

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA RACIONAL DE SELEÇÃO DE CICLOS E MOTORES TÉRMICOS

Leandro Destefane de Souza ¹; Marco Antonio Soares de Paiva ²

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *Este trabalho apresenta uma metodologia racional para seleção de ciclos termodinâmicos para produção de energia mecânica voltada tanto para movimento veicular como para geração de energia elétrica e toma como referência os ciclos mencionados na literatura mais recente. As figuras de mérito avaliadas são: eficiência, faixa de potência, tipo de combustível, aplicações típicas e parâmetros operacionais, entre outros aspectos. Questões como tendências e impactos ambientais também são abordadas no trabalho. No total, foram selecionados 12 ciclos para análise.*

Introdução

Um ciclo termodinâmico pode ser entendido como um conjunto de processos termodinâmicos sucessivos sofridos por um sistema material em que os estados inicial e final são idênticos, ou seja, não há variação de propriedades do sistema. Por meio dos ciclos termodinâmicos é possível converter energia térmica (calor) em trabalho mecânico. A obtenção de trabalho a partir de duas fontes térmicas com temperaturas diferentes é empregada para produzir movimento, por exemplo nos motores veiculares, ou nos alternadores empregados na geração de energia elétrica. A eficiência de conversão da energia, ou rendimento termodinâmico, é um dos principais parâmetros pertinentes a um ciclo termodinâmico e é definido como a razão entre o trabalho mecânico produzido no ciclo e o calor recebido do reservatório de alta temperatura. Nos processos contínuos, tal relação é descrita em termos de potência (potência mecânica e potência térmica).

Material e Métodos

Para desenvolvimento do presente estudo, foi feita inicialmente uma ampla revisão bibliográfica para avaliação dos ciclos termodinâmicos mais importantes. Nos trabalhos encontrados, foram avaliados diagramas de processo, rendimentos típicos, faixas de potência típicas, potências volumétricas, combustíveis utilizados e tendências tecnológicas. Para aprimorar a qualidade das informações analisadas, principalmente o objetivo de criação do ciclo, foram também consultadas patentes de alguns dos ciclos avaliados. As informações obtidas foram tabuladas com auxílio do programa Excel para melhor análise comparativa dos ciclos avaliados. Os ciclos selecionados para estudo foram: Carnot, Ericsson, Rankine, Kalina, Stirling, Miller, Atkinson, Brayton, Diesel, Lenoir, Otto e Scuderi.

Resultados e Discussão

Antes de qualquer ciclo, irá se falar sobre o ciclo de Carnot, que possui quatro etapas reversíveis (TIPLIER, 2000). Este ciclo é considerado uma máquina teórica ideal quando a fonte e o sumidouro térmicos tem valores constantes, ou seja, não há ineficiências e a conversão da energia térmica de entrada é a máxima possível (Borgnakke & Sonntag, 2013). Na prática existem várias causas de ineficiências, que fazem o rendimento ser menor do que o teórico, valor máximo possível, como dito anteriormente. As ineficiências são formalmente denominadas de “irreversibilidades” na literatura específica e suas principais causas são: atrito mecânico e viscoso, transferência de calor

com diferença finita de temperatura, gradientes contínuos de temperatura na matéria, expansão não resistida, entre outros fatores.

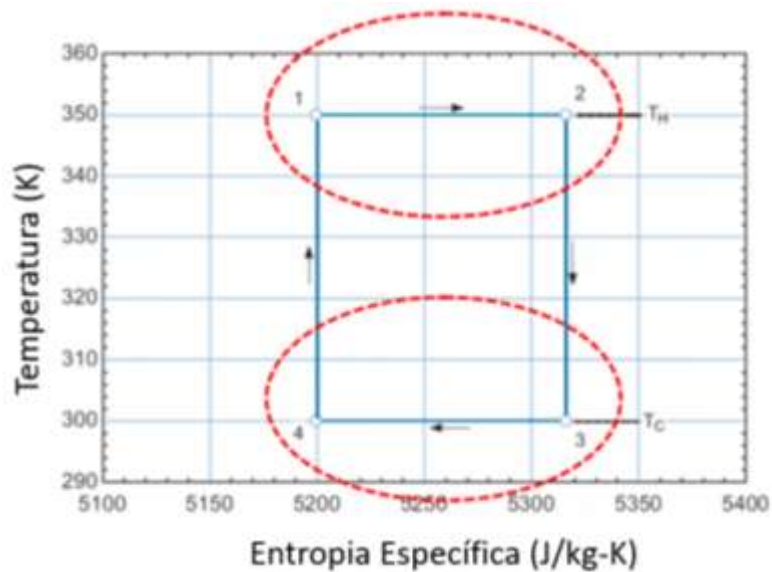


Figura 1 – Diagrama T x s do ciclo Carnot

A realização do ciclo de Carnot na prática apresenta algumas dificuldades tecnológicas. Para realizar transferência de calor em temperaturas constantes deve-se utilizar substâncias que mudem de fase. Isso, por outro lado, demanda que as etapas de compressão e expansão sejam realizadas com a presença de duas fases no interior das máquinas que realizam os processos, algo que tem barreiras tecnológicas. Comprimir ou expandir fluidos em duas fases apresenta dificuldades.

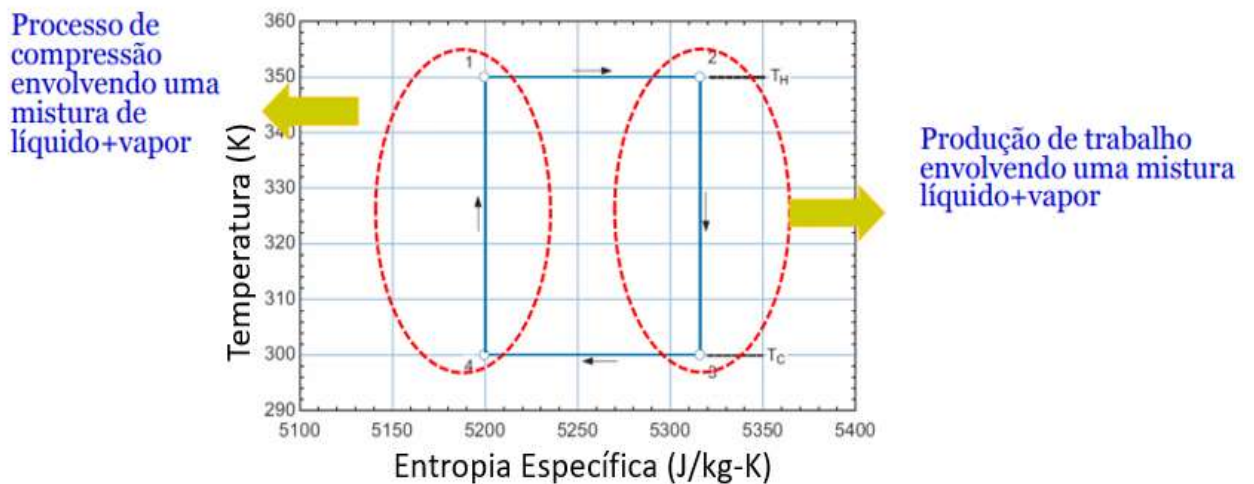


Figura 2 - Ciclo Carnot – Gráfico T-s

Uma boa metodologia para classificação dos ciclos termodinâmicos, e motores correspondentes, é iniciar sua divisão segundo a faixa de potência. Foram considerados de pequena potência os ciclos de até 1 MW: Stirling, Otto, Diesel, Atkinson, Lenoir, Miller e Scuderi. Os de alta potência: Rankine, Kalina, Ericsson e Brayton. Apresenta-se a seguir de forma resumida, as características de cada um deles.

Motor Stirling

É um motor de combustão externa, que foi criado visando substituir as máquinas a vapor, que explodiam com frequência nos anos de 1800. Por não existirem explosões em seu ciclo, o motor é bem silencioso e não tem vibrações. Além disso, algumas outras vantagens são: por ter uma combustão contínua e não intermitente, a queima de combustível é completa e eficiente, ou seja, emite menos poluentes e é um motor multicomcombustível, então qualquer fonte energética pode ser utilizada.

Algo extremamente relevante é que o motor Stirling é a máquina de maior aproveitamento na transformação de energia térmica em mecânica, com eficiência em torno de 40%, eficiência considerada muito melhor quando comparado às transformações realizadas nos Otto e Diesel que situam-se na faixa de 20% a 30% (FIGUEIREDO, 2003).

Apesar dos diversos pontos positivos do ciclo, as desvantagens são várias. Algumas delas são: é um motor mais caro quando se comparado à um motor diesel que produz a mesma potência (FARIA, 2013), há uma dificuldade ao dar partida no motor e a velocidade do motor é irregular, o que torna difícil sua aplicação em carros. A Ford conseguiu um veículo que utilizava o motor Stirling como um motor primário para locomoção, mas o primeiro problema encontrado era que o veículo não respondia assim que o motorista fizesse uma determinada ação, como acelerar o veículo. Segundo (FLUMMO, 2008), esse delay era algo em torno de vinte segundos. Ou seja, após realizado o feito de “acelerar”, o motor só teria a capacidade de responder à altura vinte segundos depois.

Ciclo Otto

O ciclo ideal é denominado de ciclo padrão ar de Otto (Borgnakke & Sonntag, 2013), e representa de forma aproximada o funcionamento de motores de combustão interna a gasolina (e etanol também), conhecidos popularmente como motores a explosão, segundo Silva et al (2014).

Os quatro processos a que o combustível é submetido durante o processo são: admissão, compressão, explosão (combustão) e exaustão.

Algumas características específicas deste motor são: a ignição do combustível acontece com o auxílio de uma vela de ignição, na fase de admissão aspira-se uma mistura de ar e combustível e, além disso, tal mistura é queimada a volume constante.

Apesar de ser um motor extremamente confiável, seu alto custo do combustível somado à questão ambiental, que cresce mais a cada dia, está fazendo com que este ciclo perca espaço no ramo automobilístico, sendo substituído por tecnologias híbridas ou elétricas.

Ciclo Diesel

Proposto em 1890 por Rudolph Diesel, este ciclo tem bastante semelhança com o ciclo anterior, Otto. Sua essência principal é que para haver uma combustão não é necessário a vela, e sim a compressão do ar até uma temperatura acima da temperatura de autoignição do combustível, e a medida que o combustível é injetado nesse ar quente, inicia-se a combustão. Outra característica única deste ciclo é que na admissão, apenas ar é aspirado para o cilindro, o combustível é aspirado somente após a compressão.

Nestes motores, as taxas de compressão são muito mais altas do que nos motores que utilizam o ciclo Otto, isso porque apenas o ar é comprimido durante o tempo de compressão, eliminando a possibilidade de autoignição (Çengel, 2009).

Algumas de suas vantagens são: baixo consumo de combustível e alta confiabilidade dos motores que utilizam tal ciclo, por terem componentes mais robustos e duráveis. Não precisar lidar com o problema da autoignição é algo que traz mais um benefício: muitos dos requisitos mais rígidos impostos à gasolina agora podem ser eliminados, e combustíveis menos refinados (e mais baratos) podem ser usados nos motores a diesel.

Entre suas desvantagens estão: o preço, já que comparado ao ciclo Otto, é cerca de 30% mais caro, a vibração e o ruído do motor, que são mais altos quando comparados ao Otto. Por outro lado, sua eficiência térmica é em geral maior do que a daquele.

Ciclo Atkinson

O ciclo Atkinson é um ciclo com poucas diferenças ao ciclo já apresentado, Otto. Neste ciclo, a relação de expansão é maior do que a de compressão, de modo que o processo de rejeição de calor possa ocorrer à pressão constante. A alta relação de expansão permite que seja obtido mais trabalho, havendo assim uma eficiência maior que a do ciclo Otto.

O movimento do pistão, neste ciclo, é mais complicado e deve ser feito mantendo-se as válvulas de admissão abertas durante parte do processo de compressão, o que acarreta em uma relação de compressão menor que a nominal.

Algumas das tentativas da utilização deste ciclo foi nos carros Lexus RC 300h (cuja potência é cerca de 164kW) e o Veloster 2019 2.0 (cuja potência é cerca de 110kW).

Ciclo Lenoir

Este motor foi considerado o primeiro motor de combustão interna comercialmente fabricado. Centenas de máquinas utilizaram-no nos anos de 1850. Porém, a falta de um processo de compressão fez com que sua eficiência fosse baixíssima (valor máximo atingido de 5%) e, também o alto peso para gerar pouca energia (cerca de 2 toneladas para 1kW), fizeram com que ele fosse esquecido e desconsiderado como uma opção para a maioria das situações. Hoje em dia, as poucas aplicações deste ciclo ocorrem em bombeamentos de água e para produção de eletricidade.

Outra desvantagem deste ciclo é que a chama apagava rapidamente, já que logo que a combustão se dava, criava-se também uma expansão de gases através do contato com a chama. Porém, apesar de sua inferioridade quando comparada a outros ciclos, é importante salientar que os gases poluentes expelidos por este motor diminuíram cerca de 100 vezes em relação aos de quarenta anos atrás.

Ciclo Miller

O ciclo Miller é um ciclo que tem grande relação com o Otto. Chamado também de motor de cinco tempos, este ciclo é o utilizado como modelo para motores híbridos utilizados no Ford Escape e no Toyota Prius (Borgnakke & Sonntag, 2013). Sua fase de expansão é mais prolongada que a fase de compressão, permitindo uma sobre-expansão dos gases queimados que seriam perdidos pelo escape (Revolorio, 2010).

Para acontecer a sobre-expansão a válvula de admissão é deixada aberta mais tempo do que seria em um motor de ciclo Otto. Sendo assim, o curso de compressão é de dois ciclos discretos: inicialmente quando a válvula de admissão está aberta, e a porção final quando a válvula de admissão está fechada. Este curso de admissão de dois estágios cria o chamado "quinto" tempo. Na compressão, a carga é parcialmente expelida para fora através da válvula de admissão ainda aberta. Tipicamente, esta perda de ar de carga resultaria numa perda de energia. No entanto, no ciclo Miller, isto é compensado pela utilização de um compressor. Com as válvulas de admissão abertas, o pistão encontra menos resistência para a compressão dos gases, diminuindo o esforço, o que garante maior eficiência (menos atrito), porém menor potência (menos gases).

Contudo, este motor acabou por apenas ser produzido entre 1995 e 1998, visto que a sua complexidade mecânica relativamente a um motor convencional da época fazia com que o seu custo de produção fosse bastante mais elevado, tendo, possivelmente, por este motivo sido um dos poucos motores com funcionamento segundo o ciclo de Miller a ser produzido em série durante alguns anos. (Lourenço, 2012)

Porém, com o recente aparecimento e conseqüente crescimento dos automóveis híbridos, a utilização de motores de ciclo sobre-expandido tem vindo a crescer largamente, existindo motores de ciclo sobre-expandido a serem desenvolvidos e alguns já em produção por parte de construtores como a Toyota®, Lexus®, Chevrolet®, Mercedes-Benz®, Ford®, Hyundai®, Kia® e Infinity®.

Ciclo Scuderi

Criado em 2009 e conhecido como motor de ciclo dividido, o ciclo Scuderi possui dois cilindros emparelhados, um de admissão e compressão e outro de potência e escape. Este motor completa um ciclo de combustão com apenas uma revolução do virabrequim, enquanto os tradicionais, duas.

A tecnologia revolucionária que reduz as emissões dos gases em até 80%, o alto torque em relação aos motores convencionais e sua boa eficiência, fazem com que este motor seja uma tendência no futuro.

Apesar das vantagens mostrarem algo promissor, sua densidade de potência é igual a ciclo Otto e por ter um cilindro a mais, seus custos aumentam.

Ciclo Rankine:

O ciclo Rankine é um ciclo largamente utilizado nas usinas de potência a vapor para produzir energia elétrica, convertendo calor em trabalho. Sua versão mais simples é composta por uma bomba e uma turbina a vapor (que dividem o sistema em zonas de alta e baixa pressão), uma caldeira e um condensador de vapor (que são responsáveis por fornecer e retirar energia do sistema na forma de calor). O calor é fornecido à caldeira por uma fonte externa, que geralmente utiliza a água como fluido operante.

A baixa temperatura de entrada na turbina a vapor (comparado com uma turbina a gás) é o motivo pelo qual o ciclo de Rankine é frequentemente usado como um ciclo de fundo para recuperar o calor rejeitado de outra forma em centrais de turbinas a gás de ciclo combinado.

Por até hoje não terem sido encontradas desvantagens que possam ser críticas ao ciclo, sua tendência é ficar estável durante muitos anos.

Ciclo Kalina

O ciclo Kalina tem grande relação e semelhança com o ciclo Rankine. A principal diferença entre eles é que, neste, usa-se uma mistura de dois fluidos de trabalho, sendo o mais comum água e amônia. Essa mistura de água-amônia já é utilizada em sistemas de refrigeração há mais de 100 anos, e sua utilização em ciclos de potência foi proposta por Alexander Kalina em 1983. Ele criou uma companhia e a chamou de Exergy como pioneira no desenvolvimento do ciclo amônia-água. Este trabalho culminou na construção da primeira planta de demonstração em Canoga Park, na Califórnia. Esta planta foi testada entre 1992 e 1997 (COELHO & MORAES, 2008).

A amônia possui a característica de evaporar a temperaturas bem menores do que a água, tornando-se assim uma substância capaz de recuperar calor a partir de fontes de baixa temperatura. Por este motivo, os ciclos Kalina possuem atrativa aplicação em ciclos finais de usinas de cogeração e em alguns sistemas geotérmicos (Júnior, 2003).

Além disso, já que a amônia é mais volátil que a água, ela irá começar a vaporizar a temperaturas mais baixas. Desta forma, as frações de amônia e água nas fases saturadas (vapor e líquida), ao longo das mudanças de fases, variam.

Ciclo Brayton

O ciclo Brayton é o ciclo utilizado como aproximação dos processos térmicos que ocorrem nas turbinas a gás. Este ciclo não possui mudança de fase e o fluido de trabalho é gasoso.

Uma das vantagens e o principal motivo deste ciclo ser utilizado em aviões e navios é a alta densidade de potência (70% em relação a outros motores), ou seja, é possível gerar muita potência comparado às máquinas de mesmo peso. Além disso, tem o fato também de que quanto menor o peso, maior a eficiência.

Algumas de suas aplicações são turbinas a gás, como turbinas aeronáuticas e turbinas estacionárias (para geração de energia) e industriais (BATISTA, 2011)

Ciclo Ericsson

O ciclo Ericsson difere do ciclo de Carnot em apenas dois momentos, quando os dois processos isentrópicos são substituídos por dois processos de regeneração a pressão constante. Sendo a regeneração um processo durante o qual calor é transferido para um dispositivo que armazena energia térmica (chamado de regenerador) durante uma parte do ciclo, e é transferido de volta para o fluido de trabalho durante a outra parte do ciclo.

Este ciclo é difícil de ser realizado na prática, porque envolve transferência de calor com uma diferença de temperatura infinitesimal em todos os componentes. Isso requer superfícies de transferência de calor infinitamente grandes, ou tempos infinitamente longos para a realização dos processos, e nenhuma das duas opções é prática. Em virtude dessas limitações, por muito tempo o ciclo Ericsson foi de interesse apenas teórico. Entretanto, existe um interesse renovado no motor que opera segundo esse ciclo, por causa de seu potencial de eficiência mais alta e melhor controle de emissões (Çengel, 2009).

À medida que o número de estágios de compressão e expansão aumenta, o ciclo Brayton com resfriamento intermediário, reaquecimento e regeneração se aproxima do ciclo Ericsson (Çengel, 2009).

Resultados

Com os dados e informações obtidas, foi criada uma tabela no Excel, contendo as principais características de cada ciclo e/ou motor. A tabela permite avaliar comparativamente de forma rápida as principais vantagens e desvantagens dos ciclos estudados.

	Carnot	Ericsson	Rankine	Kalina	Stirling	Miller	Atkinson
Vantagens	-	Silencioso, mais seguro e vida útil elevada, adaptabilidade à combustíveis	Boa eficiência, quase sem vibração, bastante sustentável, já que utiliza água como fluido, poucos problemas com as turbinas	Quando utilizado em ciclos de vapor com aplicações de baixas temperaturas, maior eficiência em relação ao ciclo rankine	Combustão contínua e não intermitente (emitindo menos poluentes), motor multcombustível e bastante silencioso	Por a válvula de admissão ficar aberta mais tempo, o pistão encontra menor resistência para a compressão dos gases, diminuindo o esforço, o que aumenta a eficiência	Devido à alta relação de expansão, obtém-se mais trabalho
Desvantagens	-	Alto investimento, arranque deve ser à quente, relativa falta de difusão tecnológica	É necessário um sistema de engrenagens para baixas rotações. Relativamente ineficiente para aplicações em baixas temperaturas	Não tem bom funcionamento quando aplicado em altas temperaturas	Motor duas vezes mais caro quando se comparado ao motor diesel que produz a mesma potência, velocidade do motor é irregular, dificuldade ao dar partida no motor	Alta complexidade mecânica quando relacionado à um motor convencional, fazendo com que seu custo de produção seja alto. Menor potência, pois há menor volume de gás.	Movimento do pistão complicado, devendo deixar as válvulas de admissão abertas durante parte do processo de compressão, acarretando em uma relação de compressão menor do que a nominal
Aplicações	Usado apenas como comparativo, não pode ser aproximado na prática	Concetradores solares, reaproveitamento da energia do escape,	Usinas de açúcar e álcool, indústrias de papel e celulose, petroquímica, alimentícia e usinas de processamento de lixo	Sistemas geotérmicos, processos de cogeração e ciclos de vapor com aplicações de baixa temperatura	Parabólicas solares, refrigeradores cryocooler, submarinos	Carros híbridos, como Ford Escapade e Toyota Prius	Carros híbridos, como Lexus RC 300h e Veloster 2019 2.0
Eficiência	-	Até 34%	Até 43%	Aumenta a eficiência em até 20% comparado ao ciclo Rankine, quando utilizado em processos com baixa temperatura	Até 45%	Até 10% mais eficiente que um ciclo Otto convencional	
Equação da Eficiência	$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$	$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$	$\eta = \frac{W_{iiq}}{q_{ent}} = 1 - \frac{q_{sai}}{q_{entra}}$		$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$	$\eta = 1 - k \frac{RC - RC1}{RC^k - RC1^k}$ $RC = \frac{v4}{v3} \text{ e } RC1 = \frac{v1}{v3}$	

	Brayton	Diesel	Lenoir	Otto	Scuderi
Vantagens	Alta densidade de potência, baixo tempo de resposta, partida e parada mais rápidas	Baixo consumo de combustível e alta confiabilidade dos motores que utilizam este ciclo	Baixa emissão de gases poluentes quando comparado à anos atrás. Diminui-se cerca de 100 vezes com relação a 1970.	Melhor performance a altas velocidades	Produz até 80% menos toxinas do que um típico motor de combustão, motor consegue produzir mais torque
Desvantagens	Ruído de alta frequência, menor vida útil, muitos componentes sob alta tensão mecânica	Preço 30% mais alto quando comparado ao ciclo Otto, vibração, ruído do motor	Baixíssima eficiência e a chama pode apagar rapidamente	Alto preço do combustível e gases poluentes	Cilindro adicional aumenta o custo do motor e também as perdas por atrito. Ainda não foi aplicado, portanto as informações ficam limitadas
Aplicações	Modelos turbojatos e grandes embarcações (engenharia naval). Ciclos combinados com ciclo Rankine	Veículos mais pesados, como caminhões, ônibus e picapes	Alguns motores de combustão a pistão usados no passado. Hoje utilizados em bombeamento de água e produção de eletricidade	Veículos leves, como carros de passeio	Veículos híbridos
Eficiência	Até 55%	30-38%	Até 5%	22-30%	Por não ter sido aplicado ainda, os valores não foram encontrados
Equação da Eficiência	$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}}$	$\eta = 1 - \frac{T_1\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{kT_2\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)}$	$\eta = 1 - \gamma \frac{T_3 - T_1}{T_2 - T_1}$	$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{(rv)^{k-1}}$ $rv = \text{relação de compressão} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$	Por não ter sido aplicado ainda, a formulação não foi realizada

	Carnot	Ericsson	Rankine	Kalina	Stirling	Miller	Atkinson
Diagramas ideais							
Potência média das aplicações reais	-	Poucas aplicações, mas que variaram entre 1-3MW	1-1200MW	1-10MW	20-140 kW	92-133 kW	110-164 kW
Tipo de combustível	-	Hidrogênio e Hélio são os mais comuns, porém vem se estudando sobre $GdCrO_4$, $ErCrO_4$	Água	Normalmente utiliza-se água e amônia	Pode-se empregar qualquer fonte de calor como combustível, como, combustíveis fósseis, biocombustíveis, energia geotérmica, luz solar. O hidrogênio é considerado o mais estável	Mistura Ar + Combustíveis leves, como álcool, gasolina e gás natural	Mistura Ar + Combustíveis leves, como álcool, gasolina e gás natural

	Brayton	Diesel	Lenoir	Otto	Scuderi
Diagramas ideais	<p>(a) Diagrama T-v</p> <p>(b) Diagrama P-v</p>	<p>(a) Diagrama P-v</p> <p>(b) Diagrama T-v</p>	<p>Pressão</p> <p>Volume</p>	<p>Fim da combustão</p> <p>Abertura da válvula de escape</p> <p>Abertura da válvula de admissão</p> <p>Admissão</p> <p>Descarga</p> <p>Compressão</p> <p>Ignição</p> <p>Expansão</p> <p>PMS PMI v</p>	Ainda não foi desenvolvido o diagrama
Potência média das aplicações reais	100kW-180MW	Até 350 kW	Até 17 kW	Até 250kW	Estima-se uma potência entre 200-300 kW
Tipo de combustível	Ar + Combustível que 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	Mistura de ar/diesel	Diversas tentativas para melhorar a eficiência, alterando o combustível, como pólvora, pó de carvão, aguarrás (destilada da resina), destilados do petróleo, álcool e hidrogênio.	Mistura Ar + Combustíveis leves, como álcool, gasolina e gás natural	Mistura Ar + Combustíveis leves, como álcool, gasolina e gás natural

Cocnlusões

Foram identificados os principais ciclos termodinâmicos utilizados na prática e feita uma análise comparativa de suas principais características. Pela forma compacta de apresentação, ela permite uma rápida avaliação dos vários ciclos termodinâmicos. Não foi encontrada na literatura a apresentação de uma análise comparativa da forma como foi apresentada neste trabalho. Não obstante, a tabela ainda não é completa. Pode ser melhorada e complementada com parâmetros característicos adicionais.

Referências Bibliográficas

- BATISTA, V. O.; (2011) *Desenvolvimento e construção da câmara de combustão de uma microturbina a gás*. Trabalho de conclusão de curso. Pato Branco: Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- BORGNACKE, Claus; SONNTAG, Richard. (2013) *Fundamentos da termodinâmica*. 8ed. Editora Blucher.
- COELHO, N. P; COELHO, P.; (2010) *Geração de Energia Geotermelétrica a partir de Plantas do tipo Kalina*.
- ÇENGEL, Y.; BOLES, M. (2006) *Termodinâmica*. McGraw-Hill, São Paulo, 5 ed.,
- FARIA, Sérgio.; (2013) *O Ciclo Termodinâmico Stirling*.
- GHANE, D. B.; *Scuderi split cycle engine: revolutionary technology & evolutionary design review* – Ahmednagar, Índia.
- LOURENÇO, C. E. R.; (2012) *Contribuição para o fabrico de motor de ciclo sobre-expandido*.
- MARTINS, J. J. G.; RIBEIRO, B. S (2007) *Desenvolvimento do conceito de motor sobre-expandido – análise teórica, numérica e experimental*.
- MENESES, E. L (2011) *O uso de turbinas a gás para geração de energia elétrica em plataformas*.
- REVOLORIO, V. A. E.; (2010) *Ventajas de um Ciclo Miller Frente a um Ciclo Diesel, en Motores de Combustión Interna, en Sistemas Electrógenos Estacionarios de Baja Velocidad*.
- SCUDERI Group Will Present Result from Split-Cycle Prototype Testinh at IAA. 2009. Disponível em: <<https://www.greencarcongress.com/2009/09/scuderi-iaa-20090908.html>>. Acesso em: 16 maio 2018
- SILVA, E. et al. *Motores de combustão interna*. 2014/2015. Mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- STONE, Richard.; (1999) *Introduction to internal combustion engines*. 3rd edition. Warrendale, Pa. Editora Society of automotive engineers, Inc.
- MACWAN, Sunil. *The Kalina Cycle – A major Breakthrough in Efficient Heat to Power Generation*. 2013. Disponível em: http://www.heatispower.org/wp-content/uploads/2013/11/Recurrent-Eng-macwan_chp-whp2013.pdf>. Acesso em: 22 setembro 2018
- The Wall Street Journal. Estados Unidos da América: [s.n.], 2009. Disponível em: <<https://www.wsj.com/articles/SB124027019500336889>>. Acesso em: 10 ago. 2018
- TIPLER, Paul; MOSCA, Gene. (2009) *Física para cientistas e engenheiros vol.1 – Mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica*. 6ed. Editora TLC.