

REVIEW OF ATKINSON CYCLE MECHANISMS APPLIED ON INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Matheus R. R. Sabka, Roberto Simoni, Thiago Hoeltgebaum, Daniel Martins

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC
matheus.sabka@grad.ufsc.br, roberto.simoni@ufsc.br,
thiagohbaum@gmail.com, daniel.martins@ufsc.br

Abstract. *This paper presents a review of the Atkinson cycle mechanisms. A review of the bibliography and technology was done and as results we identify several possibilities of unexplored kinematic chains with potential for application as Atkinson cycle mechanism. The mechanism and machine theory was applied to classify the mechanisms found in the patent search by mobility and number of loops. The classification proposed in this paper was successfully applied to classify variable compression ratio (VCR) engines. As a result, this initial study presents all possible kinematic chains that can be applied as Atkinson cycle mechanisms.*

Keywords: *Atkinson cycle, Mechanism, Thermal efficiency.*

1. INTRODUÇÃO

O ciclo térmico Atkinson foi envolvido pelo cientista James Atkinson no ano de 1885. A observação deste ciclo ocorreu na mesma época do início do desenvolvimento dos motores de combustão interna do ciclo Otto e Diesel. No entanto, devido à complexidade das cadeias cinemáticas dos mecanismos do ciclo Atkinson, os ciclos Otto e Diesel são utilizados na grande maioria dos motores de combustão interna.

O ciclo Atkinson possui um curso de compressão menor do que o curso de expansão [7]. A Figura 1 mostra o motor da patente US20110226199A1[11] cuja cadeia cinemática opera no ciclo Atkinson. Note a diferença no curso de admissão e expansão do pistão. Esta é a característica que difere o

ciclo Atkinson do ciclo Otto. A variação do curso resulta em melhor aproveitamento dos gases de combustão para a produção de trabalho. Desta forma, este ciclo térmico é utilizado para a produção de um ciclo mais eficiente termicamente quando comparado ao ciclo Otto [7]. Uma quantidade de gases no interior do cilindro requer menos combustível para a queima.

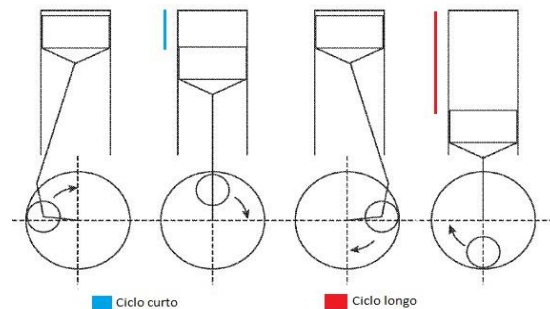


Figura 1. Mecanismo da patente US20110226199A1 operando no ciclo Atkinson. Fonte: Mohtashemi [11]

O foco deste trabalho é estudar as cadeias cinemáticas dos mecanismos do ciclo Atkinson. Os motores do ciclo Atkinson são termicamente mais eficientes, contudo a complexidade dos mecanismos que geram o ciclo Atkinson ainda reduz a aplicação prática deste ciclo. O objetivo é entender quais as características dessas cadeias cinemáticas do ciclo Atkinson e quais são as possibilidades de inovação no que tange o desenvolvimento de mecanismos de motores do ciclo Atkinson.

Existem muitas possibilidades para sintetizar cadeias cinemáticas que operem no ciclo Atkinson. Para tanto, a síntese cinemática destas cadeias cinemáticas é útil para compreender a viabilidade de aplicação em um motor de combustão interna.

2. METODOLOGIA

No desenvolvimento deste trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica da literatura para entender os conceitos fundamentais dos motores do ciclo Atkinson. Também foi realizada uma revisão da literatura da teoria de mecanismos para entender o relacionamento entre os elos e juntas da cadeia cinemática que gera mecanismos do ciclo Atkinson.

Além disso, foi realizada uma busca de patentes para entender o avanço da tecnologia dos mecanismos do ciclo Atkinson, bem como o potencial para inovação.

2.1 Revisão bibliográfica do ciclo Atkinson

A revisão bibliográfica envolve a busca na literatura em termos de artigos e livros.

Boretti e Scalzo [2] defendem o potencial da aplicação de tecnologias no setor automotivo para tornar os motores de combustão interna mais eficientes. O ciclo Atkinson é descrito com uma ótima alternativa. Ele apresenta a aplicação de um mecanismo auxiliar possível de ser implementado em uma cadeia cinemática convencional do ciclo Otto. Essa montagem possibilita o motor a operar no ciclo Atkinson e variar a taxa de compressão (VCR, em inglês). O artigo mostra resultados numéricos de simulações realizadas em motores automotivos.

Chen *et al.* [3] comparou os ciclos Otto e Atkinson, motores aspirados e turbo comprimidos. No relatório, o autor avaliou resultados entre esses quatro motores considerando parâmetros termodinâmicos e econômicos.

Yanlin *et al.* [4] pesquisou o desempenho de um motor ciclo Atkinson. Na análise, o autor considerou os efeitos de transferência de calor, atrito e variação do calor específico no fluido de trabalho. Estas considerações afetam a análise de dados comparado a um ciclo de ar ideal. O autor destaca que considerar tais efeitos é necessário para

avaliar parâmetros de combustão interna ciclo Atkinson.

Gonca *et al.* [5] analisou um motor diesel utilizando a aplicação de um mecanismo do ciclo Atkinson com sobrealimentação. Os resultados dos ensaios demonstram que houve redução na quantidade dos gases de exaustão, aumento da eficiência e da potência.

A citação das investigações descritas acima mostram a ampla exploração do motor ciclo Atkinson. Muitas análises produzem dados favoráveis à utilização de tais motores. Em vista disso, há amplo interesse de empresas e instituições no desenvolvimento de cadeias cinemáticas de mecanismos do ciclo Atkinson.

2.2 Revisão bibliográfica da teoria de mecanismos

Uma cadeia cinemática é um conjunto de elos conectados por juntas. Um mecanismo é uma cadeia cinemática em que um dos elos é fixo na base [9]. A mobilidade de um mecanismo pode ser calculada pelo critério geral da mobilidade que. Tsai [17] mostra que a equação da mobilidade é

$$M = \lambda(n - j - 1) + j \quad (1)$$

onde $\lambda = 3$ é a ordem do sistema de helicoides, n é o número de elos e j o número de juntas com um grau de liberdade da cadeia cinemática.

A mobilidade pode também ser calculada em termos do número de circuitos L da seguinte forma

$$M = j - \lambda L \quad (2)$$

A mobilidade, ou graus de liberdade refere-se ao número de parâmetros independentes necessários para definir todas as possíveis configurações do mecanismo em qualquer instante de tempo [12]. A medida que a quantidade de graus de liberdade aumenta, a cadeia cinemática tende a ser mais complexa devido ao aumento da quantidade de elos e juntas.

2.3 Revisão tecnológica de mecanismos de motores do ciclo Atkinson

A revisão tecnológica envolve a busca de patentes de mecanismos de motores do ciclo Atkinson. Neste trabalho foram estudadas as seguintes patentes apresentadas na Tabela 1, as quais estão entre as mais citadas na base de dados do Google Patents.¹ A pesquisa de patentes utilizando esta ferramenta foi preliminar, focada apenas nas patentes mais citadas por outros autores.

Tabela 1. Identificação das patentes estudadas.

| Patente | Inventor | M | L |
|----------------------|--------------------------|---|---|
| US20110226199 A1[11] | Bahman Mohtashemi | 1 | 2 |
| US 7185615B2 [14] | Honda | 1 | 3 |
| US 7661395B2 [18] | Honda | 1 | 3 |
| US4380972 [13] | Parkins Malcom Frederick | 1 | 4 |
| US 5927236 [6] | Luis Marino Gonzalez | 2 | 2 |
| US8074612 B2 [15] | Hyundai | 2 | 3 |
| US7228838 B2 [1] | Nissan | 2 | 4 |
| US8794200 B2 [10] | GM | 2 | 4 |

Nas patentes estudadas foi possível observar que os mecanismos apresentam mobilidade $M = 1$ e $M = 2$ e número de circuitos $L = 2$, $L = 3$ e $L = 4$, conforme mostram as colunas 3 e 4 da Tabela 1.

Dadas as Eq. (1) e (2) e as patentes estudadas na Tabela 1, surge uma maneira de classificar os mecanismos do ciclo Atkinson pela mobilidade e número de circuitos. Essa classificação foi utilizada por Hoeltgebaum, Simoni e Martins [8] para classificar os mecanismos de motores com taxa de compressão variável (VCR, em inglês). Assim, as patentes estudadas podem ser classificadas da seguinte forma:

- $M = 1, L = 2$
- $M = 1, L = 3$
- $M = 1, L = 4$
- $M = 2, L = 2$
- $M = 2, L = 3$
- $M = 2, L = 4$

¹ Google Patents. <https://patents.google.com/>

3. DISCUSSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresenta um estudo inicial em mecanismos do ciclo Atkinson. Nesta abordagem inicial, percebe-se que poucas cadeias cinemáticas foram exploradas.

A Tabela 2 mostra todas as possíveis cadeias cinemáticas com potencial de aplicação para motores do ciclo Atkinson, de acordo com a classificação proposta na seção anterior, sendo as cadeias cinemáticas planas ($\lambda = 3$) com $M = 1, 2$; $L = 2, 3, 4$.

Tabela 2. Número de cadeias cinemáticas planas. Fonte: Simoni *et al.* [16]

| Mobilidade | Circuitos | | |
|------------|-----------|---------|---------|
| | $L = 2$ | $L = 3$ | $L = 4$ |
| M | | | |
| 1 | 2 | 16 | 230 |
| 2 | 3 | 35 | 753 |

A Tabela 2 mostra que o número de cadeias cinemáticas com potencial de gerar mecanismos do ciclo Atkinson é grande e existe a necessidade de fazer um mapeamento completo do número de mecanismos com uma busca de patentes mais avançada. Essa abordagem permitirá identificar os potenciais para inovação em cadeias cinemáticas dos motores do ciclo Atkinson.

5. RESULTADOS E CONCLUSÃO

A revisão bibliográfica e tecnológica de mecanismos do ciclo Atkinson auxiliou a identificação de características similares das cadeias cinemáticas, conforme apresentado na Tabela 2. As patentes pesquisadas avaliaram mecanismos com mobilidade $M = 1, 2$; e número de circuitos $L = 2, 3, 4$. A grande quantidade de patentes neste campo de estudo aponta para a possibilidade real de aplicação das cadeias cinemáticas de mecanismos ciclo Atkinson em motores de combustão interna. No entanto, salienta-se a necessidade de um exame mais aprofundado por meio de uma busca de patentes mais completa.

6. REFERÊNCIAS

- [1] AOYAMA, Shunichi; MOTOKI, Katsuya; TAKEMURA, Shinichi. **Internal combustion engine**. U.S. Patent n. 7,228,838, 12 jun. 2007.
- [2] BORETTI, Alberto; SCALZO, Joseph. Novel crankshaft mechanism and regenerative braking system to improve the fuel economy of passenger cars. In: **Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress**. Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 19-44
- [3] CHEN, Josh *et al.* **Internal Combustion Engine: Atkinson Cycle**. Disponível em: http://brandonyangcad.weebly.com/uploads/1/8/3/2/18324641/atkinson_cycle_report.pdf Último acesso em: 30 de maio de 2016.
- [4] GE, Yanlin *et al.* Performance of an Atkinson cycle with heat transfer, friction and variable specific-heats of the working fluid. **Applied Energy**, v. 83, n. 11, p. 1210-1221, 2006
- [5] GONCA, Guven *et al.* Application of the Miller cycle and turbo charging into a diesel engine to improve performance and decrease NO emissions. **Energy**, v. 93, p. 795-800, 2015.
- [6] GONZALEZ, Luis Marino. **Variable stroke mechanism for internal combustion engine**. U.S. Patent n. 5,927,236, 27 jul. 1999.
- [7] GUPTA, Hari N. **Fundamentals of internal combustion engines**. PHI Learning Pvt. Ltd., 2012.
- [8] HOELTGEBAUM, Thiago; SIMONI, Roberto; MARTINS, Daniel. Reconfigurability of engines: A kinematic approach to variable compression ratio engines. **Mechanism and Machine Theory**, v. 96, p. 308-322, 2016
- [9] IONESCU, T. Gt. Terminology for mechanisms and machine science. **Mech. Mach. Theory**, v. 38, n. 7-10, p. 819-825, 2003.
- [10] JACQUES, Robert Lionel; JOCSAK, Jeff. **Engine assembly with phasing mechanism on eccentric shaft for variable cycle engine**. U.S. Patent n. 8,794,200, 5 ago. 2014.
- [11] MOHTASHEMI, Bahman. **Radial internal combustion engine with different stroke volumes**. U.S. Patent Application n. 12/728,145, 19 mar. 2010.
- [12] NORTON, Robert L. **Cinemática e dinâmica dos mecanismos**. AMGH Editora, 2010.
- [13] PARKINS, Malcolm F. **Internal combustion engines**. U.S. Patent n. 4,380,972, 26 abr. 1983.
- [14] SATO, Yoshikazu; WATANABE, Sei. **Variable stroke engine**. U.S. Patent n. 7,185,615, 6 mar. 2007.
- [15] SHIN, Min Sig *et al.* **Variable compression ratio apparatus**. U.S. Patent n. 8,074,612, 13 dez. 2011.
- [16] SIMONI, R. *et al.* Enumeration of kinematic chains and mechanisms review. In: **13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato, México**. 2011. p. 19-25.
- [17] TSAI, Lung-Wen. **Mechanism design: enumeration of kinematic structures according to function**. CRC press, 2000
- [18] WATANABE, Sei; KONO, Shohei; NAOE, Gaku. **Stroke-variable engine**. U.S. Patent n. 7,661,395, 16 fev. 2010.