pela empresa holandesa Phillips nos anos 1950 e 1960 chegaram a índices de eficiência térmica de 45%, superando facilmente os motores a gasolina, diesel e as máquinas a vapor (eficiência entre 20% e 30%). Este Ciclo foi criado pelo pastor escocês Robert Stirling em 1816. Ele visava à substituição do motor a vapor, com o qual o motor Stirling tem grande semelhança estrutural e teórica. O ciclo Stirling é um ciclo fechado e baseia-se no ciclo de Carnot, que representa o limite máximo de eficiência para uma máquina térmica.

Quatro fases compõem o ciclo de Stirling, que podem ser vistas na Figura 10, são:

1-2 Expansão Isotérmica: Uma fonte de calor externa aquece o gás enquanto este se expande a fim de que sua temperatura permaneça constante.

2-3 Resfriamento Isocórico: O calor é retirado do gás.

3-4 Compressão Isotérmica: O gás é refrigerado enquanto seu volume diminui para que sua temperatura não aumente.

4-1 Aquecimento Isocórico: O gás é aquecido até a temperatura inicial e o ciclo recomeça.

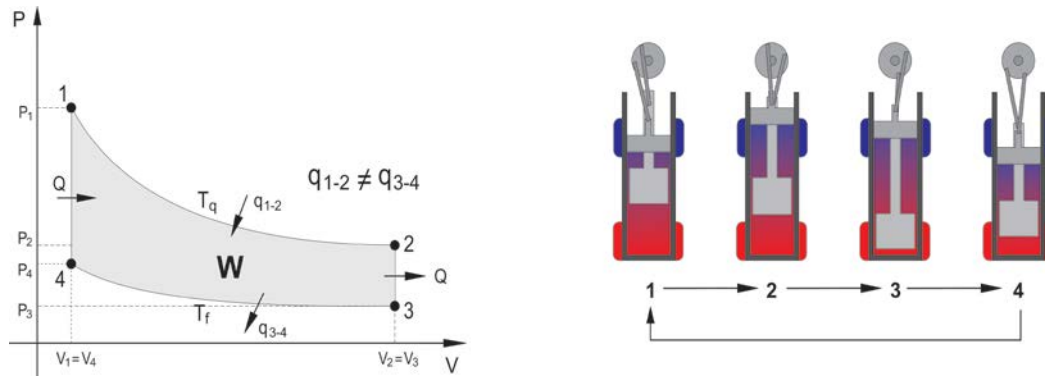


Figura 10 - Diagrama Pressão x Volume de um Ciclo Stirling

O motor Stirling é surpreendente por sua simplicidade, pois consiste de duas câmaras em diferentes temperaturas que, aquecem e resfriam, um gás de forma alternada, provocando expansões e contrações de modo cíclico, o que faz movimentar dois êmbolos ligados a um eixo comum.

A fim de diminuir as perdas térmicas, geralmente é instalado um "regenerador" entre as câmaras quente e fria, onde o calor (que seria rejeitado na câmara fria) fica armazenado para a fase seguinte de aquecimento, incrementando sobremaneira a eficiência termodinâmica, atuando como um sistema que armazena energia em cada ciclo. O calor é depositado no regenerador quando o gás passa da fonte quente para a fonte fria, fazendo que o gás chegue mais frio na fonte fria. Quando o gás vai da fonte fria para a fonte quente recebe o calor depositado no regenerador e chega mais quente na fonte quente. Pode-se ver a representação de um regenerador no ciclo Stirling na Figura 11.

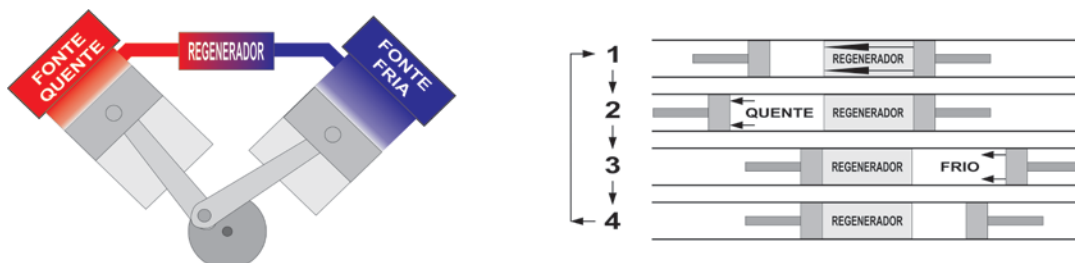


Figura 11 - Posições do Pistão nas Fases de um Ciclo Stirling com Regenerador

O regenerador diminui a perda de energia do sistema.

Os gases utilizados nos modelos mais simples são o ar, hélio ou hidrogênio, pressurizados, empregados nas versões de alta potência e rendimento, por serem gases com condutividade térmica mais elevada e menor viscosidade, isto é, transportam energia térmica (calor) mais rapidamente e tem menor resistência ao escoamento, o que implica menores perdas por atrito.

As fontes de calor são externas, tanto para aquecimento e resfriamento do gás. Por isso o nome de máquina térmica de ciclo termodinâmico de combustão externa. Ao contrário dos motores de combustão interna, o gás que executa o trabalho nunca deixa o interior do motor, portanto esta é uma máquina de ciclo fechado.

Na tabela 3, tem-se um quadro comparativo entre o Ciclo de Carnot e o Ciclo Stirling, mostrando o que acontece em cada fase das transformações.

| Ciclos/Fases | 1-2 | 2-3 | 3-4 | 4-1 |
|--------------|---------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Carnot | Expansão isotérmica | Expansão adiabática | Compressão isotérmica | Compressão adiabática |
| Stirling | Expansão isotérmica | Resfriamento isocórico | Compressão isotérmica | Aquecimento isocórico |

Tabela 3 - Quadro comparativo entre os Ciclos de Carnot e Stirling

O rendimento do Ciclo Stirling, segue o modelo do rendimento do Ciclo de Carnot na teoria.

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_q} \quad (20)$$

Porém na prática tem-se que levar em consideração as perdas térmicas e mecânicas, que não é considerado no cálculo do rendimento ideal (teórico), conforme pode ser visto na Figura 12, o comparativo gráfico entre o teórico e o real.

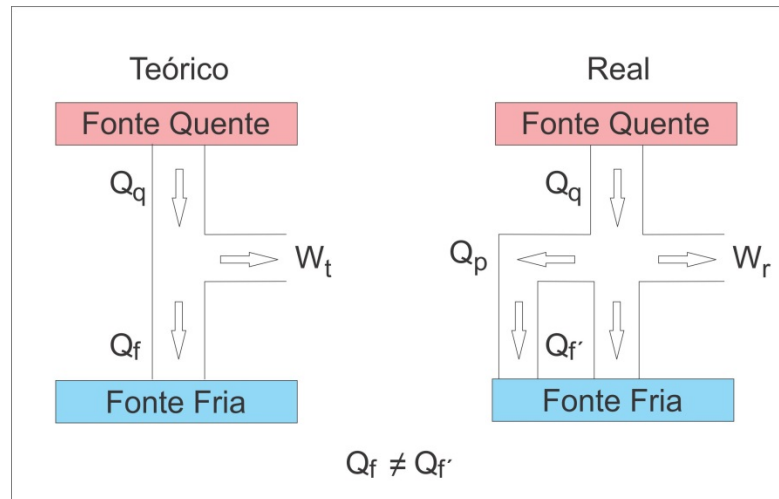


Figura 12 - Fluxo de calor de uma máquina térmica ideal (teórica) e real

De acordo com a 1ª lei da termodinâmica para um ciclo:

$$Q = Q_{entra} - Q_{sai} = W \quad (21)$$

O trabalho é uma diferença da energia que entra menos a que sai para cada ciclo.

Em um ciclo ideal, a partir da 1ª lei:

$$Q_t = Qq - Qf = W_t \quad (22)$$

Em um ciclo real, entretanto, deve-se levar em consideração as perdas existentes, assim tem-se:

$$Q_r = Qq - Qf' - Qp = W_r \quad (23)$$

Onde:

Qq é a energia que sai da fonte quente;

Qf , Qf' são energias que entram na fonte fria;

Qp é a energia que é perdida na forma de calor e perdas mecânicas (atrito);

Q_r é a energia real do sistema que é usada para realizar trabalho;

Q_t é a energia teórica do sistema que seria usada para realizar trabalho caso não existirem perdas.

W_r é o trabalho real;

W_t é o trabalho teórico.

Como o trabalho ideal W_t é sempre maior do que o trabalho real W_r , pelas equações (22) e (23), tem-se que:

$$W_r < W_t \quad (24)$$

Então a relação entre o trabalho real W_r entregue e trabalho teórico W_t entregue:

$$\frac{W_r}{W_t} < 1 \quad (25)$$

E a essa relação da equação (25), chama-se de Fator de Perda.

$$F_P = \frac{W_r}{W_t} \quad \text{ou} \quad F_P = \frac{Q_r}{Q_t} = \frac{Q_t - Q_p}{Q_t} \quad (26)$$

O rendimento real para um Ciclo Stirling considera, o F_P , Fator de Perda, uma relação entre o trabalho real W_r , com perdas e o trabalho teórico W_t , sem perdas.

$$\eta = \left[1 - \frac{T_f}{T_q}\right] \cdot F_P \quad (27)$$

4. ANÁLOGO ELÉTRICO

Para os motores de combustão externa baseados no ciclo termodinâmico de Carnot e Stirling, devido às suas características de construção e comportamento das grandezas físicas muito parecidas com grandezas elétricas, eles podem facilmente serem construídos em um modelo na forma de circuitos elétricos, que foi chamado neste estudo de análogo elétrico.

Como foi visto anteriormente, em um ciclo termodinâmico, o trabalho (W) realizado é, por definição, equivalente à área interna do ciclo num diagrama Pressão x Volume conforme a Figura 13. Será visto também que o trabalho em um circuito elétrico é também equivalente à área interna de um ciclo potência elétrica x tempo.

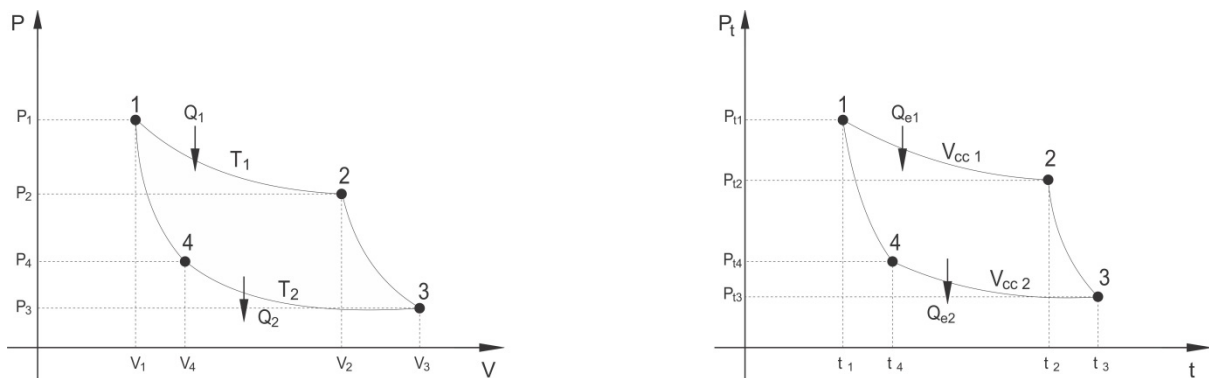


Figura 13 – Diagrama (Pressão x Volume) de um Ciclo Termodinâmico de Carnot e Diagrama (Potência Elétrica x tempo) de um Análogo Elétrico

A equação geral que define o trabalho em um ciclo é:

$$W = \oint P \cdot dV \quad [\text{J}] \quad (28)$$

Por definição, o trabalho de uma máquina elétrica é dado por:

$$W_e = E = V \cdot I \quad [\text{W}] \quad (29)$$

e

$$W_e = E = V \cdot I \cdot t \quad [\text{J}] \quad (30)$$

Por definição potência elétrica é:

$$P_t = V \cdot I \text{ [W]} \quad (31)$$

Tem-se também no elétrico, que o trabalho (W) realizado é por definição, equivalente à área interna ao ciclo num diagrama potência elétrica x tempo ($P_t \times t$) como na Figura 13.

$$W_e = E = \oint P_t \cdot dt \text{ [J]} \quad (32)$$

Conforme se pode ver na Figura 13, o trabalho mecânico é igual à área compreendida pelo desenho no diagrama Pressão x Volume:

$$W_m = \oint P \cdot dV \text{ [J]} \quad (33)$$

Na mesma Figura 13, analogamente observa-se que o trabalho elétrico é igual à área compreendida pelo desenho no diagrama Potência elétrica x tempo:

$$W_e = \oint P_t \cdot dt \text{ [J]} \quad (34)$$

Faz-se a analogia igualando o trabalho mecânico com o trabalho elétrico:

$$W_m = W_e \quad (35)$$

$$\oint P \cdot dV \text{ [J]} = \oint P_t \cdot dt \text{ [J]} \quad (36)$$

Partindo se agora para o rendimento que é a parte fundamental para este estudo de analogias.

Para a Máquina de Carnot o rendimento:

$$\eta = \frac{W_{liquido}}{Q_q} \quad (37)$$

Trabalho líquido é dado pela soma dos trabalhos das transformações da Figura 13:

$$W_{liquido} = W_{1-2} + W_{2-3} + W_{3-4} + W_{4-1} \quad (38)$$

Sendo o processo 1-2 isotérmico de um gás ideal, a energia Q_q é igual ao total de energia entregue ao sistema pela fonte quente no ciclo de Carnot:

$$Q_q = W_{1-2} \quad (\text{para um gás ideal}) \quad (39)$$

O trabalho do ponto 1 para o 2:

$$W_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV \quad (40)$$

Como

$$P = \frac{n \cdot \bar{R} \cdot T}{V} \quad (41)$$

$$W_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} \frac{n \cdot \bar{R} \cdot T_q}{V} \cdot dV \quad (42)$$

$$W_{1-2} = n \cdot \bar{R} \cdot T_q \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (43)$$

Da mesma forma o trabalho do ponto 3 para o 4, também isotérmico:

$$W_{3-4} = \int_{V_3}^{V_4} \frac{n \cdot \bar{R} \cdot T_f}{V} \cdot dV \quad (44)$$

$$W_{3-4} = n \cdot \bar{R} \cdot T_f \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad (45)$$

Os trabalhos dos pontos 2 para o 3 e do ponto 4 para o 1, para o ciclo de Carnot são processos adiabáticos e a energia interna depende apenas das temperaturas iniciais e finais do processo, que são as temperaturas T_f e T_q , que são iguais e opostas para cada um desses dois processos.

$$W_{2-3} = -W_{4-1} \quad (46)$$

OBS: Para o Stirling por serem isocóricos, não se realiza trabalho nesses processos:

$$W_{2-3} = W_{4-1} = 0 \quad (47)$$

Então:

$$W_{\text{liquido}} = n \cdot \bar{R} \cdot T_q \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) - n \cdot \bar{R} \cdot T_f \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad (48)$$

Por ser o processo adiabático reversível para o ciclo de Carnot, de 2 para 3 e de 4 para 1 sabe-se que:

$$P \cdot V^\gamma = \text{constante}$$

Então usando a equação do gás ideal:

$$T \cdot V^{\gamma-1} = \text{constante}$$

Para o processo adiabático 2 - 3:

$$T_q \cdot V_2^{\gamma-1} = T_f \cdot V_3^{\gamma-1} \quad (49)$$

4 - 1:

$$T_q \cdot V_1^{\gamma-1} = T_f \cdot V_4^{\gamma-1} \quad (50)$$

Relacionando, tem-se:

$$\left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{\gamma-1} = \frac{T_q/T_f}{T_q/T_f} \cdot \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} \quad (51)$$

E para o ciclo Stirling sabe-se que $V_4 = V_1$ e $V_2 = V_3$

Tanto para o Carnot quanto para o Stirling é válida a relação:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_4}{V_3} \quad (52)$$

Como os processos 1-2 e 3-4 são isotérmicos:

$$W_{liquido} = n \cdot \bar{R} \cdot T_q \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) - n \cdot \bar{R} \cdot T_f \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (53)$$

Relaciona-se o calor e o trabalho por:

$$Q_q = W_{1-2} = n \cdot \bar{R} \cdot T_q \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (54)$$

A partir de (48) e (54), se expressa o rendimento do ciclo como:

$$\eta = \frac{W_{liquido}}{Q_q} = \frac{n \cdot \bar{R} \cdot T_q \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) - n \cdot \bar{R} \cdot T_f \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}{n \cdot \bar{R} \cdot T_q \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)} \quad (55)$$

Obtendo-se finalmente o rendimento da Máquina de Carnot:

$$\eta = \frac{T_q - T_f}{T_q} = 1 - \frac{T_f}{T_q} \quad (56)$$

Do mesmo modo, a partir do circuito análogo elétrico da Figura 13, pode-se escrever o rendimento como:

$$\eta = \frac{W_{liquido}}{Q_q} \quad (57)$$

Onde o trabalho líquido é dado pela soma dos trabalhos das transformações:

$$W_{\text{líquido}} = W_{1-2} + W_{2-3} + W_{3-4} + W_{4-1} \quad (58)$$

A energia total é igual à energia fornecida pela Tensão $V_{cc\ q}$, sendo esta análoga à T_q que é temperatura da fonte quente para o ciclo de Carnot:

$$Q_q = W_{1-2} \quad (59)$$

O trabalho do ponto 1 para o 2 é dado pela expressão:

$$W_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} P_t \cdot dt \quad (60)$$

Sendo

$$P_t = I \cdot V_{cc} \quad (61)$$

Substituindo-se (61) em (60), tem-se

$$W_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} I \cdot V_{cc} \cdot dt \quad (62)$$

$$W_{1-2} = I \cdot V_{cc\ q} \cdot (t_2 - t_1) \quad (63)$$

Da mesma forma o trabalho do ponto 3 para o 4 é dado por:

$$W_{3-4} = \int_{t_3}^{t_4} I \cdot V_{cc\ f} \cdot dt \quad (64)$$

$$W_{3-4} = I \cdot V_{cc\ f} \cdot (t_4 - t_3) \quad (65)$$

Os trabalhos dos pontos 2 para o 3 e do ponto 4 para o 1, analogamente são processos que dependem apenas das tensões elétricas iniciais e finais, denominadas de tensões $V_{cc\ q}$ e $V_{cc\ f}$. Elas são iguais e opostas para cada um desses dois processos, e por ser um ciclo fechado e reversível.

$$W_{2-3} = -W_{4-1} \quad (66)$$

Então:

$$W_{\text{líquido}} = I \cdot V_{cc\ q} \cdot (t_2 - t_1) - I \cdot V_{cc\ f} \cdot (t_4 - t_3) \quad (67)$$

Sendo a expansão e compressão isotérmicas de igual período de tempo, tem-se que:

$$(t_2 - t_1) = (t_4 - t_3) \quad (68)$$

Portanto:

$$W_{liquido} = I \cdot V_{ccq} \cdot (t_2 - t_1) - I \cdot V_{ccf} \cdot (t_2 - t_1) \quad (69)$$

$$Q_q = W_{1-2} = I \cdot V_{ccq} \cdot (t_2 - t_1) \quad (70)$$

$$\eta = \frac{W_{liquido}}{Q_q} = \frac{I \cdot V_{ccq} \cdot (t_2 - t_1) - I \cdot V_{ccf} \cdot (t_2 - t_1)}{I \cdot V_{ccq} \cdot (t_2 - t_1)} \quad (71)$$

Portanto o rendimento do Análogo Elétrico da Máquina de Carnot é definido como:

$$\eta = \frac{V_{ccq} - V_{ccf}}{V_{ccq}} = 1 - \frac{V_{ccf}}{V_{ccq}} \quad (72)$$

A Segunda Lei da Termodinâmica pode também ser considerada nesta analogia elétrica. Não existe corrente de uma fonte de tensão menor para a de tensão maior, mas sim sempre da maior para a menor. Também não existe um motor ou circuito elétrico de eficiência 100%.

Para a entropia do ciclo de Carnot existe também a análoga entropia elétrica para o análogo elétrico.

Se o ciclo é fechado e reversível, a somatória da entropia ou a variação de entropia ao longo do ciclo é igual à zero.

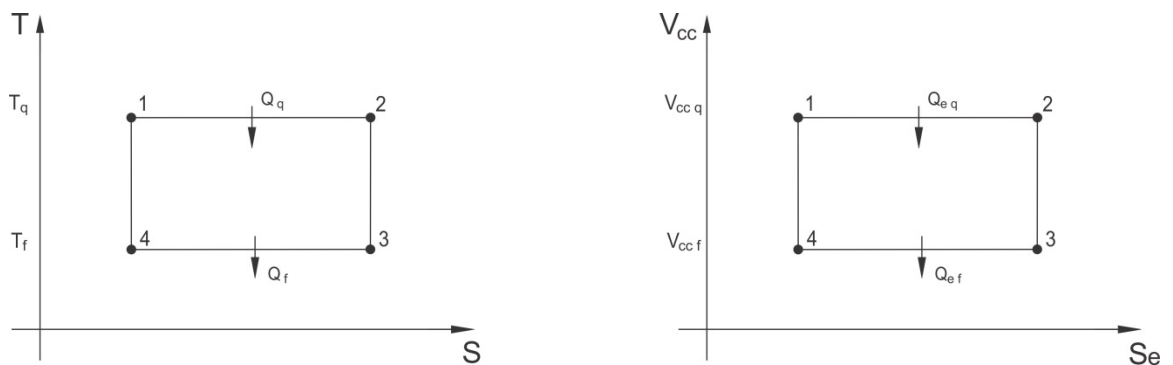


Figura 14 – Diagrama (Temperatura x Entropia) de um Ciclo Termodinâmico de Carnot e Diagrama (Tensão Elétrica x Entropia Elétrica) de um Análogo Elétrico

Pode se escrever a variação de entropia no ciclo como:

$$\sum \frac{Q_i}{T_i} = dS = \oint \frac{\delta Q}{T} = 0 \quad (73)$$

Para o ciclo de Carnot representado na figura 14 tem-se:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{1}{T_q} \int_1^2 dQ + \frac{1}{T_f} \int_3^4 dQ \quad (74)$$

$$\Delta S = \frac{Q_q}{T_q} + \frac{Q_f}{T_f} = 0 \quad (75)$$

Tem-se que a variação de entropia para o ciclo de Carnot é nula.

Da mesma forma para o análogo elétrico, a somatória da entropia elétrica ou a variação de entropia elétrica no ciclo é nula.

$$\sum \frac{Q_{ei}}{V_{cci}} = dS_e = \oint \frac{\delta Q_e}{V_{cc}} = 0 \quad (76)$$

Onde

Q_{ei} é carga elétrica;

V_{cci} é tensão elétrica;

dS_e é variação de entropia elétrica.

Para o ciclo do diagrama $V_{cc}S$:

$$\oint \frac{\delta Q_e}{V_{cc}} = \frac{1}{V_{ccq}} \int_1^2 dQ_e + \frac{1}{V_{ccf}} \int_3^4 dQ_e \quad (77)$$

$$\oint \frac{\delta Q_e}{T} = \frac{Q_{eq}}{V_{ccq}} + \frac{Q_{ef}}{V_{ccf}} = 0 \quad (78)$$

A variação da entropia elétrica para o ciclo de análogo elétrico é também igual à zero.

Será visto a analogia existente entre a “taxa de transferência de calor” (q) e a “corrente elétrica” (I). No ciclo de Carnot a taxa de transferência de calor (q), flui da fonte quente para a fria, no circuito análogo elétrico a corrente elétrica (I), também flui da análoga “fonte quente” V_{ccq} onde a tensão elétrica é maior, para a análoga “fonte fria” V_{ccf} que tem a tensão elétrica menor do que a V_{ccq} .

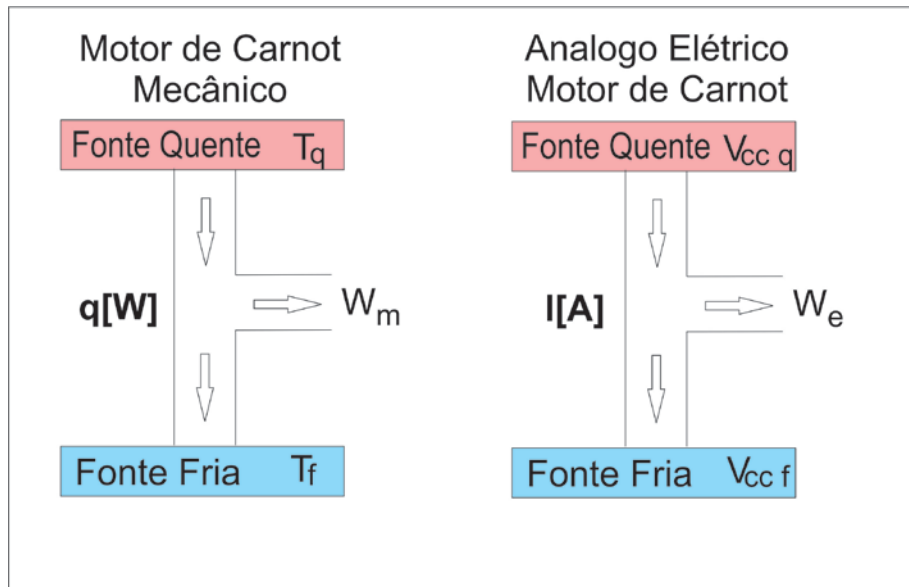


Figura 15 - Analogia entre o Taxa de Transferência de Calor e a Corrente Elétrica

5. DEMONSTRAÇÃO DE ANALOGIA ENTRE OS CIRCUITOS ELÉTRICOS E UMA MÁQUINA TÉRMICA DE CARNOT

Os modelos eletrônicos análogos que aqui serão apresentados são os mais simplificados possíveis, para que assim haja fácil entendimento da analogia.

Da mesma forma que as grandezas mecânicas têm o seu análogo elétrico, que será visto nas seções seguintes, as partes mecânicas tem o seu análogo com o elétrico.

Na tabela 4 pode ser visto uma relação das partes mecânicas e seus análogos componentes elétricos que foram utilizados nas modelagens dos circuitos, para os análogos dos ciclos de Carnot e Stirling.

| PARTES MECÂNICAS | PARTES ELÉTRICAS |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| Câmara e Pistão | Capacitor |
| Motor | Resistor |
| Mudanças de processos (1-2-3-4-1) | Relés (chaves) |
| Fontes quente e fria | Fontes de tensão elétrica V_{cc} |
| Perdas de calor ou mecânicas (atrito) | Resistores |
| Regenerador | Resistor e Capacitor (RC) |

Tabela 4 - Quadro comparativo das analogias entre as partes mecânicas e elétricas

5.1 Demonstração Teórica da Analogia Elétrica para o Ciclo de Carnot

Na analogia elétrica, a câmara que contem o gás que aquece ou resfria, é representado por um capacitor onde aquecer significa carrega-lo com a tensão elétrica V_{cap} e resfriar é descarrega-lo desta mesma tensão elétrica.

O ciclo elétrico análogo ao ciclo de Carnot é apresentado na Figura 16.

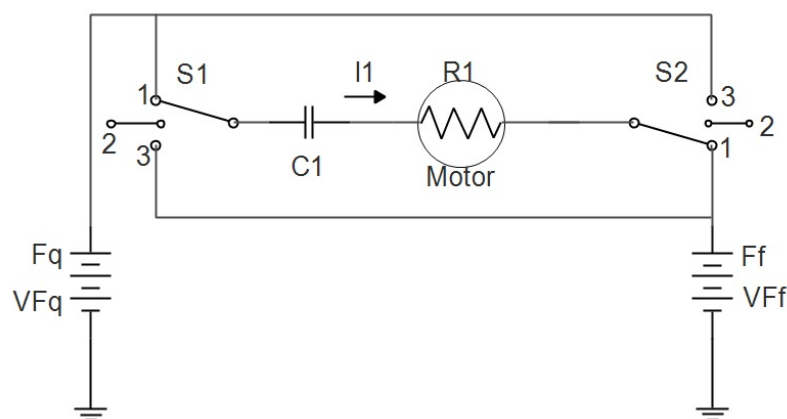


Figura 16 - Análogo elétrico de um Ciclo de Carnot – Expansão Isotérmica

O motor é uma resistência elétrica, representado por R_1 .

A partir da equação da 1ª Lei de Ohm, a tensão no motor V_M :

$$V_M = R_1 \cdot I_1 \quad (79)$$

Isola-se I:

$$I_1 = \frac{V_M}{R_1} \quad (80)$$

Um capacitor faz o papel análogo à câmara e cilindro de expansão e compressão da máquina de Carnot. O capacitor carregando, seria a expansão, o capacitor descarregando a compressão.

C1 é o capacitor de armazenamento de energia Q_e . A tensão elétrica no capacitor é V_{cap} .

Ao se colocar as chave S1 e S2 na posição 1, a tensão elétrica no motor fica: $V_{M_1} = V_{Fq} - V_{Ff} - V_{cap}$, e é nesse momento que acontece o análogo da expansão isotérmica, conforme a linha 1-2 da Figura 17.

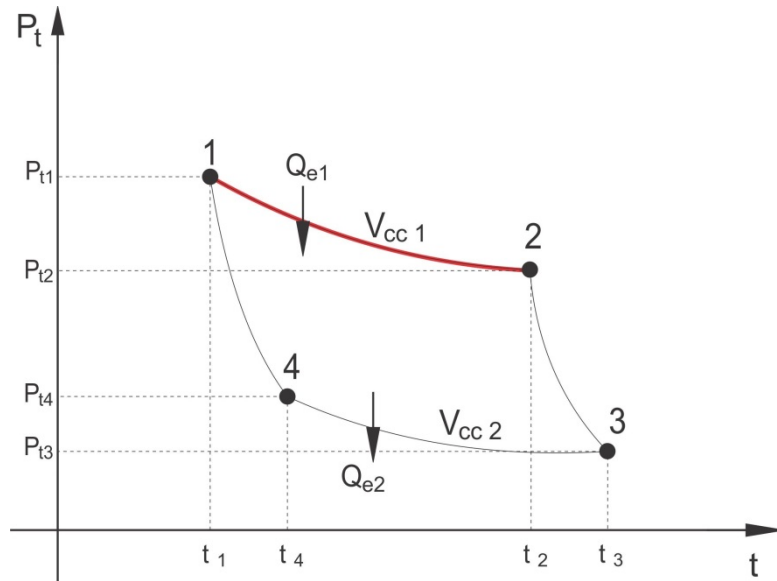


Figura 17 - Diagrama Potência Elétrica x Tempo de um Análogo Elétrico – Expansão Isotérmica

O análogo da expansão adiabática (2-3) ocorre com as chaves S1 e S2 nas posições 2, onde não é mais fornecida tensão ao motor, analogamente não há mais trocas térmicas nas fontes quente e fria, conforme Figuras 18 e 19.

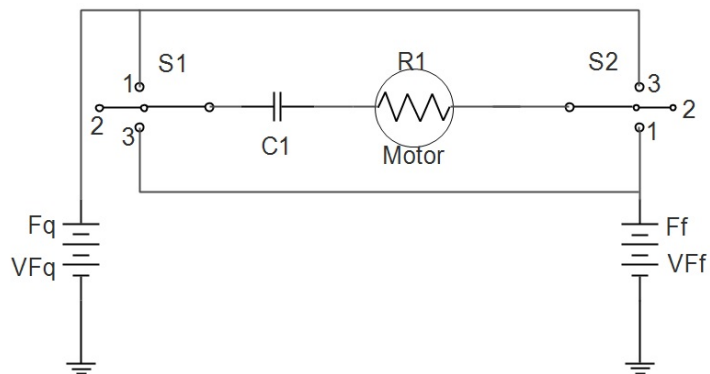


Figura 18 - Análogo elétrico de um Ciclo de Carnot – Adiabáticas

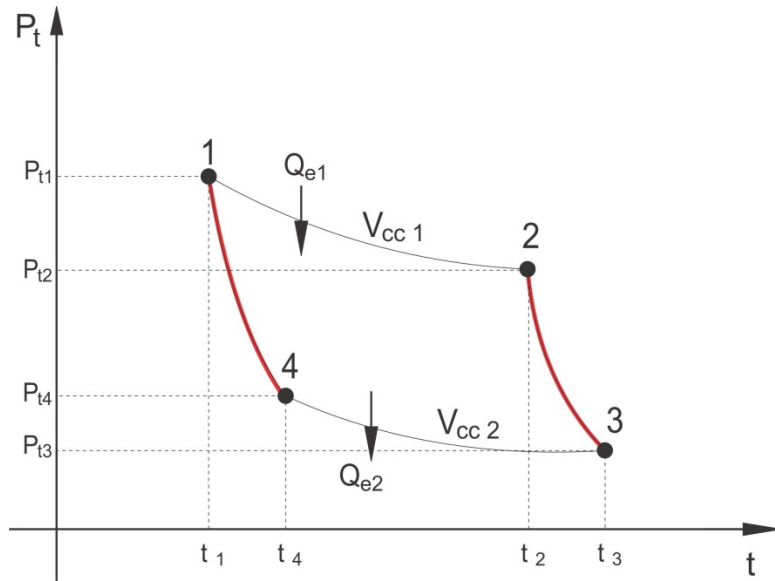


Figura 19 - Diagrama Potência x Tempo de um Análogo Elétrico – Expansão e Compressão Adiabáticas

Trocando-se a chave S1 e S2 para a posição 3, a tensão do motor torna-se: $V_{M_2} = V_{Fq} - V_{Ff} + V_{cap}$, invertendo-se a corrente no circuito, e é nesse momento que acontece o análogo da compressão isotérmica conforme o circuito da Figura 20 e conforme a linha 3-4 da Figura 21.

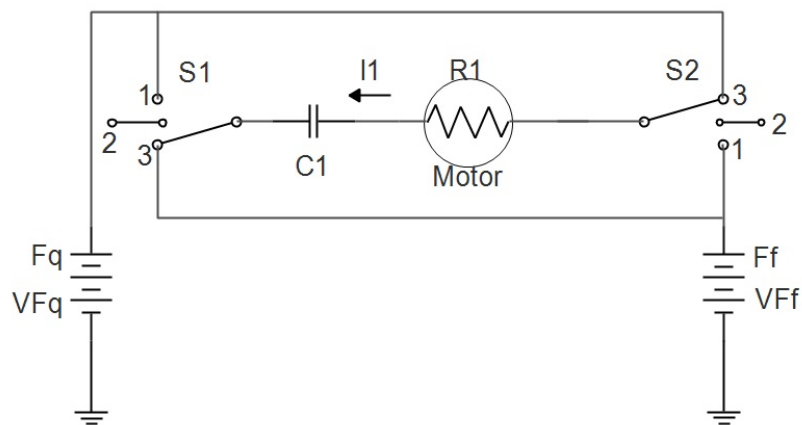


Figura 20 - Análogo elétrico de um Ciclo de Carnot – Compressão Isotérmica

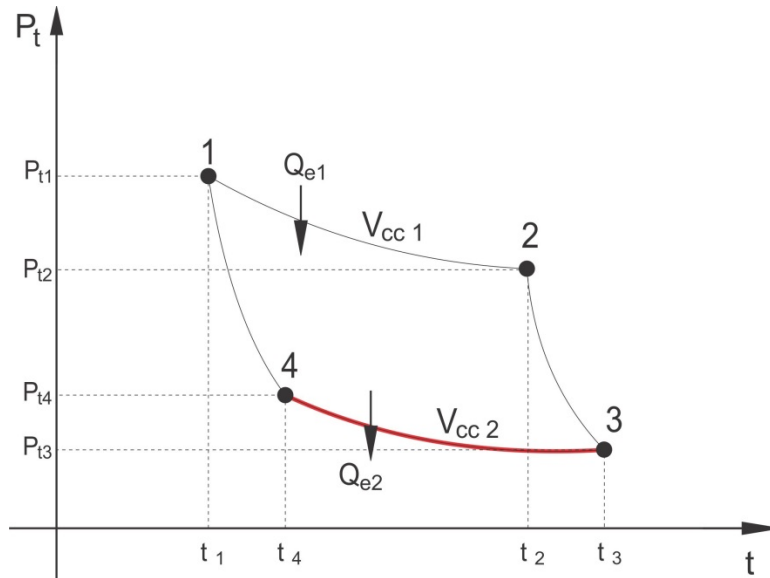


Figura 21 - Diagrama Potência Elétrica x Tempo de um Análogo Elétrico – Compressão Isotérmica

O análogo da compressão adiabática (4-1) ocorre nas trocas das chaves S1 e S2 para as posições 2, onde não é mais fornecida tensão ao motor, analogamente não há mais trocas térmicas nas fontes quente e fria, conforme Figura 18 e 19.

Na prática o chaveamento desse circuito deve ser feito por relés acionados por um gerador de pulso que controla a frequência de operação.

$$\text{A corrente elétrica passando pelo motor é: } I1 = \frac{V_{ccq} - V_{ccf}}{R_1} \quad (81)$$

Por definição, o rendimento de um motor elétrico se dá pela relação da potência no motor com a potência de entrada do sistema, do mesmo modo que a relação entre o trabalho e a energia fornecida pela fonte quente de um ciclo termodinâmico.

$$\eta = \frac{P_M}{P_E} \quad (82)$$

A potência no motor (R_1) é P_M e da entrada é P_E .

Por definição potência elétrica é tensão elétrica (V_{cc}) x corrente elétrica (I):

$$P_t = V_{cc} \cdot I \quad (83)$$

Por definição:

$$V_M = \frac{V_{M_1} + V_{M_2}}{2} \quad (84)$$

$$V_M = \frac{V_{cc\ q} - V_{cc\ f} - V_{cap} + V_{cc\ q} - V_{cc\ f} + V_{cap}}{2} \quad (85)$$

$$V_M = V_{cc\ q} - V_{cc\ f} \quad (86)$$

Chega-se a conclusão de que a tensão elétrica no motor (R_1), fica independente da tensão elétrica do capacitor V_{cap} .

A potência no motor é dada por:

$$P_M = (V_{cc\ q} - V_{cc\ f}) \cdot I1 \quad (87)$$

E a potência de entrada do sistema é dada por:

$$P_E = V_{cc\ q} \cdot I1 \quad (88)$$

Então,

$$\eta = \frac{(V_{cc\ q} - V_{cc\ f}) \cdot I1}{V_{cc\ q} \cdot I1} = \frac{V_{cc\ q} - V_{cc\ f}}{V_{cc\ q}} \quad (89)$$

$$\eta = \frac{V_{cc\ q}}{V_{cc\ q}} - \frac{V_{cc\ f}}{V_{cc\ q}} \quad (90)$$

Simplificando obtém-se a mesma equação do rendimento dos ciclos de gás em circuito fechado:

$$\eta = 1 - \frac{V_{cc\ f}}{V_{cc\ q}} \equiv \eta = 1 - \frac{Tf}{Tq} \quad (91)$$

Lembrando-se que para este modelo a tensão elétrica é análoga à temperatura.

Observa-se que se forem aumentadas ou diminuídas as tensões das fontes quente e fria, acarretará no aumento ou diminuição do rendimento do sistema.

Portanto a analogia elétrica para o ciclo de Carnot fica aqui demonstrada para este circuito elétrico.

5.2 Demonstração Teórica da Analogia Elétrica para o Ciclo Stirling

Um capacitor tem a função de analogia da câmara e pistão na expansão e compressão da máquina Stirling. O capacitor carregando, expansão, o capacitor descarregando, compressão. A energia no capacitor é armazenada em forma de cargas elétricas, pela tensão elétrica, medida em Coulombs.

No ciclo de Carnot ideal, não existem perdas. Em uma máquina operando no ciclo Stirling existem as perdas. A representação análoga a essas perdas são representadas na forma de resistências elétricas, que diminuem a corrente elétrica que chegaria ao motor, diminuindo sua potência e conseqüentemente o rendimento.

Na Figura 22, a resistência R_{meio} representa as perdas para o meio sob a forma de calor e R_{mec} as perdas mecânicas pelo trabalho de compressão/expansão do cilindro na câmara de armazenamento de energia. Como é mostrado na seqüência, o rendimento depende de um Fator de Perda, F_p , que é uma relação entre a corrente elétrica que gera trabalho no motor pela corrente elétrica total do sistema, uma parte da qual, representam as perdas. Relembrando que a corrente elétrica é análoga da taxa de transferência de calor circulante na câmara, sempre da região quente para a fria, ou analogamente aqui da fonte de tensão maior para a menor.

Se a resistência elétrica for pequena no ramo do circuito que representam as perdas, a corrente elétrica perdida I_r é grande, analogamente o fluxo de perdas é grande também, então a corrente elétrica que chega ao motor I_m análoga ao fluxo aproveitável que vai para o motor realizar trabalho é pequena e conseqüentemente o Fator de Perda, F_p é pequeno, isso faz com que na equação do rendimento o resultado também será de um rendimento menor. Será visto

a definição do Fator de Perda F_p logo a seguir e qual é a sua atuação na equação de rendimento.

Do mesmo modo, se a resistência desse ramo do circuito que representam as perdas é grande, a corrente elétrica perdida I_r é pequena e conseqüentemente a corrente elétrica que chega ao motor I_m que é a corrente elétrica aproveitada pelo motor, é grande, e então o rendimento será maior.

Se a resistência ficar grande o suficiente para não mais passar corrente pelo ramo das perdas, então esse Fator Perdas, F_p , passa a ser igual a um, e se chega ao modelo de eficiência Ideal Teórica do Ciclo de Carnot, ou seja, 100%. Será explicado melhor na sequência com a equação do rendimento para o análogo elétrico do Ciclo Stirling.

Nesta configuração onde as chaves fechadas conforme a Figura 22, já desconsiderando a tensão elétrica no capacitor V_{cap} conforme visto no capítulo anterior, equações (84) a (86), a tensão do motor fica: $V_M = V_{Fq} - V_{Ff}$, e nesse momento que acontece o análogo da expansão isotérmica.

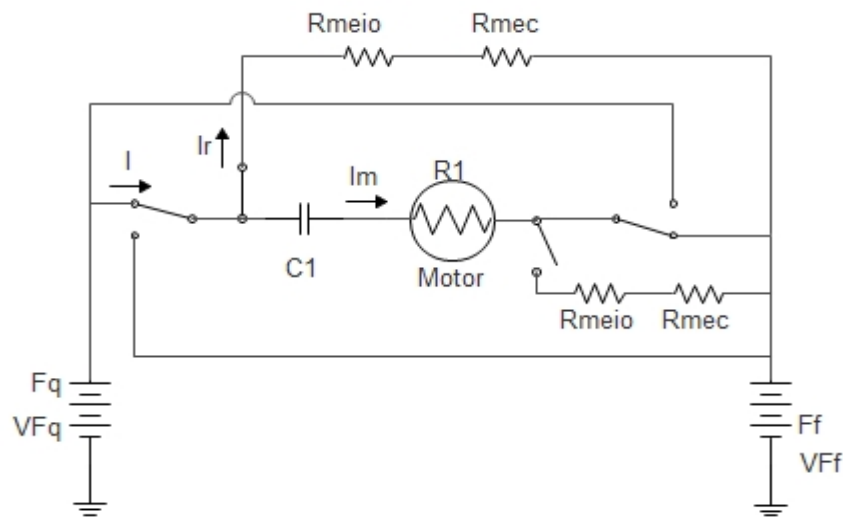


Figura 22 - Análogo elétrico de um Ciclo Stirling – Expansão Isotérmica

A corrente elétrica I , que é análoga a taxa de transferência de calor da câmara quente para a fria, análogas às fontes quente e fria, é dividida em duas partes, uma que vai para o motor I_m (entregue ao motor para realizar trabalho) e a outra I_r , que é perdida na forma de calor R_{meio} e R_{mec} por esforço mecânico.

Portanto:

$$I = I_m + I_r \quad (92)$$

Com as chaves fechadas conforme a Figura 23, do mesmo modo já desconsiderando a tensão elétrica no capacitor V_{cap} conforme visto no capítulo anterior equações (84) a (86), a tensão do motor fica: $V_M = V_{ccq} - V_{ccf}$, só que no outro sentido da circulação da corrente elétrica, e é nesse momento que acontece o análogo da compressão isotérmica.

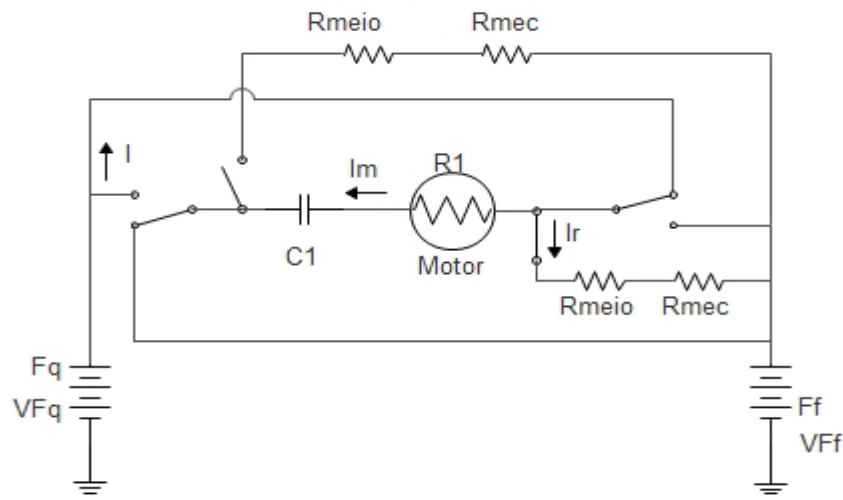


Figura 23 - Análogo elétrico de um Ciclo de Stirling – Compressão Isotérmica

A expansão e compressão isocóricas ocorrem analogamente nas trocas de posições das chaves, onde não ocorre mais a variação de volume do gás, não realizando trabalho.

O rendimento de um motor elétrico é representado pela divisão da potência no motor pela potência de entrada do sistema.

$$\eta = \frac{P_M}{P_E} \quad (93)$$

As potências no motor e entrada são calculadas pela equação das potências elétricas:

$$P_t = V_{cc} \cdot I \quad (94)$$

A potência no motor é dada por:

$$P_M = (V_{cc\ q} - V_{cc\ f}) \cdot I_m \quad (95)$$

E a potência de entrada do sistema é dada por:

$$P_E = V_{cc\ q} \cdot I \quad (96)$$

Então,

$$\eta = \frac{(V_{cc\ q} - V_{cc\ f}) \cdot I_m}{V_{cc\ q} \cdot I} \quad (97)$$

Sabe-se que:

$$I > I_m \quad (98)$$

Faz-se:

$$\frac{I_m}{I} = F_P \equiv \frac{W_r}{W_t} \quad (99)$$

Como

$$I = I_m + I_r \quad (100)$$

$$F_P = \frac{I_m}{I_m + I_r} \quad (101)$$

Ressaltando de que esse fator é dependente de I_m e I_r , as correntes (análogo à transferência de calor) aproveitáveis e perdidas do sistema.

Da mesma maneira que a Eq. (97) e (99)

$$\eta = \frac{(V_{cc\ q} - V_{cc\ f}) \cdot I_m}{V_{cc\ q} \cdot I}$$

$$\frac{I_m}{I} = F_P$$

Tem-se que;

$$\eta = \left[\frac{V_{ccq} - V_{ccf}}{V_{ccq}} \right] \cdot F_p \quad (102)$$

Simplificando chega-se a mesma equação do rendimento dos ciclos de Carnot:

$$\eta = \left[1 - \frac{V_{ccf}}{V_{ccq}} \right] \cdot F_p \quad \equiv \quad \eta = \left[1 - \frac{T_f}{T_q} \right] \cdot F_p \quad (103)$$

Onde:

$$F_p < 1 \quad (104)$$

Da mesma maneira demonstrado na Eq. (26), na Seção 3.5.5, o Fator de Perda F_p nada mais é do que uma relação entre a quantidade de calor perdido com a quantidade de calor aproveitado para a máquina realizar trabalho.

$$F_p = \frac{I_m}{I} \quad \equiv \quad F_p = \frac{Q_r}{Q_t} = \frac{Q_t - Q_p}{Q_t} \quad (105)$$

Onde:

Q_p é energia que é perdida do sistema na forma de calor e perdas mecânicas;

Q_r é a energia útil do sistema que é usada para realizar trabalho;

Q_t é a energia teórica do sistema que seria usada para realizar trabalho caso não existam perdas.

Relembrando novamente de que para este modelo a tensão elétrica é análoga à temperatura. Observa-se que trabalhar com essa diferença de tensão aumentando ou diminuindo as tensões das fontes quente e fria, afetará o resultado do rendimento.

O rendimento varia com as perdas do sistema, características físicas da máquina térmica real.

O rendimento igual à máquina teórica de Carnot, só pode ser obtido em um sistema com perdas nulas. Porém sabe-se que na prática não existe um sistema sem perdas mecânicas e térmicas.

Se existisse tal sistema sem perdas conforme foi comentado no início desta análise de analogia do circuito elétrico, o Fator de Perda ficaria assim:

$$\lim_{I_r \rightarrow 0} (F_P) = \lim_{I_r \rightarrow 0} \left(\frac{I_m}{I_m + I_r} \right) = \frac{I_m}{I_m + 0} = 1 \quad (106)$$

Então com Fator de Perda $F_P = 1$ ter-se-á o rendimento do Ciclo ideal de Carnot:

$$\eta = \left[1 - \frac{V_{ccf}}{V_{ccq}} \right] \cdot 1 \quad \equiv \quad \eta = \left[1 - \frac{T_f}{T_q} \right] \cdot 1 \quad (107)$$

Idêntico ao rendimento do Ciclo Ideal de Carnot (Apenas teórico).

Para o projeto de um motor deve-se levar em conta a quantidade das perdas de calor das câmaras para o ambiente ou por perdas mecânicas relativas ao formato das câmaras e características térmicas dos materiais.

Portanto a analogia teórica para o ciclo Stirling está demonstrada para este circuito elétrico.

Conforme já especificado na Tabela 3, o ciclo de Carnot é composto pelos processos são isotérmicos e adiabáticos, enquanto que no ciclo Stirling os processos são isotérmicos e isocóricos.

Conclui-se, portanto que existem as analogias entre as grandezas mecânicas e elétricas para os modelos deste estudo, conforme pode ser vistas na tabela 5.

| GRANDEZAS MECÂNICAS | GRANDEZAS ELÉTRICAS |
|---|---|
| P - Pressão Mecânica [Pa] | P_t - Potência Elétrica [W] |
| ΔV - Variação do Volume do Gás [cm ³] | Δt - Deslocamento no Tempo das Cargas Elétricas [s] |
| T - Temperatura no Gás [K] | V_{cc} - Tensão elétrica [V] |
| R - Resistência Térmica [K/W] e Mecânica [Pa] | R - Resistência Elétrica [Ω] |
| q - Taxa de Transferência de Calor [W] | I - Corrente Elétrica [A] |
| Q - Transferência de Energia Térmica [J] | Q_e - Carga Elétrica [C] |
| η_m - Rendimento da Máquina Mecânica [%] | η_e - Rendimento da Máquina Elétrica [%]. |

Tabela 5 - Quadro comparativo das analogias entre as grandezas mecânicas e elétricas

6. DEMONSTRAÇÃO PRÁTICA DA ANALOGIA ELÉTRICA COM A MECÂNICA (SIMULAÇÕES ELÉTRICAS)

É importante relembrar, de que somente os ciclos termodinâmicos de Carnot e de Stirling fazem parte deste estudo, e que os outros ciclos citados servem apenas para mostrar a sua existência e seu funcionamento, dos quais estes servem também para o entendimento e referência para esse estudo.

Para a realização das simulações deste estudo utilizou-se um simulador elétrico muito conceituado no mercado, por sua excelência e confiabilidade: O Orcad, ferramenta de construção dos circuitos elétricos com a biblioteca de componentes e suas propriedades, utilizado em conjunto com Pspice que é o simulador dos circuitos elétricos operando em conjunto. Orcad/Pspice são softwares propriedade da empresa Cadence.

A versão Orcad/Pspice Lite que foi utilizada aqui para esse estudo, pode ser utilizada livremente sem ter uma licença especial para uso, porém é limitada a certo número de componentes. Portanto com esta restrição, pode ser utilizado na forma livre para estudos acadêmicos. E como neste estudo o número de componentes utilizados é pequeno, essa versão livre serviu perfeitamente.

Para um melhor entendimento de como visualizar o ciclo termodinâmico análogo, devido à diferença de que o análogo é no tempo e não no volume, e por isso não será possível visualizar o ciclo fechado, como é comumente visto em um diagrama Pressão x Volume.

Então, para que possa ser visualizado em um diagrama Potência Elétrica x Tempo, espelha-se a imaginariamente a linha da compressão isotérmica para fechar o ciclo conforme pode ser visto na Figura 24.

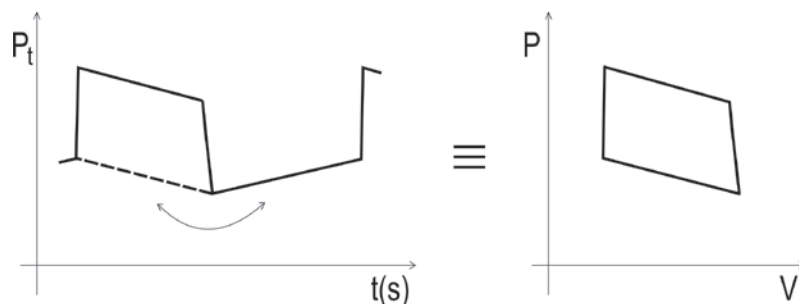


Figura 24 – Ciclo Termodinâmico Análogo

Na tabela 6 está feito um resumo das simulações elétricas que serão feitas no decorrer deste estudo. Servindo de referência comparativa entre as simulações e também para que haja um melhor entendimento.

| Nº | SIMULAÇÃO | Vq (V) | Vf(V) | | | RENDIMENTO % | | |
|----|-----------|--------|-------|-----------------|-----------------|--------------|--------------------|--|
| 1ª | CARNOT | 20 | 10 | | | 50.00 | | |
| 2ª | CARNOT | 40 | 10 | | | 75.00 | | |
| | | | | REGENERADOR | FATOR DE PERDAS | | | |
| 3ª | STIRLING | 20 | 10 | - | 0.4535 | 22.65 | | |
| 4ª | STIRLING | 20 | 10 | - | 0.7136 | 35.65 | | |
| 5ª | STIRLING | 40 | 10 | - | 0.4545 | 34.05 | | |
| 6ª | STIRLING | 40 | 10 | - | 0.7142 | 53.55 | | |
| 7ª | STIRLING | 20 | 10 | R=150Ω C=1000μF | 0.6747 | 33.70 | POTÊNCIA MOTOR(mW) | |
| | STIRLING | 20 | 10 | - | 0.4535 | 22.65 | 795 | |
| 8ª | STIRLING | 20 | 10 | R=500Ω C=1000μF | 0.8691 | 43.45 | 784 | |
| 9ª | STIRLING | 20 | 10 | R=50Ω C=1000μF | 0.7410 | 37.05 | | |

Tabela 6 - Simulações Realizadas

A seguir é mostrado na Figura 25, o Fator de Perda (%) versus o Rendimento (%), para uma melhor visualização da comparação entre as simulações para o ciclo Stirling, que compreendem as simulações 3ª a 9ª. Vê-se que quanto maior o valor do fator de perda maior será o rendimento, conforme visto anteriormente.

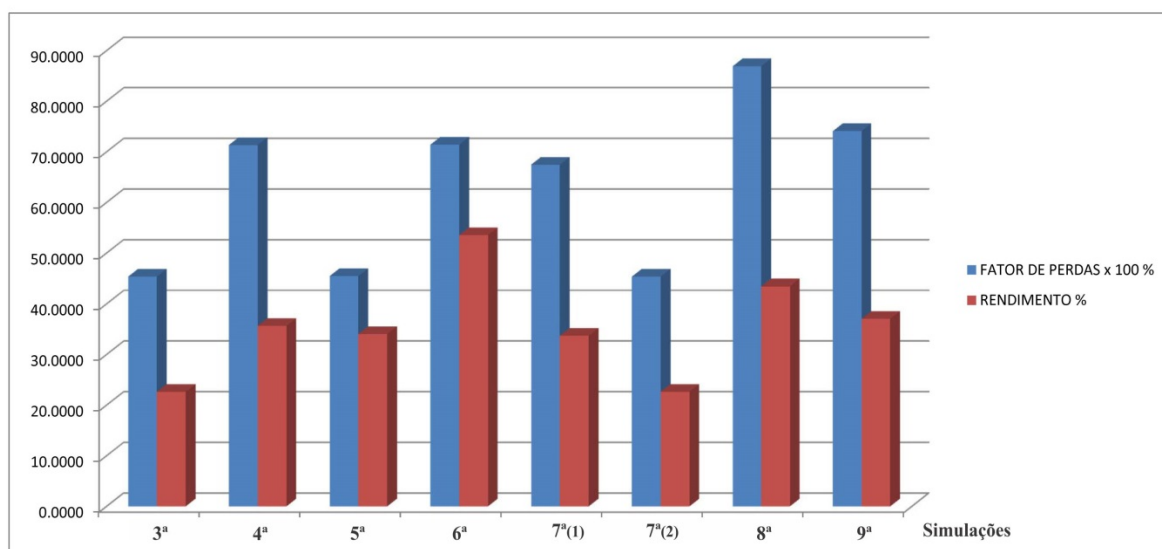


Figura 25 – Fator de Perda x Rendimento para as Simulações do Ciclo Stirling

6.1 Simulações para Verificação do Análogo Elétrico para o Ciclo de Carnot

Os modelamentos para o análogo elétrico do Ciclo de Carnot que foi utilizado para este estudo são apresentados a seguir. As temperaturas análogas às tensões elétricas que estarão sendo propostas nas simulações seguintes são aleatoriamente escolhidas, e estão relacionadas apenas para questão de cálculos de analogia.

6.1.1 Simulação Carnot 20/10V

A configuração proposta para esta 1ª simulação consiste do análogo elétrico para o Ciclo de Carnot com a tensão da fonte quente $V_q = 20V$ análogo a uma fonte de calor $T_q = 330^\circ C$ ou 603 K e da fonte fria $V_f = 10V$ análogo a uma fonte fria de temperatura ambiente de $T_f = 30^\circ C$ ou 303 K, conforme a Figura 26.

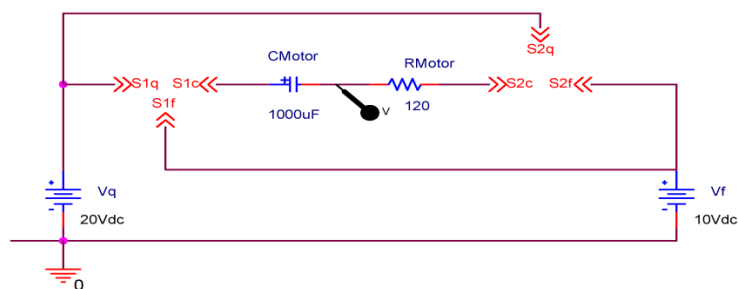


Figura 26 - Esquema Elétrico Carnot 20V/10V

Os resultados para essa simulação são apresentados na Figura 27, onde se visualiza: o ciclo termodinâmico análogo no tempo, o rendimento calculado pelas potências medidas e o rendimento calculado Eq. (70) do capítulo 5.1.

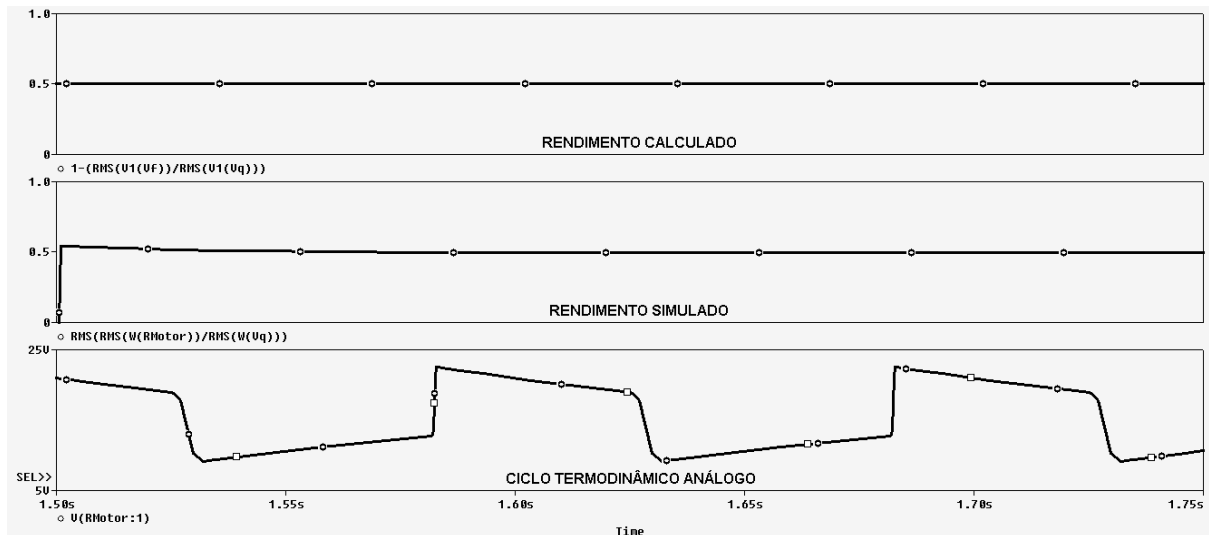


Figura 27 - Simulação Carnot 20V/10V

Pode-se verificar na Figura 27, de que os rendimentos tanto quanto calculado e quanto o obtido pela simulação, são os mesmos e iguais a 0,5, e o ultimo gráfico mostra o ciclo termodinâmico análogo.

Demonstra-se que os rendimentos calculados pela relação das potências de entrada pela potência do motor medidas, quanto obtidos a partir das tensões análogas as fontes quentes e frias, são iguais ao rendimento de um motor definido para o Ciclo de Carnot:

$$\eta = 1 - \frac{10}{20} \equiv \eta = 1 - \frac{303}{603} \approx 0,50 = (50\%)$$

6.1.2 Simulação Carnot 40/10V

Procurando-se demonstrar o efeito do aumento da temperatura, nesta 2ª simulação considera-se o análogo elétrico para o Ciclo Stirling com a tensão da fonte quente $V_q = 40V$ análogo a uma fonte de calor $T_q = 940^\circ C$ ou 1213 K e da fonte fria $V_f = 10V$ análogo a uma fonte fria de temperatura ambiente $T_f = 30^\circ C$ ou 303 K, conforme a Figura 28.

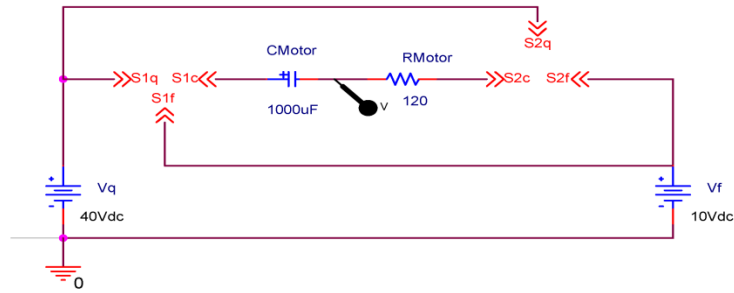


Figura 28 - Esquema Elétrico Carnot 40V/10V

Da mesma maneira para essa simulação pode ser visto na Figura 29, de que os rendimentos tanto quanto calculado e quanto o obtido pela simulação são os mesmos e iguais a 0,75.

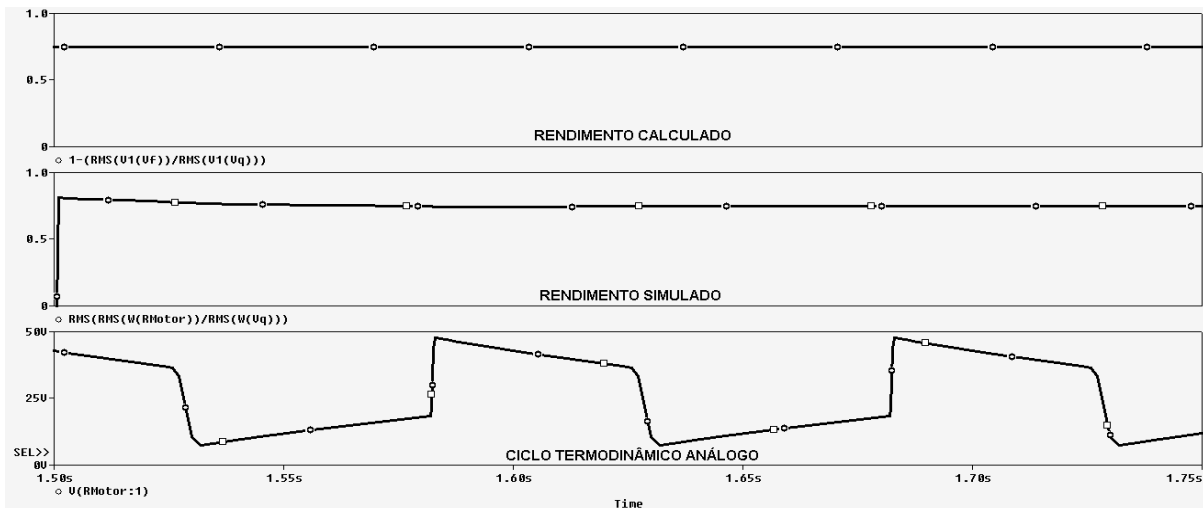


Figura 29 - Simulação Ciclo de Carnot 40V/10V

Fica mostrado, portanto, como na primeira simulação, que os rendimentos calculados pela relação das potências de entrada e potência do motor medidas, quanto os obtidos a partir das tensões análogas as fontes quentes e frias, são iguais ao rendimento definido para o Ciclo de Carnot.

$$\eta = 1 - \frac{10}{40} \equiv \eta = 1 - \frac{303}{1213} \approx 0,75 = (75\%)$$

Pode ser visto na Figura 30 que o comportamento do rendimento versus ao análogo da temperatura da fonte quente V_q , para uma modelagem com a analogia de fonte fria $V_f = 10V$

e a fonte quente V_q variando de 20V a 160V, equivalente para o ciclo de Carnot com $T_f = 303K$ e T_q variando entre 603 K e 5050 K.

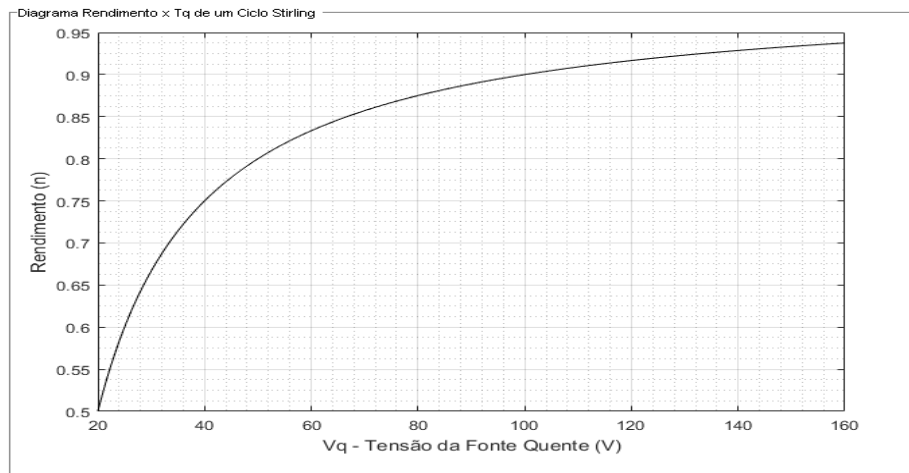


Figura 30 – Diagrama Rendimento x V_q de um Ciclo de Carnot

6.2 Simulações para Verificação na Prática do Análogo Elétrico para o Ciclo Stirling

Os modelamentos para o análogo elétrico do Ciclo Stirling que foram utilizados neste estudo são apresentados nas simulações a seguir, onde serão feitas além das análises de rendimento, também análises de perdas. Perdas essas conforme foram mencionadas anteriormente para o ciclo Stirling, para o meio externo.

6.2.1 Simulação Stirling 20/10V – Grandes Perdas

Nesta 3ª simulação, a configuração proposta para o análogo elétrico para o Ciclo Stirling, compreende um circuito com a tensão da fonte quente $V_q = 20V$ análogo a uma fonte de calor $T_q = 330^{\circ}C$ ou 603 K e da fonte fria $V_f = 10V$ análogo a uma fonte fria de temperatura ambiente $T_f = 30^{\circ}C$ ou 303 K, conforme a Figura 31.

Neste modelo, está sendo considerada a condição de que os materiais e isolamentos para o análogo mecânico desse modelo são muito ruins, onde as perdas para o meio e as perdas mecânicas são grandes, e, portanto o rendimento deverá ser muito baixo.

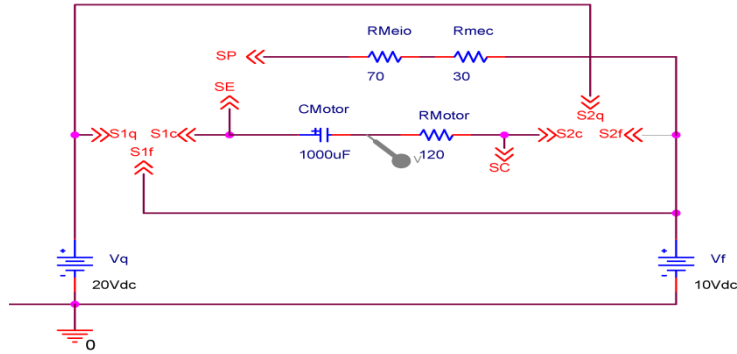


Figura 31 - Esquema Elétrico Stirling 20V/10V (Grandes Perdas)

Os resultados para essa simulação podem ser vistos na Figura 32, onde o rendimento calculado e o obtido pela simulação tem o mesmo valor. Também se observa na parte superior o cálculo do Fator de Perda.

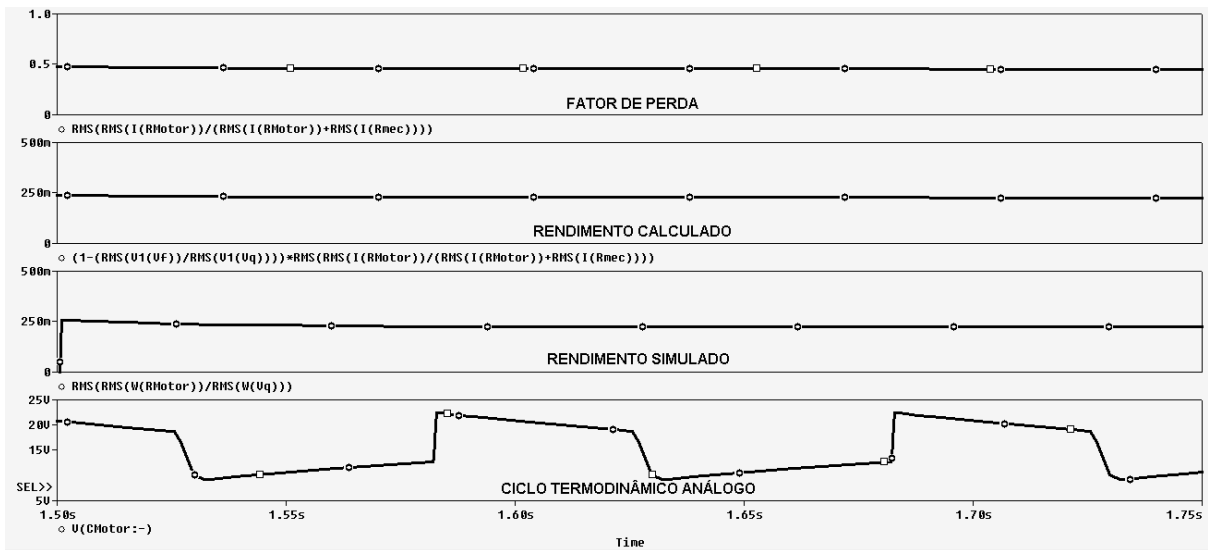


Figura 32 - Simulação Stirling 20V/10V (Grandes Perdas)

Como esperado o rendimento tanto obtido pela relação das potências de entrada e potência do motor medidas, quanto o calculado pelas tensões análogas as fontes quentes e frias, são iguais ao rendimento calculado para um motor conforme a equação dos rendimentos para o Ciclo Stirling:

$$F_p = 0,453 \text{ (obtido pela simulação)}$$

O Fator de Perda é calculado através da Eq. (101) do capítulo 5.2

$$F_p = \frac{I_m}{I_m + I_r}$$

Onde:

$$I_m = \frac{20V - 10V}{120\Omega} = 0,083 \text{ A}$$

$$I_r = \frac{20V - 10V}{100\Omega} = 0,1 \text{ A}$$

Resultando:

$$F_p = \frac{0,083}{0,183} = 0,4535$$

O cálculo do rendimento fica então:

$$\eta = \left[1 - \frac{10}{20}\right] \cdot 0,453 \quad \equiv \quad \eta = \left[1 - \frac{303}{603}\right] \cdot 0,453 \approx 0,5 \cdot 0,453 = (22,65)$$

Neste caso o ciclo Stirling apresenta um rendimento de 22,65 para um rendimento máximo de Carnot de 50%, para esta condição de operação.

6.2.2 Simulação Stirling 20/10V – Pequenas Perdas

Para essa 4ª simulação, a configuração proposta para este análogo elétrico do Ciclo Stirling, tem a tensão da fonte quente $V_q = 20V$ análogo a uma fonte de calor $T_q = 330^\circ C$ ou 603 K e da fonte fria $V_f = 10V$ análogo a uma fonte fria a temperatura ambiente $T_f = 30^\circ C$ ou 303 K, conforme Figura 33.

Porém nesta configuração, considera-se de que os materiais e isolamentos para o análogo mecânico desse modelo são bons, onde as perdas mecânicas e para o meio são bem menores se comparado ao modelo da Figura 31, portanto o rendimento deverá ser bem melhor.

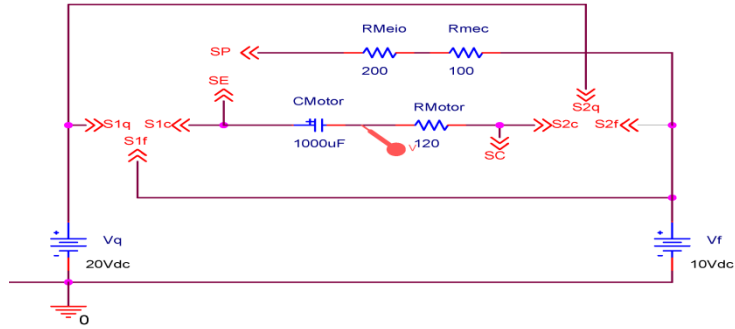


Figura 33 - Esquema Elétrico Stirling 20V/10V (Pequenas Perdas)

Os resultados para essa simulação são apresentados na Figura 34, onde mostrados estão o rendimento calculado pela equação e o obtido pela simulação, e como esperado são iguais. Também é mostrado o valor do Fator de Perda calculado, pelos valores obtidos na simulação.

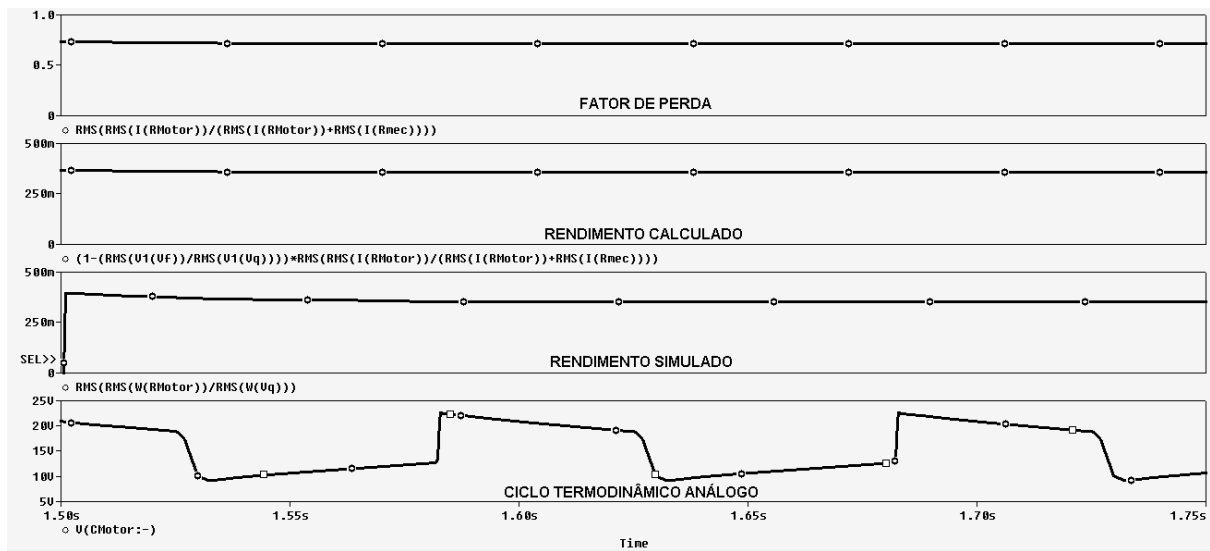


Figura 34 - Simulação Stirling 20V/10V (Pequenas Perdas)

Nesta configuração obtém-se o valor do Fator de Perda:

$$F_p = 0,713$$

Para:

$$I_m = \frac{10V}{120\Omega} = 0,083 A$$

E:

$$I_r = \frac{10V}{300\Omega} = 0,033 A$$

Desta forma,

$$F_p = \frac{0,083}{0,1163} = 0,7136$$

O rendimento neste caso é:

$$\eta = \left[1 - \frac{10}{20}\right] \cdot 0,713 \quad \equiv \quad \eta = \left[1 - \frac{303}{603}\right] \cdot 0,713 \approx 0,5 \cdot 0,713 = (35,65)$$

Para esta simulação nota-se de que o rendimento melhorou bastante ao ser comparado ao da 3ª simulação onde as perdas para o meio são maiores.

6.2.3 Simulação Stirling 40/10V – Grandes Perdas

Para esta 5ª simulação a configuração proposta para este análogo elétrico do Ciclo Stirling, é uma tensão da fonte quente $V_q = 40V$ análogo a uma fonte de calor $T_q = 940^\circ C$ ou 1213 K e da fonte fria $V_f = 10V$ análogo a uma fonte fria de temperatura ambiente $T_f = 30^\circ C$ ou 303 K, conforme a Figura 35. Considera-se para este modelo de que os materiais e isolamentos para o análogo mecânico deste são muito ruins, onde as perdas para o meio e as perdas mecânicas são grandes, portanto o rendimento deverá ser muito baixo.

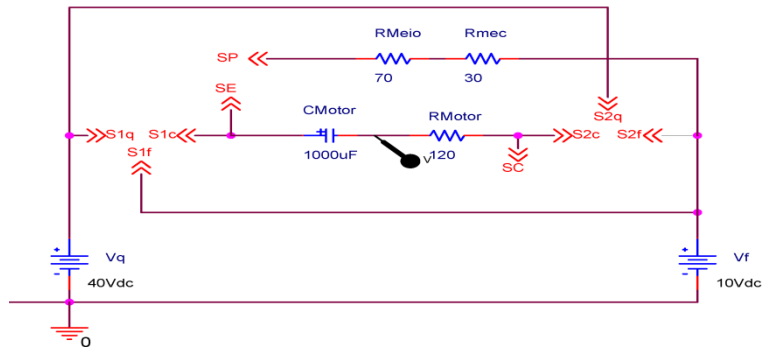


Figura 35 - Esquema Elétrico Stirling 40V/10V (Grandes Perdas)

Na Figura 36, para este caso, são mostrados o rendimento calculado pela equação dos rendimentos e também o obtido pela simulação. Também é apresentado o Fator de Perda.

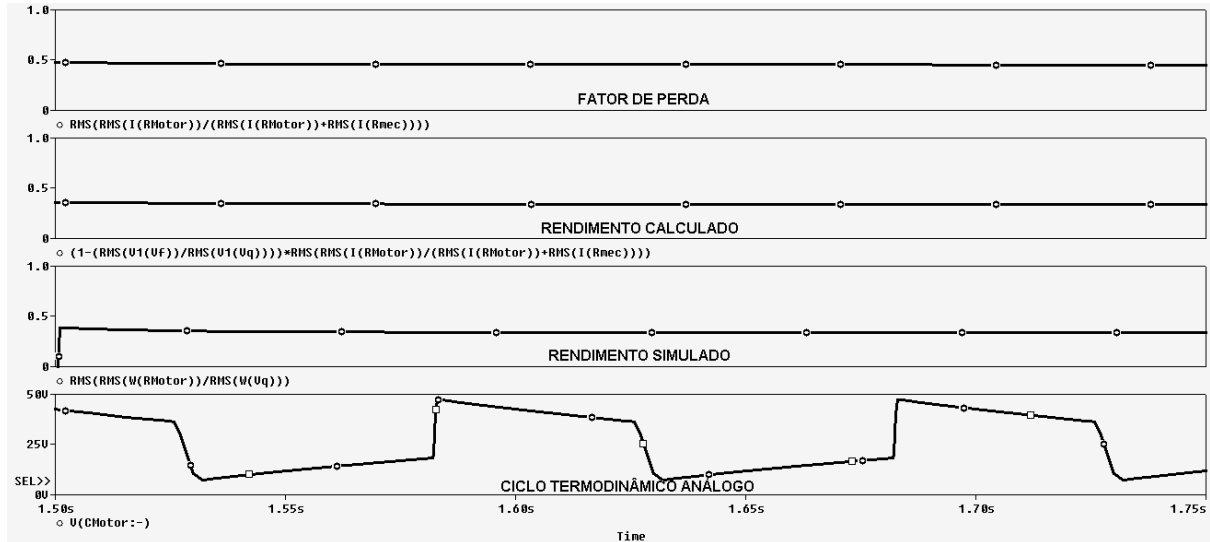


Figura 36 - Simulação Stirling 40V/10V (Grandes Perdas)

O fator de perda simulado para este caso é:

$$F_p = 0,454$$

Sendo

$$I_m = \frac{30V}{120\Omega} = 0,25 A$$

E

$$I_r = \frac{30V}{100\Omega} = 0,3 A$$

Tem-se

$$F_p = \frac{0,25}{0,55} = 0,4545$$

O cálculo do rendimento fica então:

$$\eta = \left[1 - \frac{10}{40}\right] \cdot 0,454 \quad \equiv \quad \eta = \left[1 - \frac{303}{1213}\right] \cdot 0,454 \approx 0,75 \cdot 0,454 = (34,05)$$

6.2.4 Simulação Stirling 40/10V – Pequenas Perdas

A configuração para esta 6ª simulação consiste de um análogo elétrico para o Ciclo Stirling com a tensão da fonte quente $V_q = 40V$ análogo a uma fonte de calor $T_q = 940^\circ C$ ou 1213 K e da fonte fria $V_f = 10V$ análogo a uma fonte fria de temperatura ambiente $T_f = 30^\circ C$ ou 303 K, conforme a Figura 37.

Como na 4ª simulação está se considerando que os materiais e isolamentos para o análogo mecânico desse modelo são bons, portanto as perdas para o meio e as perdas mecânicas são bem menores se comparado à simulação anterior, portanto o rendimento deverá ser bem melhor.

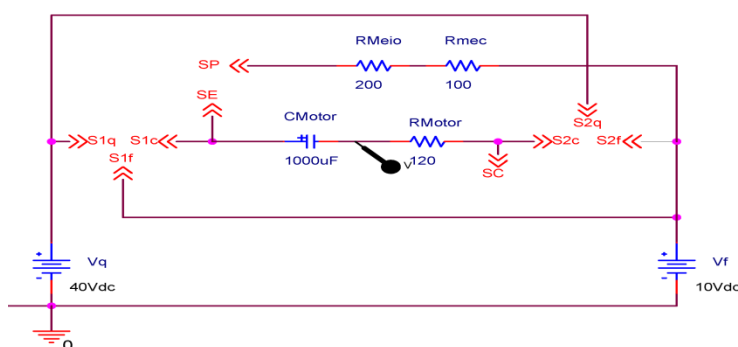


Figura 37 - Esquema Elétrico Stirling 40V/10V (Pequenas Perdas)

Os resultados para essa simulação podem ser vistos na Figura 38.

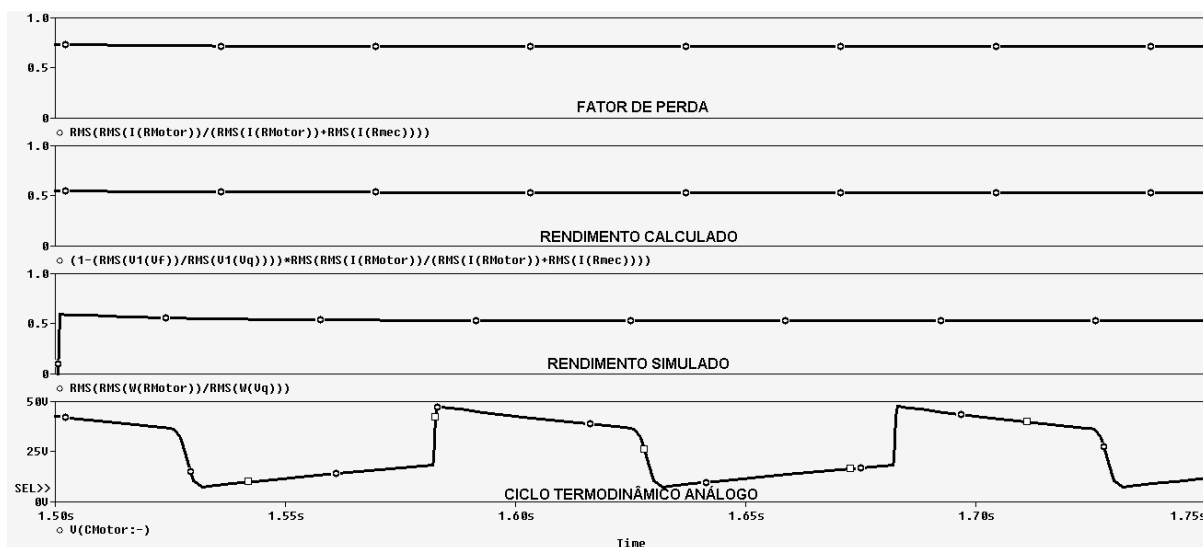


Figura 38 - Simulação Stirling 40V/10V (Pequenas Perdas)

Conforme a Figura 38, o Fator de Perda obtido pela simulação é:

$$F_p = 0,714$$

Para

$$I_m = \frac{30V}{120\Omega} = 0,25 A$$

E

$$I_r = \frac{30V}{300\Omega} = 0,1 A$$

Desta forma tem-se o Fator de Perda calculado:

$$F_p = \frac{0,25}{0,35} = 0,7142$$

O rendimento resultante será:

$$\eta = \left[1 - \frac{10}{40}\right] \cdot 0,714 \quad \equiv \quad \eta = \left[1 - \frac{303}{1213}\right] \cdot 0,714 \approx 0,75 \cdot 0,714 = (53,55)$$

Nota-se novamente para esta simulação, de que o rendimento melhorou consideravelmente se comparado ao da simulação anterior onde as perdas de calor para o meio e as perdas mecânicas são maiores.

Pode ser visto na Figura 39 o comportamento comparativo do rendimento versus ao análogo da temperatura da fonte quente V_q , para duas modelagens do ciclo Stirling. A primeira, com pequenas perdas e a segunda com grandes perdas. Para estas modelagens esta sendo utilizado para a analogia de fonte fria $V_f = 10V$ e para a da fonte quente V_q , de uma variação de 20V a 160V, que corresponde a $T_f = 303 K$ e T_q variando entre 603 K e 5050 K.

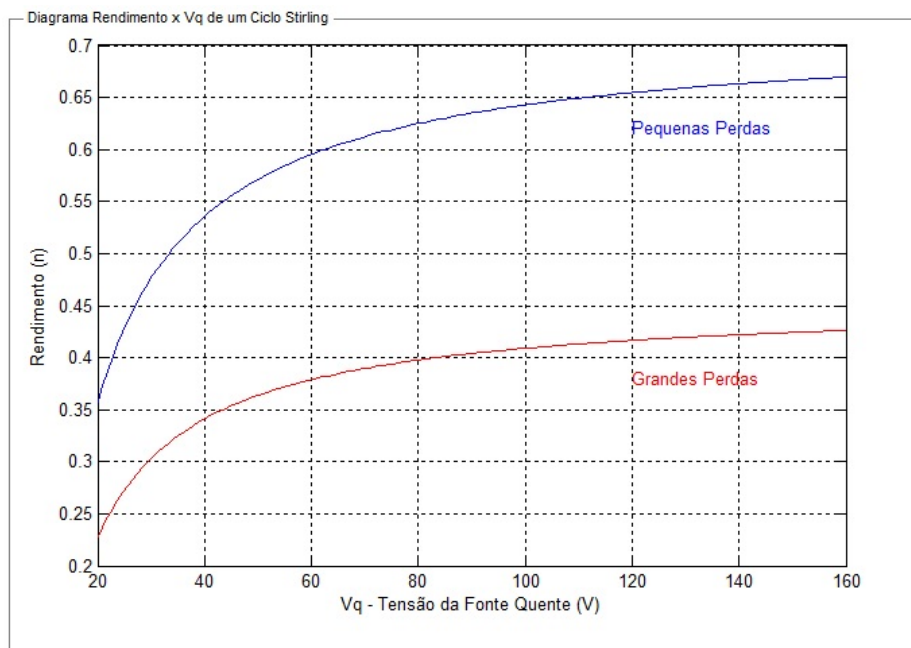


Figura 39 – Diagrama Rendimento x Vq de um Ciclo Stirling (Pequenas e Grandes Perdas)

6.2.5 Simulações com Regenerador Stirling

Ficou demonstrado com as simulações anteriores de que se pode melhorar o rendimento mediante o aumento da diferença de calor entre as fontes quentes e frias, aqui analogamente as tensões (V_{cc}) das fontes quentes e frias.

Através das simulações a seguir, será visto que este aumento do rendimento do sistema pode ser feito também ao adicionar-se um regenerador, que fará com que as perdas de energia do sistema sejam reduzidas pelas suas características construtivas. Porém a eficiência de um regenerador nunca é 100% e ainda assim existem as perdas pela troca de calor entre as câmaras e também pelas suas paredes.

6.2.5.1 Simulação Stirling 20/10V - Grandes Perdas com Regenerador

Na configuração desta 7ª simulação, é inserido um regenerador no circuito da 3ª simulação, Figura 31 no capítulo 6.2.1, conforme a Figura 40.

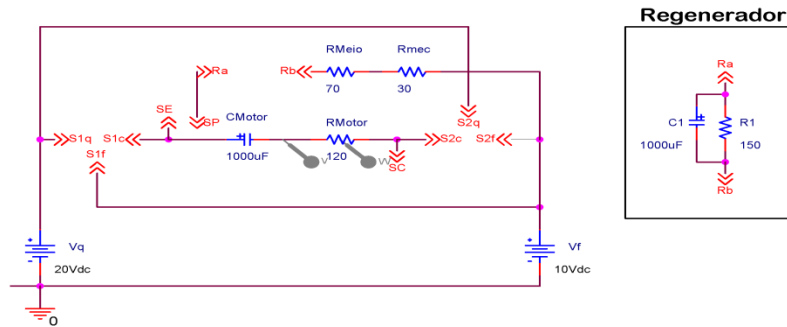


Figura 40 - Esquema Elétrico Stirling 20V/10V (Grandes Perdas com Regenerador)

Verifica-se de que o rendimento teve uma melhora significativa, o Fator de Perda que era de 0,453 aumentou para 0,674.

Com isso observa-se pelos cálculos abaixo o novo rendimento.

Conforme a Figura 41, o Fator de Perda obtido pela simulação é:

$$F_p = 0,674$$

Para

$$I_m = \frac{10V}{120\Omega} = 0,083 A$$

E

$$I_r = \frac{10V}{250\Omega} = 0,04 A$$

Desta forma tem-se o Fator de Perda calculado:

$$F_p = \frac{0,083}{0,123} = 0,6747$$

O cálculo do rendimento fica então:

$$\eta = \left[1 - \frac{10}{20}\right] \cdot 0,674 = 0,5 \cdot 0,674 = (33,70)$$

Desta forma o rendimento que era de 22,65 aumentou para 33,70

Pela atuação do regenerador, houve um aumento significativo no rendimento, que pode ser visto na Figura 41.

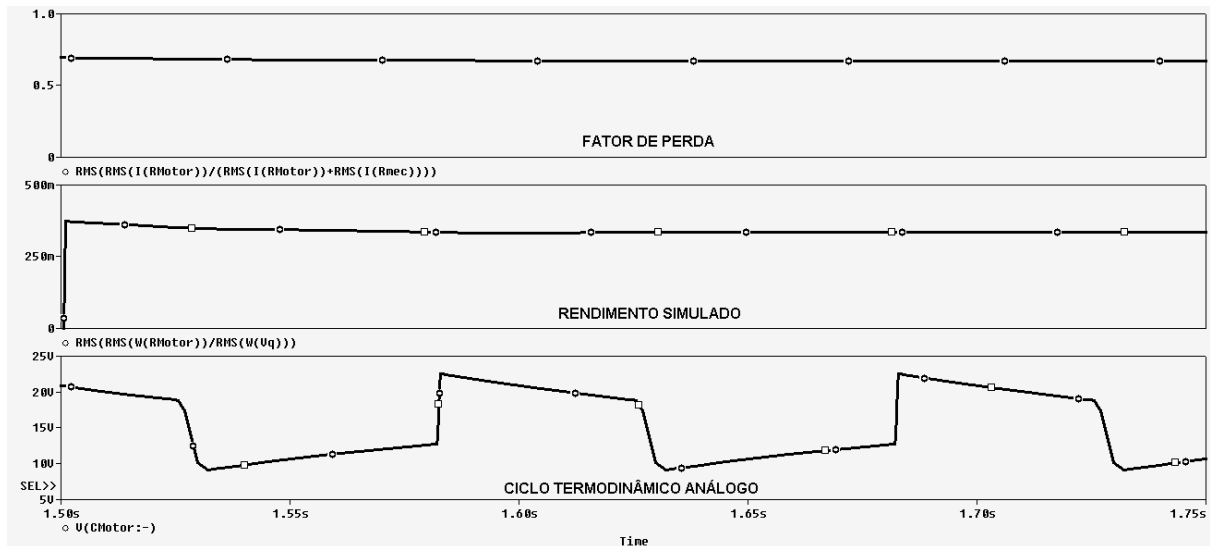


Figura 41 - Simulação Stirling 20V/10V (Grandes Perdas com Regenerador)

Também se analisará aqui a diferença de potência entregue para o motor, com duas situações distintas, uma sem regenerador e a outra com regenerador.

Nas Figuras 42 e 43, pode-se ver a comparação entre as potências entregue para o motor nessas duas condições.

Verifica-se como esperado, que a potência entregue para o motor com a regeneração do calor é maior do que a sem a regeneração. A potência entregue ao motor, sem regenerador é de 784 mW e a com regenerador é de 795 mW. Conclui-se, portanto de a potência entregue ao motor aumenta com a atuação do regenerador.

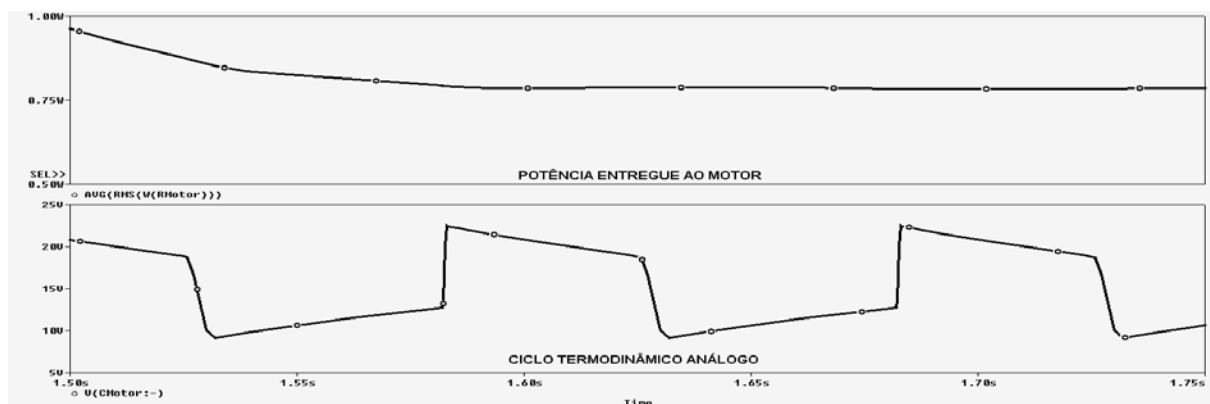


Figura 42 - Potência Motor Stirling 20V/10V (Grandes Perdas sem Regenerador)

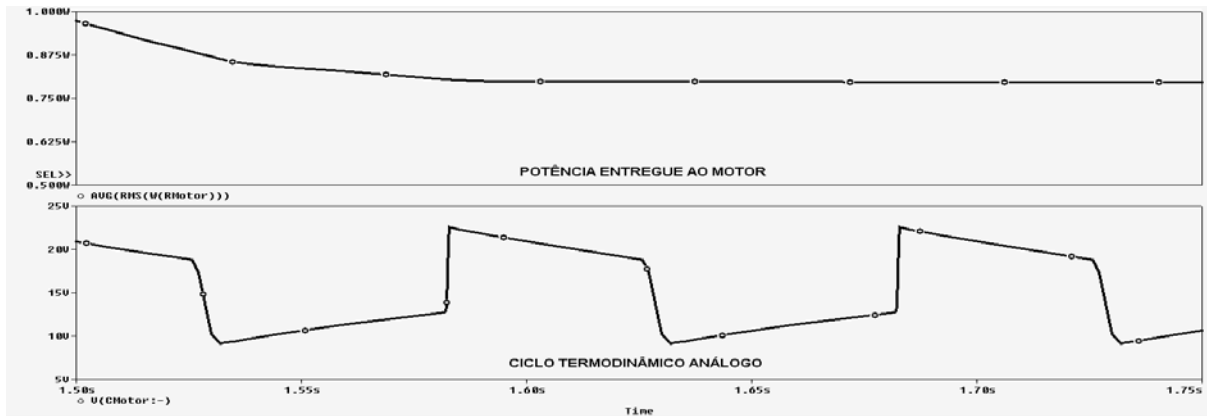


Figura 43 - Potência Motor Stirling 20V/10V (Grandes Perdas com Regenerador)

6.2.5.2 Simulação Stirling 20/10V - Pequenas Perdas com Regenerador

Para esta análise, 8ª simulação, é inserido um regenerador no circuito da segunda simulação, Figura 33 no capítulo 6.2.2, conforme o circuito representado pela Figura 44.

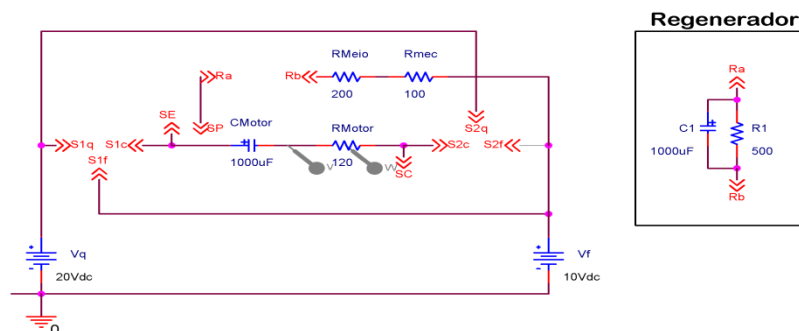


Figura 44 - Esquema Elétrico Stirling 20V/10V (Peq. Perdas com Regenerador Eficiente)

Espera-se de que este conjunto, por ter pequenas perdas e ainda um regenerador bem dimensionado e de boa eficiência, venha a ter um excelente rendimento, se comparado aos demais. Apresentam-se os resultados desta simulação com um regenerador na Figura 45, e verifica-se de que melhorou, o Fator de Perda, F_p , que era de 0,713 aumentou para 0,867.

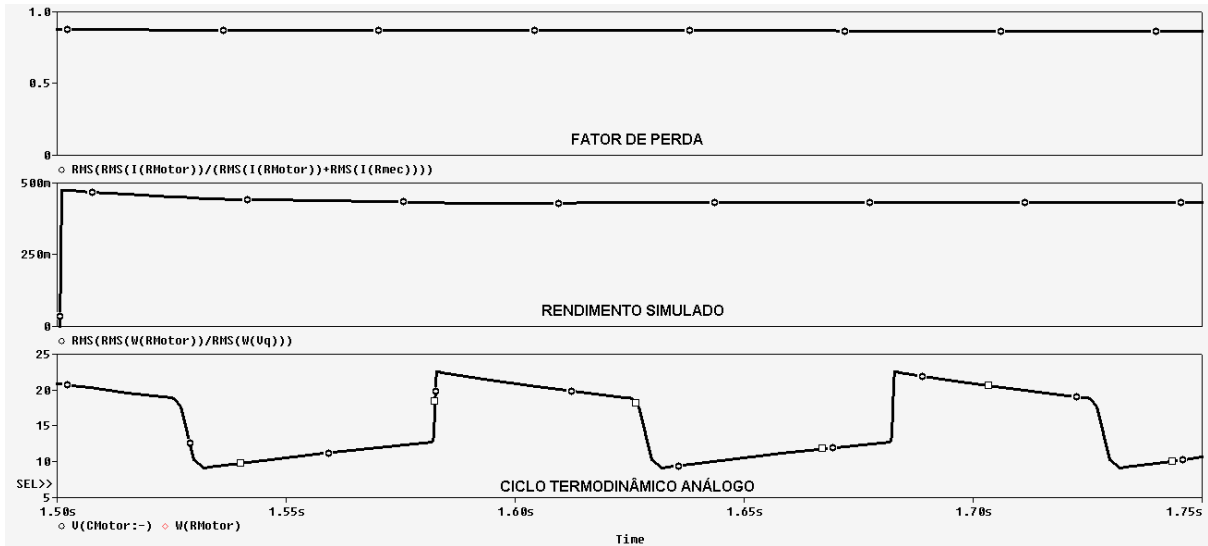


Figura 45 - Simulação Stirling 20V/10V (Peq. Perdas com Regenerador Eficiente)

Com isso pode ser visto pelos cálculos a seguir de que o novo rendimento teve uma melhora significativa.

Conforme a Figura 45, o Fator de Perda obtido pela simulação é:

$$F_p = 0,869$$

Para

$$I_m = \frac{10V}{120\Omega} = 0,083 A$$

E

$$I_r = \frac{10V}{800\Omega} = 0,0125 A$$

Desta forma tem-se o Fator de Perda calculado

$$F_p = \frac{0,083}{0,0955} = 0,8691$$

O cálculo do rendimento fica então:

$$\eta = \left[1 - \frac{10}{20}\right] \cdot 0,869 = 0,5 \cdot 0,869 = (43,45)$$

Vê-se aqui que o rendimento que era de 35,65 aumentou para 43,45

Agora se altera para esta 9ª simulação, para mostrar a diferença dos resultados, para um regenerador mal dimensionado ou de pouca eficiência ou má qualidade, conforme na Figura 46.

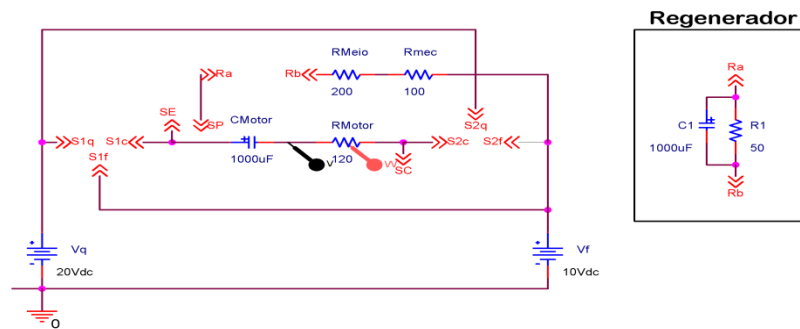


Figura 46 - Esquema Elétrico Stirling 20V/10V (Peq. Perdas com Regenerador Fraco)

Apresentam-se os resultados desta simulação na Figura 47, com este regenerador não muito eficiente, e verifica-se de que houve aumento no rendimento.

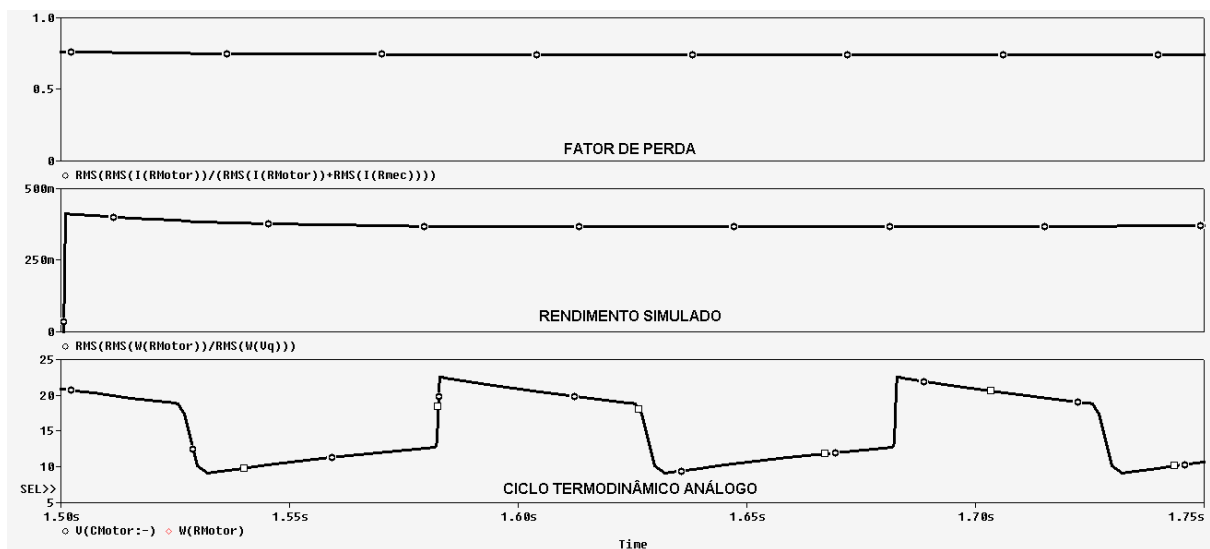


Figura 47 - Simulação Stirling 20V/10V (Peq. Perdas com Regenerador Fraco)

Com isso observa-se que pelos cálculos do rendimento abaixo de que o novo rendimento não teve um melhora significativa se comparada ao rendimento de um regenerador melhor dimensionado e/ou de melhor qualidade.

Conforme a Figura 47, o Fator de Perda obtido pela simulação é:

$$F_p = 0,741$$

Para

$$I_m = \frac{10V}{120\Omega} = 0,083 A$$

E

$$I_r = \frac{10V}{350\Omega} = 0,0286 A$$

Desta forma tem-se o Fator de Perda calculado

$$F_p = \frac{0,083}{0,112} = 0,741$$

O cálculo do rendimento fica então:

$$\eta = \left[1 - \frac{10}{20}\right] \cdot 0,741 = 0,5 \cdot 0,741 = (37,05)$$

Desta forma o rendimento que era de 35,65% aumentou somente para 37,05%

A conclusão que se chega, é a da grande importância de se trabalhar com regeneradores eficientes para as máquinas Stirling. Se as perdas de calor forem diminuídas ou minimizadas, contribuir-se-á significativamente para o aumento do rendimento.

Para esse modelo onde as perdas de calor e mecânicas são pequenas, mostrar-se um diagrama conforme a Figura 48, o comportamento comparativo do rendimento versus ao análogo da temperatura da fonte quente V_q , para duas modelagens do ciclo Stirling. A primeira, com regenerador eficiente e a segunda sem regenerador. Para estas modelagens esta sendo utilizado para a analogia de fonte fria $V_f = 10V$ e para a da fonte quente V_q , de uma variação de 20V a 160V.

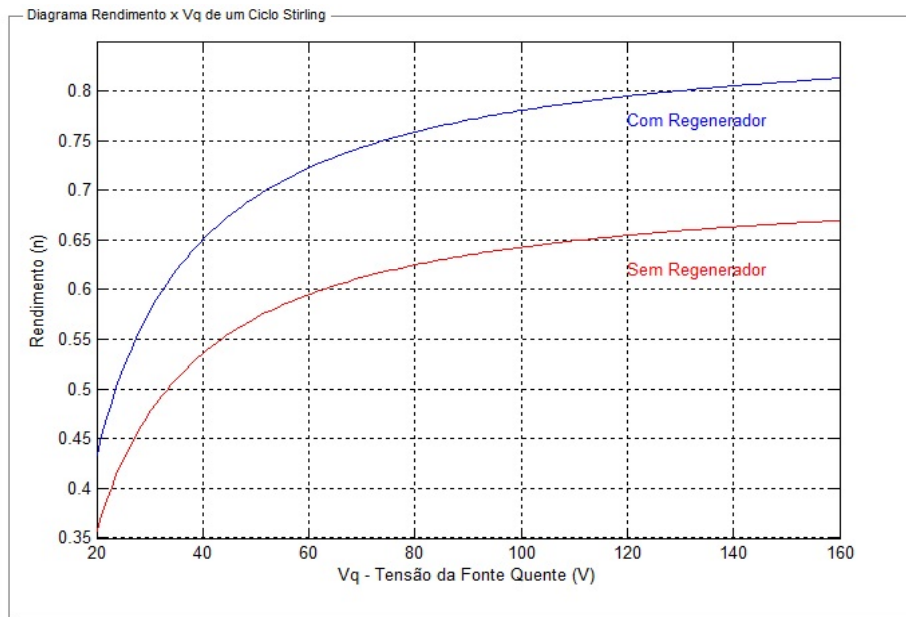


Figura 48 – Diagrama Rendimento x Vq de um Ciclo Stirling (Com e Sem Regenerador)

Na Figura 49 pode ser visto a relação entre o rendimento e o Fator de Perda. Nota-se de que existe uma relação direta entre o rendimento e o Fator de Perda. Para se maximizar eficiência de rendimento, deve-se projetar um conjunto, minimizando as perdas térmicas e mecânicas, o que envolve um regenerador eficiente.

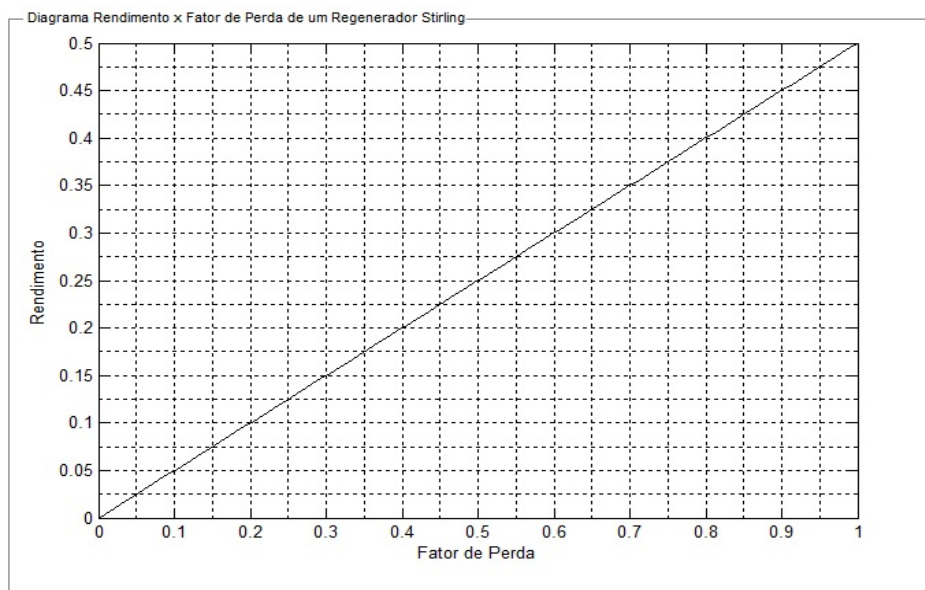


Figura 49 – Rendimento x Fator de Perda (F_p) Regenerador Análogo Stirling

Para este caso de analogia na modelagem as dimensões não precisam necessariamente manter uma relação direta de proporções entre o elétrico e o mecânico. Para o cálculo do rendimento, necessariamente a temperatura tem que ter uma relação proporcional com a análoga tensão elétrica. A fonte quente análoga de 20V não pode representar uma fonte de calor de 20 K. Conforme se utilizou nas simulações onde $20V \cong 603 \text{ K}$ e assim proporcionalmente a fonte fria de $10V \cong 303 \text{ K}$, e ou quaisquer outros valores que se queira, desde que se mantenha uma relação $\frac{V_f}{V_q} \cong \frac{T_f}{T_q}$, para que os cálculos sejam corretos.

6.3 Regenerador Stirling Análogo Elétrico

Para esse estudo, serão calculados os valores dos componentes de um circuito elétrico RC análogo de um regenerador Stirling. Utiliza-se aqui para o cálculo RC de um regenerador análogo, a fórmula de analogia de um modelo físico real para um circuito RC (Incropera 6ª Edição, Fundamentos de Transferência de calor e Massa, 2006 - Capítulo 5, página 258, equação 5.7.)

$$\tau_t = \frac{\rho \cdot V_C}{h \cdot A_S} = R_1 \cdot C_1 \quad \text{Eq. (5.7)}$$

Onde:

τ_t = Constante de tempo térmica;

ρ = Massa específica;

h = Coeficiente de transferência de calor por convecção do material;

V_C = Volume do corpo;

A_S = Área da superfície;

R_1 = Resistência de transferência de calor por convecção;

C_1 = Capacitância térmica global do sólido.

O circuito elétrico análogo que está sendo estudado aqui representa a analogia proporcional de um motor Stirling de pequenas dimensões.

O regenerador foi dimensionado conforme o desenho da figura 50.

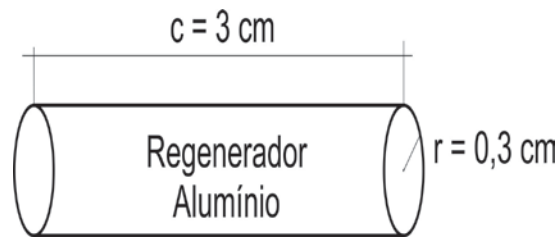


Figura 50 - Regenerador Pequenas Dimensões Stirling

Nesta modelagem considerou-se como as grandezas para as dimensões e o material o alumínio:

$$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3;$$

$$h = \text{entre } 0,40 \text{ a } 40,00 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K});$$

$$V_C = 8,4823 \times 10^{-7} \text{ m}^3;$$

$$A_S = 6,2203 \times 10^{-4} \text{ m}^2;$$

$$\tau_t = \frac{\rho \cdot V_C}{h \cdot A_S} = \frac{2700 \cdot 8,4823 \times 10^{-7}}{h \cdot 6,2203 \times 10^{-4}}$$

O valor de τ_t varia de 9,2 a 0,092, conforme se pode ver na Figura 51.

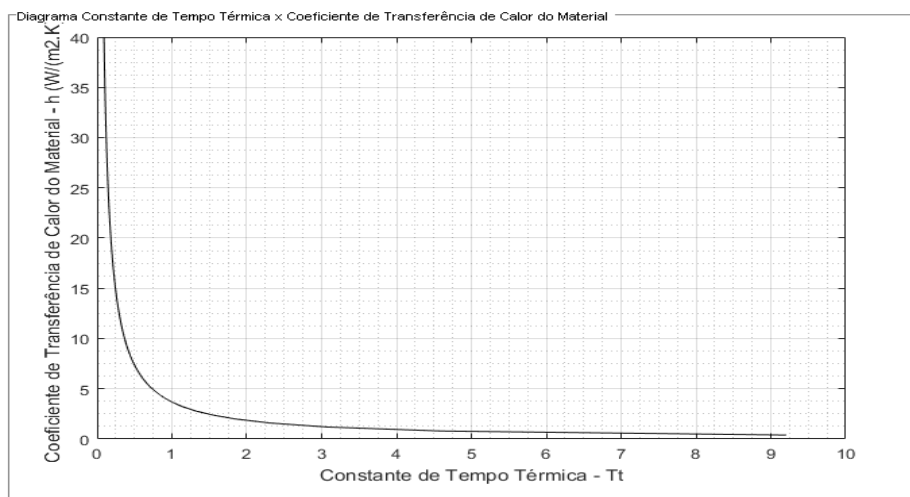


Figura 51 – Diagrama Coeficiente de transferência de calor por convecção x Constante de tempo térmica

A Constante de tempo térmica é definida pela equação:

$$\tau_t = R_1 \cdot C_1$$

Onde R_1 é a resistência e C_1 a capacitância do material

Escolhe-se um valor da resistência considerando-se a relação do valor das perdas da modelagem análogo elétrica.

$$R_1 = 500 \Omega$$

Para se calcular C_1 :

$$C_1 = \frac{\tau_t}{R_1} = \frac{\tau_t}{500}$$

Os valores de capacitância variam de $18\mu\text{F}$ a $18400 \mu\text{F}$.

Adotando-se um valor médio, chega-se ao valor do capacitor de aproximadamente $0,001\text{F}$, ou seja $1000 \mu\text{F}$, conforme mostrado na Figura 52, o qual é o que foi utilizado para o regenerador deste estudo.

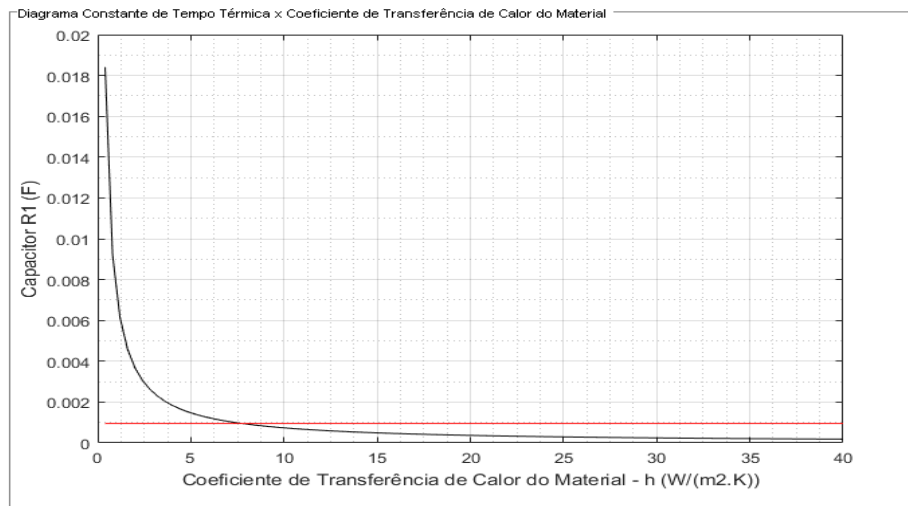


Figura 52 – Diagrama Capacitância x Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção

Portanto chegou-se aos valores RC diretamente proporcionais para o circuito elétrico análogo do regenerador Stirling.

6.4 Aumento de Potência de um Regenerador em Diferentes Frequências de Operação

Este estudo compreende na análise dos valores do rendimento em relação a várias frequências de funcionamento para o circuito da Figura 44.

Os valores do resistor e do capacitor para o circuito RC foram: $R_1 = 500\Omega$ e $C_1 = 1000\mu\text{F}$. Composto-se assim o regenerador RC análogo proporcional ao real físico conforme valores obtidos no capítulo anterior 6.3.

Para conseguir este resultado de estudo, foram feitas várias simulações com o circuito da Figura 39, variando-se a frequência de funcionamento de 200 Hz a 1000 Hz. O aumento de potência com o regenerador em relação à frequência de operação do circuito eletrônico pode ser visto na Figura 53.

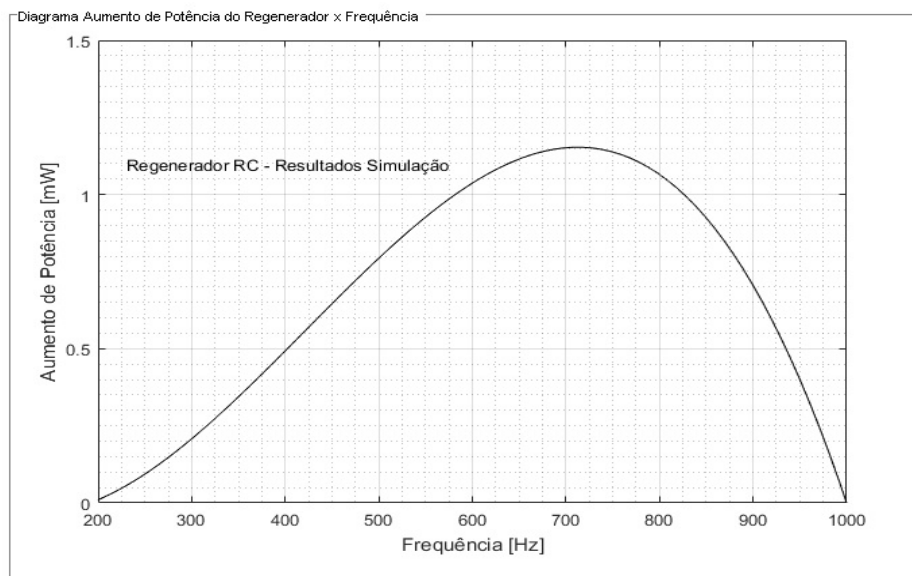


Figura 53 - Aumento de Potência x Frequência [Hz] Regenerador Análogo Stirling

Cheng e Yang, (2011), que realizaram testes com um regenerador Stirling, aonde chegaram à conclusão de que o aumento da potência do motor com o auxílio do regenerador é variada conforme a curva da Figura 54.

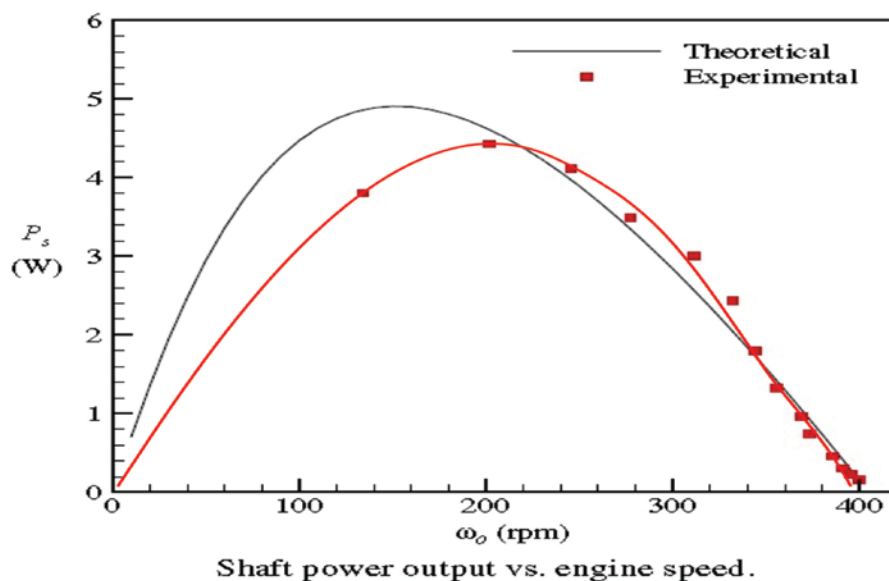


Figura 54 – Variação da Potência x Rotação de um Regenerador Stirling

Fonte: Cheng e Yang, "Analytical Model for Predicting the Effect of Operating Speed on Shaft Power Output of Stirling Engines", (2011).

Comparando-se as Figuras 53 e 54 pode-se ver que os resultados são similares, mostrando que o regenerador análogo elétrico tem o funcionamento similar ao do regenerador Stirling real mecânico.

Pode-se observar que as grandezas estão em dimensões diferentes nos gráficos, frequência no elétrico e velocidade angular no mecânico. O ponto fundamental aqui é mostrar que em ambos os resultados, o rendimento varia com a frequência ou a velocidade de rotação.

A conclusão que se chega é que, o rendimento de um regenerador depende da frequência de operação, por isso deve ser dimensionado de forma tal a ter um melhor rendimento para a frequência em que se vai trabalhar. As características RC do regenerador, resistência e capacitância, devem ser trabalhadas de forma a se obter um melhor resultado possível.

Se pudessem ser ajustados os valores RC do regenerador Stirling real, este operaria sempre no valor máximo de rendimento para todas as frequências. Para o análogo elétrico é possível, e deve ser utilizado um resistor variável, também chamado de potenciômetro ou trimpot, para ajustar o valor de $R_1 = 500\Omega$ para outro valor, de tal modo a poder entregar

sempre a mesma potência ao motor igual à máxima, que neste caso foi na frequência de 710 Hz. Para este modelo, precisou ser utilizado um potenciômetro linear de 1K Ω , podendo ser alterado seu valor entre 1K Ω e 500 Ω . No diagrama da Figura 55 pode ser visto a variação da resistência elétrica.

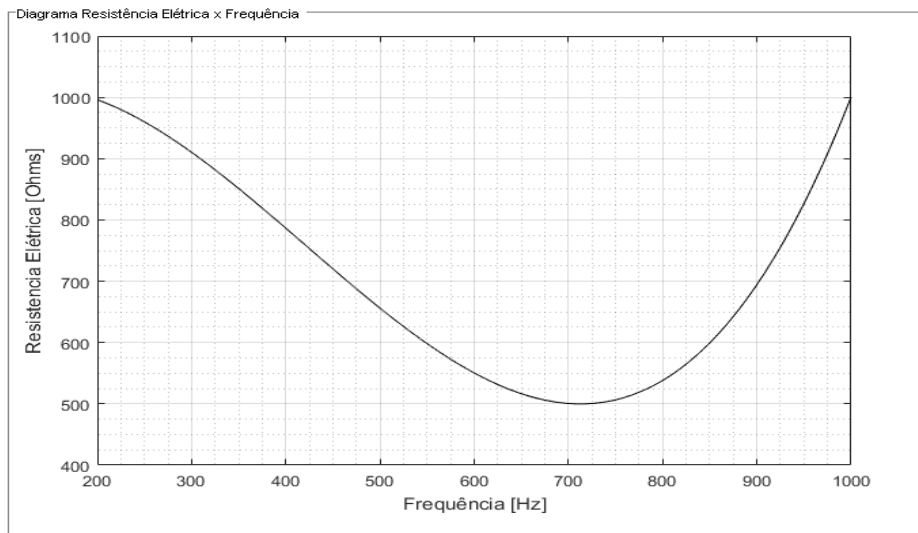


Figura 55 – Diagrama Resistência x Frequência para o Regenerador Análogo Stirling

7. CONCLUSÃO

Para os motores de combustão externa baseados no ciclo termodinâmico de Carnot e Stirling, devido às suas características de construção e do comportamento das grandezas físicas análogas com grandezas elétricas, para estes, podem facilmente ser reproduzidos em um modelo na forma de circuitos elétricos, que se chamou aqui de análogo elétrico.

Buscou-se utilizar circuitos elétricos simples para uma melhor compreensão do método. Porém esses circuitos quando projetados de formas mais complexas, se tornam muito mais semelhantes aos motores reais, porém os cálculos são mais complexos e de mais difícil entendimento.

Este estudo serviu para demonstrar que os modelos análogos elétricos aqui feitos para os modelos mecânicos das máquinas térmicas operando nos ciclos termodinâmicos de Carnot e Stirling, são funcionais.

Demonstrados de forma matemática e com as diversas simulações feitas com circuitos eletrônicos modelados por simulador, pelos seus resultados pode-se verificar a veracidade dos modelos. Deve-se levar em conta principalmente as simulações comparativas do análogo com o Stirling real que foi abordado nos capítulos 6.3 e 6.4, ficando-se claro de que o comportamento em ambos os casos são muito parecidos, quando se não idênticos.

Assim sendo, a modelagem destes circuitos eletrônicos análogos aos modelos mecânicos podem reproduzir a forma e os resultados de um modelo mecânico, só que, porém de fácil acesso e baixos custos, comparados a se ter que usar peças e utilizar sensores caros e a utilização de laboratórios e equipamentos de aquisição de dados.

O propósito deste método é que seja utilizado para se projetar e entender os problemas e se achar soluções para os motores em estudo, para que posteriormente se tenha maiores subsídios para o dimensionamento e a construção dos motores mecânicos. Este método também é um melhor custo benefício para ser apresentado de forma acadêmica.

Primariamente o fundamento deste trabalho é demonstrar que as grandezas físicas da mecânica têm suas referentes análogas na eletricidade. Portanto podem-se utilizar circuitos eletrônicos para estudos que tragam melhores entendimentos e melhoramentos nos funcionamentos dos motores mecânicos.

Este é apenas um passo inicial para a utilização deste recurso, que ficando cada vez mais conhecida e desenvolvida, venha no futuro trazer grandes benefícios e praticidades aos estudos nos desenvolvimentos tecnológicos.

Alguma das principais vantagens em se utilizar o análogo elétrico para se estudar, projetar e realizar as simulações de uma máquina térmica são:

- Os entendimentos dos fenômenos da termodinâmica por sua analogia com os elétricos ficam mais simples de se assimilar;
- Baixo custo com gastos, peças e mão de obra, que praticamente não existe;
- Local reduzido, não é necessário um laboratório, apenas uma mesa e um computador;
- Agilidade na construção, análise, compreensão, facilidade nos modelamentos e controles.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDER, CHARLES K.; SADIKU, MATTHEW N.O., “Fundamentals of Electric Circuits”, 3rd Edition, McGraw-Hill Science, (2006).

BLANK, DAVID A. and WU, CHIH, “Power Optimization of an Extra-Terrestrial, Solar-Radiant Stirling Heat Engine”, Energy Vol. 20, No. 6, pp. 523-530, (1995).

BLANK, DAVID A.; DAVIS, GREGORY W. and WU, CHIH, “Power Optimization of an Endoreversible Stirling Cycle With Renegeration”, Energy Vol.19, No. I, pp. 125-133, (1994).

CENGEL, YUNUS A.; BOLES, MICHAEL A., “ Thermodynamics. An Engineering Approach” 7th ed., New York : McGraw-Hill, (2011).

CHEN, MINGHUA, “The Physics Teacher”, Vol.27, No.4, p272-273, Shaoxing County, Zhejiang Province, People’s Republic of China, (1989).

CHENG, CHIN-HSIANG; YANG, HANG-SUIN, ” Analytical Model for Predicting the Effect of Operating Speed on Shaft Power Output of Stirling Engines”, Applied Energy 36 , pp. 5899–5908, (2011)(a).

CHENG, CHIN-HSIANG; YANG, HANG-SUIN, ”Optimization of Geometrical Parameters for Stirling Engines Based on Theoretical Analysis”, Applied Energy 92 , pp. 395–405, (2011)(b).

CULLEN, BARRY; MCGOVERN, JIM, “Energy system feasibility study of an Otto cycle/Stirling cycle hybrid automotive engine”, Energy 35 pp.1017–1023, (2010).

FEYNMAN, RICHARD P.; LEIGHTON, ROBERT B. AND SANDS, MATTHEW, “The Feynman Lectures on Physics”, 6a ed.,United States of America: CIT, (1977).

GILLISPIE, CHARLES COULSTON; PISANO, RAFFAELE, ” Lazare and Sadi Carnot - History of Mechanism and Machine Science”, 2a ed, Berlin, Alemanha , (2014).

HU, ZHONG JUN; LI, ZHENG YU; LI QING; LI QIANG, “Evaluation of Thermal

Efficiency and Energy Conversion of Thermoacoustic Stirling Engines, Energy 51 pp.802–812, (2010).

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P., “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, 6a. ed., New York: Wiley, (2006).

KREITH, FRANK; MANGLIK, RAJ M. & BOHN, MARK S., “Principles of Heat Transfer”, 7th ed., Cengage Learning, Inc , (2014).

MIT, “The Internal combustion engine (Otto Cycle)”, web.mit.edu, (2006).

MORAN, SHAPIRO ,”Fundamentals of Engineering Thermodynamics”, 8th ed., John Wiley & Sons Ltd, (2014).

MOTOR DE STIRLING (STIRLING, ROBERT), “A História do Motor de Stirling”, motorstirling.wordpress.com, (2014).

ORGAN, ALLAN J., “Thermodynamics and Gas Dynamics of the Stirling Cycle Machine”, Engineering Department, University of Cambridge, (2010).

Park, S.H. e Lee, Y. S., “An Approximate Thermal Analysis of Stirling Engine Regenerators”, KSME Journal, Vol. 7, No.2, pp. 133-143, (1993)

PUECH, PASCAL; TISHKOVA, VICTORIA, “Thermodynamic analysis of a Stirling engine including regenerator dead volume”, Renewable Energy 36 pp. 872 e 878, (2011).

QUADROS, SÉRGIO, “A Termodinâmica e a Invenção das Maquinas Térmicas”, Editora Scipione, (1981).

SIER, ROBERT, “A Biography of the Inventor of the Heat Economiser and Stirling Cycle Engine”, Editora L.A Mair, (1995).

THOMBARE, D.G.; VERMA, S.K., ”Technological Development in the Stirling Cycle Engines”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 pp. 1–38I, (2008).

TIMOUMI, YOUSSEF; TLILI, ISKANDER; NASRALLAH, SASSI BEN, “Design and

performance optimization of GPU-3 Stirling engines”, Energy 33 pp.1100–1114, (2008).

TOGHYANI, SOMAYEH; KASAEIAN, ALIBAKHSH ; AHMADI, MOHAMMAD H.,
”Multi-objective Optimization of Stirling Engine Using Non-ideal Adiabatic Method”,
Energy Conversion and Management 80 pp. 54–62, (2014).

TURSUNBAEV A.; ORDA, E. P.; LEZHEBOKOV, A. I.; KOROBKOV, A. P.;
SEMYANNIKOV, A. I., “Solar Stirling Engine Rig Tests”, Applied Solar Energy, Vol. 46,
n°. 3, pp. 175–178., (2010).

USHER, A. P.; “A History of Mechanicals Inventions”, 1st edition, McGraw-Hill book
company Inc., New York, (1929).

VAN WYLLEN, G.J.; SONNTAG, R.E. ; BORGNAKKE, C. - Fundamentos da
Termodinâmica. 6ª Edição, Ed. Edgard Blücher, (2003).