# PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARNO IOCKHECK

# DESENVOLVIMENTO DE MÁQUINA TÉRMICA DE CICLO DIFERENCIAL

CURITIBA 2015

### MARNO IOCKHECK

# DESENVOLVIMENTO DE MÁQUINA TÉRMICA DE CICLO DIFERENCIAL

Dissertação apresentada ao programa de pósgraduação em Engenharia Mecânica, pelo Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Pontificia Universidade Católica do Paraná, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luís Mauro Moura

CURITIBA 2015

### MARNO IOCKHECK

# DESENVOLVIMENTO DE MÁQUINA TÉRMICA DE CICLO DIFERENCIAL

Trabalho apresentado à banca examinadora do programa de Mestrado em Engenharia Mecânica, da Pontificia Universidade Católica do Paraná. Curitiba, Paraná, Brasil.

> Prof. Dr. Álvaro César Camargo do Amarante Curso de Engenharia de Alimentos (PUCPR)

Prof. Dr. José A. A. Velásquez Alegre Curso de Engenharia Mecânica (UTFPR)

Prof. Dr. Luís Mauro Moura (orientador) Programa de Pós Graduação em Eng. Mecânica (PUCPR)

Prof. Dr. Stephan Hennings Och Programa de Pós Graduação em Eng. Mecânica (PUCPR)

Curitiba, 06 de fevereiro de 2015.

### AGRADECIMENTOS

Aos professores Michelle Sostag Meruvia, Roberto Dalledone Machado, João Elias Abdalla Filho, Viviana Cocco Mariani, pelos trabalhos de instruções e de ensinamentos nas diversas disciplinas do curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica.

À Pontificia Universidade Católica do Paraná que acolheu o Tema proposto para o presente Curso de Mestrado, e viabilizou este estudo.

Aos amigos Claudio Von Dokonal, Erisson B. Durante pelo apoio neste trabalho inovador e muito desafiador.

Especialmente ao professor Luís Mauro Moura, pelo forte apoio, orientações científicas essenciais e de extrema importância para a realização teórica e física do modelo de ensaio, objeto da presente dissertação.

Especialmente ainda ao amigo Saulo Finco pelos esforços na realização do projeto do primeiro modelo experimental de laboratório, na composição de idéias para o aprimoramento da tecnologia e ainda pelo apoio e encorajamento para a continuidade das pesquisas.

Especialmente também a Vitor Hugo Iockheck, meu filho, pelo apoio e entusiasmo cativante de criança a qual de uma forma ou de outra nos faz ir muito além da imaginação limitada de um adulto.

Registra-se o meu agradecimento a todos. O apoio, críticas e sugestões foram decisivas para a conclusão deste trabalho.

### **DIREITOS DE PROPRIEDADE**

O presente tema de mestrado é baseado em tecnologias de propriedade da empresa ABX Energia Ltda, conceitos, desenhos, metodologias e partes do texto do presente documento não podem ser utilizados para reprodução por qualquer meio, seja ele em forma física, construída para obter força mecânica, seja para reprodução em papel ou em mídia eletrônica sem o consentimento e ou licenciamento dos direitos de uso pela instituição proprietária.

### **RESUMO**

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de um novo conceito de máquina térmica de circuito fechado, e abrange a definição do princípio de funcionamento com base nos fundamentos teóricos, dedução das expressões dos processos do ciclo, o projeto e construção de uma máquina experimental cujo objetivo é concretizar o ciclo termodinâmico de oito processos, com dez eventos, especificamente com quatro processos isotérmicos e quatro processos adiabáticos e estes com duas fases de transferência de massa. Dependendo do desenho do modelo, os processos adiabáticos poderão ser isocóricos. Os processos termodinâmicos ocorrem sobre um novo modelo de sistema termodinâmico que possui características dos sistemas aberto e fechado simultaneamente o qual foi denominado de Sistema Termodinâmico Híbrido.

O objetivo principal do presente trabalho é encontrar um modelo de máquina térmica de alta eficiência, com semelhanças à Máquina de Carnot ou de ciclo Stirling, porém que seja controlável, isto é, os processos isotérmicos e adiabáticos são controlados externamente por um sistema eletrônico, eles podem ser modulados, detalhe não existente nas máquinas mais conhecidas atualmente, e a máquina proposta possui mais uma característica importante a independência de sistemas mecânicos auxiliares de alta potência para iniciar a operação, como ocorre nos projetos com motores Stirling, Otto, Brayton e Diesel, esta característica viabiliza projetos de máquinas de grandes potências e que tenha aplicações práticas.

Desta forma, baseado em ciências multidisciplinares, basicamente de engenharia mecânica e elétrica, e mais especificamente na termodinâmica e sistemas de controle retroalimentados que controla o ciclo termodinâmico, foi desenvolvido um motor térmico de ciclo Diferencial, é um ciclo novo cujo conceito e características serão descritas no texto desta dissertação.

O ciclo termodinâmico é controlado eletronicamente através de sinais que indicam a posição angular instantânea do eixo dos elementos de transporte do gás entre as regiões quentes, isoladas e frias, independente do ciclo mecânico que por meio de um processador definem as curvas pressão-volume, ou seja, as fronteiras entre os processos isotérmicos e adiabáticos ou isocóricos são bem definidas e controladas.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Ciclo Diferencial Sistema Termodinâmico Híbrido

- Inconsistência do Teorema de Carnot Ciclo reversível
- Energia limpa e renovável
- Fontes flexíveis
- Geração de energia
- Controlabilidade
- Energia para sondas espaciais
- Propulsão Iônica
- Propulsão Independente do AR (AIP)

### ABSTRACT

The present work is the development of a new concept of thermal machine of closed loop circuit, and includes the definition of the operating principle based on the theoretical foundations, deduction of the expressions of the processes, mathematical and numerical modeling, design and construction An experimental machine whose aim is to achieve the thermodynamic cycle of eight processes of ten events, specifically four isothermal processes four adiabatic processes and these two mass transfer steps. Depending on the model design, the adiabatic processes can be isochoric. The thermodynamic processes occur on a new thermodynamic system model that has characteristics of both open and closed systems simultaneously which was named Hybrid Thermodynamic System.

The main objective of this study is to find a heat engine model of high efficiency, with similarities to the Carnot machine or Stirling cycle machine, but it is controllable, ie the isothermal adiabatic processes and are controlled externally by an electronic system, they can be adjusted, non-existent in currently known machines, and the proposed machine has another important characteristic, the independence of high-power auxiliary mechanical systems to start the operation, as in projects with Stirling engines, Otto, Diesel and Brayton, this feature enables the great powers machine design and has practical applications.

Thus, based on multidisciplinary sciences, primarily of mechanical and electrical engineering, specifically in thermodynamics, robotics technology and the thermodynamic cycle control process, a thermal Differential cycle engine was developed, is a new cycle whose concept and characteristics are described in the text of this dissertation.

The thermodynamic cycle is electronically controlled using signals indicating the instantaneous angular position of the axis of the gas transport elements between hot, isolated and cold regions, independent of the mechanical cycle by a processor defining the pressure-volume curves with high precision, ie, the boundaries between the isothermal and adiabatic process or isochoric are well defined and controlled.

### **KEYWORDS**

Differential cycle Thermodynamic Hybrid System Inconsistency of the Carnot Theorem Reversible cycle Clean and renewable energy Flexible sources Energy generation Controllability Power for space probes Ion propulsion AIR Independent Propulsion ( AIP )

### LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1:	Propulsão iônica e energia elétrica para exploração do espaço profundo	5
Figura 2:	Diagrama da Máquina de Carnot, bomba de calor entre reservatórios	
	quente e frio	12
Figura 3:	Diagrama da Máquina de Carnot com uma bomba de calor demonstrada	
	sob a visão da Termodinâmica Clássica	13
Figura 4:	Diagrama mostrando a resultante $dE = 0$ , consequência da	
	demonstrações do Teorema de Carnot pela Termodinâmica Clássica	13
Figura 5:	Diagrama da Máquina de Carnot, bomba de calor entre reservatórios quente e frio	14
Figura 6:	Diagrama da Máquina de Carnot, bomba de calor entre reservatórios	
	quente e frio com fontes de energia	16
Figura 7:	Diagrama completo de um sistema Termodinâmico com a Máquina	
	de Carnot, bomba de calor entre reservatórios quente e frio com fontes	
	de energia e carga	17
Figura 8:	Ciclo Rankine	21
Figura 9:	Ciclo Ericsson	22
Figura 10:	Ciclo Brayton	23
Figura 11:	Ciclo Otto	24
Figura 12:	Ciclo Atkinson	24
Figura 13:	Ciclo Diesel	25
Figura 14:	Ciclo Stirling Ideal	28
Figura 15:	Ciclo Stirling Real	28
Figura 16:	As 4 fases do ciclo Stirling	29
Figura 17:	Motor Stirling Alfa	30
Figura 18:	Motor Stirling Beta	31
Figura 19:	Motor Stirling Beta de Pistão Livre	31
Figura 20:	Motor Stirling Gama	32
Figura 21:	Motor Stirling Beta Rombico	34
Figura 22:	Desenho original da máquina de ciclo de Carnot	36
Figura 23:	Ciclo Termodinâmico de Carnot	37
Figura 24:	Motores Stirling Pistão Livre com gerador para exploração do	
	espaço profundo	47
Figura 25:	Volume de controle de uma máquina com um sistema termodinâmico	51
Figura 26:	O conceito de Sistema Termodinâmico	51
Figura 27:	Sistema Híbrido ou Composto	52
Figura 28:	Diagrama da Máquina Térmica de Ciclo Diferencial	53
Figura 29:	Gráfico P x V do Ciclo Diferencial no tempo to	54
Figura 30:	Gráfico P x V do Ciclo Diferencial na formação do diferencial de Potencial	55
Figura 31:	Gráfico P x V da formação do diferencial de potencial sobre as curvas do Ciclo em regime	56
Figura 32:	Gráfico P x V do Ciclo Diferencial	57

Figura 33:	Sistema Termodinâmico da Máq. de ciclo Diferencial no início do processo adiabático	61
Figura 34.	Sistema Termodinâmico da Mág, de ciclo Diferencial anós a realização	01
i iguiu 5 i.	de trabalho de S1 sobre S2	62
Figura 35:	Sistema Termodinâmico da Mág. de ciclo Diferencial após a finalização	-
e	do processo adiabático	64
Figura 36:	Diagrama da Máquina de ciclo Diferencial, bomba de calor entre	
	reservatórios quente e frio com fontes de energia	67
Figura 37:	Diagrama completo de um sistema Termodinâmico com a Máquina de	
	ciclo Diferencial, bomba de calor entre reservatórios quente e frio com	
	fontes de energia e carga	68
Figura 38:	Modelo clássico proposto por diversos autores no sentido de provar o	
	Teorema de Carnot	70
Figura 39:	Modelo com o equivalente para a proposta da figura 24	71
Figura 40:	Modelo alternativo cumprindo todos os princípios e sem a necessidade	
	da bomba de calor	72
Figura 41:	Fluxo de calor de uma máquina térmica	74
Figura 42:	Fluxo de calor de uma Máquina Térmica Diferencial	75
Figura 43:	Máquina Térmica de ciclo Diferencial	. 77
Figura 44:	Diagrama do Modelo da Máquina Térmica de ciclo Diferencial	82
Figura 45:	Curvas da potência da Máq. de ciclo Diferencial em função da	
	Temperatura	. 88
Figura 46:	Curva da controlabilidade da potência pelo Duty Cycle	89
Figura 47:	Curva do rendimento da Máquina de ciclo Diferencial em função do	
	Duty Cycle	. 89

### LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Tabela do ciclo Diferencial de 8 processos e 10 eventos	58
Tabela 2:	Tabela de resultados da simulação do modelo matemático da	
	Máquina de ciclo Diferencial considerando variação da temperatura, e	
	demais parâmetros constantes	87
Tabela 3:	Tabela de resultados da simulação do modelo matemático da Máquina	
	de ciclo Diferencial considerando variação do Duty Cycle mantendo	
	demais parâmetros constantes	88
Tabela 4:	Tabela de resultados da simulação do modelo matemático da Máquina	
	de ciclo Diferencial considerando variação na Taxa de transferência de	
	partículas, e demais parâmetros constantes	91

### LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

Símbolo	Definição	Unidade
$T_1$	Temperatura da fonte quente	[K]
$T_2$	Temperatura da fonte fria	[K]
η	Rendimento	[ ]
$T_{\mathrm{f}}$	Temperatura da fonte fria	[K]
Tq	Temperatura da fonte quente	[K]
r	Taxa de transferência de partículas entre câmaras	[ ]
E	Energia	[J]
Q	Transferência de energia	[J]
W	Trabalho	[J], [N.m]
Р	Potência	[W]
р	Pressão	[Pa]
V	Volume	$[m^3]$
n	Número de moles	[mol]
R	Constante universal dos gases	[J/(kg.K)]
М	Massa molar	[g/mol]
c <sub>p</sub>	Calor específico a pressão constante	[J/(kg.K)]
C <sub>v</sub>	Calor específico a volume constante	[J/(kg.K)]

Abreviatura	Definição
ETM	Elemento de transferência de massa
EFM	Elemento de força motriz

# SUMÁRIO

1.	INTROD	UÇÃO	1
2.	REVISÃO	) BIBLIOGRÁFICA	6
	2.1. Termodinâmica Clássica e Termodinâmica Moderna		11
	2.2. Demonstração do Cumprimento do Princípio Zero, da Primeira e Segunda		
	Lei da Te	rmodinâmica na Máquina de Carnot	12
	2.3. Máqu	inas Térmicas Atuais	18
	2.4. As Pr	incipais Máquinas Térmicas da Atualidade	21
	2.4.1.	Motor de Ciclo Rankine	21
	2.4.2.	Motor de Ciclo Stirling	22
	2.4.3.	Motor de Ciclo Ericsson	22
	2.4.4.	Motor de Ciclo Brayton (turbina)	23
	2.4.5.	Motor de Ciclo Otto	23
	2.4.6.	Motor de Ciclo Atkinson	24
	2.4.7.	Motor de Ciclo Diesel	25
	2.5. Moto	res Stirling	25
	2.5.1.	Princípio de operação dos Motores Stirling	28
	2.5.2.	Motor Stirling Alfa	30
	2.5.3.	Motor Stirling Beta	31
	2.5.4.	Motor Stirling Gama	31
	2.5.5.	Eficiência dos Motores Stirling Atuais	32
	2.5.6.	Combustíveis aplicáveis em Motores Stirling	33
	2.5.7.	Emissões dos Motores Stirling	33
	2.5.8.	Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento de Motores Stirling	33
	2.6. Eficié	ència dos Motores Atuais	35
	2.7. A Má	quina de Carnot	36
	2.7.1.	Demonstração Matemática do Rendimento do Ciclo de Carnot	37
3.	BREVE H	IISTÓRIA DA TERMODINÂMICA	41
4.	CONCEI	IO DE SISTEMA TERMODINÂMICO	50
	4.1. O Sis	tema Termodinâmico	50
	4.2. O Cic	clo Diferencial	53
	4.3. Descrição do Ciclo Diferencial		
	4.4. Demo	onstração Matemática do Ciclo Diferencial	59

5.	DEMONSTRAÇÃO DO CUMPRIMENTO DO PRINCÍPIO ZERO, DA
	PRIMEIRA E SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA NA MÁQUINA DE
	CICLO DIFERENCIAL
6.	CONJECTURAS E E ANÁLISES DE SISTEMAS FORMADOS POR UMA
	BOMBA DE CALOR, UMA MÁQUINA, RESERVATÓRIOS E FONTES DE
	ENERGIA
7.	ANÁLOGO ELÉTRICO DA MÁQUINA DIFERENCIAL
8.	FLUXO TERMODINÂMICO DE UMA MÁQUINA TÉRMICA BASEADA
	EM SISTEMA ABERTO E FECHADO
9.	FLUXO TERMODINÂMICO DE UMA MÁQUINA TÉRMICA
	DIFERENCIAL
10.	. A MÁQUINA TÉRMICA DIFERENCIAL E AS TRÊS LEIS DA
	TERMODINÂMICA
11.	MÁQUINA TÉRMICA DIFERENCIAL (MODELO SIMPLES
	EXPERIMENTAL DE LABORATÓRIO
12.	FONTES TÉRMICAS FLEXÍVEIS
13	SISTEMAS DE PROPULSÃO INDEPENDENTES DE AR
14.	CONTROLABILIDADE DE ROTAÇÃO, TORQUE E POTÊNCIA
15.	. MODELAMENTO MATEMÁTICO DA MÁQUINA TÉRMICA DE CICLO
	DIFERENCIAL
16	CONCLUSÃO
17.	BIBLIOGRAFIA

### 1. INTRODUÇÃO

Refere-se a presente dissertação de Mestrado, a um Projeto de Pesquisa na área de motores termodinâmicos, mais especificamente a um novo conceito de máquina térmica que opera com gás em circuito fechado em configuração diferencial a qual é caracterizada por realizar um ciclo termodinâmico de oito processos, ou de outra forma a explicar, a mesma realiza simultaneamente dois ciclos termodinâmicos simultâneos, cada um com quatro processos interdependentes, complementares, sendo dois destes processos "isotérmicos" e dois "adiabáticos" ou "isocóricos" com transferência de massa.

A presente máquina opera em conformidade com os princípios da termodinâmica, Princípio Zero, Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica e de acordo com os fundamentos de Nicolas Léonard Sadi Carnot, ou comumente "Carnot", cujo enunciado elaborado em 1824 e aceito no meio científico não se altera, "*Para haver conversão contínua de calor em trabalho, um sistema deve realizar ciclos entre fontes quentes e frias, continuamente. Em cada ciclo, é retirada uma certa quantidade de calor da fonte quente (energia útil), que é parcialmente convertida em trabalho, sendo o restante rejeitado para a fonte fria (energia dissipada*)" [http://pt.wikipedia.org/wiki/Ciclo\_de\_Carnot, 2014].

No presente, as necessidades mundiais por energia e força mecânica se tornaram desafios cujas soluções veem trazendo implicações climáticas devastadoras. Os estudos desenvolvidos por organismos internacionais como a ONU revelam impactos de extrema gravidade ao planeta. A utilização de combustíveis fósseis, petróleo, gás, carvão, dos quais dependem a economia mundial, vem causando o aquecimento do planeta, redução das camadas de gelo polares, alterações do clima, altas concentrações de gases que geram o efeito estufa, entre outros problemas. Outras fontes de energia, como a atômica, utilizadas pelas nações mais desenvolvidas, por sua vez estão sujeitas a gerar graves acidentes por falhas de diversas ordens, entre estas se encontram as próprias mudanças climáticas que intensificam eventos como tempestades, furacões, entre outros. [(O. Edenhofer, Report. 2011), (ESA, http://www.esa.int/Our\_Activities/Technology/Space\_for\_energy. 2013), (Rech, http://helmholtz.de/ no\_cache/en/ research/energy/renewable\_energies. 2013), (Sawin, Report. 2012)].

Noventa e nove por cento (99%) da massa da Terra está a uma temperatura superior a 1.000 graus Celsius. A cada dia, 2,5 vezes a energia consumida em todo o mundo escapa a partir do interior da Terra para o espaço. Este potencial da energia geotérmica pode ser explorado. Na Islândia, o suprimento de energia para 90 por cento das famílias são fornecidos

com o calor da profundidade para gerar vapor para movimentar as turbinas das usinas. [Röbke, http://www.helmholtz.de/en/artikel/energy-from-inside-the-earth-2431/. 2014].

"O estilo de vida baseada em combustíveis fósseis e da economia do presente deve dar lugar a outro estilo baseado em energia renovável e sustentável. Chegar lá é um dos maiores desafios. A fonte solar oferece potencial para realizar este objetivo. O Projeto de Energia Limpa Harvard foi concebido em 2008 com objetivo de encontrar alternativas para a utilização desta fonte.

O Sol é uma fonte abundante de energia e a Terra recebe energia solar suficiente por hora para atender a demanda anual da humanidade. A cada ano, a luz solar irradia na superfície da Terra energia equivalente ao dobro da energia de todos os combustíveis fósseis e as reservas de energia nuclear. A energia solar é, portanto, uma alternativa óbvia para estas fontes não-renováveis e irá desempenhar um papel importante no fornecimento de forma sustentável às crescentes demandas de energia. [Harvard, http://cleanenergy.molecularspace.org/ about-cep/#Solar\_Energy\_and\_the\_Energy\_Supply\_ of\_the\_Future. 2013].

Portanto, máquinas térmicas de alta eficiência que operam com calor começam a se tornar cada vez mais importante para o futuro.

Nos últimos duzentos anos foram inventadas várias máquinas térmicas para utilização na indústria e para gerar energia para a população, as tecnologias mais conhecidas e economicamente viáveis até o presente são:

- Máquinas de ciclo Rankine, demonstrado em 1859 por William John Macquorn Rankine;
- Máquinas usadas em jatos e também em geração de energia operam pelo ciclo Brayton, criado em 1872 por George Brayton, proposto mais cedo em 1791 por John Barber, utiliza como fonte de energia, principalmente derivados de materiais de origem fóssil;
- Máquinas de combustão interna usadas em automóveis operam pelo ciclo Otto, desenvolvido por Nikolaus Otto em 1876, utiliza combustíveis de origem fóssil e atualmente também de origem vegetal, o álcool;
- Máquinas de combustão interna usadas em veículos pesados, caminhões, trens, navios e em aplicações industriais, operam pelo ciclo Diesel, desenvolvido por Rudolf Diesel em 1893/1897, utiliza também combustíveis de origem fóssil, atualmente também de origem vegetal, o biodiesel;

 Máquinas de combustão externa, atualmente usada em projetos de energias alternativas, operam pelo ciclo Stirling, desenvolvido por Robert Stirling em 1816, utiliza várias fontes de energia, atualmente voltada para fontes menos poluentes e de menor impacto ambiental, como biomassa, fontes termais, termossolar.

Em síntese, as tecnologias apresentadas acima são na maioria máquinas térmicas com ciclos termodinâmicos de quatro processos e seu ciclo termodinâmico é referenciado à vizinhança e esta é o ambiente, podendo ser a atmosfera, ao espaço em que se encontram, por exemplo: as máquinas de combustão interna, após a realização do trabalho sobre um elemento de força mecânica, pistão, turbina, os gases são liberados ao ambiente, portanto as forças dos gases empurram os elementos de força motriz indo em direção às suas respectivas vizinhanças, ou seja, o ambiente. No caso das máquinas Stirling, seu ciclo termodinâmico de quatro processos, dois isotérmicos e dois isocóricos, ocorre com o gás sempre confinado no mesmo volume de controle e a força motriz ocorre através do deslocamento de um elemento, por exemplo, um pistão, contra sua vizinhança, o ambiente externo ou outra câmara pressurizada ou com vácuo.

Entre as máquinas térmicas de circuito fechado, as que se assemelham à Máquina Diferencial, fruto do presente Projeto de Pesquisa, por este motivo, ou seja, apenas por serem em circuito fechado se encontram as máquinas Stirling, observa-se motores tipo Alfa como as publicadas nas patentes US7827789, Welty, et al (2010), e US20080282693, Takeshi, et al (2008) tipo Beta como a patente US20100095668, Beale, et al (2010), tipo Gama como a patente US20110005220, Berchowitz, (2011), máquinas Stirling Rotativas como as patentes US6195992, Nommensen (2001) e US6996983, Cameron (2006), (híbridas tipo Wankel-Stirling conforme patente US7549289, Herring (2009) e outras referências como: PI0515980-6 A, Silver et al (2007) a qual trata de um método com princípio Stirling, PI0515988-1 A, Silver et al (2007) da mesma forma trata de um método com princípio Stirling, a WO2009097698A1, Thiessen (2009) trata de um método para máquina térmica de ciclo de Carnot modificado. Todas as referências definem modelos, métodos e inovações em máquinas térmicas de circuito fechado de ciclo Stirling o qual constitui de dois processos isotérmicos e dois isocóricos ocorrendo um após o outro sequencialmente.

Por outro lado, a tecnologia descrita na presente dissertação, apresenta uma máquina de circuito fechado, porém não é composta por um ciclo de quatro processos e sim por um novo conceito numa configuração diferencial de modo que a mesma realiza um ciclo de oito processos, sempre em pares, dois a dois, com transferência de massa, conferindo dez eventos,

mantendo e seguindo os conceitos da termodinâmica, porém a mesma obriga a considerar a variação de massa nas equações, propiciando uma possibilidade não considerada nas máquinas térmicas atuais, ou seja, o conceito da presente tecnologia oferece uma nova condição.

Um dos objetivos desta tecnologia é seu emprego em plantas de geração de energia flexíveis quanto às fontes térmicas, rendimento teórico economicamente viável na relação energia gerada versus fonte térmica e com o mínimo impacto ambiental, com a utilização de fontes térmicas limpas. Como por exemplo, a solar, termossolar, de baixo impacto ambiental como biocombustíveis e econômicos como o uso de resíduos e em plantas pré-existentes onde o mesmo opera aproveitando as perdas de calor do sistema existente, formando sistemas de cogeração.

Outra característica interessante da tecnologia, a mesma permite sua utilização formando processos mais complexos denominados ciclos combinados como, por exemplo, formando sistemas de ciclo Combinado Brayton-Diferencial, isto é, o calor dos gases descartados a temperaturas superiores a 600°C podem ser canalizados para ser a fonte de energia para uma máquina de ciclo Diferencial, da mesma forma Rankine-Diferencial, cujas fontes de calor para a máquina de ciclo Diferencial são as saídas de vapor dos últimos estágios das turbinas a vapor e gases das chaminés, e assim também passa a ser viável Diesel-Diferencial, cuja fonte de calor vem dos fluidos de refrigeração da máquina Diesel, Otto-Diferencial, cuja fonte de calor vem dos fluidos de refrigeração da máquina de ciclo Otto, entre outros, ampliando o desempenho, uma vez que os processos de máquinas térmicas de ciclo Brayton, Rankine, Diesel, Otto, possuem muitas perdas térmicas impossíveis de serem aproveitadas pelos seus próprios ciclos termodinâmicos dependentes de altas temperaturas, sendo necessários sistemas mais eficientes alternativos para este aproveitamento. Por outro lado, provavelmente seria mais vantajosa uma única máquina de ciclo Diferencial, obtendo energia diretamente da fonte primária.

A máquina de ciclo Difernecial não depende de ar para seu funcionamento, esta característica a inclui em possibilidades para projetos espaciais. Atualmente uma equipe do MIT está trabalhando no desenvolvimento de propulsores iônicos como uma alternativa de baixa emissão eficiente em termos de energia para tecnologias de propulsão convencionais, como motores a jato. Os novos propulsores usarão jatos iônicos, que são criados por meio de energia elétrica à alta tensão, assim o motor poderia produzir uma impulsão potente sem a necessidade de combustível. [Chu, http://newsoffice.mit.edu/2013/ionic-thrusters -0403. 2013].

Após uma série de experimentos, a equipe do MIT anunciou que propulsores iônicos podem ser mais eficientes do que os motores usados atualmente na indústria aeroespacial. Em sua pesquisa, que foi publicada na revista Proceedings of the Royal Society, afirmou que os propulsores iônicos podem produzir 110 N de empuxo por quilowatt, enquanto um motor a jato convencional poderia produzir 2 N por kW. [CHU, http://newsoffice. mit.edu/2013/ionic-thrusters -0403. 2013]



Fig. 1 Propulsão iônica e energia elétrica para exploração do espaço profundo. [Mann, http://www.wired.com/2012/11/radioactive-stirling-engine-exploration/. 2012]

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Parte dos principais institutos de pesquisas internacionais na área de energia, propulsão e aeroespaciais vem concentrando esforços no desenvolvimento de novas tecnologias que proporcionem maiores rendimentos, flexibilização de combustíveis e alternativas limpas. Desta forma, em função de algumas características similares, a revisão bibliográfica retrata informações referentes a motores Stirling, pois dentre as máquinas conhecidas, é a que mais se aproxima da máquina de ciclo Diferencial e é uma das tecnologias mais promissoras.

A maior parte da literatura técnica encontrada possui como origem países da Europa e Estados Unidos. Da Europa, especialmente a Alemanha, Suécia e Dinamarca. Quanto a projetos de Pesquisas com patentes requeridas, encontra-se como origem: Estados Unidos, Alemanha, Japão, Suécia, China, Coreia.

Wood - Sunpower, Inc. 2003, descreveu que a empresa Sunpower fundada por William Beale, desenvolveu uma máquina Stirling cuja potência nominal é de 1000 W, porém produz até 1300 We (Watt elétrico), projetada para sistema de cogeração, fornece uma eficiência de 29% reais, ou seja, a relação direta entre a energia elétrica de saída pela energia em calor na entrada nas condições térmicas de 550°C na região quente e 50°C na região fria. A configuração da máquina é beta do tipo pistão livre.

Kongtragool et al., 2003, relata que Máquinas Stirling com gás Helio ou Hidrogênio operando com temperaturas na ordem de 973 K e pressões de 200 bar obtém eficiências na ordem de 40% tendo como fonte termossolar com concentradores espelhados parabólicos. As empresas que possuem máquinas com tais características são a Kockums (United Stirling) 25 kW, Thermal Motors STM 4-120 25 kWe (kiloWatt elétrico), e SOLO 11 kW.

Scoditti, 2003, afirma que baixo peso, baixo ruído, baixa vibração e quase sem emissões fazem das máquinas Stirling boas soluções para aplicações limpas. As características mecânicas simples sem combustão por explosão configuram as Stirling, máquinas robustas de baixa manutenção e que máquinas simples de baixo custo tendo o ar como fluido de trabalho a baixa pressão, operam com rendimentos na ordem de 10% e projetos mais elaborados, com gases mais apropriados e altas pressões o rendimento poderá ser superior a 30%.

Ishiguro et al., 2007, relata que principalmente os Estados Unidos estão gerando intensos esforços de desenvolvimento de sistemas nucleares para missões espaciais, em diversas áreas da ciência e tecnologia. A motivação é o desejo de realizar missões de pesquisa e exploração do espaço e dos corpos espaciais, especialmente missões tripuladas à Lua e a Marte, visando a colonização do espaço no futuro distante e as tecnologias para geração de energia e propulsão são vitais. Embora o Programa Prometheus tenha sido cancelado, as atividades programadas de pesquisa e desenvolvimento continuam. Referente ao reator três tipos estão em consideração, LMR (Liquid Metal Reactor), HPS (Heatpipe Power System) e GCR (Gas Cooled Reactor). Entre os sistemas de conversão considerados incluem motor Stirling de pistão livre, sistema de ciclo Brayton fechado, e conversor termoelétrico. Dentre estes, o motor Stirling oferece inúmeras vantagens, especialmente eficiência e a flexibilidade com as fontes térmicas.

Karabulut, et al., 2009, apresenta em artigo um experimento em uma máquina Stirling tipo Beta projetada para operar com baixas temperaturas, a região quente operando com 200°C e a região fria com 27°C, obtendo uma eficiência térmica de 15%.

John H. Glenn Research Center, 2010, publicou que desenvolveu um motor Stirling na configuração Beta tipo Pistão Livre para uso aeroespacial o qual obteve em ensaios uma eficiência de 38% tendo uma fonte de calor de 850 °C e um sistema de resfriamento que mantém a região fria a 90 °C.

Cullen, et al., 2011, revela as limitações das máquinas Stirling até recentemente, entre as mais importantes são as baixas eficiências quando opera fora do regime ótimo, a dependência de um elemento de força mecânica externo para partida e a estanqueidade. Por outro lado, as modernas máquinas Stirling são versáteis e tecnologicamente melhor desenvolvidas, dentre as vantagens das máquinas atuais podem ser exemplificadas: melhor eficiência com a alteração do movimento senoidal para elipsoidal, técnicas mais evoluídas para vedações.

As máquinas Stirling de pistões livres utilizam a variação da pressão do ciclo termodinâmico para controlar o movimento do pistão deslocador do gás de trabalho, esta máquina teve como pioneiro um trabalho desenvolvido por William Beale iniciado na década de 60. A tecnologia desenvolvida por William Beale oferece várias vantagens, particularmente a redução de perdas por atrito. Esta tecnologia é utilizada para geração a partir de fonte termossolar e para geração de energia no espaço. Por outro lado, as máquinas com acionamento mecânico com eixos e manivelas interligando fisicamente os pistões de força e os pistões deslocadores do gás de trabalho continuam nos campos de pesquisa para as configurações de motores Stirling. O conceito tradicional com movimentos harmônicos senoidais impõe um distanciamento do ciclo termodinâmico ideal e seu efeito traz uma redução significativa no trabalho realizado e eficiência. Assim as pesquisas revelam novos

mecanismos os quais aperfeiçoam o ciclo de trabalho realizado pelas máquinas Stirling. Estes novos mecanismos alteraram o movimento senoidal para elíptico, aproximando do ideal os processos termodinâmicos: dois isotérmicos e dois isocóricos, e por consequência melhorando o ciclo de trabalho e rendimento. Desta forma, é possível concluir que o desacoplamento do ciclo termodinâmico do ciclo mecânico com controle eletrônico traz inúmeras vantagens. A diferença entre movimento senoidal para elíptico está mecanicamente nos desenhos das articulações entre eixos, bielas e pistões, ou de outra forma, com sistemas independentes. O movimento elíptico executa o transporte do gás de trabalho entre as isotérmicas com maior velocidade em se comparando com o movimento senoidal, esta propriedade reduz a passagem direta de calor da fonte quente para a fria e o diagrama de pressão e deslocamento se torna mais retangular em seu formato.

Energy Department - Federal Government of USA, 2013, publicou no site (<u>http://energy.gov/ne/nuclear-reactor-technologies/space-power-systems</u>) no tópico, Radioisotope Thermoelectric Generators (RTGs), "Os sistemas RTG são ideais para aplicações onde os painéis solares não podem fornecer alimentação adequada, como em missões de pesquisas em planetas distantes do Sol por sondas e espaçonaves". Os RTGs têm sido usados em muitas missões da National Aeronautics and Space Administration (NASA).

Também o Energy Department - Federal Government of USA, 2013, publicou no mesmo site (http://energy.gov/ne/nuclear-reactor-technologies/space-power-systems): a próxima geração de Geradores por Radioisótopos, Advanced Stirling Radioisotope Generator (ASRG), está sendo desenvolvido como uma tecnologia de RPS (Radioisotope power systems) de alta eficiência para apoiar futuras missões espaciais na superfície marciana ou no vácuo do espaço. Este sistema utiliza conversores de Stirling, que têm partes móveis para converter mecanicamente calor em eletricidade. Este sistema de conversão de energia, se implantado com sucesso, irá reduzir o peso de cada RPS e a quantidade de Pu-238 necessária por missão.

O tema "Máquinas Térmicas a Gás de Circuito Fechado", especialmente Motores Stirling, praticamente não é abordado no Brasil, com exceção a poucos projetos de pesquisas por algumas Universidades ou algumas publicações de entusiastas que montaram pequenas máquinas por hobby.

O tema apresentado neste capítulo "Revisão Bibliográfica" revela que as pesquisas em máquinas térmicas a gás de circuito fechado, especialmente "Motores Stirling", inventado em 1816, teve seu interesse retomado com força nos últimos 10 anos, até então esquecido pelas indústrias e pelos interesses científicos. Neste curto período foi comprovada que a tecnologia

Stirling oferece alto rendimento, com registros apontando 45%, considerando a sua flexibilidade ao combustível, o motor Stirling pode competir com os motores Diesel de 2 tempos e baixa rotação, como o Wartsila-Sulzer, cujo rendimento publicado é na ordem de 50%, e o sistema combinado de duas máquinas Brayton-Rankine com registros de rendimento na ordem de 60%.

Diversos autores e pesquisadores vêm utilizando as leis e fundamentos da Termodinâmica, rearranjando-as de forma a obter novas alternativas para produzir força mecânica e energia e novas alternativas também para as fontes de energia. Todas as máquinas térmicas de uma forma ou de outra, operam com o calor, porém o calor pode se originar de diversas formas e vindas de diversas fontes distintas e de modo geral as máquinas normalmente não são tão flexíveis a ponto de operar com qualquer uma delas. Temos máquinas que operam com combustão interna, estas exigem combustíveis específicos e geralmente refinados. Outras operam com calor externo, também com combustão e exigem sistemas de transferência de calor específicos, outras operam com calor provindo de materiais quentes, sólidos, líquidos, gasosos, ainda outras com calor concentrado como o do Sol com concentradores. Não importa o arranjo, o ciclo, ou desenho das máquinas, absolutamente todas seguem as três leis da termodinâmica que formam os princípios da transformação da energia em trabalho e o modo como a energia flui nos sistemas.

Princípio zero da termodinânica afirma que "Se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro, então eles estão em equilíbrio térmico entre si." Este princípio define que se um corpo de menor energia térmica é colocado em contato com um corpo com maior energia térmica, a tendência é que a energia flua, em parte, do corpo de maior temperatura para o corpo de menor temperatura. Quando os dois corpos atingirem a mesma temperatura, nenhuma mudança mais irá ocorrer, cessa a transferência de energia. Cada material possui diferentes características, não necessariamente o corpo com maior energia tenha a temperatura mais alta. [GREITZER, E M. SPAKOVSZKY, Z. S. WAITZ, I. A.; "Thermodynamics and Propulsion" - Art. 2013].

Primeira lei da termodinâmica como a Lei Zero, que definiu uma propriedade útil, a "temperatura", a Primeira Lei define uma outra propriedade útil chamada ``energia". É conhecida como Princípio de Joule (lei da conservação da energia), este postulado admite que diversas formas de trabalho podem ser convertidas umas nas outras, que *a energia total transferida para um sistema é igual à variação de sua energia interna*. A variação da energia

de um sistema é igual à diferença entre o calor adicionado ao sistema e ao trabalho realizado pelo sistema. Observa-se também a equivalência entre trabalho e calor. [GREITZER, E M. SPAKOVSZKY, Z. S. WAITZ, I. A.; "Thermodynamics and Propulsion" - Art. (2013)].

A **segunda lei da termodinâmica** expressa que "A quantidade de entropia de qualquer sistema isolado termodinamicamente tende a se incrementar com o tempo, até alcançar um valor máximo". A mudança de entropia de qualquer sistema e seus arredores, considerados em conjunto, é positivo e se aproxima de zero para qualquer processo que se aproxima da reversibilidade. Duas das formas mais importantes de expressar a segunda lei da termodinâmkica são pelos enunciados de Kelvin-Planck e Clausius:

Enunciado de Clausius: "É impossível a construção de um dispositivo que, por si só, isto é, sem intervenção do meio exterior, consiga transferir calor de um corpo para outro de temperatura mais elevada". Em outras palavras, não é possível construir um refrigerador que transporte energia de um corpo frio para outro de maior temperatura sem auxílio externo.

Enunciado de Kelvin-Planck: "É impossível a construção de um dispositivo que, por si só, isto é, sem intervenção do meio exterior, consiga transformar integralmente em trabalho o calor absorvido de uma fonte a uma dada temperatura uniforme". Em outras palavras, não é possível construir uma máquina com rendimento igual ou superior a 100%.

Enquanto a primeria lei da termodinâmica estabelece a conservação de energia em qualquer processo, a segunda lei estabelece condições para que os processos termodinâmicos possam ocorrer. [GREITZER, E M. SPAKOVSZKY, Z. S. WAITZ, I. A.; "Thermodynamics and Propulsion" - Art. (2013)].

A terceira lei da termodinâmica diz que, quando um sistema se aproxima da temperatura do zero absoluto, todos os processos cessam, e a entropia tende a zero. A lei, portanto, fornece um ponto de referência para a determinação do valor da entropia. [CARTER, W CRAIG; "A Survey of Molar Entropies" - Art. (2002)].

A equação proposta por Nernst é:

$$\lim_{T \to 0} \Delta S = 0$$

 $\Delta S$  é a variação de entropia

T é a temperatura.

#### 2.1. Termodinâmica clássica e termodinâmica moderna:

A Termodinâmica é o estudo do calor e da energia. Na sua essência a termodinâmica define as leis de como a energia se move em um sistema.

A diferença entre a termodinâmica clássica e a termodinâmica moderna oferece elementos importantes para os estudos do ciclo Diferencial e do sistema termodinâmico híbrido.

A variação da entropia de um sistema pela termodinâmica clássica é expressa matematicamente pelas seguintes equações:

$$dS \ge 0$$
  $dS = \frac{dQ}{T} \implies dQ \ge 0$ 

Pela termodinâmica clássica:

$$dQ = 0$$
 é válido para todos os sistemas.

A variação da entropia de um sistema pela termodinâmica moderna é expressa matematicamente pelas seguintes equações:

$$dS > 0$$
  $dS = \frac{dQ}{T} \implies dQ > 0$ 

Pela termodinâmica moderna:

$$dQ = 0$$
 não é válido para sistemas acoplados.

A termodinâmica clássica é uma parte da termodinâmica para sistemas simples, ou mais exatamente a dizer, é uma parte da termodinâmica para sistemas não acoplados; enquanto termodinâmica moderna é para sistemas complexos, ou mais exatamente a dizer, termodinâmica moderna é uma parte da termodinâmica para sistemas acoplados. Todos os sistemas de conversão de energia, máquinas térmicas, são sistemas acoplados. [JITAO, WANG., Modern Thermodynamics Based on the Extended Carnot Theorem - 2011] [DENKER, JOHN., Modern Thermodynamics – 2014].

# 2.2. Demonstração do cumprimento do Princípio Zero, da Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica na Máquina de Carnot:

Para esta demonstração, utilizando a termodinâmica clássica, será considerado um diagrama formado por um reservatório quente, um reservatório frio, uma bomba de calor (Carnot) e uma máquina de Carnot.



Fig. 2 (Diagrama da Máquina de Carnot, bomba de calor entre reservatórios quente e frio)

O rendimento da máquina ideal de Carnot (Mc) é dado pela seguinte expressão:

$$\eta_m = 1 - \frac{Tf}{Tq}$$

Tf é a temperatura do gás na isotérmica de baixa temperatura.

Tq é a temperatura do gás na isotérmica de alta temperatura.

A relação do trabalho mecânico no eixo da bomba de calor (Wb) com a energia transportada para o reservatório quente (Qb1) possui a mesma relação do rendimento da máquina de Carnot e a expressão é:

Da mesma forma,

Tf é a temperatura do gás na isotérmica de baixa temperatura.

Tq é a temperatura do gás na isotérmica de alta temperatura.

A transferência de energia mecânica por parte da máquina de Carnot para o eixo da bomba de calor é idêntico **no limite**, (Wm = Wb) e é o trabalho necessário para a bomba de calor transferir a energia (calor) necessária para movimentar a máquina de Carnot. Assim o sistema demonstra a **reversibilidade do ciclo de Carnot**. A primeira lei da Termodinâmica, da conservação da energia é satisfeita. Na figura 3 é mostrado o diagrama da máquina de Carnot com uma bomba de calor sob a visão da termodinâmica clássica. Na figura 4 é mostrado que sob esta visão tem-se a máquina funcionando com a bomba e as fontes quentes e frias permanecem intactas, contrariando a termodinâmica moderna,



Fig. 3 (Diagrama da Máquina de Carnot com uma bomba de calor demonstrada sob a visão da Termodinâmica Clássica).



Fig. 4 (Diagrama mostrando a resultante dE = 0, consequência da demonstrações do Teorema de Carnot pela Termodinâmica Clássica).

De acordo com a segunda lei da Termodinâmica, segundo o **enunciado de Clausius**, não é possível haver fuxo de calor espontâneo a partir de um corpo mais frio para outro corpo mais quente e ainda quando existem dois corpos na mesma temperatura, eles estarão em equilíbrio térmico, **Princípio Zero da Termodinâmica**, e portanto também não poderá haver fluxo de calor entre ambos. Portanto para haver fluxo de calor do gás para um reservatório qualquer, o gás deve ter a temperatura maior e para haver fluxo de calor de um reservatório qualquer para o gás, o reservatório deve ter a temperatura maior. Desta forma, o modelo apresentado com as considerações para demonstrar a reversibilidade, não é adequado para demonstração ou comprovações das leis físicas sobre sistemas acoplados formados por bombas, máquinas e reservatórios, para tal, os elementos e processos devem ser agregados das leis físicas da Termodinâmica.

Rearranjando o diagrama da figura 3, teremos uma visão física mais apropriada. Na fronteira do gás de trabalho com os reservatórios não existe uma bomba para levar o calor de um para o outro, o fluxo deve ocorrer pela diferença de temperatura. Para tal, na figura 5 convencionou-se que o reservatório quente terá a temperatura **Tq**, o reservatório frio a temperatura **Tf**.



Fig. 5 (Diagrama da Máquina de Carnot, bomba de calor entre reservatórios quente e frio)

O rendimento da máquina ideal de Carnot (Mc) observando o enunciado de Clausius é dado pela seguinte expressão:

$$\eta_m = 1 - \frac{Tf+dT}{Tq-dT}$$

**Tf+dT** é a temperatura do gás na isotérmica de baixa temperatura.

**Tq-dT** é a temperatura do gás na isotérmica de alta temperatura.

A relação do trabalho mecânico no eixo da bomba de calor (Wb) com a energia transportada para o reservatório quente (Qb1), observando o enunciado de Clausius, não possui mais a mesma relação do rendimento da máquina de Carnot e a expressão é:

$$\eta_b = 1 - \frac{Tf - dT}{Tq + dT}$$

Tf - dT é a temperatura do gás na isotérmica de baixa temperatura.Tq+dT é a temperatura do gás na isotérmica de alta temperatura.

Com esta demonstração, observa-se que o sistema não gera mais energia que uma máquina cujo rendimento seja de 100%, pois (Wb > Wm) e o enunciado de Kelvin-Planck é cumprido baseado no enunciado de Clausius que diz que não pode haver fluxo de calor espontâneo de um corpo com temperatura menor para outro corpo com temperatura maior. Assim a segunda lei da Termodinâmica é cumprida. O rendimento da máquina equivalente formada por uma bomba de calor com um motor de Carnot é menor que 100%.

## η<sub>eq</sub>< 100%

Para que a máquina de Carnot (Mc) possa suprir a necessidade da bomba de calor (Bc), a mesma necessita de mais calor do que a bomba possa transportar do reservatório frio para o quente e assim, (Qm1 > Qb1) e (Qm2 > Qb2), desta forma a energia do reservatório 1 vai continuamente sendo transportada para o reservatório 2 e as temperaturas de ambos tendem a se igualar com o tempo até que o sistema se estabilize completamente em uma mesma temperatura e as máquinas cessam o movimento, toda a energia do sistema se conserva, cumprindo também a primeira lei da Termodinâmica, considerando adiabático o meio externo.

Prosseguindo com a demonstração de forma a permitir a operação do sistema proposto, o desenho da figura 5 pode evoluir para o modelo da figura 6 e assim teremos um

sistema mais claro para constatar a primeira e segunda lei da Termodinâmica sob um sistema operante de forma estável e contínuo.

Nenhuma energia pode ser extinta nem criada, nenhum trabalho pode ser realizado com apenas uma fonte de energia, não ocorre fluxo de energia a partir de um corpo mais frio para outro mais quente espontaneamente, nenhuma máquina pode chegar a 100% de rendimento e além de tudo a energia deve ser conservada.

Na figura 6 abaixo temos um modelo completo, formado por uma bomba de calor (Bc), uma máquina de Carnot (Mc), um reservatório quente, um reservatório frio, uma fonte de energia quente e outra fonte de energia fria.



Fig. 6 (Diagrama da Máquina de Carnot, bomba de calor entre reservatórios quente e frio com fontes de energia)

O rendimento deste sistema, figura 6, é dado pela razão da energia disponível no eixo da máquina de Carnot (Wm), pela energia total que entra no sistema (Wb + Eq):

$$\eta_e = \frac{Wm}{Wb + Eq}$$

De outra forma, a energia no eixo da máquina de Carnot também pode ser representada pelas diferenças entre a energia líquida de entrada no sistema com a energia descartada na fonte fria:

$$Wm = Wb + Eq - Ef$$

O rendimento pode ser expresso da seguinte forma:

$$\eta_e = 1 - \frac{Ef}{(Wb + Eq)}$$

Um modelo completo, funcional onde a primeira e segunda lei da Termodinâmica podem ser constatadas está demonstrado na figura 7.



Fig. 7 (Diagrama completo de um sistema Termodinâmico com a Máquina de Carnot, bomba de calor entre reservatórios quente e frio com fontes de energia e carga)

Para que o raciocínio seja coerente com a mínima condição de análise, é necessário que o sistema proposto tenha um equilíbrio e assim manter os elementos estáveis. Desta forma é importante considerar neste exemplo que (Wm = Wb), assim a análise se simplifica e fica evidente que (Qm1 > Qb1) e (Qm2 > Qb2) e (Ef = Qm2 - Qb2).

Obviamente está claro que mesmo sob condições ideais, o sistema formado por uma máquina de Carnot, Bomba de calor, dois reservatórios e fontes de energia não geram um modelo de máquina com rendimento maior ou igual a 100%, confirmando novamente o enunciado de Kelvin-Planck e que a reversibilidade, primeira e segunda lei não coexistem no limite matemático considerando máquina, bomba e reservatórios formando um sistema, a reversibilidade não pode ser raciocinada assim porque no sistema as temperaturas dos reservatórios e do gás em ambas as máquinas devem obrigatoriamente ser ligeiramente diferentes. A reversibilidade se confirma ao analisar isoladamente os processos em cada uma das máquinas, bomba e máquina de Carnot em condições absolutamente idênticas em temperatura as quais contrariam Kelvin-Planck e Clausius quando configuradas em um único sistema de modo a esperar que a máquina impulsione a bomba e esta forneça calor para a máquina continuamente. Assim o modelo e raciocínio usado para demonstrar a reversibilidade não pode ser o mesmo para a comprovação dos enunciados de Kelvin-Planck e Clausius, esta tentativa produziria uma quebra sucessiva das leis da termodinâmica.

#### 2.3. Máquinas térmicas atuais:

O meio científico e a indústria vem pesquisando e desenvolvendo máquinas térmicas a mais de 200 anos. As máquinas existentes possuem como referência a máquina de Carnot, cujos projetos são baseados em sistemas termodinâmicos fechados, como a Stirling e Ericsson, por exemplo, ou sistemas abertos, como as máquinas a combustão, elas na maioria possuem ciclos termodinâmicos constituídos por 4 processos. Assim se classificam todas as máquinas conhecidas, a própria máquina teórica de Carnot, a Stirling, os motores Otto, Diesel, máquinas de ciclo Brayton, a vapor largamente utilizadas na geração de energia elétrica operante pelo ciclo Rankine, entre outras.

O conceito destas tecnologias em que os fundamentos da termodinâmica são aplicados sobre modelos de sistema aberto ou fechado leva a todas as máquinas a terem como limite máximo de eficiência a equação de Carnot a qual representa a máquina ideal para uma
condição onde toda a massa de gás permanece constante em todos os processos desde o reservatório quente até o frio, passando pelos elementos de força motriz. Os modelos termodinâmicos aberto e fechado possuem como característica a massa constante em todos os processos, assim a eficiência máxima permanece dependente da temperatura, esta característica soberana leva os pesquisadores a gerarem esforços no desenvolvimento de materiais mais resistentes às altas temperaturas e assim obter melhores rendimentos, uma vez que reduzir a temperatura fria não é normalmente viável. No entanto, não é a temperatura que gera o trabalho e sim a pressão do gás, esta propriedade permite pesquisas que desobrigam a dependência direta da temperatura, mas isto implica no modelo de sistema empregado. Esta possibilidade ocorre em um modelo de sistema em que a massa não seja constante em seus processos. Um modelo de sistema híbrido permite a variação da massa em processos adiabáticos, viabilizando um novo comportamento sob os mesmos fundamentos.

Nos modelos conhecidos, aberto ou fechado, a equação do rendimento de um sistema termodinâmico com um reservatório quente, um frio com uma região isolada, configurando um ciclo com dois processos isotérmicos e dois adiabáticos foi demonstrada por Carnot e é definida por:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \tag{1}$$

Onde  $T_2$  é a temperatura da fonte fria e  $T_1$  a temperatura da fonte quente, e o rendimento desta máquina tende a 100% no limite onde  $T_2$  tende a "zero" ou no caso de  $T_1$  ser levado a temperaturas muito elevadas.

Esta expressão é uma consequência da aplicação dos fundamentos sobre modelos de sistemas aberto e sistemas fechados, onde a massa de gás que entra nos processos é a mesma que sai ou é a mesma que termina o ciclo.

As máquinas térmicas conhecidas são desenhadas de modo a realizar seus ciclos mecânicos e termodinâmicos referenciados à sua vizinhança, ou seja, realizam trabalho contra o ambiente onde se encontram e seus processos termodinâmicos são referenciados também à vizinhança onde se encontram, de modo geral referenciados à atmosfera quando aplicadas no nosso meio, ao vácuo quando no espaço ou referenciadas a uma câmara sob determinada condição fixa. Estas características são comuns aos sistemas aberto e fechado.

Em física, o termo referência ou referencial é utilizado para se medir e registrar as grandezas físicas, como por exemplo, posição, velocidade, força, pressão, aceleração, campos eletromagnéticos, campos gravitacionais e outras grandezas de forma relativa a um referencial fixo, ambiente onde se encontram ou uma câmara em uma condição fixa definida. Tomando como exemplo um motor de combustão interna (ciclo Otto, Diesel, Brayton), os gases da combustão exercem uma força (pressão) em direção à sua vizinhança, esta vizinhança é o ambiente onde se encontram, o ar atmosférico, espaço, ou qualquer ambiente para onde o gás e o movimento dos elementos mecânicos se deslocam. Sob o ponto de vista termodinâmico, todo o gás, ora em expansão, após realizar o trabalho, todo ele se desloca para a referência, a sua vizinhança, o ambiente externo, normalmente para o ar atmosférico, a totalidade de matéria envolvida executa este curso. Assim são os motores de automóveis, aviões, sondas e naves espaciais e as máquinas térmicas para geração de energia. Assim, o "reservatório quente" é a fronteira onde o gás recebe o calor para gerar a sua expansão, o "reservatório frio" é a fronteira onde o gás perde o calor, pode ser a fronteira com o ambiente.

Quanto aos motores de circuito fechado conhecidos, como o de ciclo Stirling, muito embora o gás não seja descartado ao ambiente, a força exercida do gás sobre os pistões o desloca contra o ambiente externo, o gás, nos seus processos termodinâmicos na sua totalidade não se altera e sempre estarão expostos aos dois reservatórios, o quente e o frio.

Desta forma, pode-se constatar que as máquinas térmicas conhecidas possuem um único sistema termodinâmico, onde o gás envolvido com o trabalho é exposto totalmente ao calor para ganhar energia, realiza o trabalho e posteriormente todo o gás é exposto ao frio. Todas as máquinas conhecidas até o presente, de ciclo Stirling, ciclo Ericsson, ciclo Otto, ciclo Diesel, ciclo Rankine, ciclo Brayton, ou qualquer outra, são máquinas baseadas em sistema termodinâmico aberto ou sistema termodinâmico fechado.

# 2.4. As Principais Máquinas térmicas da Atualidade:

A Máquina teórica ideal de Carnot é uma máquina com um ciclo de 4 processos, foi definida em 1824. As principais Máquinas Térmicas de uso comercial são também referenciais e também possuem ciclos termodinâmicos na maioria de quatro processos:

1.	Motor de Ciclo Rankine	(Século XVIII)
2.	Motor de Ciclo Stirling	(1816)
3.	Motor de Ciclo Ericsson	(1853)
4.	Motor de Ciclo Brayton (turbina a gás)	(1870)
5.	Motor de Ciclo Otto	(1876)
6.	Motor de Ciclo Atkinson	(1882)
7.	Motor de Ciclo Diesel	(1897)

Existem outros ciclos termodinâmicos como Lenoir, Kalina, Miller, Stoddard, Scuderi, Bell Coleman e Hygroscopic são variações muito próximas dos ciclos já existentes.

# 2.4.1. Motor de ciclo Rankine:

As Máquinas Rankine são de combustão externa, inventada no século XVIII, possui um ciclo termodinâmico que converte calor em trabalho. O calor é suprido via externa para um laço fechado, onde é usual usar água. Este ciclo gera cerca de 90% de toda a energia elétrica produzida no mundo, incluindo virtualmente toda a energia termossolar, biomassa, carvão e nuclear nas usinas elétricas. As máquinas Rankine, na sua concepção simples, possui um ciclo termodinâmico de quatro processos, sendo dois isobáricos (4 - 1, 2 - 3), dois isentrópicos (1 - 2, 3 - 4).



Fig. 8 (Ciclo Rankine) [MARTINEZ, ISIDORO, 1995].

Mais tarde, o ciclo Rankine evoluiu para outras configurações, em que recebeu novos processos com objetivo de melhorar a sua eficiência.

# 2.4.2. Motor de ciclo Stirling:

O Motor Stirling foi inventado em 1816 por Robert Stirling, é um motor de combustão externa e possui um ciclo termodinâmico de quatro processos. Informações mais detalhadas sobre este motor serão tratadas em capítulo específico a seguir.

# 2.4.3. Motor de ciclo Ericsson:

Os motores Ericsson, inventado por John Ericsson em 1853, são de combustão externa. O Ciclo Ericsson possui similaridades com outros ciclos importantes, como o Ciclo Stirling e o Ciclo Brayton. O Ciclo Ericsson, assim como o Ciclo Stirling, utiliza um regenerador. Os dois ciclos possuem eficiências térmicas iguais a do Ciclo de Carnot. Os motores Ericsson possuem um ciclo termodinâmico de quatro processos, sendo dois isobáricos (2 - 3, 4 - 1), dois isotérmicos (1 - 2, 3 - 4).



Fig. 9 (Ciclo Ericsson) [MARTINEZ, ISIDORO, 1995].

### 2.4.4. Motor de ciclo Brayton (Turbina a gás):

O Motor Brayton é um motor de combustão interna, o modelo ideal denomina-se Ciclo Brayton, concebido por George Brayton em 1870. Opera em um ciclo termodinâmico de sistema aberto, ou seja, o fluido de trabalho (ar) é admitido na pressão atmosférica e os gases de escape, após passarem pela turbina, são descarregados de volta na atmosfera sem que retornem à admissão. A denominação *turbina a gás* pode ser erroneamente associada ao combustível utilizado. A palavra **gás** não se refere à queima de gases combustíveis, mas, sim ao fluido de trabalho da turbina, que é neste caso a mistura de gases resultante da combustão. O combustível em si pode ser gasoso, como gás natural, gás liquefeito de petróleo (GLP), gás de síntese ou líquido, como querosene, óleo diesel e até mesmo óleos mais pesados. As máquinas Brayton possuem um ciclo termodinâmico de quatro processos, sendo dois adiabáticos (1 - 2, 3 - 4), dois isobáricos (4 - 1, 2 - 3). [MIT, http://web.mit.edu/16 .unified/www/SPRING/propulsion/notes/ node27.html, Art. (2013)].



Fig. 10 (Ciclo Brayton) [MARTINEZ, ISIDORO, 1995].

### 2.4.5. Motor de ciclo Otto:

O motor Otto funciona por combustão interna com ignição por centelha. 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. Motores baseados neste ciclo equipam a maioria dos automóveis de passeio atualmente. Os motores Otto possuem um ciclo termodinâmico de quatro processos, sendo dois adiabáticos (1 - 2, 3 - 4), dois isocóricos (2 - 3, 4 - 5). [Heywood, John B.; - "Internal Combustion Engine Fundamentals", 1988].



Fig. 11 (Ciclo Otto) [HEYWOOD, JOHN B - 1988]

#### 2.4.6. Motor de ciclo Atkinson:

O motor ciclo de Atkinson é um motor a combustão interna inventado por James Atkinson em 1882. O ciclo de Atkinson foi projetado para dar prioridade à eficiência ao invés da potência e é usado em modernos carros híbridos. Esta máquina é uma variação do motor de ciclo Otto, cujas operações de válvulas alongam, estendem alguns processos do ciclo, visando maior economia e o ciclo passa a ter uma conotação de seis processos, adiabático (1 - 2), isocórico (2 - 3, 5 - 6), isobárico (3 - 4, 6 - 1), isentrópico (4 - 5). [Heywood, John B.; - "Internal Combustion Engine Fundamentals", 1988].



Fig. 12 (Ciclo Atkinson) [MARTINEZ, ISIDORO, 1995].

### 2.4.7. Motor de ciclo Diesel:

O Motor Diesel ou motor de ignição por compressão é um motor de combustão interna inventado em 1897 pelo engenheiro alemão Rudolf Diesel (1858-1913), em que a combustão do combustível se faz pelo aumento da temperatura provocado pela compressão de ar. Os motores Diesel possuem um ciclo termodinâmico de quatro processos, sendo dois adiabáticos (1 - 2, 3 - 4), um isobárico (2 - 3) e um isocórico (4 - 1). [Heywood, John B.; - "Internal Combustion Engine Fundamentals", 1988].



Fig. 13 (Ciclo Diesel) [HEYWOOD, JOHN B - 1988]

### 2.5. Motores Stirling:

As máquinas de Ciclo Stirling são máquinas a gás de circuito fechado que operam por meio de uma fonte de calor externa, podendo ser por combustão, mas não obrigatoriamente.

O motor Stirling vem atraindo a atenção de diversas empresas, para aplicações em projetos de geração de energia elétrica distribuída, suprimento de energia em sondas espaciais, para propulsão de submarinos em substituição aos de tecnologia nuclear, pelo fato de reunir características técnicas muito interessantes.

Algumas empresas e organizações que vem desenvolvendo projetos com motores Stirling são, a NASA e ESA (Agência Espacial Europeia) para projetos espaciais, a Kockums para submarinos tipo AIP (Air Independent Propultion), Sunpower, Ametek, BG Group PLC, BSR Solar Technologies GmbH, Ripasso Energy, Stirling Biopower, Stirling Technology, Inc, Infinia Corp, Viking Development Group, para outras aplicações como sistemas combinados de calor e força residencial, Geração Distribuída, normalmente usando como fonte térmica o calor do Sol (termossolar), combustão de biomassa, cogeração, canalizando perdas de outros sistemas térmicos, e geotermal.

Os motores Stirling existentes geralmente possuem altas eficiências termodinâmicas, pois requerem apenas calor para operar, no caso de utilização de processos por combustão, permitem emissões muito reduzidas em se comparando com qualquer outra máquina térmica que utilize o mesmo combustível, além de serem extremamente flexíveis com o tipo de combustível usado.

Por outro lado, há desvantagens bem expressivas dos motores Stirling frente às máquinas que operam por outros ciclos termodinâmicos. Os motores Stirling não admitem boa controlabilidade (rotação e torque) isto limita muito seu uso em tração. Para viabilizar um controle em um motor é necessário um sistema que admita uma função de transferência cujos parâmetros produzam efeitos diretos nas grandezas úteis, rotação e torque. Por exemplo, nos motores Otto e Diesel, este controle é feito pela alimentação direta do combustível e mistura do oxigênio para a combustão, isto é possível porque cada ciclo exige uma demanda de combustível e oxigênio e estes vem de fora do motor e são controlados por válvulas, sistemas eletrônicos e um comando do usuário, portanto há uma resposta direta. Por sua vez, o motor Stirling, nas configurações existentes, não responde a uma mudança direta na alimentação, pois a inércia térmica é muito grande, por sua vez, o sistema fechado no qual o ciclo opera, impõe uma pressão média levando os elementos de força, pistões, a se posicionarem resultando um volume máximo, portanto estas condições estreitam a faixa operacional dos motores Stirling, diminuindo o calor, o motor para de operar, aumentando o calor, o motor opera de forma desequilibrada em função de que na maioria dos motores Stirling a defasagem entre os elementos de força e do deslocamento do gás é fixa. Portanto trata-se de um motor que usualmente opera bem em um único ponto da sua curva.

Outra limitação importante, os motores Stirling possuem um ciclo termodinâmico de 4 processos com o gás confinado num único espaço geralmente com volume variável gerando trabalho sobre um ou mais pistões (êmbolos), necessitando de um segundo motor de potência equivalente para dar a partida. As configurações da maioria dos motores Stirling, alfa, beta e gama, demonstram um volume ocupado pelo gás de trabalho e este faz fronteira com os elementos de força, pistões, que por sua vez estão ligados a bielas, virabrequins e um eixo para levar a força ao meio externo. O volume onde o gás trabalha é variável, o gás tende a ocupar o maior volume possível, assim os motores, quando em repouso, possuem nas câmaras o volume máximo, para começar a funcionar é necessário calor, o gás aumenta a pressão,

ainda na posição de repouso. Para iniciar o funcionamento é necessário produzir o giro e levar a máquina a uma rotação mínima necessária onde o ciclo do motor possa se manter e assim produzir força. Portanto a força mecânica externa necessária para levar o motor ao funcionamento deve vencer a força do gás quente sobre os pistões da máquina, e esta força, por estas condições, necessariamente são equivalentes.

Outra limitação importante dos motores Stirling está na sua geometria. Estas impedem a construção de máquinas de grande porte e evidentemente grandes potências. A constatação deste fato é bem direta, ao observar um modelo qualquer de motor Stirling, as regiões de transferência de calor e de frio coincidem com os volumes de gás nos pistões de força e de deslocamento, desta forma, para obter máquinas de alta potência é necessário aumentar o volume destes elementos, cilindros e pistões, como o gás possui baixa condutividade térmica, a taxa de transferência de calor para o gás é inversamente proporcional às dimensões dos elementos de força e assim os projetos ficam limitados a baixas potências. Na prática, observa-se motores de alguns kiloWatt, geralmente inferiores a 100 kW.

Os motores Stirling são classificados pelas suas configurações mecânicas, existem centenas de desenhos de motores Stirling, porém todos possuem o mesmo ciclo termodinâmico formado por quatro processos, sendo dois isotérmicos e dois isocóricos com o gás de trabalho confinado sempre no mesmo ambiente com volume variável de modo a gerar trabalho contra a vizinhança, geralmente o ambiente ou uma câmara pressurizada ou a vácuo.

As principais classificações de motores Stirling são: Motores Stirling Alfa, Motores Stirling Beta e Motores Stirling Gama.

# 2.5.1. Princípios de operação dos Motores Stirling:

O ciclo Stirling é formado por quatro processos, sendo dois isotérmicos (1 - 2, 3 - 4), dois isocóricos (2 - 3, 4 - 1), conforme figura 14.

Observando as fases do motor Stirling mostrado na figura 16, constata-se que o gás é mantido sempre confinado em uma única região, porém deslocando alternadamente entre áreas quentes e frias desta mesma região de forma a realizar os 4 processos termodinâmicos em cada ciclo e assim produzir trabalho através dos pistões de força contra a vizinhança.

Os fabricantes de motores Stirling utilizam normalmente o Hélio, Hidrogênio, Nitrogênio ou o ar seco como gás de trabalho. O Hélio e Hidrogênio oferecem maiores eficiências em função de suas propriedades, porém exigem projetos mais elaborados para evitar vazamentos.

Quando a maior parte do fluido de trabalho se encontra na região de aquecimento, ocorre o processo isotérmico de alta temperatura 3-4, fazendo o gás se expandir, a alta pressão produz o deslocamento dos pistões de força, e a pressão diminui realizando trabalho contra a vizinhança, a fase seguinte é o processo isocórico 4-1, o gás de trabalho é transportado para a região de resfriamento passando pelo regenerador o qual conserva parte do calor do gás. Posteriormente, o gás se encontrando na região fria, é realizado o processo isotérmico 1-2, de baixa temperatura, o pistão de força recebe trabalho da vizinhança. Na quarta e última fase o gás é transportado da região fria para a quente, recebendo parte do calor armazenado no regenerador, realizando então um novo processo isocórico 2-3. Durante todo o ciclo o número de partículas do gás ou massa, permanece inalterado. O ciclo Stirling ideal é visualizado na figura 14.

Para qualquer máquina térmica, a determinação dos processos termodinâmicos de seus ciclos é feito por aproximação, nos modelos de máquinas reais as fronteiras de cada processo não são bem definidas, a indefinição das transições é apresentada na figura 15.



Na figura 16 é mostrado um diagrama com os 4 processos do ciclo termodinâmico do motor Stirling. Durante o processo Isotérmico de Compressão, o pistão da parte quente se move lentamente no sentido ascendente, próximo ao topo do cilindro enquanto que o pistão da parte fria move-se rapidamente também no sentido ascendente, comprimindo o gás de trabalho frio, fase 1 - 2 da figura 14. O aumento da energia causado pela compressão é removido pelo trocador de calor.



Fig. 16 (As 4 fases do ciclo Stirling). [MAJESKI, Report. 2002]

Durante o processo Isocórico (Aquecimento Regenerativo), o pistão da parte quente inicia o movimento de descida no interior do cilindro enquanto que o pistão da parte fria move-se lentamente no sentido ascendente, transportando o gás de trabalho da região fria para a região quente, nesta fase a pressão interna continua a aumentar com a recuperação do calor armazenado no regenerador, fase 2 - 3 da figura 14.

Durante o processo isotérmico de expansão, o pistão da parte quente se move lentamente no sentido descendente, próximo ao ponto morto inferior do cilindro enquanto que o pistão da parte fria move-se rapidamente também no sentido descendente, expandindo o gás. Esta é a única fase em que o motor gera força útil, fase 3 - 4 da figura 14. O calor é fornecido pelo trocador de calor (aquecimento por uma fonte externa). A energia que executa esta fase, de expansão, é a energia direta vinda da fonte quente.

Durante o processo isocórico (Resfriamento Regenerativo), o pistão da parte quente inicia o movimento de ascensão no interior do cilindro enquanto que o pistão da parte fria move-se lentamente no sentido descendente, transportando o gás de trabalho da região quente para a região fria e com a liberação do calor para o regenerador, nesta fase a pressão interna continua a diminuir, fase 4 - 1 da figura 14.

Numa visão realística, o trabalho indicado do motor é equivalente à área interna da curva da figura 15.

### 2.5.2. Motor Stirling Alfa:

O motor Stirling tipo alfa, figura 17, possui dois ou mais pistões que operam alternadamente no interior de seus respectivos cilindros onde existe o gás de trabalho. O gás de trabalho se move entre regiões quentes e frias passando por um regenerador o qual é responsável por conservar parte da energia. Os pistões estão conectados em um mesmo virabrequim por meio de bielas, cinemático solidário. O deslocamento do gás de trabalho pelo pistão de deslocamento possui um movimento com defasagem fixa em relação ao deslocamento do pistão de força, possuem uma conexão física pelos elementos da máquina.



Fig. 17 (Motor Stirling Alfa) - [MAJESKI, Report. 2002]

### 2.5.3. Motor Stirling Beta:

O motor Stirling tipo beta possui um arranjo formado por um pistão deslocador e um pistão de trabalho, ambos executam movimentos alternativos alinhados em um único cilindro. Da mesma forma como nas demais configurações, o gás de trabalho se move entre regiões quentes e frias passando por um regenerador o qual é responsável por conservar parte da energia. Esta configuração permite dois tipos de construção, um deles os pistões estão conectados mecanicamente a um mesmo eixo de força ou virabrequim por meio de bielas, figura 18, e a segunda, chamado de pistão livre, figura 19. Este modelo possui um gerador de eletricidade de deslocamento linear. [Wood, Art. 2004].



Fig. 18 (Motor Stirling Beta) [MAJESKI, Report, 2002]



Fig. 19 (Motor Stirling Beta de pistão livre) [MAJESKI, Report, 2002]

# 2.5.4. Motor Stirling Gama:

O motor Stirling tipo gama, figura 20, tem deslocador e um pistão de trabalho. Ambos executam movimentos alternativos, porém cada um opera em seu respectivo cilindro. Da mesma forma como nas demais configurações, o gás de trabalho se move entre regiões quentes e frias passando por um regenerador o qual é responsável por conservar parte da energia. Nesta configuração os pistões são acionados pelo mesmo eixo de força ou virabrequim.



Fig. 20 (Motor Stirling Gama) - [MAJESKI, Report. 2002]

# 2.5.5. Eficiência dos Motores Stilring Atuais:

Na teoria, para uma máquina térmica qualquer que tenha sua configuração sobre um sistema aberto ou fechado, o limite para a eficiência máxima é a própria eficiência da Máquina de Carnot. A equação do rendimento da máquina Stirling é idêntica e é dada por.

$$\eta = 1 - \frac{Tf}{Tq}$$

$$Tf - Temperatura da fonte fria
Tq - Temperatura da fonte quente$$

Portanto a eficiência máxima do motor Stirling é dependente da temperatura, ou melhor, quanto maior for a temperatura do reservatório quente (Tq), maior será o rendimento máximo que o motor poderia teoricamente atingir. Por outro lado, esta característica permite que um motor Stirling possa operar com temperaturas muito inferiores a quaisquer outras máquinas térmicas, pois a maioria, praticamente todas as máquinas comerciais operam por combustão e isto significa temperaturas em torno dos 1000 °C ou mais.

### 2.5.6. Combustíveis aplicáveis em Motores Stirling:

As Máquinas Stirling possuem uma grande versatilidade quanto ao uso de combustíveis ou fontes de energia. Como a base de operação é o calor, além de a mesma poder operar com fontes diversas, podem fazê-lo simultaneamente, desde que o projeto admita levar o calor ao gás de trabalho. Elas se adaptam a combustíveis tradicionais, fósseis, bem como aos combustíveis renováveis, se adaptam a energia nuclear, bem como ao termossolar ou geotérmico.

### 2.5.7. Emissões dos Motores Stirling:

As emissões das Máquinas Stirling são consideravelmente menores que as demais máquinas térmicas, e melhor controláveis. Há três razões primárias para esta particularidade:

- Se usado combustíveis convencionais, a combustão ocorre externamente, a queima é contínua, portanto há menos resíduos. Máquinas de combustão interna, a queima é intermitente, quantidades consideráveis de resíduos são emitidos para o ambiente.
- A alta eficiência das Máquinas Stirling, por si proporciona emissões menores por kWh gerado para qualquer referência de combustível usado.
- Se o projeto previr uma fonte de calor natural, como a termossolar ou geotermal, não existirá emissões. Este é um fator importante a considerar em função de que a máquina Stirling admite projetos para operar com temperaturas inferiores à maioria, então estas fontes de menor temperatura são viáveis.

# 2.5.8. Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento de Motores Stirling:

As máquinas Stirling reúnem características que vem chamando a atenção das indústrias, instituições de pesquisas e especialmente as empresas aeroespaciais e navais. A eficiência, flexibilidade quanto à fonte térmica, baixos ruídos, baixas emissões, aplicações

com fontes limpas e renováveis tornam o motor Stirling, um forte candidato para ser à base das máquinas do futuro. [MAJESKI, Report. 2002].

Sua eficiência dependente da temperatura, e vem direcionando algumas empresas em pesquisar e gerar esforços no desenvolvimento de máquinas para operar com temperaturas cada vez mais altas e por consequência conseguir maior eficiência, porém os problemas com os materiais empregados também aumentam. Outras empresas e instituições optaram por desenvolver máquinas para operar com temperaturas relativamente baixas, por consequência passam a ter eficiências termodinâmicas também mais baixas, porém em função de praticamente todas as máquinas Stirling operarem por meio de pistões, temperaturas mais baixas obrigam as máquinas a operarem com menores velocidades em função das propriedades de transferência da energia (calor) ao gás, que é lenta, a inércia térmica é grande, e esta característica impõe menores perdas mecânicas, ou seja, menos movimento mecânico significa menos atrito dentro do mesmo período de tempo e assim compensam em parte as reduções da eficiência pelo uso de menores temperaturas. [MAJESKI, Report. 2002].

Assim as pesquisas vem sendo direcionadas em materiais para altas temperaturas, materiais e componentes com menores perdas por fricção, menores arrastes, melhores isolantes e condutores térmicos. Os motores de Ciclo Stirling na configuração Beta Rômbico, figura 21, e Beta de Pistões Livres, figura 19, são conquistas destas pesquisas. Cada pistão do motor tipo Beta Rombico possui um arranjo formado por duas bielas e dois virabrequins, desta forma é cancelada a força transversal dos pistões sobre o cilindro, reduzindo sensivelmente o desgaste mecânico do pistão e do cilindro. [MAJESKI, Report. 2002].



Fig. 21 (Motor Stirling Beta Rombico) - [MAJESKI, Report. 2002]

Atualmente os maiores desafios para uma evolução de alto impacto dos motores Stirling reside em obter controlabilidade da rotação e torque e em configurações que permitam projetos de máquinas de altas potências, estas características trarão as Máquinas Stirling à frente das demais máquinas térmicas até o presente, conhecidas. Uma publicação a este respeito foi feita por "*University of Canterbury*", a qual propõe um motor Stirling tipo beta com um pistão de deslocamento do gás controlado por um servosistema linear independente do elemento de força motriz e assim conseguir maior controle da máquina. A mesma idéia também foi adotada pela "*University of Glasgow*" na Escócia. [Gopal, http://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/7306. 2012].

# 2.6. Eficiência dos Motore Atuais:

A eficiência da conversão de energia de uma máquina térmica é a razão do trabalho de saída pela energia (calor) de entrada.

Muitas vezes os fabricantes de máquinas térmicas reportam uma eficiência referenciada percentualmente à Máquina de Carnot nas mesmas condições térmicas, por exemplo, se a eficiência de Carnot em uma dada condição for de 70%, e a companhia reporta que sua máquina possui uma eficiência de 40% da Máquina de Carnot, a eficiência real desta máquina será de 28%.

Um exemplo comum com estes referenciais são as turbinas que operam pelo Ciclo Brayton, alguns fabricantes publicam que as mesmas possuem rendimentos na ordem de 80%. Estas máquinas térmicas operam em uma temperatura na combustão próxima a 1250 °C e os gases são expelidos após gerar a força a temperaturas da ordem de 600 °C. Estas máquinas consomem aproximadamente 40% de sua energia disponível apenas para fazer a compressão do ar para obter o oxigênio necessário na combustão. Para esta condição, quando é publicado que o rendimento é de 80% referenciado a Carnot, na realidade o rendimento desta máquina será de 34% que é a relação entre a força mecânica gerada pela energia fornecida.

# 2.7. A Máquina de Carnot:

A máquina de Carnot foi idealizada por Nicolas Léonard Sadi Carnot, conforme seu desenho original datado de 1824.

É uma máquina ideal que utiliza calor para realizar trabalho. Dentro do cilindro contém um gás que opera através de processos isotérmicos de expansão e compressão, fazendo com que o pistão realize trabalho contra a vizinhança (ambiente).

As literaturas atuais indicam que a máquina de Carnot é o meio mais eficiente de produzir trabalho por meio de duas fontes, uma quente e uma fria, *considerando um único sistema termodinâmico, seja ele aberto ou fechado*.

O **teorema de Carnot** dita: Não há máquina térmica, que operando entre dois reservatórios de calor, seja mais eficiente que um **ciclo reversível** operando entre os mesmos dois reservatórios.

De outra forma, as literaturas também definem:

O **teorema de Carnot** dita: Não há máquina térmica, que operando entre dois reservatórios de calor, seja mais eficiente que a **máquina de Carnot** operando entre os mesmos dois reservatórios.



Fig. 22 (Desenho original da máquina de ciclo de Carnot)

Carnot percebeu que na realidade não é possível construir um motor termicamente reversível, portanto motores reais são menos eficientes do que o indicado pela equação (3). Apesar disto, para os sistemas termodinâmicos conhecidos, aberto e fechado, essa equação é perfeitamente aplicável para determinar a máxima eficiência possível que poderia ser esperada para um dado grupo de reservatórios térmicos. [WANG, JITAO.; "Modern Thermodynamics based on the Extended Carnot Theorem", Springer Verlag, 2011].

$$\eta = 1 - \frac{Tf}{Tq}$$
<sup>(3)</sup>

Tf – Temperatura da fonte fria

Tq - Temperatura da fonte quente

### 2.7.1. Demonstração Matemática do Rendimento do Ciclo de Carnot:

O ciclo de Carnot é composto por quatro processos termodinâmicos, sendo dois isotérmicos e dois adiabáticos.



Fig. 23 (Ciclo Termodinâmico de Carnot).

Observando a figura 23, entrada de energia em 3 - 4.

$$W_{3-4} = \int P. dV$$

Para entender melhor a configuração diferencial a ser explicada à frente, partiremos do princípio que durante o processo isotérmico de alta, existem " $n_1$ " partículas na câmara.

Pela equação geral dos gases:

$$P = \frac{n_{1} \cdot R \cdot T_{1}}{V}$$

$$W_{34} = \int_{V_{3}}^{V_{4}} \frac{n_{1} \cdot R \cdot T_{1}}{V} \cdot dV$$

$$W_{34} = n_{1} \cdot R \cdot T_{1} \cdot \ln(V) / \int_{V_{3}}^{V_{4}}$$

$$W_{34} = n_{1} \cdot R \cdot T_{1} \cdot \ln\left(\frac{V_{4}}{V_{3}}\right)$$

E a energia em 1 - 2 é representada por:

$$W_{1-2} = \int P. dV$$

Da mesma forma, para entender melhor a configuração diferencial, partiremos do princípio que durante o processo isotérmico de baixa, existem "n<sub>2</sub>" partículas na câmara.

Pela equação geral dos gases:

$$P = \frac{n_2 \cdot R \cdot T_2}{V}$$

$$W_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} \frac{n_2 \cdot R \cdot T_2}{V} \cdot dV$$
$$W_{1-2} = n_2 \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln(V) \int_{V_1}^{V_2}$$
$$W_{1-2} = n_2 \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

O trabalho líquido do ciclo é:

$$W = W_{3-4} + W_{4-1} + W_{1-2} + W_{2-3}$$

Os processos 4-1 e 2-3 são adiabáticos e a energia interna depende apenas da temperatura, as temperaturas iniciais e finais deste processo são iguais e opostas, o número de partículas também idêntico, assim:

$$W_{4-1} = -W_{2-3}$$

Portanto:

$$W = W_{3-4} + W_{1-2}$$

Sendo o calor fornecido na fonte quente  $Q_{3-4} = W_{3-4}$ , tem-se que o rendimento da máquina de Carnot é:

$$\eta = \frac{W_{3-4} + W_{1-2}}{W_{3-4}}$$

Substituindo pelas equações de trabalho:

$$\eta = \frac{n_1 \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) + n_2 \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}{n_1 \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)}$$

Considerando que é um sistema fechado, a razão:

$$\frac{V_4}{V_3} = \frac{V_1}{V_2}$$

Pelas propriedades dos logaritmos:

$$\eta = \frac{n_1 \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln \left(\frac{V_4}{V_3}\right) - n_2 \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln \left(\frac{V_4}{V_3}\right)}{n_1 \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln \left(\frac{V_4}{V_3}\right)}$$

Simplificando:

$$\eta = \frac{n_1 \cdot T_1 - n_2 \cdot T_2}{n_1 \cdot T_1}$$

Então:

$$\eta = 1 - \frac{n_2 \cdot T_2}{n_1 \cdot T_1}$$

Porém como a máquina de Carnot possui uma única câmara com o gás de trabalho confinado, e este, nestas condições realiza os quatro processos termodinâmicos, dois isotérmicos e dois adiabáticos, o número de partículas é constante ( $n_1 = n_2$ ).

Então:

$$\eta = 1 - \frac{p_2 T_2}{p_1 T_1}$$

E finalmente a equação do rendimento da máquina ideal teórica de Carnot é:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \tag{4}$$

Onde  $T_2$  é a temperatura da fonte fria e  $T_1$  a temperatura da fonte quente, e o rendimento desta máquina tende a 100% no limite onde  $T_2$  tende a "zero".

Partindo do desenho original da máquina de Carnot, figura 22, idealizada por Nicolas Léonard Sadi Carnot, por volta de 1820, porém em uma configuração "diferencial", como sendo duas máquinas conectadas entre si, defasadas em 180°, com transferência de massa durante os processos adiabáticos, o referencial de uma máquina não mais seria o ambiente, e

sim a outra máquina, tanto sobre o sistema mecânico que realiza trabalho, como ao sistema termodinâmico.

O sistema formado por duas câmaras, dois subsistemas, cada um executa seu próprio ciclo termodinâmico com as partículas que elas contém. É, portanto um sistema integrado com dois ciclos termodinâmicos simultâneos defasados em 180°, formando um único ciclo termodinâmico com 8 processos ocorrendo em pares e defasados, mas com transferência de massa entre eles.

Na Máquina Diferencial com transferência de massa durante os processos adiabáticos, após uma das câmaras realizar trabalho contra a outra, o sistema de controle habilita a passagem de partículas da câmara de alta para a câmara de baixa através do ETM. Esta energia conservada fica "circulando" entre as duas câmaras da máquina.

O rendimento de uma máquina térmica é um fator de grande importância, a capacidade de uma máquina em operar com baixos diferenciais térmicos a torna fundamental para o aproveitamento de fontes naturais, limpas e renováveis de baixo ou nenhum impacto ambiental.

# 3. BREVE HISTÓRIA DA TERMODINÂMICA

"Há relatos de ter sido o grego Teodoros [530 a.C.] o primeiro a utilizar a expansão do ar quente para introduzir um sistema de aquecimento central no mais famoso templo construído em Éfeso, na Ásia, para homenagear a Deusa Diana.

Os fenômenos sobre a expansibilidade térmica do ar foram objeto de estudo por parte dos gregos, tais como o filósofo Empédocles da Akragas (atual Agrigento) (ac.490-ac. 430) quando os gregos ocupavam o sul da Itália e o físico Estratão de Lâmpsaco (ac.340-ac. 270), o qual foi além nos métodos e recorreu à experimentação pura. Foram, de fato, defensores do mecanicismo na natureza, negando a existência de qualquer divindade transcendental, algo verdadeiramente revolucionário naqueles tempos. Philon de Bizâncio (ac.300-?). Este descreveu um aparelho que demonstrava a relação entre a expansão do ar e a variação de temperatura, que é considerado como o precursor do termômetro.

Nas primeiras décadas da Era Cristã (d.C.), os fenômenos térmicos voltaram a ser estudados pelo grego Heron de Alexandria (20 d.C.-?). Com efeito, em sua obra intitulada Pneumática (composta de dois livros), Heron descreve um dispositivo semelhante ao de

Philon, bem como apresenta, também, a descrição de uma máquina a vapor – a *Eolípila* (do latim *Aeolipyla*, que significa "porta de Eola"), isto é, uma esfera oca com dois tubos recurvados e presos na mesma. Fervendo então a água contida na esfera, o vapor d água resultante, ao escapar pelos tubos, fazia a mesma girar. Observe-se que esse dispositivo já havia sido rudimentarmente descrito pelo arquiteto romano Marcus Vitrivus Pollio (a.C 90-20), em seu tratado De Architectura (em 10 volumes), escrito por volta de 40 a.C. [Armand Gibert, Origens Históricas da Física Moderna: Introdução Abreviada (Fundação Calouste Gulbenkian, 1982)].

Somente quinze séculos depois da *Eolípila*, apareceram novos trabalhos com o vapor dágua e, desta vez, para usá-lo a seu serviço. Com efeito, em 1615, o engenheiro francês Salomon de Caus (1576-1626) publicou o livro intitulado Les Raisons des Forces Mouvantes ("As Razões das Forças Moventes").

Muito mais tarde, em 1679, o médico e físico francês Denis Papin (1647- c.1712) inventou o *digestor de calor* (hoje conhecido como *panela de pressão*).

Em 1689, Papin inventou uma *bomba centrífuga*, que era uma máquina a vapor destinada a elevar água de um canal entre as cidades alemãs Kassel e Karlshaven. Um ano depois, em 1690, ele escreveu o artigo intitulado De Novis Quibusdam Machinis ("Um Novo Tipo de Máquina") no qual descreveu o funcionamento da *bomba centrífuga*. Ainda nesse artigo, apresentou sua teoria, ainda imperfeita, de uma máquina funcionando pelo jogo alternativo de um êmbolo. Essa teoria resultou de sua observação de que a água fervida, colocada em um tubo oco, faria com que o vapor resultante deslocasse uma espécie de êmbolo colocado na outra extremidade do tubo. Em 1698, Papin enviou cartas ao filósofo e matemático alemão Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), **criador do Cálculo Diferencial**, nas quais mencionou que estava trabalhando em uma máquina para elevar água a uma grande altura pela força do fogo, e que, com tal força havia conseguido movimentar uma pequena carruagem.

Pela força do calor e vapor, no final do Século 17, depois de praticamente desmatar sua floresta, a Inglaterra passou a usar o carvão mineral como fonte de energia. No entanto, as minas desse carvão eram constantemente inundadas de água e seu esgotamento era feito manualmente, constituindo-se em uma tarefa penosa para quem a realizasse. Em vista disso, em 1698, o inventor e engenheiro inglês Thomas Savery (c.1650-1715) desenvolveu um tipo de máquina a vapor, que era um dispositivo que produzia vácuo pela condensação de vapor dágua. Tal dispositivo, ao ser conectado com um tubo longo e mergulhado no interior de uma

mina de carvão alagada, aspirava água devido à formação do vácuo. Por essa razão, esse dispositivo (que foi patenteado por Savery) ficou conhecido como o *amigo do mineiro*.

Por apresentar muitas limitações, principalmente quando envolvia pressões altas (acima de oito atmosferas), a máquina de Savery foi aperfeiçoada pelo inventor e engenheiro inglês Thomas Newcomen (1663-1729), em 1705, ao construir cilindros polidos nos quais pistões (êmbolos) se deslocava. O movimento de vaivém desses pistões devia-se, respectivamente, à expansão do vapor, já que, por causa do resfriamento decorrente dessa expansão, havia a formação de vácuo e, consequentemente, a pressão atmosférica baixava o pistão. No entanto, como a água destinada a condensar o vapor esfriava também o cilindro, desse modo, grande quantidade de calor era desperdiçada. Apesar dessa limitação, a máquina de Newcomen foi empregada por vários anos. Em 1705, Leibniz enviou para Papin um esquema da máquina de Savery que conseguia elevar água. Como já havia trabalhado nesse problema, esse esquema o estimulou a continuar seus estudos sobre esse tipo de máquina. Assim, em 1707, Papin escreveu o livro Ars Nova ad Aquam Ignis Adminiculo Efficacissime Elevandum ("Uma Nova Maneira de Bombear Água Usando Vapor") no qual apresentou suas ideias sobre a máquina a vapor, inclusive com a descrição de válvulas de segurança para evitar acidentes. Note-se que, em 1709, Papin construiu o primeiro barco a vapor [baseado no movimento de um êmbolo (pistão) devido ao vapor] com pás propulsoras ao invés de remos. Ele experimentou esse barco nas águas do Rio Fulda, na Alemanha.

A primeira máquina a vapor com dois cilindros foi projetada pelo mecânico e inventor russo Ivan Ivanovich Polzunov (1728-1766), em 1763. Sua montagem foi concluída no dia 30 de maio de 1766, três dias antes de ele morrer. Registre-se que um modelo da máquina de Polzunov se encontra no *Museu de Barnaul*, na Rússia.

A limitação da máquina de Newcomen, ou seja, a de esfriar também o cilindro foi contornada pelo engenheiro escocês James Watt (1736-1819), em maio de 1765, ao inventar o *condensador* – um dispositivo isolado para resfriar o vapor d água – e adaptá-lo à máquina de Newcomen. Em 1769, Watt patenteou sua invenção e começou a comercializá-la. Além disso, continuou o seu aperfeiçoamento. Em 1782, ele simplesmente abandonou o uso da pressão atmosférica para baixar os pistões, e passou, então, a utilizar o próprio vapor para realizar essa tarefa. Desse modo, o vapor entrava alternativamente nas duas extremidades do pistão, e este, portanto, tanto empurrava quanto aspirava o vapor. Em vista disso, esse seu novo invento ficou conhecido como máquina de ação dupla. Logo

depois, em 1783, Watt introduziu a definição de *cavalo-vapor* (CV) ["horse-power" (HP)], ao usar um robusto cavalo e mostrar que ele poderia elevar à altura aproximada de 1,20 m, um peso de 68 kg em um segundo. Hoje, essa unidade de *potência*, no sistema Metro-Kilograma-Segundo (MKS), recebe o nome de *Watt*, em sua homenagem. Um ano depois, em 1784, Watt inventou o *regulador centrífugo* que, automaticamente, controlava a produção de calor de suas máquinas. Por fim, em 1790, Watt completou a invenção da hoje máquina a vapor de Watt incorporando a ela um *medidor de pressão*.

Uma nova idéia sobre a aplicação prática do vapor dágua foi apresentada pelo engenheiro e inventor norte-americano Robert Fulton (1765-1815). Com efeito, em 1797, ele propôs ao governo do Imperador Napoleão Bonaparte (1769-1821) a construção de um submarino movido a vapor, o *Nautilus*, para que o mesmo pudesse ser usado na guerra contra a Inglaterra. Essa idéia, contudo, foi rejeitada por aquele governo. No entanto, como ele voltou a insistir nesse projeto, agora junto ao Ministro da Marinha Francesa, Napoleão deulhe então a concessão para construir o primeiro submarino a vapor, o *Nautilus*, que ficou pronto em 1800. É oportuno destacar que, em 17 de agosto de 1807, Fulton atravessou o Rio Hudson, nos Estados Unidos, com o primeiro barco a vapor, construído por ele e pelo diplomata norte-americano Robert R. Livingston (1746-1813): o *North River Steamboat of Clermont*, logo denominado pela imprensa de *Clermont*. Esse barco, com a potência de 24 HP, viajava a uma velocidade de 8 km/h. Fulton e Livingston já haviam construído um barco a vapor com o qual viajaram no Rio Sena, no dia 09 de agosto de 1803, viajando contra a correnteza e com uma velocidade de 5-6 km/h.

As máquinas a vapor citadas acima apresentavam uma eficiência (rendimento) muito baixa, cerca de 5 a 7 por cento. Em vista disso, em 1803, o general e engenheiro militar francês Lazare Nicolas Marguerite Carnot (1753-1823) estudou essa deficiência denominada por ele de *força viva virtual*, usando o conceito de *energia potencial* [Sir Edmund Taylor Whittaker, A History of the Theories of Aether and Electricity: The Classical Theories (Thomas Nelson and Sons Ltd., 1951)]. É interessante notar que o físico e médico inglês Thomas Young (1773-1829) publicou, em 1807, seu livro intitulado Lectures on Natural Philosophy ("Conferências sobre Filosofia Natural") no qual usou o termo *energia* no sentido hoje conhecido, qual seja: *a capacidade de realizar trabalho*.

O estudo do rendimento da máquina a vapor iniciado por Lazare Carnot, em 1803, conforme visto acima foi retomado por seu filho, o físico francês Nicolas Léonard Sadi

Carnot (1796-1832), e apresentado em seu livro intitulado Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu et sur les Machines Propes à Devélopper cette Puissance ("Reflexões sobre a Potência Motriz do Fogo e sobre as Máquinas Próprias para Desenvolver essa Potência"), publicado em 1824. Nesse livro, Carnot descreve uma máquina ideal, sem atrito, que realiza um ciclo completo, de modo que a substância usada – vapor, gás ou outra qualquer – é levada de volta a seu estado inicial. Desse modo, Carnot afirmou: - *A potência motriz do fogo (calor) é independente dos agentes empregados para produzi-la; sua quantidade é determinada somente pelas temperaturas dos corpos entre os quais, no resultado final, ocorre a transferência do calor*. Nesse ciclo, mais tarde conhecido como *ciclo de Carnot*, o calor era transformado em "força mecânica" e essa transformação dependia apenas da diferença de temperatura absoluta entre a da *fonte quente* (caldeira: T<sub>1</sub>) e a da *fonte fria* (condensador: T<sub>2</sub>). É oportuno notar que a *potência motriz do fogo* usada por Carnot é hoje denominada de *rendimento* (<sup>7</sup>), dada por:

$$\eta = (T_1 - T_2)/T_1$$

Ao comparar a "queda" do calor em sua máquina com a queda da água em uma caixa d água, e ao considerar o fato de que essa água pode voltar à sua caixa por intermédio de uma bomba, Carnot concluiu que sua máquina poderia trabalhar de modo *reversível*, isto é, ora deixando o calor "cair" da fonte quente para a fonte fria, ora "subindo" da fonte fria para a fonte quente. Havia, no entanto, uma pergunta intrigante, qual seja: como era que a conservação do calor nesse processo *reversível* se coadunava com a conservação do calor nos processos *irreversíveis* como, por exemplo, a produção de calor por atrito nas famosas experiências realizadas pelo físico anglo-norte-americano Sir Benjamin Thompson, Conde de Rumford (1753-1814), em 1798 e 1799, Carnot estava consciente dessas dificuldades tanto que, em 1832, em uma série de notas escritas pouco antes de morrer (sua morte ocorreu ainda em 1832) e publicadas após sua morte, descreveu novas experiências nas quais procurava determinar o *equivalente mecânico do calor*, pois começara a desconfiar da "materialidade" do calor.

A máquina de Carnot foi estudada pelo físico francês Benoit-Pierre-Émile Clapeyron (1799-1864), em 1834 (*Journal de l'École Polytecnique* 14, p. 190), ocasião em que o *ciclo de Carnot* foi pela primeira vez representado graficamente (hoje, esse gráfico é conhecido como *diagrama P-V*) por dois processos *isotérmicos* (que mantém a temperatura constante) e por dois *adiabáticos* (que mantém a troca de calor constante). De posse desse gráfico e de sua

famosa Equação dos Gases Perfeitos, Clapeyron demonstrou, matematicamente, que a produção de *trabalho* na máquina de Carnot dependia somente da diferença de temperatura absoluta entre os reservatórios térmicos considerados por Carnot. E mais ainda, que a máquina e o gás utilizado na mesma retornavam ao seu estado inicial, no final de cada ciclo, com o calor sendo conservado nesse ciclo.

Com a força do vapor, em 1801, Richard Trevithick, inventor britânico, aplicou rodas a uma das suas máquinas. Esta *locomotiva rodoviária* que ficou conhecida como *The Puffing Devil*, terá sido um dos primeiros veículos rodoviários a carregar passageiros movendo-se pela sua própria fonte de energia (antes de Trevithick, já Joseph Cugnot, tinha construído uma máquina similar). Este veículo, predecessor do automóvel, andava pelas ruas de Camborne passeando os amigos de Trevithick, mas, como não conseguia manter a pressão do vapor durante muito tempo, não teve grandes efeitos práticos.

Em 1803, Trevithick construiu outro veículo auto propulsionado, chamava-se "London Steam Carriage" (Carruagem a Vapor de Londres) e era basicamente, uma carruagem com um motor a vapor acoplado. Esta máquina atraiu bastante a atenção do público e da imprensa, mas não teve sucesso, devido ao seu custo ser muito superior ao das tradicionais carruagens puxadas por cavalos.

No ano seguinte, construiu a primeira locomotiva para caminho de ferro. Esta máquina que não tinha nome foi usada nas minas de ferro em Pen-Y-Darren no País de Gales. Com 10 vagões atrelados, à velocidade de 8 km/hora, fez a sua primeira viagem no dia 21 de Fevereiro de 1804. Embora tivesse funcionado, o seu sucesso foi efémero: a máquina avariava constantemente e o seu peso, partia os carris, desenhados para serem utilizados pelas carruagens puxadas por cavalos. Trevithick viria a construir mais uma locomotiva em Coalbrookdale, mas pouco ou nada se sabe acerca dessa máquina.

Trevithick foi um pioneiro cujas invenções eram avançadas demais para a sua época; além das locomotivas, construiu barcos a vapor, máquinas de debulhar e de dragar, no entanto nunca conseguiu investidores que o ajudassem a desenvolver as suas invenções.

Mais uma aplicação prática da máquina a vapor foi a locomotiva a vapor – a *Active* - construída pelo engenheiro e inventor inglês George Stephenson (1781-1848). Com essa locomotiva ele transportou, em 17 de setembro de 1825, pela primeira vez, 450 pessoas no trecho Darlington-Stockton, na Inglaterra, com uma velocidade de 24 km/h. Em 15 de

setembro de 1830, construiu uma nova locomotiva a vapor - a *Rocket* -, que desenvolvia uma velocidade de 58 km/h, usada no deslocamento de pessoas no trecho Liverpool-Manchester, na Inglaterra.

Entre 1833 e 1835, os engenheiros industriais e inventores russos Yefim Alekseyevich Cherepanov (1774-1842) e seu filho Miron Yefimovich Cherepanov (1803-1849) construíram as primeiras locomotivas a vapor russas. Em 1837, eles também construíram, na Rússia, a primeira *estrada de ferro*, que ia de uma de suas fábricas, localizadas no vilarejo de Nizhny Tagil, até uma mina de cobre.

Em 1816 o escocês Robert Stirling e seu irmão inventaram o motor Stirling. É uma máquina a gás de circuito fechado cujo ciclo termodinâmico é também de quatro processos, sendo dois isotérmicos e dois isocóricos. Algumas empresas desenvolveram modelos cuja eficiência chegaram a índices de 45%. Algumas características desta máquina a deixaram ao esquecimento por mais de 150 anos. Resurgindo agora no século XXI, esta tecnologia é a mais promissora para sistemas de energia no espaço, permitindo projetos para exploraçao do espaço profundo. [MANN, http://www.wired.com/2012/11/radioactive-stirling-engine-exploration/. 2012], [NASA, http://www.nasa.gov/home/hqnews/2003/may/HQ news c03n prt.htm, 2013].



Fig. 24 Motores Stirling Pistão Livre com gerador para exploração do espaço profundo. [Mann, http://www.wired.com/2012/11/radioactive-stirling-engine-exploration/. 2012]

Outros tipos de máquinas térmicas que são amplamente utilizadas nos dias de hoje, principalmente para força de tração, são os motores de combustão interna (MCI). Segundo

nos conta o escritor norte-americano Tom Philbin, o primeiro MCI deve-se ao engenheiro inglês Robert Street, com sua patente inglesa que lhe foi concedida em 1794. Seu motor de combustão interna consiste de um cilindro com um pistão conectado a um braço de articulação que opera uma bomba dágua simples. O cilindro – envolvido em um tubo de resfriamento com água – estendia-se até um forno que o aquecia até atingir a temperatura na qual uma mistura de ar e combustível líquido entravam em ebulição. É oportuno destacar que, antes de usar combustível líquido (por exemplo, álcool e derivados do petróleo), as máquinas térmicas usavam gases expelidos pela ignição de pólvora.

O motor Street foi sendo cada vez mais aperfeiçoado. Por exemplo, em 04 de dezembro de 1823, o engenheiro inglês Samuel Brown obteve a patente inglesa de um motor a gás. Por essa mesma época, conforme vimos acima, o francês de la Tour construiu também um motor a gás. Mais tarde, em 1838, o engenheiro inglês William Barnett construiu o primeiro motor de dois tempos (MCI-2T) ("two-stroke") usando uma bomba externa de ar e combustível. Em 1860, o engenheiro francês Jean Joseph Étienne Lenoir (1822-1900) patenteou MCI-2T que utilizava válvulas tubulares deslizantes e tendo o gás de iluminação como seu principal combustível. Mais tarde, em 1872, o engenheiro norte-americano George Brayton (1830-1892) também patenteou um MCI-2T que possuía um cilindro para compressão, uma câmara de combustão, e um cilindro separado no qual os produtos do querosene, usado como combustíveis se expandiam.

Uma inovação importante nos MCI aconteceu em 1862, quando o engenheiro francês Alphonse Eugène Beau de Rochas (1815-1893) patenteou o princípio do MCI com um "ciclo de quatro tempos" (MCI-4T). Contudo, somente em 1876, o engenheiro alemão Nikolaus August Otto (1832-1891) construiu o MCI-4T proposto por Beau de Rochas. Nesse tipo de motor, uma mistura de gás de carvão (usados nas cidades) com ar era queimada formando gases quentes, que se expandem rapidamente e empurram os pistões do motor, levando-os a mover-se em quatro tempos – o famoso *ciclo Otto* - composto de: 1) *admissão* ou *aspiração*; 2) *compressão*; 3) *combustão*; 4) *exaustão*. Otto obteve a patente norte-americana (*USPatent*:178.023) de seu invento, em 30 de maio de 1876. Por sua vez, em 1879, o engenheiro russo Ogneslav Stefanovich Kostovich (1851-1916) começou a construir um motor Otto que funcionaria com combustível líquido leve, e que foi concluído em 1883. Em 1885, ele construiu um modelo mais aperfeiçoado com a potência de 60-80 HP, e que pesava 240 kg. Este MCI, que tinha oito cilindros (pistões) distribuídos em duas colunas de quatro,

foi patenteada em 1888 pelo governo russo. É oportuno destacar que, posteriormente, a aviação russa foi desenvolvida usando cilindros horizontais.

Outro tipo de máquina térmica foi construído pelo engenheiro sueco Carl Gustav Patrik de Laval (1845-1913), em 1883. Trata-se da turbina a vapor (de impulsão e de reação), que atingia a velocidade angular de 42.000 rotações por minuto (rpm), e usada como desnatadeira (máquina para desnatar, isto é, tirar nata ou gordura do leite). Na turbina de impulsão, um fluido de alta pressão e baixa velocidade é dirigido por intermédio de um esguicho ("nozzle") fixo às palhetas do rotor; na turbina de reação, o esguicho é preso no próprio motor. Logo depois, em 1884, o engenheiro inglês Sir Charles Algernon Parsons (1854-1931) inventou a turbina a vapor constituída de múltipos estágios, formada de uma série de rodas no mesmo eixo, que giravam a 18.000 rpm. Nessa turbina, o vapor passava de uma roda para a outra, rodas essas que aumentavam de diâmetro à medida que a pressão do vapor diminuía. Desta maneira, cada roda absorvia parte da energia do vapor. Somente em 1896, o inventor norte-americano Charles Gordon Curtis (1860-1953) patenteou a turbina a vapor com muitos conjuntos de rodas. É oportuno notar que Curtis, em 1899, patenteou a primeira turbina a gás.

Novas idéias sobre os MCI foram apresentadas a partir de 1885. Com efeito, logo em 1885, o engenheiro alemão Gottlieb Wilhelm Daimler (1834-1900) patenteou o primeiro MCI no qual usou vapor de gasolina em lugar de gás de carvão, cuja ignição, diferente da chama permanente como Otto fízera, em 1876, era feita com um sistema de ignição elétrica. Ao adaptar esse motor a uma bicicleta, Daimler inventou a primeira motocicleta. Por sua vez, em 26 de janeiro de 1886, o engenheiro alemão Karl Friedrich Benz (1844-1929) patenteou o primeiro automóvel triciclo, dotado de um MCI-Daimler. Mais tarde, em 1892, o engenheiro alemão Rudolf Christian Karl Diesel (1858-1913) patenteou o hoje famoso ciclo Diesel. Um ano depois, em 1893, Diesel construiu o primeiro MCI usando o ciclo que havia idealizado, utilizando, no entanto, óleo pesado ao invés de gasolina. Ainda em 1893, Benz construiu o primeiro automóvel tetraciclo, dotado de um MCI-Otto-Daimler. Por fim, em 1913, o engenheiro norte-americano Henry Ford (1863-1947) introduziu a montagem em linha de produção em sua fábrica de automóveis, movidos por MCI.

É importante destacar que os irmãos norte-americanos Wright [Orville (1871-1948) e Wilbur (1867-1912)] construíram um MCI, com quatro cilindros em linha, tendo como combustível a gasolina, e usaram-no em seus primeiros vôos, em 1903. Também é interessante destacar que os irmãos Wright, em suas primeiras pesquisas sobre o avião, observavam como os pássaros restabeleciam o equilíbrio no vôo angulando uma asa para baixo e outra para cima. Aliás, foi também observando o vôo de urubus, em Belém do Pará, muito antes, entre 1874 e 1880, que o poeta, jornalista e gramático, o primeiro físico experimental paraense Julio Cezar Ribeiro de Souza (1843-1887), descobriu a forma fusiforme ou assimétrica que um balão deveria ter para garantir sua navegabilidade.

"Sobre a energia nuclear, a *fissão nuclear* descoberta em 1938, substituiu o combustível (inicialmente sólido e depois líquido) para vaporizar a água nas máquinas (usinas) térmicas, resultando nas hoje conhecidas usinas nucleares". [Institute of Human Thermodynamics and IoHT Publishing Ltd, http://www.humanthermodynamics.com/ht-history.htm 2013], [http://en.wikipedia.org/wiki/History\_of\_thermodynamics, 2013], [http://pt.wikipedia.org/wiki/ Richard\_Trevithick, 2013]

# 4. CONCEITO DE SISTEMA TERMODINÂMICO

# 4.1. O Sistema Termodinâmico:

As máquinas térmicas e motores são projetados baseados em sistemas termodinâmicos. Os sistemas termodinâmicos conhecidos são definidos pela literatura como sistema aberto, sistema fechado e sistema isolado.

As leis da termodinâmica (bem como as leis de Newton) são para um sistema, uma quantidade específica da matéria. Os interesses de estudo podem estar dirigidos no que acontece em um volume fixo, por exemplo, um motor de combustão interna, de automóvel, de foguete ou um motor a jato (ou outra máquina térmica) através da qual a massa está fluindo em uma determinada taxa. Também pode estar dirigido nos índices de calor e trabalho dentro e fora de um sistema. Por esta razão, a forma do volume de controle e as leis do sistema são de grande importância.

Um exemplo de sistema é mostrado na figura 25. O sistema termodinâmico se encontra em uma determinada condição no tempo  $t_i$ , executa uma função na máquina "Motor" e posteriormente o sistema se encontrará em outra condição no tempo  $t_f$ .



Fig. 25 (Volume de controle de uma máquina com um sistema termodinâmico). [MIT,http://web.mit. edu/16.unified/www/FALL/ thermodynamics/notes/node19.html – 2013]

Um sistema termodinâmico é uma quantidade de matéria de identidade fixa, em torno do qual podemos tirar um limite, veja a figura 26 para um exemplo. Os limites podem ser fixos ou móveis. Trabalho ou o calor pode ser transferido através do limite do sistema. Tudo fora dos limites é o ambiente.

Ao trabalhar com dispositivos como motores muitas vezes é útil para definir o sistema a ser um volume de identificação com o fluxo de entrada e saída. Isso é chamado de um volume de controle. Um exemplo de sistema aberto é mostrado na figura (26 b), entre estes se encontram todos os motores de combustão interna e máquinas a vapor.

Um sistema fechado, figura (26 a), é uma classe especial de sistema com limites que a matéria não pode atravessar. Por isso, o princípio da conservação da massa é automaticamente satisfeita sempre que empregam uma análise de sistema fechado. Este tipo de sistema é às vezes chamado de "massa controle", motores Stirling, Ericsson e a Máquina de Carnot são exemplos de máquinas baseadas em sistema fechado. [MIT, http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/ thermodynamics/ notes/node19.html, 2013].



Fig. 26 (O conceito de Sistema Termodinâmico). [MIT, http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/ thermodynamics/notes/node19.html – 2013]

Um sistema isolado por sua vez, compreende um modelo em que não há troca de energia nem de massa com a sua vizinhança. Um sistema isolado é também fechado, porém um sistema fechado não é necessariamente isolado.

A Máquina ou motor de ciclo Diferencial é baseado em um novo modelo de sistema diferente dos conhecidos com propriedades exclusivas. O sistema termodinâmico da máquina de ciclo Diferencial compreende propriedades do sistema fechado e do sistema aberto simultaneamente e está sendo definido como um Sistema Híbrido ou Composto.

O sistema híbrido, figura 27, é formado por dois subsistemas de forma que no tempo t1 um dos subsistemas possui massa m1 e o outro possui massa m2, e no tempo t2 o primeiro subsistema terá massa m2 e o segundo terá massa m1, a massa considerando ambos os subsistemas se conserva permanentemente e se conserva em seu respectivo subsistema durante uma parte significativa do processo termodinâmico, mas há troca de certa quantidade de massa e energia entre ambos em processo adiabático em determinado momento específico do ciclo termodinâmico, ambos estão defasados em 180°.



Fig. 27 Sistema Híbrido ou Composto.

O sistema híbrido proposto trás vantagens significativas em função de dois elementos, um elemento de transferência de massa e energia que deve operar de forma circulante e um elemento de controle inteligente dos processos.

A Máquina Térmica de ciclo Diferencial é caracterizada por um sistema termodinâmico híbrido ou composto com um elemento de conservação de energia e transferência de massa e um elemento de controle de processo inteligente. As leis e fundamentos termodinâmicos devem ser empregados e analisados sobre este modelo termodinâmico.

Na figura 28 está sendo mostrada a Máquina Térmica de ciclo Diferencial com o seu sistema termodinâmico híbrido ou composto formado pelos subsistemas S1 e S2, pelo elemento de transferência de massa ETM e por um sistema inteligente de controle, não mostrado na figura, o qual controla os processos termodinâmicos e mecânicos auxiliados pelo conjunto de válvulas V1, V2 e V3. Para gerar trabalho e força mecânica externa, a máquina é dotada ainda de um elemento de força motriz EFM.



Fig. 28 (Diagrama da Máquina Térmica de Ciclo Diferencial)

# 4.2. O Ciclo Diferencial:

O que caracteriza o ciclo Diferencial e permite a sua realização é o modelo de sistema termodinâmico. Os modelos de sistemas termodinâmicos conhecidos, definidos por aberto e fechado, não permitem a realização de dois processos, ou duas transformações simultâneas que são próprias do ciclo Diferencial, para isto é necessário um modelo de sistema termodinâmico formado por dois subsistemas.

O ciclo Diferencial é caracterizado por oito processos e sempre dois processos simultâneos por vez. O ciclo completo é formado por oito processos compreendendo dez eventos.

O ciclo Diferencial somente pode existir em um modelo de sistema termodinâmico duplo, que possui características dos sistemas aberto e fechado simultaneamente, este modelo denominamos Sistema Híbrido ou Composto. Uma máquina de ciclo Diferencial possui dois subsistemas que operam, executam ciclos simultâneos e opostos e interconectados, ou seja, "Diferencial".

Uma das propriedades mais importantes do ciclo Diferencial é uma particularidade que se distingue das demais máquinas térmicas, de forma que seu sistema de conservação de energia e transferência de massa atribui uma curva de alta eficiência superior à definida pelos sistemas conhecidos com base na equação de Carnot, muito embora nos limites ambos convergem para os mesmos resultados.



Fig. 29 (Gráfico P x V do Ciclo Diferencial no tempo to)

Na figura 29 é mostrado o gráfico  $\mathbf{P} \times \mathbf{V}$  do ciclo Diferencial antes de iniciar o processo de conversão de energia. Os subsistemas se encontram equalizados em pressão e temperatura. Como o sistema termodinâmico é formado por dois subsistemas interdependentes, sua representação foi implementada com dois sistemas de coordenadas justapostos, cada um representando seu respectivo subsistema. No tempo to, cada subsistema se encontra com no partículas (moles), na temperatura ambiente Tf e na pressão Po.


Fig. 30 (Gráfico P x V do Ciclo Diferencial na formação do diferencial de potencial)

Na figura 30 é mostrado o gráfico **P** x **V** demonstrando a formação do diferencial de potencial que ocorre no primeiro ciclo. Um dos subsistemas fornece calor ao gás, elevando a temperatura para **Tq**, ainda com **no** partículas, a máquina executa a transferência de massa para o outro subsistema criando o diferencial de partículas e por consequência de potencial (Pressão) proporcionando que o subsistema de alta tenha sempre **n1** partículas e uma linha de pressão mais alta em **Tq** comparando com **no** partículas e por consequência o subsistema de baixa tenha sempre **n2** partículas em **Tf** e uma linha de pressão mais baixa também em se comparando com **no** partículas. Nesta etapa a máquina fornece energia extra para a formação desta diferença de potencial a qual é conservada durante todo o tempo em que a máquina estiver em operação, no entanto o sistema de controle não poderá dispor desta energia para gerar trabalho útil, pois esta é a condição para a conversão de energia com eficiência superior. Em outras palavras, para se obter alta eficiência, superior à máquina de Carnot, a Máquina de ciclo Diferencial deverá conservar, circular internamente parte da energia, esta não pode ser disponibilizada para gerar trabalho.

Fazendo uma analogia com sistemas elétricos onde existem duas fontes e entre elas se encontra uma carga, a forma de aumentar a eficiência na carga é aumentar a diferença de potencial, desta forma para a mesma potência ocorre uma redução da corrente e a energia entregue à fonte de baixa é reduzida (porque a energia depositada na fonte de baixa é expressa pela multiplicação da corrente pelo potencial desta fonte). No sistema termodinâmico da máquina de ciclo Diferencial é exatamente isto que ocorre, primeiramente o sistema de controle eleva o diferencial de potencial entre as fontes, transferindo parte da massa de gás de um subsistema para o outro, com a energia (calor) se formam as linhas de pressões superiores ao se comparar com os sistemas conhecidos (pois nos sistemas conhecidos, **n** é constante, a massa de gás é a mesma em todos os processos), e no subsistema com menos massa a linha de pressão abaixa, porém um ponto é importante, a máquina somente poderá desempenhar trabalho até o limite de forma a manter a energia do diferencial de potencial conservada, portanto há de se considerar um sistema de controle inteligente.



Fig. 31 (Gráfico P x V da formação do diferencial de potencial sobre as curvas do Ciclo em regime)

Na figura 31 é mostrado o gráfico  $P \times V$  com as curvas que demonstram como o diferencial de potencial é gerado sobre as curvas do ciclo Diferencial em regime. Neste gráfico podem ser observadas as trajetórias das isotérmicas com **no** partículas, assim como ocorrem nos sistemas termodinâmicos simples (aberto ou fechado) os quais são as linhas iniciais do ciclo quando o número de partículas de cada subsistema são iguais entre si, comparando-se com as isotérmicas do sistemas termodinâmicos do sistemas termodinâmicos híbrido quando há diferenças dos números de partículas entre os subsistemas.

As linhas das adiabáticas e da transferência de massa mostradas na figura 30 também ajudam a interpretar graficamente as energias envolvidas nos processos adiabáticos. Há uma coerência entre a adiabática de expansão, quando n2 partículas expande a partir de Tq para Tf, correspondendo à energia para elevar n2 partículas de Tf para Tq na adiabática de compressão e a energia de (n1 - n2) partículas passando de um subsistema com maior potencial para o subsistema com menor potencial, fechando a totalidade da energia conservada.

#### 4.3. Descrição do ciclo Diferencial:

O ciclo termodinâmico Diferencial é mais complexo que os ciclos da maioria das máquinas térmicas conhecidas. A figura 32 está representando o gráfico  $\mathbf{P} \times \mathbf{V}$  do ciclo Diferencial quando este já se encontra em regime.



Fig. 32 (Gráfico P x V do Ciclo Diferencial)

O diagrama  $\mathbf{P} \times \mathbf{V}$  do ciclo Diferencial esta sendo representado por dois sistemas de coordenadas, cada um representando seu respectivo subsistema e linhas tracejadas entre dois pontos dos gráficos, indicando os eventos de transferência de massa.

O ciclo diferencial descrito abaixo é caracterizado por oito processos com dez eventos.

**Processo 1:** É uma transformação isotérmica de expansão (1-2) que ocorre no subsistema  $S_1$  com (n + dn) partículas. Durante esta fase, a subcâmara  $S_1$  expõe o gás de trabalho na sua região de aquecimento.

**Processo 2:** Ocorre simultaneamente ao processo 1, é uma transformação isotérmica de compressão (c-d) que ocorre no subsistema  $S_2$  com (n - dn) partículas. Durante esta fase, a subcâmara  $S_2$  expõe o gás de trabalho na sua região de resfriamento.

**Processo 3:** É uma transformação adiabática de expansão (2-3) que ocorre no subsistema  $S_1$  e simultaneamente com a transferência das partículas e energias (Ec1) conservadas circulantes

para  $S_2$ . Durante esta fase, a subcâmara  $S_1$  expõe o gás de trabalho na sua região isolada, sem perdas para o ambiente ou vizinhança.

**Processo 4:** É uma transformação adiabática de compressão (d-a) que ocorre no subsistema  $S_2$  e simultaneamente com o recebimento das partículas e energias conservadas circulantes. Durante esta fase, a subcâmara  $S_2$  expõe o gás de trabalho na sua região isolada, sem perdas para o ambiente ou vizinhança.

**Processo 5:** É uma transformação isotérmica de compressão (3-4) que ocorre no subsistema  $S_1 \text{ com } (n - dn)$  partículas. Durante esta fase, a subcâmara  $S_1$  expõe o gás de trabalho na sua região de resfriamento.

**Processo 6:** Ocorre simultaneamente ao processo 5, é uma transformação isotérmica de expansão (a-b) que ocorre no subsistema  $S_2$  com (n + dn) partículas. Durante esta fase, a subcâmara  $S_2$  expõe o gás de trabalho na sua região de aquecimento.

**Processo 7:** É uma transformação adiabática de compressão (4-1) que ocorre no subsistema  $S_1$  e simultaneamente com o recebimento das partículas e energias conservadas circulantes. Durante esta fase, a subcâmara  $S_1$  expõe o gás de trabalho na sua região isolada, sem perdas para o ambiente ou vizinhança.

**Processo 8:** É uma transformação adiabática de expansão (b-c) que ocorre no subsistema  $S_2$  e simultaneamente com a transferência das partículas e energias (Ec2) conservadas circulantes para  $S_1$ . Durante esta fase, a subcâmara  $S_2$  expõe o gás de trabalho na sua região isolada, sem perdas para o ambiente ou vizinhança.

Tempo	Transf.	Descrição
1	1	1-2 Processo isotérmico de expansão pelo subsistema S <sub>1</sub>
1	2	c-d Processo isotérmico de compressão pelo subsistema S <sub>2</sub>
	3	2-3 Processo adiabático de expansão pelo subsistema S <sub>1</sub>
2		2-da Transferência de massa e energia do subsistema $S_1$ para o $S_2$ (energia circulante)
	4	d-a Processo adiabático de compressão pelo subsistema S <sub>2</sub>
3	5	3-4 Processo isotérmico de compressão pelo subsistema S <sub>1</sub>
	6	a-b Processo isotérmico de expansão pelo subsistema S <sub>2</sub>
4	7	4-1 Processo adiabático de compressão pelo subsistema S <sub>1</sub>
		b-41 Transferência de massa e energia do subsistema S <sub>2</sub> para o S <sub>1</sub> (energia circulante)
	8	b-c Processo adiabático de expansão pelo subsistema S <sub>2</sub>

 Tabela 1:
 (Tabela da descrição dos processos do ciclo Diferencial)

## 4.4. Demonstração matemática do ciclo Diferencial:

A demonstração matemática do ciclo Diferencial considera os seguintes parâmetros:

Temperatura da fonte		Tq		
Temperatura da fonte	e fria:		Tf	
Número de partículas	Гq:	nl		
Número de partículas	s (moles) vinculado a '	Γf:	n2	
Massa molar do gás:			Mm	
P1 = Pa	P2 = Pb	P3 = P	c	P4 = Pd
V1 = Va	V2 = Vb	V3 = V	Vc	V4 = Vd

Sob os mesmos fundamentos de Carnot:

Observando a figura 30, no subsistema  $S_1$ , a entrada de energia na isotérmica em 1 – 2.

$$Q_{1-2} = W_{1-2} = \int P. dV$$

Observar que nas isotérmicas de alta sempre haverá  $n_1$  partículas.

Pela equação geral dos gases:

$$P = \frac{n_{1} \cdot R \cdot Tq}{V}$$

$$Q_{1-2} = \int_{V_{1}}^{V_{2}} \frac{n_{1} \cdot R \cdot Tq}{V} \cdot dV$$

$$Q_{1-2} = n_{1} \cdot R \cdot Tq \cdot \ln(V) / \int_{V_{1}}^{V_{2}}$$

$$Q_{1-2} = n_1 \cdot R \cdot Tq \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Simultaneamente ocorre o processo isotérmico de baixa temperatura no subsistema S<sub>2</sub>:

$$Q_{c-d} = W_{c-d} = \int P. dV$$

Observar que nas isotérmicas de baixa sempre haverá  $n_2$  partículas.

Pela equação geral dos gases:

$$P = \frac{n_2 \cdot R.Tf}{V}$$

$$Q_{c-d} = \int_{V_c}^{V_d} \frac{n_2 \cdot R.Tf}{V} \cdot dV$$

$$Q_{c-d} = n_2 \cdot R.Tf \cdot \ln(V) / \int_{V_c}^{V_d}$$

$$Q_{c-d} = n_2 \cdot R.Tf \cdot \ln\left(\frac{V_d}{V_c}\right)$$

Observar que no início do ciclo foi estabelecido o diferencial de potencial proporcionado sempre por **n1** partículas no subsistema de alta temperatura.

Temos demonstrado as expressões que descrevem as isotérmicas de alta temperatura dada por  $Q_{1-2}$  com n1 partículas e de baixa temperatura dada por  $Q_{c-d}$  com n2 partículas. É importante analisar que não há obrigação alguma que as isotérmicas devam ser com a mesma massa.

Observando novamente a figura 8, no subsistema  $S_1$ , o processo adiabático de expansão 2-3.

No ponto (2) o sistema S1 se encontra com sua isotérmica de alta temperatura concluída, com a temperatura em Tq, a pressão P2, número de partículas n1 e volume V2. Neste mesmo instante, no ponto (d) o sistema S2 se encontra com sua isotérmica de baixa temperatura concluída, com a temperatura em Tf, a pressão Pd, número de partículas n2 e volume Vd.

Condição fundamental: no ponto (2) ou (b) no final do processo isotérmico de alta deverá haver energia suficiente para levar o sistema aos pontos (3) e (a) ou (c) e (1) respectivamente em processos adiabáticos. Esta energia não poderá ser utilizada na geração de trabalho externo, deverá ser conservada para manter a eficiência estável. Para entender melhor, a energia no ponto (2) está associada à massa de **n1** partículas na temperatura **Tq**, o processo 2 - 3 é adiabático e neste trajeto ocorre transferência de energia mecânica que é conservada e somada à energia da transferência de massa pelo elemento de transferência de massa e é utilizada para retornar no processo d – a elevando **n1** partículas para a temperatura **Tq** e pressão **P1** ou **Pa**. É um processo reversível. Pode ser feito uma analogia com a máquina de Carnot, onde na adiabática de expansão **n** partículas na temperatura inicial **Tq** transfere energia para o elemento mecânico, esta energia é utilizada para o processo adiabático de compressão para elevar as mesmas **n** partículas da temperatura **Tf** para a temperatura **Tq** na pressão superior.



Fig. 33 (Sistema Termodinâmico da Máq. de ciclo Diferencial no início do processo adiabático)

Observando a figura 33 o subsistema S1 se encontra no ponto (2) e o subsistema S2 no ponto (d). No processo adiabático de expansão do subsistema S1 sobre o subsistema S2, a variação da energia depende das temperaturas finais e iniciais. Não há troca de energia com a vizinhança, porém há trabalho de um subsistema sobre o outro.

A expressão da energia em forma de trabalho total fornecida por S1 é:

$$W_{s1} = W_{2.3} = \frac{n_1 \cdot R}{(1 - y)}$$
 (Tf - Tq)

Onde:

y = cp/cv

A energia da expressão  $W_{S1}$  corresponde ao trabalho do subsistema S1 sobre S2 mostrado no desenho da figura 34, e corresponde a uma variação volumétrica representada pelo deslocamento de gás da posição onde se encontra o rotor da turbina (figura 34) até a linha tracejada. Note que o volume deslocado corresponde à massa de gás transferida de um subsistema para o outro. Assim como é considerado uma massa **m** nos eixos e pistões da máquina de Carnot os quais armazenam energia mecânica para a adiabática de compressão, neste modelo da mesma forma se considera um rotor de turbina com massa **m** para a mesma finalidade, este elemento de massa **m** corresponde ao ETM (elemento de transferência de massa) mostrado na figura 28.



Fig. 34 (Sistema Termodinâmico da Máq. de ciclo Diferencial após a realização de trabalho de S1 sobre S2)

No entanto, temos dois subsistemas, simultaneamente ao processo adiabático de expansão de S1 há o processo adiabático de compressão de S2, ou seja, o sistema S1 exerce trabalho sobre S2.

A expressão da energia total recebida por S2 é:

$$W_{s2} = W_{d-a'} = \frac{n_2 \cdot R}{(1 - y)} \cdot (Tq' - Tf)$$

A condição  $W_{S1} = W_{S2}$  tem que ser satisfeita.

Como  $n_2 < n_1$ , então Tq' > Tq.

Por outro lado, não havendo transferência de massa e Tq' sendo maior que Tq, parte da energia seria devolvida à fonte quente e seria, portanto perdida pelo sistema.

Simultaneamente temos no subsistema  $S_1$ ,  $n_1$  partículas na temperatura Tf, equalizada à fonte fria.

Desta forma, a transferência de massa, parte das partículas de  $S_1$  para  $S_2$ , levará o subsistema  $S_2$  de **Tq'** para **Tq**, equalizando a temperatura à fonte quente, e o subsistema  $S_1$  passará a ter **n**<sub>2</sub> partículas e o subsistema  $S_2$  passará a ter **n**<sub>1</sub> partículas. Durante o processo prático, a trajetória desta adiabática é direta de **Tf** para **Tq**, sem passar por **Tq'**, pois há a transferência simultânea de parte do gás de um subsistema para o outro, semelhante ao processo adiabático do ciclo Brayton.

A expressão que descreve a equalização e o equilíbrio é a seguinte:

$$W_{S1} = W_{S2} = W_{d-a'} = W_{d-a} = \frac{n_2 \cdot R}{(1 - y)} \cdot \frac{(Tq' - Tf)}{(1 - y)} + \frac{n_2 \cdot R}{(1 - y)} \cdot \frac{(Tq - Tq')}{(1 - y)} + \frac{(n_1 - n_2) \cdot R}{(1 - y)} \cdot (Tq - Tf)$$

Simplificando, tem-se:

$$W_{s_2} = W_{d-a} = \frac{n_1 \cdot R}{(1 - y)} \cdot (Tq - Tf)$$

Desta forma, demonstra-se que a energia cedida na adiabática de expansão em S<sub>1</sub> é recebida na adiabática de compressão em S<sub>2</sub> com transferência de ( $n_1 - n_2$ ) partículas e a condição W<sub>S1</sub> = W<sub>S2</sub> é satisfeita. Na figura 35 é mostrado o sistema formado pelos subsistemas S1 e S2 com processos adiabáticos concluídos.



Fig. 35 (Sistema Termodinâmico da Máq. de ciclo Diferencial após a finalização do processo adiabático)

Desta forma observa-se que os processos adiabáticos de expansão e de compressão com transferência de massa são idênticos e suas energias são conservadas no processo.

Por analogia:

$W_{1-2} = W_{a-b}$	(Isotérmicas de alta temperatura e n1 partículas)				
$W_{3-4} = W_{c-d}$	(Isotérmicas de baixa temperatura e n2 partículas)				
$W_{S1} = W_{S2}$	(Adiabáticas de expansão e compressão)				

O trabalho líquido total de um ciclo completo:

 $W_{Liq} = W_{1-2} + W_{a-b} + W_{3-4} + W_{c-d}$ 

A energia total fornecida pela fonte quente:

 $Q_{Tot} = W_{1-2} + W_{a-b}$ 

Importante:

A demonstração matemática com o emprego das equações de trabalho nos processos adiabáticos para gases monoatômico ou diatômico darão os mesmos resultados da demonstração acima.

$$W = -\frac{3}{2}nR\Delta T$$

(Equação de trabalho do gás monoatômico)

$$W = -\frac{5}{2}nR\Delta T$$

(Equação de trabalho do gás diatômico)

## 5. DEMONSTRAÇÃO DO CUMPRIMENTO DO PRINCÍPIO ZERO, DA PRIMEIRA E SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA NA MÁQUINA DE CICLO DIFERENCIAL

Com o modelo formado com uma máquina de ciclo Diferencial, nenhuma energia pode ser extinta nem criada, nenhum trabalho pode ser realizado com apenas uma fonte de energia, não ocorre fluxo de energia a partir de um corpo mais frio para outro mais quente espontaneamente, nenhuma máquina pode chegar a 100% de rendimento, nem mesmo em um conjunto formado por uma máquina com uma bomba de calor e além de tudo a energia deve ser conservada.

Na figura 36 temos um modelo completo, formado com uma bomba de calor (Bc), uma máquina de ciclo Diferencial (Md), um reservatório quente, um reservatório frio, uma fonte de energia quente e outra fonte de energia fria.

#### O postulado de Carnot:

Carnot postulou a existência de uma máquina que, em virtude do seu projeto ou substância de trabalho produziria mais potência do que a "Máquina de Carnot" operando entre a mesma diferença de temperatura e com a mesma quantidade de "calórico". Esta máquina hipotética trabalharia ao lado de uma "Máquina de Carnot" revertida, que por sua vez, consumiria todo o calor fornecido pelo condensador da primeira e forneceria todo o seu calor liberado para o evaporador da hipotética. Porém a máquina revertida consumiria somente uma porção da força motriz produzida pela máquina hipotética, deixando o restante disponível para trabalho externo. Juntas, estas duas máquinas formariam uma máquina maior cujo único efeito seria a produção de força motriz em quantidade ilimitada. Como tal movimento

perpétuo violava sua primeira premissa, Carnot concluiu que nenhuma máquina produz mais força motriz do que a "Máquina de Carnot". [Encyclopaedia Britannica, Vol 4, pp 940, 941. Vol 11, pp 237 a 239] [Dictionary of Scientific Biography Vol. 3 e 4, pp 79 a 83]

Analisando o postulado de Carnot, o mesmo concluiu que o sistema produziria um movimento perpétuo, haveria a produção de força motriz em quantidade ilimitada. Esta afirmação de Carnot sugere que a bomba tiraria calor (energia) continuamente da evaporadora e o transportaria para a condensadora e esta alimentaria a máquina e esta por sua vez teria energia de sobra para ser utilizada e, portanto, sob sua ótica, trata-se de um sistema com rendimento superior a 100%. Supondo-se que Carnot tenha considerado que as fontes fossem ilimitadas e que as mesmas coincidam com as unidades evaporadora e condensadora, mesmo assim o sistema não configura rendimento de 100%, menos ainda acima de 100%. O rendimento de um sistema é dado pela razão entre a energia útil disponível e a energia total fornecida pela fonte, mesmo que esta seja uma das unidades, um dos reservatórios, e com este conceito deve-se aplicar o Princípio Zero, Primeira Lei e Segunda Lei da Termodinâmica, mais especificamente os enunciados de Clausius e Kelvin-Planck.

#### Análise física:

A figura 36 apresenta a modelagem de um sistema lógico, equilibrado e que permite conclusões claras. Um sistema formado por um motor de Carnot revertido **Bc** com rendimento  $\eta c$ , dois reservatórios e uma máquina térmica **Md**, e ( $\eta d > \eta c$ ), para uma avaliação precisa os parâmetros devem ser cuidadosamente definidos e relacionados. Por exemplo, se for considerado (Wb = Wd), evidentemente haveria um fluxo de calor resultante maior que seria retirado do reservatório 2, mais frio, e transferido para o reservatório 1 (Qb2 > Qd2), e assim o sistema ficaria desequilibrado, exigindo agregar uma fonte externa no reservatório 2 e a análise se complica. Em outras palavras, a fonte de energia necessária deveria entrar no reservatório 2, mais frio e a bomba teria o trabalho de transportar esta energia do reservatório mais frio para o mais quente e assim permitir a máquina operar. Um segundo exemplo, fazendo ( $Qd1 \approx Qb1$ ), o efeito seria idêntico, o fluxo de calor resultante transportaria mais calor do reservatório 2 para o reservatório 1. Finalmente considerando Qd2 ligeiramente maior que Qb2, teremos um sistema estável e todas as condições favoráveis para uma

avaliação lógica e toda a visão física do sistema se revela e as expressões a seguir ficam completamente coerentes e de fácil entendimento.



Fig. 36 (Diagrama da Máquina de ciclo Diferencial, bomba de calor entre reservatórios quente e frio com fontes de energia)

Da mesma forma como ocorre com o modelo com a máquina de Carnot, o rendimento deste sistema é dado pela razão da energia disponível no eixo da máquina de ciclo Diferencial (Wd), pela energia total que entra no sistema (Wb + Eq):

$$\eta_e = \frac{Wd}{Wb + Eq}$$

A energia no eixo da máquina de ciclo Diferencial pode ser representada pelas diferenças entre a energia líquida de entrada no sistema com a energia descartada na fonte fria:

$$Wd = Wb + Eq - Ef$$

Assim, o rendimento pode ser expresso da seguinte forma:

$$\eta_e = 1 - \frac{Ef}{(Wb + Eq)}$$

Um modelo completo, funcional onde a primeira e segunda lei da Termodinâmica podem ser constatadas, está demonstrado na figura 37.



Fig. 37 (Diagrama completo de um sistema Termodinâmico com a Máquina de ciclo Diferencial, bomba de calor entre reservatórios quente e frio com fontes de energia e carga)

É importante observar que sob nenhuma circunstância, o rendimento de um sistema formado por uma máquina de ciclo Diferencial seria maior ou igual a 100%.

Fica claro que não se pode expressar a equação do rendimento deste sistema como uma relação entre o calor transportado pela bomba de calor com a energia de saída da máquina Diferencial **Wd**, também não se pode expressar que seja uma relação entre a energia de saída da máquina Diferencial **Wd** pela energia de entrada na bomba de calor **Wb**.

As demonstrações mostram que não é possível resumir um modelo de máquina equivalente baseado somente nas relações de rendimento entre uma bomba de calor e uma máquina térmica sem levar em conta a fonte de energia e o caminho por ela realizado.

## 6. CONJECTURAS E ANÁLISES DE SISTEMAS FORMADOS POR UMA BOMBA DE CALOR, UMA MÁQUINA, RESERVATÓRIOS E FONTES DE ENERGIA

Antes das conjecturas, é importante rever o conceito de flutuação e do Princípio Zero da Termodinâmica.

<u>Flutuação:</u> a inexistência de uma das fontes em um sistema gera a flutuação. Sistemas formados com uma única fonte não oferecem a possibilidade de ocorrer o fluxo de energia. Todos os processos cessam e o sistema se equaliza termicamente com a fonte existente.

O principio zero da Termodinâmica e a Flutuação: O Princípio Zero é definido da seguinte forma: *"Se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro, então eles estão em equilíbrio térmico entre si."* Alguns autores ao demonstrar sistemas formados por bombas, máquinas e reservatórios, definem que as isotérmicas da bomba juntamente com da máquina e juntamente com o respectivo reservatório tenham a mesma temperatura, pelo Princípio Zero, isto significa ausência de fluxo de energia e por fim acaba por violar a segunda lei da Termodinâmica pelo Enunciado de Clausius. Como durante toda a fase das isotérmicas, com o deslocamento dos elementos mecânicos, o fuxo de energia deve ocorrer, é necessário haver uma diferença de temperatura entre a origem e o destino. Portanto nenhum sistema pode ficar em flutuação e ao mesmo tempo gerar trabalho e por consequência sempre haverá um fluxo que se dirige da fonte principal de energia, de maior temperatura, em direção à fonte secundária. Este princípio está mais claro na Termodinâmica Moderna.

Nos próximos parágrafos será apresentada uma série de hipóteses com respectivos comentários.

### Conjectura 1:

A demonstração a seguir corresponde a uma publicação comum em artigos científicos, muitos autores vem publicando a mesma matéria com o objetivo de demonstrar a impossibilidade da existência de uma máquina com rendimento superior à máquina de Carnot. Segue abaixo a descrição do autor e seu modelo na figura 38.

Descrição:

#### Prova do Teorema de Carnot

Considere uma máquina de Carnot (rendimento máximo possível) trabalhando como refrigerador e acoplada a uma máquina com rendimento maior que a de Carnot. O resultado deste acoplamento é uma máquina perfeita, que viola o enunciado de K-P. Logo, nenhuma máquina pode ter um rendimento maior do que a máquina de Carnot.



Fig. 38 (Modelo clássico proposto por diversos autores no sentido de provar o Teorema de Carnot)

O autor do sistema da figura 38 está utilizando o modelo apresentado como uma proposta de prova que a máquina **D** não pode existir. De fato não pode, pelo menos da forma como está sendo apresentado, mas analisando com atenção observa-se que o modelo apresentado não sustenta um equacionamento, o sistema têm que considerar a máquina, a bomba, os reservatórios, as fontes de energia, a carga, a energia utilizada e o fluxo da energia e este sempre deve fluir da fonte de maior potencial para a fonte de menor potencial, enfim, o processo deve ser respeitado bem como as leis que os regem. O autor apenas somou uma máquina à outra e relatou sua conclusão. Às vezes para se evoluir de um estado **a** para um estado **b** é necessário uma série de processos, se saltar um ou executá-lo sem respeitar as leis, o destino **b** poderá não existir.

O autor do modelo da figura 38 não justifica as fontes de energia, ele sugere uma fusão da bomba **B** com os reservatórios e com a máquina **C**, nenhuma lei é respeitada neste trajeto onde deve ocorrer uma série de eventos enunciados pela segunda lei da Termodinâmica, observando também o Princípio Zero. No final o autor afirma que o resultado deste sistema gera uma máquina térmica com rendimento superior à máquina de Carnot, de 100%, e seria uma máquina "perfeita", impossível, que viola o enunciado de Kelvin-Planck e que fornece energia a partir de uma fonte de baixo potencial (baixa temperatura) sem o auxílio de uma bomba.

Revisando a demonstração, oferecendo uma forma diferente é mostrado na figura 39, o desenho contempla a fonte e elementos para que o processo de fluxo da energia ocorra cumprindo as exigências físicas para tal.



Fig. 39 (Modelo com o equivalente para a proposta da figura 24)

Na figura 39 é reapresentada a proposta com as leis físicas sendo parcialmente respeitadas, porém é inconsistente não pelo fato de violar Kelvin-Planck, mas antes disto, pelo fato de impor um fluxo de energia a partir da fonte de menor potencial para a de maior potencial. Neste caso o autor propõe que a fonte da energia seja a fonte de menor temperatura, dela é extraído (10 J + dE), a energia útil é de 10 J e a energia que segue descartada para a fonte quente é de **dE**. Porém se trata de uma impossibilidade e não configura um motor perpétuo como sugere o autor do sistema da figura 38, mas antes disto, outra violação, a proposta do fluxo a partir da fonte mais fria.

Conjectura 2:

Uma nova revisão da demonstração, oferecendo agora mais uma alternativa é mostrada na figura 40. Na figura 40 é apresentado um sistema similar ao proposto pelo autor do modelo da figura 38, porém está sendo considerado que a energia fornecida para a bomba a partir do reservatório frio seja aproximadamente igual a energia cedida pela máquina a este reservatório. Lembrando que a igualdade absoluta não é possível para não violar o Princípio Zero, o Princípio Zero não admite flutuação em temperatura diferente da fonte conectada e ao mesmo tempo a existência de fluxo de energia. No modelo da figura 40 as condições são outras, o enunciado de Clausius permite a utilização de uma única máquina equivalente, pois a fonte da energia possui o potencial mais alto e isto provê condições do fluxo de calor seguir seu curso natural sem o auxílio de força externa, bomba.



Fig. 40 (Modelo alternativo cumprindo todos os princípios e sem a necessidade da bomba de calor)

Equação do rendimento que representa este sistema é dada pela razão da energia útil pela energia de entrada no sistema:

$$\eta_e = \frac{10 \text{ J}}{10 \text{ J} + \text{dE}}$$

Ou:

Então:

As conjecturas apontam que não existem restrições para o rendimento de uma máquina térmica, desde que sejam respeitados os enunciados de Kelvin-Planck e Clausius e Princípio Zero.

## 7. ANÁLOGO ELÉTRICO DA MÁQUINA DIFERENCIAL

As máquinas térmicas conhecidas até o presente são todas referenciais contendo um único sistema termodinâmico, o gás de trabalho sempre na sua totalidade estará no processo permanentemente enquanto o seu ciclo durar. No análogo elétrico, a "temperatura" (Kelvin) em termodinâmica possui o seu correspondente em "tensão" (Volt). Como nas máquinas referenciais não ocorre variação de partículas no processo, a temperatura termodinamicamente produzirá uma pressão sempre diretamente proporcional às fontes quentes e frias, invariavelmente com as mesmas quantidades de partículas, alterando somente o volume. Então haverá uma temperatura Tq (Kelvin) e uma pressão correspondente Pq (Pascal) diretamente proporcional e outra temperatura Tf e uma pressão Pf também proporcional ao número de partículas e temperaturas, destas são geradas o trabalho e impõe o rendimento de forma que tanto pela temperatura quanto pela pressão o resultado será o mesmo.

Uma máquina térmica Diferencial por sua vez, possui dois subsistemas sob as mesmas condições de temperatura. Porém como há transferência de massa entre estes dois subsistemas, os diferenciais de pressões criados já não seguem mais as mesmas imposições dos sistemas referenciais. As temperaturas das fontes quentes e frias permanecem intactas, não mudam, mas as pressões as quais no seu análogo elétrico também são representadas pela "tensão", se altera completamente em função de quanto de matéria é transferida. Para a termodinâmica o análogo elétrico "tensão" corresponde a "temperatura", para o sistema de força motriz respeitando "Mecânica dos Fluidos", o análogo elétrico "tensão" (Volt) corresponde a "pressão do gás" (Pascal).

O trabalho realizado pelas máquinas térmicas mecanicamente (pela Mecânica dos Fluidos) é gerado pela pressão e não pela temperatura. Para as máquinas referenciais, por haver um único sistema, há uma direta correlação entre eles, na máquina Diferencial isto não acontece.

Da mesma forma, no análogo elétrico é possível obter rendimentos superiores em uma máquina sujeita a dois potenciais se o sistema for configurado de modo diferencial, onde parte da carga não utilizada para gerar trabalho seja conservada por meio de elementos de armazenamento de carga, como capacitores, por exemplo, criando diferenças de potenciais superiores sem quaisquer alterações nas suas respectivas fontes de energia.

# 8. FLUXO TERMODINÂMICO DE UMA MÁQUINA TÉRMICA BASEADA EM SISTEMA ABERTO E FECHADO

A figura 41 mostra o fluxo termodinâmico de uma máquina térmica convencional, como a máquina teórica de Carnot, Stirling, de ciclo Otto, Diesel, Brayton, Rankine e demais, demonstram que a fonte quente fornece calor ao sistema, parte dele realiza trabalho útil e parte é liberada para a fonte fria.



Fig. 41 (Fluxo de calor de uma máquina térmica)

Em condição idealizada, seu rendimento é expresso pela equação já apresentada:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

# 9. FLUXO TERMODINÂMICO DE UMA MÁQUINA TÉRMICA DIFERENCIAL

As máquinas térmicas diferenciais possuem um fluxo de calor diferente, existe uma transferência de massa de gás entre suas duas câmaras de conversão e por consequência com a transferência de massa de gás, evidentemente há uma transferência de energia, e esta permanece conservada e circulando entre as duas câmaras durante os processos adiabáticos de forma que a câmara que realizará sequencialmente a sua isotérmica de baixa, terá menor número de partículas, no limite este número de partículas corresponde apenas à fração do gás

e energia que efetivamente realizaram trabalho, e por consequência disponibilizará menos calor para a fonte fria.



Fig. 42 (Fluxo de calor de uma máquina térmica Diferencial)

Uma máquina com estas características irá operar com uma potência transferida da fonte de energia (quente) para realizar trabalho e uma potência circulante conservada a qual ficará circulando na máquina enquanto a mesma estiver em operação. Esta máquina deve ser dimensionada para suportar a soma destas potências. A energia circulante conservada será diretamente proporcional à energia que seria descartada continuamente por uma máquina equivalente na configuração referencial, conforme mostrado nas figuras 41 e 42.

Na Máquina Térmica Diferencial a energia conservada circulante, observada na figura 42, deve ser mantida nas câmaras de conversão nos processos adiabáticos, esta não poderá ser utilizada para gerar trabalho. Esta propriedade impõe um sistema de controle para garantir a conservação da energia. Caso não ocorrer, o sistema não proporcionará a transferência de partículas entre câmaras e o rendimento cairá e permanecerá na dependência única e exclusiva da temperatura como ocorre nas máquinas convencionais baseadas nos sistemas termodinâmicos abeerto ou fechado.

# 10. A MÁQUINA TÉRMICA DIFERENCIAL E AS TRÊS LEIS DA TERMODINÂMICA

A Máquina Térmica Diferencial, figura 28, possui dois subsistemas termodinâmicos, cada um realiza seu próprio processo termodinâmico.

Os ciclos termodinâmicos ocorrem simultaneamente, porém opostos. Como se fossem dois sistemas, enquanto um se expande, o outro encolhe, nas isotérmicas, no primeiro de expansão (alta temperatura), no segundo de contração (baixa temperatura), nesta fase sem transferência de matéria.

Após este processo de expansão de um e contração do outro, um recebendo energia (calor), o outro perdendo energia por meio de uma fonte fria, estas fontes quentes e frias são retiradas e através de um processo adiabático, estes dois sistemas são abertos e pormeio de um rotor de turbina uma parte da massa do sistema que se expandiu é transferida para o sistema que retraiu. Considerando o princípio da conservação da energia, <u>primeira lei da termodinâmica</u>, parte desta massa com energia do primeiro é transferida ao segundo e ao final deste processo adiabático teremos o primeiro sistema com menos matéria que o segundo, porém a somatória das energias não muda conforme demonstrada matematicamente no tópico 4.4.

O primeiro sistema com menos matéria passará a retrair-se por meio do processo isotérmico de baixa temperatura, exposto à fonte fria e o segundo sistema com mais matéria se expande sobre o primeiro pela isotérmica de alta temperatura exposto à fonte quente.

Desta forma, parte da energia dos sistemas é conservada porque em dado instante em processo adiabático parte da matéria de um sistema é transferida ao outro. O sistema frio sempre terá menos matéria que o sistema quente, assim haverá menor transferência de calor para a fonte fria.

Portanto, na Máquina Térmica Diferencial a energia conservada circulante, observada no diagrama de fluxo de calor, figura 42, deve ser mantida circulando permanentemente nas câmaras de conversão nos processos adiabáticos, esta não poderá ser utilizada para gerar trabalho. O que se altera nesta configuração é apenas o referencial. Esta nova curva do ciclo termodinâmico terá exatamente as mesmas condições de temperatura, porém as linhas de pressões se alteram, mais alta na isotérmica de alta e mais baixa na isotérmica de baixa.

# 11. MÁQUINA TÉRMICA DIFERENCIAL (MODELO SIMPLES EXPERIMENTAL DE LABORATÓRIO)

Uma máquina térmica, modelo simples experimental de laboratório, figura 43, foi implementado e consiste de duas câmaras na configuração diferencial, permitindo que a máquina realize 8 processos, sendo dois isotérmicos e dois isocóricos. O sistema de controle é eletrônico e impõe independência entre o ciclo mecânico de força e o ciclo termodinâmico tornando a máquina flexível, controlável em larga faixa de operação.



Fig. 43 (Máquina Térmica de ciclo Diferencial)

Conforme a definição de "ciclo Diferencial", o modelo de laboratório não possui seus subsistemas termodinâmicos referenciado a uma vizinhança, ambiente atmosférico ou espaço fixo, porém o mesmo possui dois subsistemas operando simultaneamente, defasados e interdependentes.

As fontes quentes e frias, são idênticas às máquinas conhecidas, há uma temperatura quente e uma temperatura fria.

No seu modo operante, enquanto um subsistema executa um processo isotérmico de alta temperatura "T1" com "n1" partículas (m1 massa de gás), o outro subsistema executa um processo isotérmico de baixa temperatura "T2" com "n2" partículas (m2 massa de gás). As

forças e os processos ocorrem e definem as forças e trabalho pela diferença entre o subsistema 1 com o subsistema 2.

E da mesma forma, enquanto um subsistema executa um processo isocórico de expansão e transferência de massa, o outro subsistema executa o oposto, um processo isocórico de compressão e recepção de massa de gás do primeiro. Desta forma, com duas fontes, uma quente e outra fria, com dois subsistemas termodinâmicos, ou em outras palavras dois sistemas termodinâmicos interdependentes, fisicamente proporciona linhas de pressões afastadas.

Foram realizados experimentos com a máquina modelo experimental com e sem a transferência de massa conforme descrito a seguir:

#### Ensaio 1:

Ensaio com a máquina operando pela bateria térmica estabilizada a aproximadamente 80°C. Foi realizado o experimento com o eixo em movimento alternativo limitado oscilante, não rígido (com mola), em aproximadamente 90 graus.

#### 1º. Modo Stirling gêmeo:

Com ETM e E3 fechadas (ver figura 28), a máquina operou em movimentos oscilatórios contínuos em aproximadamente 90 graus e apresentou variações na pressão de 9 bar mínima e 11 bar máxima nos manômetros.

#### 2º. Modo Diferencial com transferência de massa:

A válvula ETM foi ativada eletronicamente por um curto período de tempo imediatamente no final de cada isotérmica. A máquina alterou o movimento oscilatório para aproximadamente 100 graus e apresentou variações de pressão de aproximadamente 8 bar mínima e 12 bar máxima nos manômetros.

#### Ensaio 2:

O Ensaio foi iniciado com a bateria térmica estabilizada a aproximadamente 80°C. Foi realizado o experimento com o eixo em movimento alternativo limitado oscilante, não rígido (com mola), em movimentos de aproximadamente 90 graus.

#### <u>1º. Modo Stirling gêmeo:</u>

Com ETM e E3 fechadas (ver figura 28), a máquina operou em movimentos oscilatórios continuamente e parou quando o diferencial térmico chegou a aproximadamente 50 °C.

#### 2º. Modo Diferencial com transferência de massa:

A válvula ETM foi ativada eletronicamente por um curto período de tempo imediatamente no final de cada isotérmica e foi dado um novo "start", a máquina voltou a operar e parou quando o diferencial térmico chegou a aproximadamente 40 °C.

A máquina modelo experimental permite configuração para operar no modo Stirling gêmeo, como se fossem duas máquinas de ciclo Stirling com os eixos interconectados e com ciclos termodinâmicos defasados em 180 graus.

Outro experimento importante foi relacionado à controlabilidade. O modelo experimental possui um controle termodinâmico eletrônico simples, com lógica fixa. Desta forma a máquina foi ajustada em diferentes condições de defasagem entre o ciclo termodinâmico e o ciclo mecânico e como esperado, seu comportamento foi diretamente influenciado. Dependendo das temperaturas de operação, a máquina passou a operar com pontos ótimos diferentes para cada caso. Constatou-se desta forma, a importância e o efeito positivo da dissociação, independência, entre o ciclo mecânico e o ciclo termodinâmico.

Conforme previsto pelos estudos teóricos, pela demonstração matemática da eficiência da Máquina de ciclo Diferencial, para realizar o experimento da transferência de massa foi necessário criar um artifício para evitar que a máquina realize todo o trabalho. Caso contrário não haveria conservação de energia e, portanto, o aumento da eficiência esperado não seria observado.

# 12. FONTES TÉRMICAS FLEXÍVEIS

A tecnologia da Máquina Térmica Diferencial oferece inovações substanciais para máquinas térmicas para gerar força mecânica ou energia. Opera com fontes de calor, não exige combustão, embora também possa ser empregada, dispensa o uso de motor auxiliar de partida. Estas características conferem a esta tecnologia, aplicações em grandes plantas de geração de energia elétrica, tendo como fontes térmicas o Sol, geotermal, combustíveis biológicos ou fósseis, incluindo células combustíveis e atômicas, permitindo o uso racional conforme o local a ser aplicada.

## 13. SISTEMAS DE PROPULSÃO INDEPENDENTES DE AR

A independência de combustão oferece sua aplicação para gerar força a submarinos da classe AIP (Air Independent Propultion) e para gerar energia em sondas espaciais, e especialmente para proporcionar energia elétrica de alta potência em projetos de naves com propulsão iônica, favorecendo a exploração do espaço profundo de forma independente de propulsores a combustão ou da necessidade de empuxos previamente calculados com base nas forças gravitacionais dos planetas. Pode ser incluída ainda sua aplicação em objetos espaciais que possuam alguma fonte de calor, planetas, satélites naturais e outros corpos, como a lua, por exemplo, onde o calor poderá ser suprido por meio de concentradores solares ou por energia nuclear possibilitando a geração de energias em potência não possíveis com as tecnologias atuais.

# 14. CONTROLABILIDADE DE ROTAÇÃO, TORQUE E POTÊNCIA

A independência do ciclo termodinâmico do ciclo mecânico desta máquina confere controlabilidade, de forma a proporcionar seu uso em máquinas com controle de rotação (velocidade) e torque, ou seja, para uso em sistemas de tração.

# 15. MODELAMENTO MATEMÁTICO DA MÁQUINA TÉRMICA DE CICLO DIFERENCIAL

Foi elaborado um modelo matemático com um programa de computador para simular a operação de uma máquina térmica de ciclo Diferencial com diversos parâmetros à escolha.

Lista dos parâmetros de entrada para o modelo matemático:

Gás:	Nome do gás (Helio, Hidrogênio, Neônio, Nitrogênio, Ar)
Tpq:	Temperatura fonte quente (°C)
Tpf:	Temperatura fonte fria (°C)

Tamb:	Temperatura do ambiente (°C)
Rot:	Rotação desejada do eixo (RPM)
DC:	Duty Cycle do sistema de controle eletrônico do ciclo (%)
ds:	Taxa de compressão forçada
Ncil:	Número de cilindro do elemento de força motriz
Dcil:	Diâmetro dos cilindros (mm)
CRS:	Medida do raio do virabrequim (mm)
ROD:	Medida do comprimento da biela (mm)
Vc:	Volume da câmara de conversão (l)
Pe:	Pressão de carga do gás em repouso (bar)
Le:	Espessura dos discos do rotor (mm)

Na figura 44 segue um modelo com os principais parâmetros para simulação.

O diagrama da figura 44 formado por um conjunto de blocos representa uma máquina a qual foi modelada matematicamente e cada elemento representa um ou mais parâmetros considerados nas equações.

O modelo parte do princípio que o calor é transportado para as placas quentes por meio de um fluido e estas placas são consideradas isotérmicas em todo o processo, idem para as placas da fonte fria. A partir destas considerações os demais elementos são considerados não ideais, com perdas cujas constantes foram obtidas de tabelas.

As câmaras de conversão possuem regiões quentes, frias e isoladas de forma que o gás seja transportado por meio de um "*displacer*" em forma de discos, e o gás é transportado para as três regiões mediante controle eletrônico e neste caso por meio de informações de tempos de processo que formam o que chamamos de "*Duty Cycle*". A transferência de energia para o gás considera os parâmetros dos materiais, tipo de gás, geometria das câmaras das placas de transferência de calor, dos cilindros de força, as perdas pelo corpo dos diversos elementos, considerando inclusive as perdas para o ambiente.



Fig.44 (Diagrama do Modelo da Máquina Térmica de ciclo Diferencial)

Para o modelamento do elemento de força motriz foi considerado como referência um motor de automóvel, os atritos, forças radiais e axiais dos pistões no interior dos cilindros foram considerados e representam perdas mecânicas no modelo e para cada simulação tais perdas são demonstradas nos cálculos. Para o cálculo de perdas térmicas pelo elemento de força motriz foi considerado que a carcaça do motor possui temperatura constante e parametrizável no programa e o modo de cálculo da perda térmica foi por transitório considerando a geometria do volume que contém o gás no interior do cilindro dentro do tempo em que o mesmo se encontra avançado, equivalente à metade do tempo de um ciclo. De forma semelhante o sistema calcula as perdas térmicas no comando de válvulas.

Quando o programa que possui o modelamento matemático finaliza o cálculo sequencial do fluxo de calor até chegar ao trabalho no eixo, o programa faz uma checagem de todas as energias envolvidas no processo comparando com a energia total da entrada pelo fluido térmico quente e apresenta o desvio percentual. Quanto mais próximo a 0%, menor o erro provável do ensaio realizado pelo programa.

Desta forma, para o modelamento matemático desenvolvido, considerou-se cálculos de transferência de calor das placas quentes e frias das câmaras do conversor pelo regime transitório, porém considerou-se gás confinado nos volumes internos sem movimento.

As principais equações consideradas no modelo matemático seguem abaixo:

A taxa de transferência de calor condutiva adimensional **q**\* é dado por (Incropera/De Witt Tabela (5.2 a), 2008):

$$q^* = 2.\sum_{n=1}^{\infty} e^{-(\zeta_{n}^2 \cdot F_0)}$$

Onde o termo  $\zeta$  é dado por:

O termo Fo, número de Fourier, é dado por (Incropera/De Witt Tópico (5.8.1), 2008):

$$Fo = \alpha. t / Lc^{2}$$

Nesta expressão,  $\alpha$  é a difusidade térmica do gás, t é o tempo de exposição ao calor, Lc é a profundidade máxima do gás na câmara de transferência, para o caso em se havendo um confinamento entre duas lâminas igualmente aquecida, o Lc é equivalente à metade da distância entre estas duas lâminas.

Desta forma, a taxa de transferência adimensional  $q^*$  pode ser escrita:

$$q^{*} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{\alpha_{n}}{L_{c}c^{2}} \cdot \left[\mathbf{m}(n-\frac{1}{2})\right]^{2}\right)}$$

Por outro lado, o termo  $q^*$ , também é definido como (Incropera/De Witt (5.64), 2008):

$$q^* = \frac{q^* \cdot Lc}{k.(Ts - Ti)}$$

Desta equação, obtém-se o fluxo dimensional por unidade de área q":

$$q" = \frac{k.(Ts - Ti) \cdot q^*}{Lc} \qquad W/m^2$$

Nas expressões acima,  $\mathbf{k}$  é a condutividade térmica do gás,  $\mathbf{Ts}$  é a temperatura da superfície das lâminas de aquecimento,  $\mathbf{Ti}$  é a temperatura inicial do gás no exato momento em que o mesmo é exposto às lâminas aquecidas na câmara de transferência de energia.

Para o cálculo do fluxo de calor em área determinada em W da câmara de transferência de energia, multiplica-se pela área das faces de transferência de calor definido por A:

$$q = \frac{A.k.(Ts - Ti) \cdot q^*}{Lc} W$$

Substituindo o termo **q**\*, teremos a equação do fluxo transiente (domínio do tempo) na área das câmaras de transferência de energia:

$$q = \frac{A.k.(Ts - Ti)}{Lc} \cdot 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{G.t}{Lc^{2}} \cdot [\Pi(n - 1/2)]^{2}\right)} W$$

Para se obter a energia E transferida ao gás de trabalho durante o processo termodinâmico, é necessário integrar o fluxo **q** no domínio do tempo:

$$E = \int q \cdot dt \qquad J$$

Então a equação finalmente fica:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{k} \cdot (\mathsf{Ts} - \mathsf{Ti})}{\mathsf{Lc}} \cdot \int 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{\mathbf{Q} \cdot \mathbf{t}}{\mathsf{Lc}^{2}} \cdot |\mathbf{T}^{(n-2)}|^{2}\right)} dt \quad \mathbf{J}$$
(6)

A expressão acima é utilizada para calcular a transferência de energia para o gás durante o período em que o mesmo realiza os processos isotérmicos. Deve-se observar que o parâmetro  $\alpha$  é variável enquanto o gás estiver realizando trabalho, pois o mesmo depende da densidade  $\rho$  conforme a expressão  $\alpha = \mathbf{k} / (\rho \cdot \mathbf{cv})$  e a densidade  $\rho$  diminui no processo isotérmico de alta temperatura enquanto o gás realiza trabalho sobre o elemento de força motriz e a densidade  $\rho$  aumenta no processo isotérmico de baixa temperatura enquanto o gás recebe trabalho do elemento de força motriz.

A energia que o gás recebe em uma máquina térmica é a energia que o mesmo deve transferir para gerar trabalho ou outra forma de energia, como elétrica por exemplo, e parte é liberada ao ambiente ou à fonte de baixa temperatura. Erros nos cálculos poderão gerar desvios nos resultados, desta forma a expressão da quantidade de energia em regime estacionário é de extrema importância para conferir a confiabilidade dos cálculos realizados.

Ela é definida da seguinte forma:

$$Q = m \cdot c_v \cdot \Delta T \tag{7}$$

Esta expressão possui apenas três termos e pode ser facilmente calculada. O termo  $\mathbf{Q}$  é a quantidade de energia em Joules que o gás pode receber,  $\mathbf{m}$  é a massa de gás em kg contida na câmara de transferência de energia,  $c_v$  é o calor específico em volume constante do gás em (J/(kg.K)) e  $\Delta T$  é a diferença de temperatura em Kelvin, entre a temperatura de equilíbrio final e a temperatura inicial do gás quando sujeito às lâminas de aquecimento, ou seja  $\Delta T = Ts - Ti$ .

Para realizar a conferência do cálculo do transiente, basta efetuar o cálculo através da expressão (6), integrando-a por um tempo suficiente para atingir o equilíbrio térmico e comparar com o cálculo através da expressão (7), ambos os resultados devem ser semelhantes. A expressão (6) define o comportamento transitório de transferência de energia, no entanto o gás estando sob o fluxo de calor continuamente, haverá um instante que a partir deste, não haverá mais fluxo, a energia atinge o máximo possível e o sistema se equilibra, tornado-se estacionário. Desta forma, a semelhança dos resultados comprova as coerências dos cálculos.

As tabelas e figuras a seguir demonstram os resultados de uma simulação de um modelo através de um programa de computador. Parte dos parâmetros construtivos como algumas dimensões e constantes de materiais utilizados foram mantidos fixos, não estão disponíveis para a escolha do usuário. Portanto, considerações de projetos podem alterar os resultados.

			Unid.	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6
1	Gás	Nome gás		Nitrogênio	Nitrogênio	Nitrogênio	Nitrogênio	Nitrogênio	Nitrogênio
2	Трq	T. Quente	oC	300	400	500	600	700	800
3	Tpf	T. Frio	oC	60	60	60	60	60	60
4	Tamb	T. amb	оС	35	35	35	35	35	35
5	Rot	Rotação	RPM	900	900	900	900	900	900
6	DC	Dutycycle	%	60	60	60	60	60	60
7	ds	Taxa comp. Forç.		0	0	0	0	0	0
8	Ncil	Núm, cil		4	4	4	4	4	4
9	Dcil	Diam. Cil	mm	87	87	87	87	87	87
10	CRS	Raio Vira b.	mm	42	42	42	42	42	42
11	ROD	Comp Biela	mm	125	125	125	125	125	125
12	Vc	Vol câm.	litros	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
13	Ре	Pres. Carga	Bar	80	80	80	80	80	80
14	Le	Esp. Discos	mm	10	10	10	10	10	10
15	Pex	Pot total entrada	kW	51,68	73,88	96,59	119,79	143,43	167,47
16	Pix	Pot descartada	kW	37,15	45,37	51,83	57,11	61,57	65,43
17	Vm	Cilindrada	litros	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
18	Pmx	Pot máx motor	kW	107,86	107,86	107,86	107,86	107,86	107,86
19	Tq	T. gás quente	oC	163,57	193,75	219,12	240,90	259,59	276,08
20	Tf	T. gás frio	oC	157,68	185,43	208,41	227,73	244,19	258,38
21	Pq	Press. Quente	Bar	135,45	154,41	171,22	186,18	199,56	211,61
22	Pf	Press. Frio	Bar	96,12	92,88	89,31	85,67	82,10	78,67
23	da	Tax. Transf. nat.		1,39	1,63	1,88	2,12	2,36	2,60
24	ds	Tax. Transf. forç.		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	dn	Tax. Transf. resul		1,39	1,63	1,88	2,12	2,36	2,60
26	Pisx	Pot vazamento	kW	0,94	1,33	1,71	2,10	2,49	2,88
27	Pisa	Pot ambiente	kW	0,70	0,99	1,29	1,58	1,87	2,16
28	Ptm	Pot. Teórica mot.	kW	12,88	26,18	41,75	58,98	77,47	96,97
29	Pim	Pot. Indicada mot	kW	12,79	26,01	41,50	58,64	77,04	96,45
30	Pem	Pot. Efetiva mot	kW	12,52	25,47	40,64	57,42	75,45	94,45
31	Ps	Potência servo	kW	0,63	1,27	2,03	2,87	3,77	4,72
32	Pu	Potência útil	kW	11,90	24,20	38,61	54,55	71,68	89,73
33	Pg	Potencia gerador	kW	10,94	22,26	35,52	50,19	65,94	82,55
34	Tom	Torque eixo	N.m	66,43	135,14	215,62	304,65	400,27	501,09
35	Rei	R. ideal	%	58,20	69,70	77,03	81,99	85,50	88,08
36	R mec	R. mecanico	%	23,02	32,75	39,97	45,54	49,97	53,58
37	Rt	R. total	%	21,18	30,13	36,77	41,90	45,97	49,29

# TABELA COM SIMULAÇÕES COM A MÁQUINA DE CICLO DIFERENCIAL

Г

Tabela 2 (Tabela de resultados da simulação do modelo matemático da Máquina de ciclo Diferencial considerando variação da temperatura, e demais parâmetros constantes).

No gráfico da figura 45 é mostrada a curva de potência em função da temperatura conforme dados da tabela 2. É particularmente interessante observar que a configuração diferencial da máquina atribui um fator muito positivo, esta máquina é capaz de operar em larga faixa de temperatura, diferentemente das máquinas de ciclo Stirling conhecidas. Tal atributo é decorrente do sistema de controle do ciclo Diferencial de 8 processos, o qual permite alto grau de liberdade na formação do torque.



Fig. 45 (Curvas da potência da Máq. de ciclo Diferencial em função da temperatura)

A Máquina de ciclo Diferencial, distinguindo-se das máquinas de circuito fechado atuais de ciclo Stirling, ciclo Ericsson e também se distinguindo da máquina ideal de Carnot, é caracterizada por um servosistema que controla o ciclo termodinâmico. Este servosistema modula os oito processos requeridos pela Máquina Diferencial de forma a estabelecer uma relação "*Duty Cycle*" parametrizável entre os processos isotérmicos e adiabáticos de forma a manter constante a rotação atendendo a variação da demanda da carga, ou vice-versa. A tabela 3 demonstra claramente esta propriedade. O sistema de controle "*Duty Cycle*" impede que a máquina desperdice energia em caso de redução da demanda ou atribui torque extra de forma rápida e eficiente em variações bruscas da carga, mantendo a rotação.

TABELA PARA AVALIAÇÃO DA CONTROLABILIDADE DA POTÊNCIA							
	Tq (°C)	Tf(°C)	Rot (RPM)	DC (%)	Pu (KW)	R mec (%)	
1	500	60	900	10	10,89	31,63	
2	500	60	900	30	24,78	37,65	
3	500	60	900	50	34,47	39,43	
4	500	60	900	70	42,43	40,41	
5	500	60	900	90	49,37	41,07	

Tabela 3 (Tabela de resultados da simulação do modelo matemático da Máquina de ciclo Diferencial considerando variação do *Duty Cycle* mantendo demais parâmetros constantes).

Na figura 46 é mostrada a curva de potência em função do *Duty Cycle*. O *Duty Cycle* é a razão entre o tempo de duração dos processos isotérmicos pela somatória do tempo das isotérmicas com as adiabáticas, ou seja, o tempo de duração do ciclo termodinâmico pode variar na prática a partir de um valor superior a "zero" até um valor inferior a 100%.



Fig. 46 (Curva da controlabilidade da potência pelo Duty Cycle)

Na figura 47 é mostrada a curva do rendimento em função do *Duty Cycle*. Esta curva fornece o rendimento da máquina para cada ponto da curva de potência do gráfico da figura 46. É interessante observar que esta propriedade oferece uma resposta relativamente linear e estável mantendo a máquina com bom rendimento e desempenho em larga faixa de potência.



Fig. 47 (Curva do rendimento da Máquina de ciclo Diferencial em função do Duty Cycle)

Todas as máquinas térmicas de circuito fechado conhecidas, a máquina de ciclo Stirling. A máquina de ciclo Ericsson, a máquina teórica de ciclo de Carnot, invariavelmente possuem o ciclo termodinâmico solidário ao ciclo mecânico por conexões físicas pelos eixos, ou pelo trabalho do gás, como por exemplo, as máquinas Stirling de pistão livre, criado por William Beale. Esta condição impede a controlabilidade operacional da máquina, ou quando muito, oferece algum controle de rotação pelo aumento do calor ou da quantidade de gás no circuito por meio de um sistema de compressores auxiliares.

A Máquina de ciclo Diferencial renova o conceito, com os mesmos fundamentos da termodinâmica, porém trás flexibilidade, controlabilidade, ampliando a faixa de utilização e eliminando vários pontos críticos existentes nas Máquinas Stirling e Ericsson. O modelo experimental apresentado no tópico 11 é um exemplo, trata-se de uma máquina térmica de ciclo Diferencial que realiza 8 processos, opera em larga faixa de temperatura, não exige qualquer sistema mecânico externo para a partida.
TABELA COM SIMULAÇÕES COM A MÁQUINA DE CICLO DIFERENCIAL									
			Unid.	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6
1	Gás	Nome gás		Nitrogenio	Nitrogenio	Nitrogenio	Nitrogenio	Nitrogenio	Nitrogenio
2	Трq	T. Quente	оС	300	300	300	300	300	300
3	Tpf	T. Frio	oC	60	60	60	60	60	60
4	Tamb	T. amb	oC	35	35	35	35	35	35
5	Rot	Rotação	RPM	900	900	900	900	900	900
6	DC	Dutycycle	%	60	60	60	60	60	60
7	ds	Taxa comp. Forç.		0,00	0,25	0,50	1,00	1,50	2,00
8	Ncil	Núm, cil		4	4	4	4	4	4
9	Dcil	Diam. Cil	mm	87	87	87	87	87	87
10	CRS	Raio Vira b.	mm	42	42	42	42	42	42
11	ROD	Comp Biela	mm	125	125	125	125	125	125
12	Vc	Vol câm.	litros	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
13	Pe	Pres. Carga	Bar	80	80	80	80	80	80
14	Le	Esp. Discos	mm	10	10	10	10	10	10
	-		-		-	-			
15	Pex	Pot total entrada	kW	51,68	52,17	52,72	53,85	54,91	55,86
16	Pix	Pot descartada	kW	37,15	32,03	28,29	23,17	19,81	17,40
17	Vm	Cilindrada	litros	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
18	Pmx	Pot máx motor	kW	107,86	107,86	107,86	107,86	107,86	107,86
19	Tq	T. gás quente	oC	163,57	154,16	146,37	134,23	125,21	118,24
20	Tf	T. gás frio	oC	157,68	148,29	140,53	128,46	119,50	112,60
21	Pq	Press. Quente	Bar	135,45	141,56	146,30	153,15	157,81	161,16
22	Pf	Press. Frio	Bar	96,12	85,12	76,33	63,17	53,82	46,85
23	da	Tax. Transf. nat.		1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39
24	ds	Tax. Transf. forç.		0,00	0,25	0,50	1,00	1,50	2,00
25	dn	Tax. Transf. resul		1,39	1,64	1,89	2,39	2,89	3,39
26	Pisx	Pot vazamento	kW	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
27	Pisa	Pot ambiente	kW	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
28	Ptm	Pot. Teórica mot.	kW	12,88	18,49	22,78	29,03	33,46	36,81
29	Pim	Pot. Indicada mot	kW	12,79	18,41	22,71	28,97	33,41	36,78
30	Pem	Pot. Efetiva mot	kW	12,52	18,03	22,24	28,37	32,72	36,02
31	Ps	Potência servo	kW	0,63	0,90	1,11	1,42	1,64	1,80
32	Pu	Potência útil	kW	11,90	17,13	21,13	26,95	31,09	34,22
33	Pg	Potencia gerador	kW	10,94	15,76	19,44	24,80	28,60	31,48
34	Tom	Torque eixo	N.m	66,43	95,67	117,99	150,52	173,59	191,08
35	Rei	R. ideal	%	58,20	64,57	69,25	75,69	79,89	82,86
36	R mec	R. mecanico	%	23,02	32,84	40,08	50,06	56,61	61,26
37	Rt	R. total	%	21,18	30,21	36,87	46,05	52,09	56,35

Tabela 4(Tabela de resultados da simulação do modelo matemático da Máquina de ciclo Diferencial considerando a variação na taxa de transferência de partículas, e demais parâmetros constantes).

## 16. CONCLUSÃO

Durante este período, desde a antiguidade, o pensamento para o desenvolvimento de máquinas foi dirigido a sistemas termodinâmicos do tipo aberto e fechado e os ciclos são na maioria formado por 4 processos e termodinamicamente e mecanicamente são referenciados à vizinhança, ambiente onde se encontram, e todas as forças e evidentemente cálculos são relativos a esta vizinhança. A denominação que pode ser usada quando as grandezas físicas, força, pressão, torque, vazão, ocorrem relativamente a um meio fixo, pode ser definido com o termo "referencial". Muito embora em 1782, James Watt criou a Máquina Térmica de Dupla ação, a qual, o vapor entrava alternativamente nas duas extremidades do pistão, e este, portanto, tanto empurrava quanto aspirava o vapor, porém o sistema de transformação termodinâmico era um único, termodinamicamente a máquina era referencial.

Avaliando o contexto total do trabalho, incluindo as referências e histórias da Termodinâmica, conclui-se que pesquisas e desenvolvimentos na termodinâmica são muito vastos. Através de descobertas isoladas, aparentemente sem ligação, mantendo o conceito de unir ciências distintas, novos horizontes se formam e novas possibilidades surgem.

Constatou-se fisicamente na prática que estas particularidades nos permitiram construir uma máquina que dispensa sistemas de partida complexos, exigidos por máquinas com o conceito referencial. O sistema de controle independente, proporcionado pela eletrônica, viabilizou controles do ciclo termodinâmico independente do ciclo mecânico, nunca antes experimentado em qualquer máquina térmica a gás de circuito fechado, não se encontrou nada nas literaturas, a não ser alguma coisa nos trabalhos mais recentes, como por exemplo, uma publicação de 2012 da University of Canterbury, a qual publicou um artigo propondo um sistema de controle do ciclo termodinâmico eletronicamente por meio de servomecanismos, tornando independente o ciclo termodinâmico do mecânico e assim controlabilidade permitir maior da Máquina de ciclo Stirling. [Gopal, http://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/7306/. 2012].

Desta forma, com base na teoria estudada e apresentada, nos ensaios com uma máquina modelo experimental de bancada com os modelos matemáticos desenvolvidos, todos convergindo para os mesmos resultados, acredita-se que este trabalho venha a contribuir de forma altamente significativa para as futuras gerações de máquinas, especialmente aquelas para gerar energia, força mecânica e movimento sem impactos ambientais e por se tratar de

máquinas que não exigem combustão, proporcionam projetos de energia e sistemas de propulsão para uso espacial.

Características inovadoras existentes no ciclo Diferencial favorecem projetos de sistema de geração de energia independente da existência de ar, e ao contrário das máquinas de ciclo Stirling, sem limitações de potência e livre da necessidade de sistema mecânicos de alta potência para o início de operação. Com o emprego de células combustíveis, energia termossolar ou energia atômica, termonuclear, uma Máquina de ciclo Diferencial poderá ser utilizada para gerar energia em altas potências para uso aeroespacial e em submarinos.

## **17. BIBLIOGRAFIA**

- ARRUDA, CARLOS ARAÚJO. KUX, ARTHUR.; "O Brasil no Global Competitiveness Report". Fundação Dom Cabral, Paper (2011).
- BEALE, WILLIAM T. WOOD, JAMES GARY.; US20100095668 "Balanced multiple Groupings of beta stirling machines", Patent (2010).
- BERCHOWITZ, DAVID M.; US20110005220 "Gamma type free-piston stirling Machine configuration", Patent (2011).
- CAMERON, JOHN VERNON.; US6996983 "Stirling engine", Patent (2006).
- CHU, JENNIFER.; "Thrusters powered by ionic wind may be an efficient alternative to conventional atmosphericpropulsion technologies" MIT News Office April 3, 2013 http://newsoffice.mit.edu/2013/ionic-thrusters -0403, Art. (2013).
- CARTER, W CRAIG; **"A Survey of Molar Entropies" -** http://pruffle.mit.edu/3.00/Lecture \_16 \_web/node2.html. Art. (2002).
- CULLEN, BARRY. McGOVERN, JIM.; "Development of a theoretical decoupled Stirling cycle engine" – Dublin Institute of Technology, Conference Paper. (2009).
- DENKER, JOHN.; "Modern Thermodynamics" 2014).
- ENERGY DEPARTMENT FEDERAL GOVERNMENT OF USA.; **"Radioisotope Thermoelectric Generators (RTGs)"** - http://energy.gov/ne/nuclear-reactortechnologies/space-power-systems): Radioisotope Thermoelectric Generators (RTGs), Art. (2013).
- ESA, EUROPEAN SPACE AGENCY.; "Space and Energy" European Space Agency (ESA). http://www.esa.int/Our\_Activities/Technology/Space\_for\_energy, Art. (2013).
- GOPAL, VINOD KUMAR. CANTERBURY, UNIVERSITY.; "Active Stirling Engine" http://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/7306), Art. (2012).
- GREITZER, E M. SPAKOVSZKY, Z. S. WAITZ, I. A.; "Thermodynamics and Propulsion http://web.mit.edu/16.unified/www/ FALL/thermodynamics/notes/node49.html. Art. (2013).
- HARVARD.; "Solar Energy and the Energy Supply of the Future" The Harvard Clean Energy Project – http://cleanenergy.molecularspace.org/about-cep/#Solar\_Energy\_and \_the\_Energy\_Supply\_ of the\_Future, Art. (2013).
- HELRICH, CARL S.; "Modern Thermodynamics With Statistical Mechanics", Springer.: (2009).

HERRING, JOHN ALEXANDER.; - US7549289 "Hybrid engine", Patent (2009).

- HEYWOOD, JOHN B.; "Internal Combustion Engine Fundamentals", 2<sup>nd</sup>. ed. McGraw-Hill, Inc.: (1988).
- HOROWITZ, PAUL.; "The Art of Electronics", 2<sup>nd</sup>. ed. Cambridge: Cambridge, (2001)
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; "Fundamentos de transferência de calor", 6<sup>a</sup>. ed., Rio de Janeiro: LTC, (2008)
- INSTITUTE OF HUMAN THERMODYNAMICS AND IOHT PUBLISHING LTD.; http://www.humanthermodynamics.com/ht-history.html, Art. (2013)
- IOCKHECK, MARNO.; Pat. Req. BR1020130266345 "Máquina Térmica Diferencial", Curitiba, Pat. (2013).
- IOCKHECK, MARNO.; Pat. Req. BR1020120155540 "Máquina Térmica em Conformidade com o Ciclo de Carnot", Curitiba, Pat. (2012).
- IOCKHECK, MARNO.; Pat. Req. PI1000624-9 "Conversor de Energia Termomecânico", Curitiba, Pat. (2010).
- IOCKHECK, MARNO.; Pat. Req. PI0503189-3/c10503189-3 "Sistemas de Testes Múltiplos para Equipamentos com Motor Elétrico ou Bobinas Agregadas", Curitiba, Pat. (2005).
- ISHIGURO, YUJI. GUIMARÃES, LAMARTINE.; "Missões Espaciais e a Energia Nuclear", Divisão de Energia Nuclear IEAv, (2007).
- KARABULUT, HALIT. YÜCESU, HÜSEYIN. ÇINAR, CAN. AKSOY, FATIH.; " An experimental study on the development of a beta-type Stirling engine for low and moderate temperature heat source"., Applied Energy. Volume 86, Issue 1, January, Pages 68–73, (2009)

 KONGTRAGOOL, BANCHA, WONGWISES, SOMCHAI.; - "Review of Solar-Powered Stirling Engines and Low Temperature Differential Engines" - Renewable and Sustainable Energy Reviews - Volume 7, Issue 2, April 2003, Pages 131–154, (2003)

- MAJESKI, WILLIAM J.; "Stirling Engine Assessment (Final Report)" Electric Power Research Institute, Inc. Energy International, Inc. Report (2002)
- MANN, ADAM.; "New Nuclear Engine Could Power Deep-Space Exploration" http://www.wired.com/2012/11/radioactive-stirling-engine-exploration/, Art. (2012).

MARTINEZ, ISIDORO.; "Thermal Machines and Heat Engines", 1995).

- MILLER, RICHARD W.; "Flow Measurement Engineering Handbook", 3<sup>th</sup>. ed. Boston: McGraw-Hill, (1996)
- MIT.; **"Brayton Cycle" -** http://web.mit.edu/16.unified/www/SPRING/propulsion/notes/node27.html , Art. (2013).

- MIT.; "**Control Volume Form of the Conservation Laws**" http://web.mit.edu/16.unified/www/ FALL/thermodynamics/node19.html, Art. (2013).
- MIT.; "Entropy and Unavailable Energy" http://web.mit.edu/16.unified/www/ FALL/ thermodynamics/notes/node49.html. Art. (2013).
- NASA.; "New Nuclear Reactor With a Stirling Engine Could Power Space Mission" National Aeronautics and Space Administration - John H. Glenn Research Center. http://www.nasa.gov/centers/glenn/news/pressrel/2012/12-059\_fission\_prt.htm. Art. (2013).
- NASA.; "Nuclear Powered Stirling Engine for Moon Base" National Aeronautics and Space Administration - John H. Glenn Research Center. 27-08-2013 http://www.nasa.gov/centers/marshall/news/news/releases/2009/09-069 .html, Art. (2013).
- NASA.; "**Radioisotope Power System Program**" National Aeronautics and Space Administration – John H. Glenn Research Center. http://www.nasa.gov/home/ hqnews/2003/may/HQ news c03n prt.htm, Art. (2013).
- NOMMENSEN, ARTHUR CHARLES.; US6195992 "Stirling cycle engine", Patent. (2001).
- O. EDENHOFER, R. PICHS-MADRUGA, Y. SOKONA, K. SEYBOTH, P. MATSCHOSS, S. KADNER, T. ZWICKEL, P. EICKEMEIER, G. HANSEN, S. SCHLOMER, C. VON STECHOW (EDS).; - "Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation", Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. IPCC, (2011).
- PERRY, ROBERT H.; "Perry's Chemical Engineer's Handbook", <sup>6th</sup>. ed. New York: McGraw-Hill, (2001).
- POLING, BRUCE E.; "The Properties of Gases and Liquids", 5<sup>th</sup>. New York: McGraw-Hill, (2001).
- RECH, BERND.; "Renewable Energies" Helmholtz Association http://helmholtz.de/ no\_cache/en/research/energy/renewable\_energies/, Art. (2013).
- RÖBKE, THOMAS.; "Energy from inside the Earth" Helmholtz Association http://www.helmholtz.de/en/artikel/energy-from-inside-the-earth-2431/, Art. (2014).
- SAWIN, JANET L.; "Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century" GLOBAL STATUS REPORT, RENEWABLES 2012, Report (2012).
- SCODITTI, EMANUELLE.; "Review of Energy Conversion Devices", 2003, IEA
  Bioenergy Agreement Task 33: Thermal Gasification of Biomass (2001 2003), pp. 1 54, (2003).

- SILVER, GUY. WU, JUINERONG.; PI0515980-6 A "Método e sistema para a geração de Energia usando princípios do motor stirling", Patent. (2007).
- SILVER, GUY. WU, JUINERONG.; PI0515988-1 A "Método e sistema para geração de Energia elétrica e mecânica usando princípios de máquina stirling", Patent. (2007).
- SPAKOVSZKY, Z. S.; "Thermodynamics" http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/ thermodynamics/, 2013).
- TAKESHI, HOSHINO. AKAZAWA, TERUYUKI. KAWADA, MASAKUNI.; US20080282693 "Stirling Engine", Patent. (2008).
- THIESSEN, ROBERT.; WO2009097698A1 "Method of externally modifying a carnot engine cycle", Patent. (2009).
- WANG, JITAO.; **"Modern Thermodynamics based on the Extended Carnot Theorem",** Springer Verlag, 2011).
- WELTY, STEPHEN CHARLES. HILL, ANDREW NICHOLAS.; US7827789 "Linear Free Piston stirling machine", Patent. (2010).
- WIKIPEDIA.; "Biografia de Richard Trevithick" http://pt.wikipedia.org/wiki/Richard\_ Trevithick, Art. (2013).
- WIKIPEDIA.; "History of Thermodynamics" http://en.wikipedia.org/wiki/History\_of thermodynamics, Art. (2013).
- WIKIPEDIA.; "Máquina de Carnot" http://pt.wikipedia.org/wiki/M%C3%A1quina\_de\_ Carnot, Art. (2013).
- WILLIAMS, Alan., "Joule's Thermoscope and the second law of Thermodynamics" http://special.lib.gla.ac.uk/manuscripts/search/results\_ac.cfm? ID=4833, Glasgow University –(July, 2003).
- WOOD, J. G. and LANE, N. W., "Advanced 35 W Stirling Engine for Space Power Applications," - in Proceedings of STAIF 2003 Space Technology and Applications International Forum, edited by M.S. El-Genk, American Institute of Physics, CP654, Melville, NY, 2003, pp. 662-667. (2003).
- WOOD, J. G. and LANE, N. W., "Advanced Small Free-Piston Convertors for Space Power Applications," - in Proceedings of STAIF 2004 Space Technology and Applications International Forum, edited by M.S. El-Genk, CP699, American Institute of Physics 2004, pp. 440-444. (2004).