



Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Gabriel Luis Felic - RA 146145  
Curso: Eng. Elétrica Noturno - 41

## **Injeção de Água em um Motor a Combustão Ciclo Otto**

Orientador(a): Renato da Rocha Lopes

Campinas

2º semestre de 2020

## **Resumo**

A injeção de água durante o ciclo de combustão de um motor visa aumentar a eficiência energética e a diminuição da emissão de poluentes pelo veículo. Com o controle do motor feito via microcontrolador, pode-se conseguir uma execução mais eficiente quando comparada à atual estratégia de controle e operação. Assim oferece-se uma opção de tecnologia inovadora ao mercado de veículos atuais que vêm buscando tais melhorias.

Palavras-chave: Injeção de água, eficiência, microcontrolador.

## 1 Introdução

Há muito pesquisadores desenvolvem projetos na busca por métodos alternativos para melhora da eficiência energética e redução da emissão de poluentes do motor a combustão. Dentre as diversas opções encontradas, algumas se baseiam na busca por novas estratégias de manejo da combustão, outras em adaptações no combustível a ser utilizado, ou até mesmo na pesquisa por aditivos a serem adicionados ao combustível comum.

Além disso, para alcançar o objetivo de melhora na eficiência e redução de emissão de poluentes por motores a combustão, é preciso confirmar a viabilidade dos projetos desenvolvidos e as suas melhoras oferecidas através de testes em dinamômetros que verifiquem a durabilidade entres outros fatores a serem levados em consideração.

Este trabalho visa o desenvolvimento da implementação de injeção de água via software, de maneira similar ao mecanismo mais utilizado atualmente nos combustíveis comuns (etanol ou gasolina). Esta pesquisa iniciou-se em outubro de 2018, sendo que parte dela (até fevereiro de 2020) foi realizada durante estágio na *Marelli Sistemas Automotivos Indústria e Comércio Ltda*, que disponibilizou laboratórios para ensaios motores e acesso aos sistemas de desenvolvimento de *software*, para que fosse possível operar a injeção de água no motor a combustão, conforme o necessário.

A parte do estudo que se deu durante o referido estágio, por facilidade de contato com o sistema de inovação da equipe de *software* da Marelli, foi o desenvolvimento do *software* que faria o controle da injeção de água. Durante o estágio foi desenvolvido (de outubro de 2018 a julho 2019) um sistema eletrônico analógico para a comprovação dos conceitos, com testes preliminares em busca de resultados positivos para a continuidade da pesquisa em tal âmbito. Com medidas prévias e bem simples baseadas no circuito eletrônico analógico pode-se confirmar a viabilidade do estudo e continuar com o desenvolvimento (de agosto de 2019 a fevereiro de 2020) do controle via *software* da lógica programacional para o controle das válvulas injetoras de água.

Pela impossibilidade de dar continuidade ao estágio devido a pandemia da Covid-19, o desenvolvimento da pesquisa deu-se de forma assíncrona, com acesso remoto e auxílio da equipe que opera o laboratório do dinamômetro da *Marelli* (fevereiro de 2020 a novembro de 2020). Assim, foi possível realizar ensaios em dinamômetro e coleta dos dados para a discussão dos resultados obtidos na aplicação do *software* desenvolvido. Neste segundo momento também foi feito levantamento bibliográfico sobre o assunto.

## 1.1 Justificativa

A injeção de água num motor ciclo Otto se faz interessante a partir da premissa da redução da emissão de poluentes e aumento da eficiência do motor [1], tornando assim o motor de injeção comum mais competitivo para se manter no mercado ao enfrentar novas tecnologias, como o GDI (*gasoline direct injection*).

## 1.2 Objetivos

O atual trabalho visa desenvolver uma estratégia de gerir via *software* a injeção de água num motor a combustão, avaliando o seu impacto no aumento da eficiência energética do motor a combustão e na redução de emissão de gases poluentes, em contrapartida ao sistema de *software* atual de gestão do motor.

## 2 Metodologia

O primeiro passo da pesquisa deu-se através da validação dos ganhos da proposta por meio da injeção de água no motor através de uma montagem simples. Posteriormente, com uma montagem eletrônica, replicou-se e controlou-se o sinal do injetor de combustível para o injetor de água, através de ensaios nos laboratórios da Marelli.

Validados os ganhos, incluiu-se o controle da injeção de água na ECU (*eletronic control unit*) via *software* de maneira similar ao controle da injeção de combustível, já existente e desenvolvido pela empresa. Graças ao controle embarcado no sistema já existente, o desenvolvimento deu-se de maneira mais simplificada e rápida.

Nesta pesquisa utilizou-se uma ECU de desenvolvimento de um veículo com injeção “*tetra fuel*”, obtendo-se acesso aos relés de acionamento da injeção de GNV (*gás natural veicular*), utilizados na injeção da água. Este acesso ao comando dos relés do GNV foi implementado na estratégia de *software*, de maneira embarcada.

Levou-se em consideração devidas adaptações no *software* de acionamento dos relés para estarem de acordo com as devidas demandas para que o fluido água fosse acionado, e não mais o GNV, dadas as diferenças de viscosidade e densidade.

Atualmente existe uma lógica programacional de sobre injeção, através da qual se injeta combustível de maneira sobressalente onde tal combustível excedente não é queimado e nem gera energia útil ao motor. O objetivo da técnica é resfriar o motor em momentos de alta demanda de torque, e assim preservar a integridade mecânica das peças.

A ideia principal por detrás da injeção de água é substituir esta sobre injeção pela injeção de água via *software*. Este cálculo de sobre injeção é reutilizado no cálculo da água apenas com a adição de um ponderador na lógica de manejo programacional, dado que a capacidade térmica da mistura de combustível é diferente da água utilizada, com o objetivo do resfriamento das peças mecânicas do motor. Tal sobre escrita está ilustrada de maneira explicativa na figura 2.

Para tanto, é necessário considerar a composição da mistura de combustível a ser utilizada, assim como os módulos do *software* (aqui figurativamente nomeados de), calculador da injeção e sobre-injetor fazem. Esta consideração também revela que a composição do etanol brasileiro traz em si uma quantidade de água já prevista, o que pode diminuir a efetividade do sistema de injeção de água em quão maior for a concentração de etanol na mistura de combustível. Estas composições a serem levadas em consideração estão demonstradas na figura 1.

# Common ethanol fuel mixtures

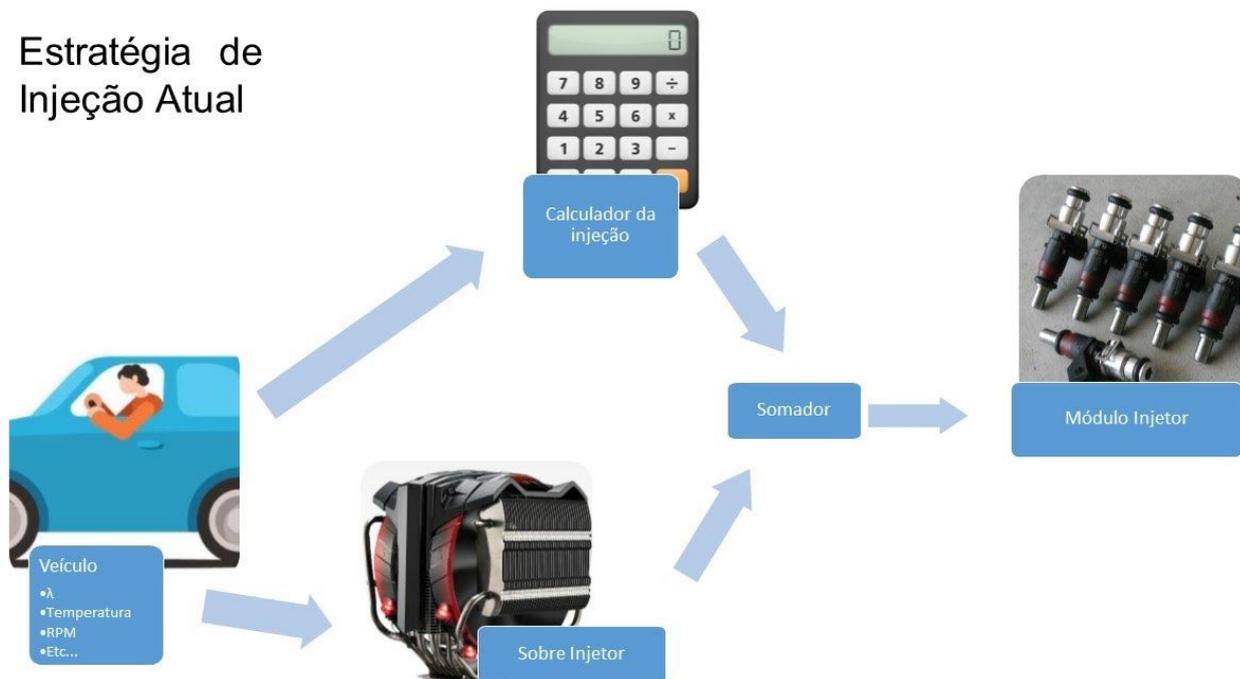
Code	E5	E10	E15	E25	E85	E100
Composition	max 5% anhydrous ethanol  min 95% gasoline	max 10% anhydrous ethanol  min 90% gasoline	max 15% anhydrous ethanol  min 85% gasoline	max 25% anhydrous ethanol  min 75% gasoline	max 85% anhydrous ethanol  min 15% gasoline	~5.3% water  100% Brazilian hydrous ethanol (contains on average 5.3 vol.% water)
Countries	Western Europe today	USA today (Western Europe in near future)	USA EPA approval cars > 2000	Brazil	USA / Europe	Brazil

Gasoline blends for use in regular cars
Flex Fuel Vehicles

Figura 1: Misturas comuns de etanol utilizadas [17].

Os cálculos dos valores de injeção, sobre injeção e equivalência da capacidade térmica são omitidos por serem propriedades da *Marelli*.

## Estratégia de Injeção Atual



## Proposta de Injeção de H<sub>2</sub>O

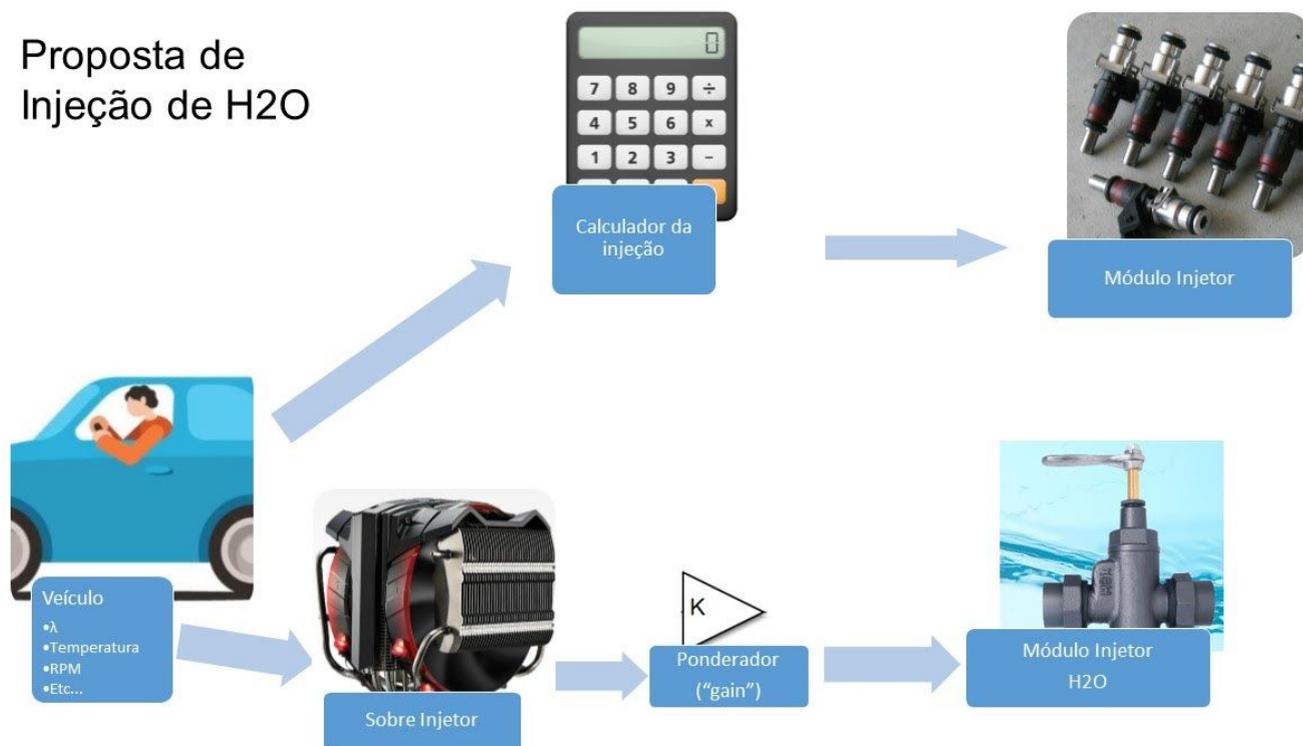


Figura 2: Comparativo dos métodos de injeção (via *software*) atuais e propostos.

Os cálculos dos módulos de *software* aqui nominados como "calculador do injetor" e "sobre injetor" são dependentes das variáveis lidas dado o funcionamento do motor, como a mistura do combustível utilizada (representada por  $\lambda$ ), a

temperatura do motor, o número de ciclos por minuto do motor (RPM) e outras variáveis não detalhadas neste estudo.

Com uma montagem com uso de um osciloscópio e um simulador específico, deseja-se verificar o correto acionamento das válvulas de injeção de água de acordo com o *software* proposto na figura 2.



Figura 3: Proposta de injeção de água para duas diferentes situações.

Na figura 3 observamos o sinal de entrada, que seria o valor a ser comandado pela válvula de injeção de combustível comum, nos sinais de situação 1 e 2 vemos o sinal que comanda a válvula de injeção de água. O sinal de saída (comando da água) deve acompanhar o sincronismo temporal de injeção do motor (comando do combustível), no ciclo dos 4 cilindros, e também o momento de início da injeção da água também deve ser o mesmo do momento do início da injeção do combustível. Além disso, também verificamos que a quantidade a ser injetada de água foi menor que a quantidade de combustível, assim como o esperado, dado o tempo menor de acionamento da válvula a uma vazão constante de fluido (no caso água no injetor de água, e combustível no injetor de combustível). As situações 1 e 2 demonstram necessidades diferentes de se arrefecer a câmara de combustão (por exemplo o número de rotações por minuto (*RPM*) da situação 2 é maior que o *RPM* da situação 1), tanto que na situação 2 a quantidade de água a ser injetada é maior em relação à situação 1. Com essa leitura do osciloscópio dos sinais enviados às válvulas injetoras foi verificado o correto funcionamento do controle proposto para a injeção de água.

Por fim, é necessário realizar medidas para comparação entre o sistema atual de sobre injeção e o sistema de injeção de água proposto. Com o uso de um dinamômetro, mede-se o consumo específico ( $C_e$ ) e a temperatura do motor.

O consumo específico é a razão entre a massa de combustível e a potência efetiva gerada no motor. O consumo específico reflete quão mais potência uma mesma quantidade de combustível é capaz de gerar. Em resumo, quão menor for o consumo específico melhor é o rendimento do motor.

A medição do consumo específico se faz necessária para se comprovar, ou não, a eficácia na redução do consumo de combustível, e indiretamente na emissão de poluentes. A massa do combustível é medida por um rotâmetro como o mostrado na figura 4, onde dada a mistura de combustível utilizada temos o conhecimento do valor da massa específica do combustível. Para a medida da potência efetiva gerada pelo motor faz se uso de um dinamômetro, exemplificado na figura 5.

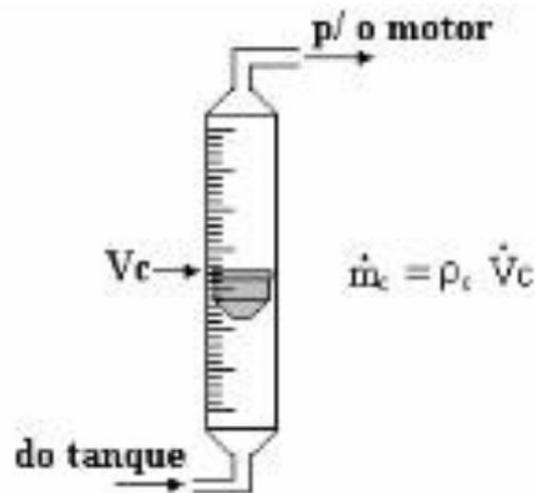


Figura 4: Rotâmetro, medidor de vazão volumétrica [9].

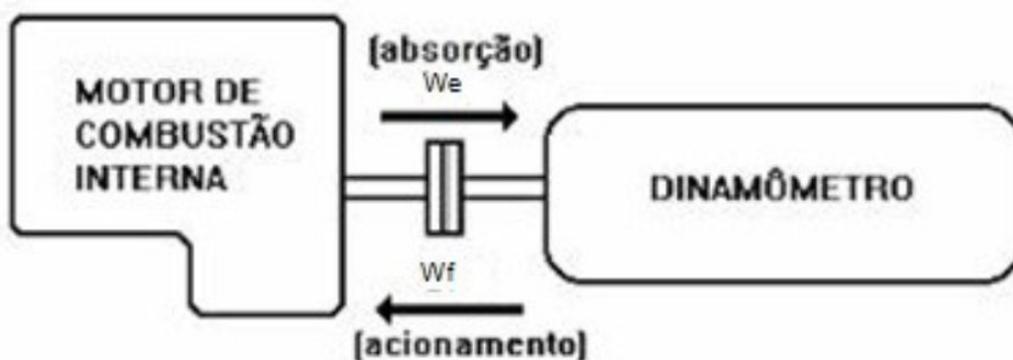


Figura 5: Esquema de um dinamômetro, sendo o  $W_e$  a potência efetiva do motor [9].

Já a medição da temperatura de operação do motor é necessária para se comprovar que a função de resfriamento é tão eficaz com a sobre injeção quanto com a injeção de água. Essa medida se dará após cerca de 5 minutos de operação ininterruptos do motor para que tenha sido atingida a temperatura de equilíbrio em operação nas condições testadas.

### 3 Resultados e Discussão

Para o início da análise dos resultados fez-se um ensaio, em que o motor estudado, com o sistema original, foi posto em funcionamento no dinamômetro, com uso de gasolina, lendo seu consumo específico ( $C_e$ ) para valores padrões de rotação por minuto (RPM). Neste ensaio comparativo realizou-se também um ensaio com uso do sistema de *software* implementando a injeção de água e medindo seu  $C_e$  para os mesmos valores de RPM. Durante este ensaio, outra variável de interesse era a temperatura do motor durante o seu funcionamento, para avaliarmos o funcionamento da água como equivalente a sobre injeção para resfriar a câmara de combustão. O comparativo entre os  $C_e$  's está na figura 6, e a comparação entre as temperaturas na figura 7.

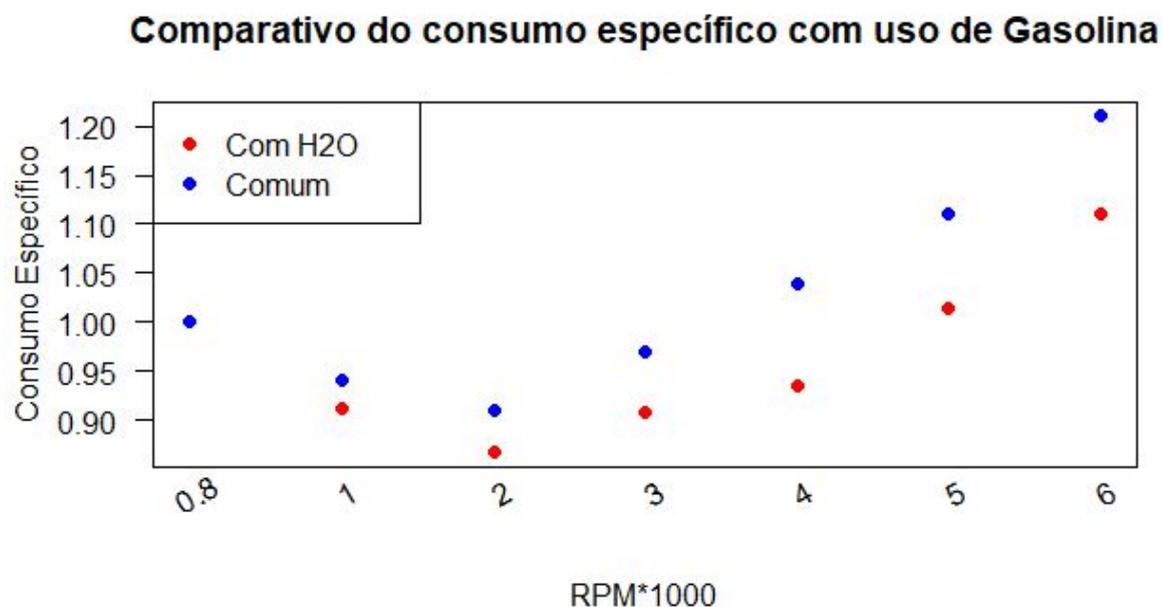


Figura 6: Comparação entre os  $C_e$  's com e sem o uso da água num motor a gasolina.

## Comparativo da Temperatura do motor com uso de Gasolina

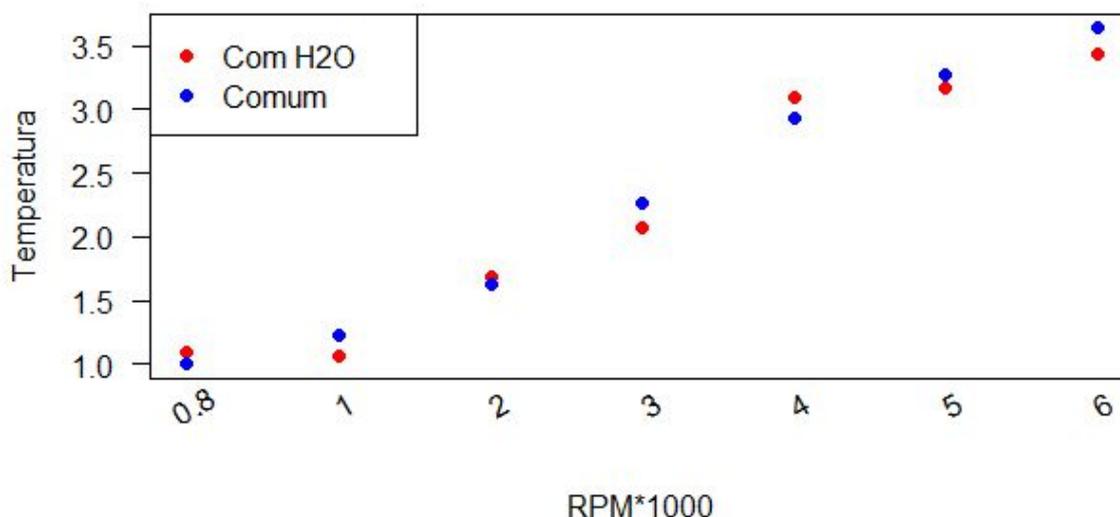


Figura 7: Comparação entre as temperaturas do motor com e sem o uso da água num motor a gasolina.

Os valores de RPM utilizados são valores que representam figurativamente o funcionamento do motor em situações corriqueiras do seu uso cotidiano na sua aplicação para mover um veículo. Estes valores de RPM foram repetidos nos próximos ensaios com diferentes misturas de combustível. O valor inicial de 800 RPM representa o motor em “marcha neutra” onde não existe carga conectada via dinamômetro ao motor, e não verificamos diferença entre os dois sistemas por que o módulo “sobre injetor” neste momento não realiza a sobre injeção, então não existe “perda” de gasolina útil para o sistema de sobre injeção no caso do sistema original.

Os valores de Consumo específico ( $C_e$ ) foram aqui normalizados em função do valor do  $C_e$  no sistema original a 800 RPM (como na fórmula 1 a seguir), com o intuito de facilitar a visualização da diferença entre os valores encontrados nos dois sistemas.

$$C_e \text{ normalizado} = \frac{C_e \text{ lido}}{C_e \text{ a } 800 \text{ RPM sistema original}}$$

Fórmula 1: normalização dos  $C_e$ 's.

Nos valores da temperatura também foi realizada similar normalização de valores, para facilitarmos a sua leitura.

Assim, na figura 6 pode-se observar a diferença dos  $C_e$ 's a rotações maiores, dado que a temperatura do motor aumenta significativamente, então existe

a necessidade de maiores valores de sobre injeção. A diferença entre os valores dos Ce's do sistema original e do com injeção de água se dá exatamente por não estarmos utilizando mais o combustível, neste caso a gasolina, como fluido resfriador da câmara de combustão do motor, e a substituindo por água.

Esta diferença também é devida a baixa capacidade térmica da gasolina em comparação a água, pois com a mesma quantidade de gasolina se arrefece menos a câmara de combustão em relação a quantidade necessária de água.

Na figura 7 observa-se que independentemente do sistema utilizado, original ou com injeção de água, há variações da temperatura do motor equivalentes, mostrando que para o uso com gasolina a injeção de água foi tão eficiente quanto a sobre injeção para manter controlada a temperatura dentro da câmara de combustão. Valores maiores ou menores podem ser devido variações da composição da gasolina utilizada e do próprio funcionamento do motor em conjunto ao dinamômetro.

Foi feito então um ensaio comparativo usando se mistura de 50% gasolina e 50% etanol, lembrando da composição do etanol representada na figura 1, e este ensaio sendo apresentado na figura 8 a comparação entre os Ce 's e na figura 9 a comparação entre as temperaturas.

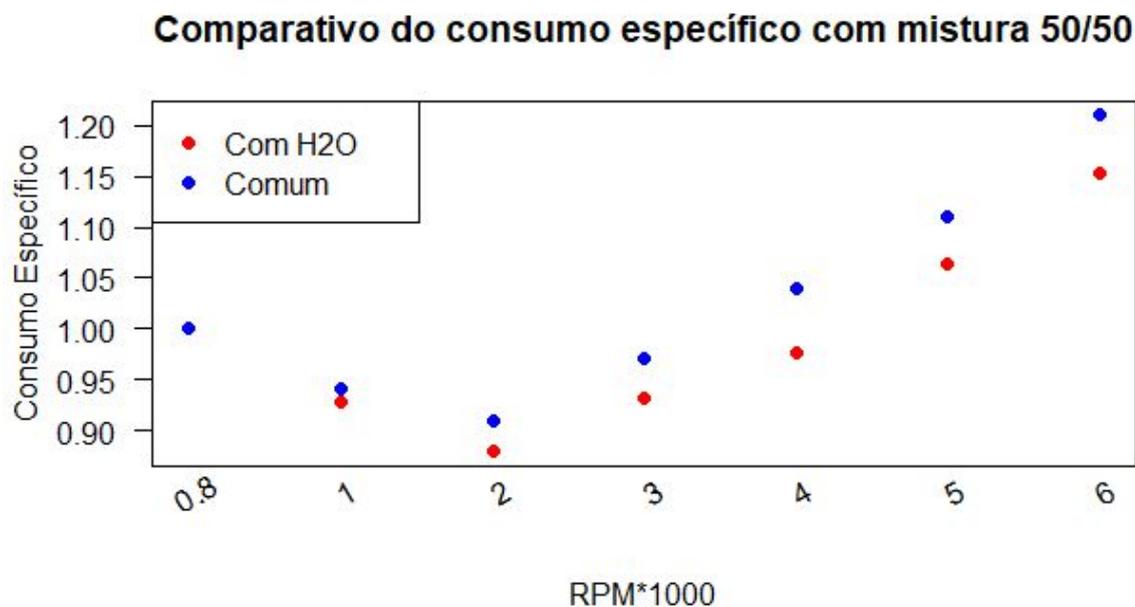


Figura 8: Comparação entre os Ce 's com e sem o uso da água num motor com mistura de 50% de gasolina e 50% de etanol.

## Comparativo da Temperatura do motor com mistura 50/50

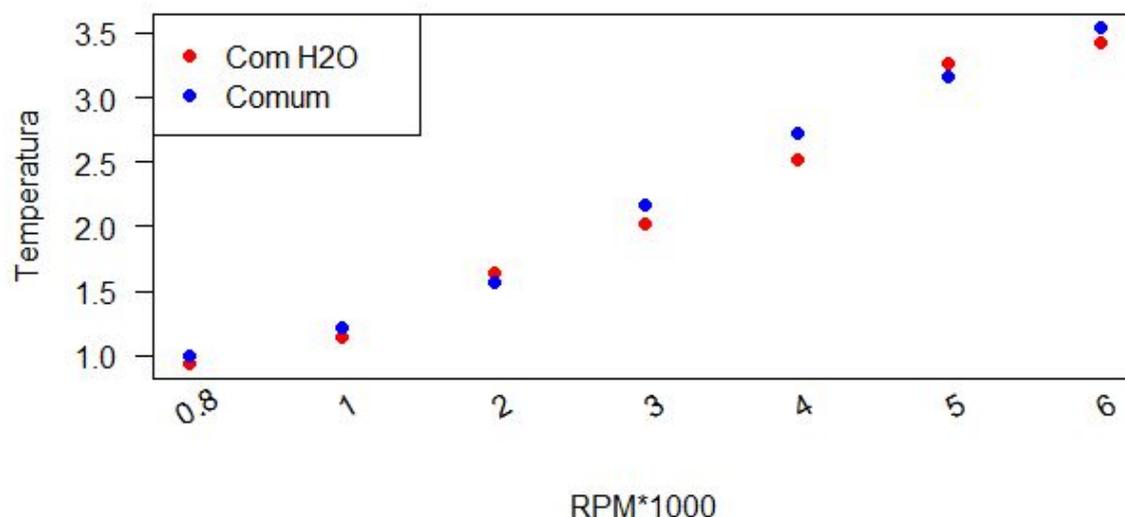


Figura 9: Comparação entre as temperaturas do motor com e sem o uso da água num motor com mistura de 50% de gasolina e 50% de etanol.

Neste caso, a diferença entre os  $C_e$ 's se fez menor, porque o módulo de sobre injeção identificou a menor necessidade de sobre injeção, dada a mistura de etanol junto a gasolina, lembrando novamente da composição do etanol utilizado que já prevê água em sua mistura e assim envia menores valores tanto de sobre injeção quanto ao módulo da injeção de água.

Novamente, como observou-se na figura 9, tem-se equivalência do controle da temperatura do motor entre os sistemas de injeção de água e sobre injeção.

Para o comparativo com o uso de apenas etanol no funcionamento do motor, fez-se mais um ensaio, utilizando novamente o motor com sistema original e com injeção de água para sua comparação, apresentando na figura 10 a comparação dos  $C_e$ 's e na figura 11 a temperatura.

### Comparativo do consumo específico com uso de Etanol

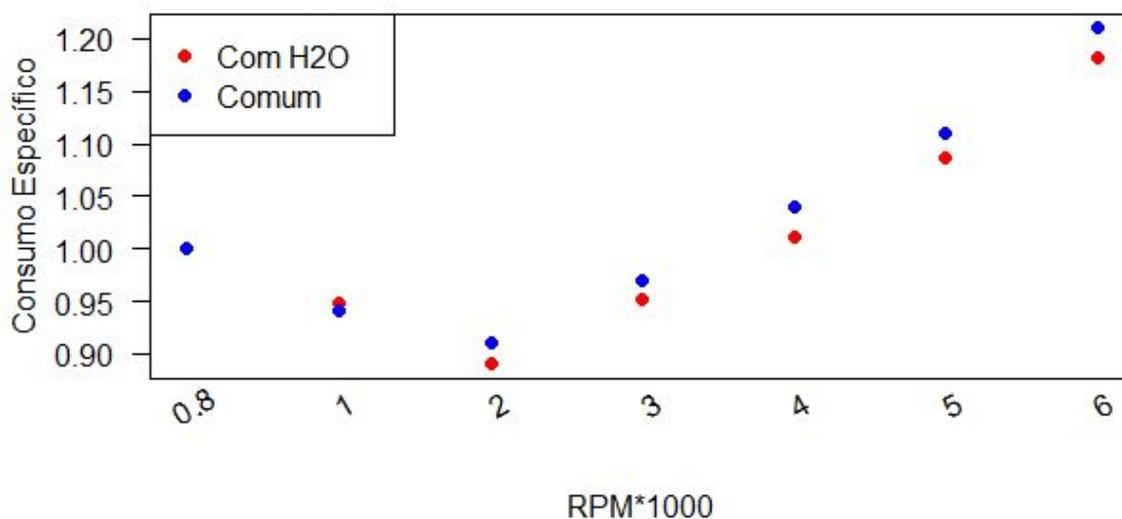


Figura 10: Comparação entre os Ce 's com e sem o uso da água num motor a etanol.

### Comparativo da Temperatura do motor com uso de Etanol

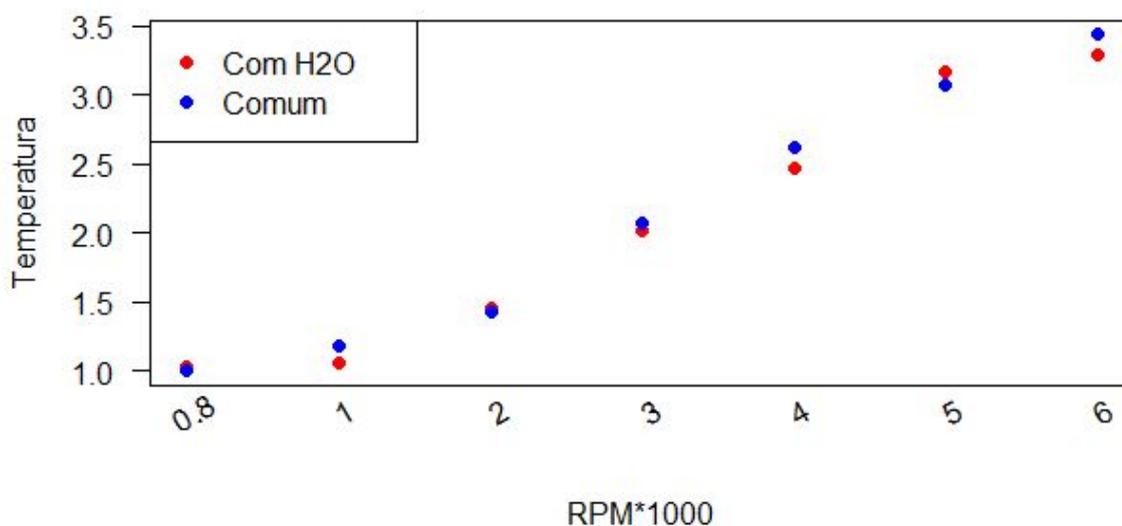


Figura 11: Comparação entre as temperaturas do motor com e sem o uso da água num motor a etanol.

Aqui vê-se ainda maior impacto da composição do etanol, cujo valor necessário da sobreinjeção se faz menor ainda, implicando em valores de quantidade de água injetada menores, e a diferença entre os dois sistemas se torna bem menor. Assim como o imaginado previamente. E outra vez obteve-se o controle

da temperatura do motor relativamente bem mantida em comparação ao sistema original.

#### **4 Conclusões**

O sistema desenvolvido para controle da injeção de água cumpre a premissa de manter a temperatura do motor equivalente ao sistema já implementado de sobre injeção.

Num motor operando exclusivamente a gasolina seu impacto é relevante na diminuição do consumo específico e, conseqüentemente, na diminuição da emissão de gases poluentes e também no aumento da eficiência energética do motor. Já em um motor com uma mistura mais rica em etanol, a eficiência da injeção de água é diminuída, dado que o etanol já possui em sua composição um percentual de água significativa (cerca de 5%). Assim o etanol por si só já realiza parte da função aqui proposta para a injeção de água.

Ainda existem outras vertentes a serem exploradas, quanto ao momento da injeção de água, que pode estar deslocado em relação ao momento da injeção do combustível, e também em relação ao que pode ocorrer em mais de um momento por ciclo, assim ainda aumentando a eficiência do sistema. Outra questão a ser explorada, refere-se a como o sistema de injeção de água pode esfriar ainda mais o motor do que o esperado pelo sistema de sobre injeção, desenvolvendo um módulo "calculador do injetor de água" independente do sobre-injeção (tornando a sobre injeção obsoleta), e em conjunto fazer com que o módulo "calculador da injeção" exija ainda mais potência.

#### **5 Referências**

[1] Wei Mingrui, Nguyen Thanh Saa, Richard FiifiTurkson, Liu Jinping, Guo Guanlun. Water injection for higher engine performance and lower emissions. Energy Institute. Published by Elsevier Ltd; 2015

[2] Noguchi M, Tanaka Y, Tanaka T, Takeuchi Y. A study on gasoline engine combustion by observation of intermediate reactive products during combustion. SAE Technical Papers; 1979.

[3] Zhang Y, Zhao H. Investigation of combustion, performance and emission characteristics of 2-stroke and 4-stroke spark ignition and cai/hcci operations in a di gasoline. Appl Energy 2014;130:244–55.

- [4] Pan M, Wei H, Feng D, et al. Experimental study on combustion characteristics and emission performance of 2-phenylethanol addition in a downsized gasoline engine. *Energy* 2018;163:894–904.
- [5] Lei Shia, Changwei Jia, Shuofeng Wang, Xiaoyu Conga, Teng Sua, Cheng Shib. Impacts of dimethyl ether enrichment and various injection strategies on combustion and emissions of direct injection gasoline engines in the lean-burn condition.
- [6] Jorge Valero-Marcoa, Bastian Lehrheuerb, J. Javier López, Stefan Pischingerb. Potential of water direct injection in a CAI/HCCI gasoline engine to extend the operating range towards higher loads.
- [7] Oliveira Junior, Motores de combustão interna, FATEC –SP, 1997.
- [8] Heywood, J. B. *Internal Combustion Engines Fundamentals*, McGraw-Hill Inc., 1988.
- [9] Taylor, C. *Análise dos Motores de Combustão Interna*. Edgard Blucher, 1976.
- [10] Taylor, C. F., *Análise dos Motores de Combustão Interna*. Edgard Blucher Vol. II, 1984
- [11] Rowland S. Benson, N. Whitehouse, *Internal Combustion Engines Vol. I*, 1979
- [12] Rowland S. Benson, N. Whitehouse, *Internal Combustion Engines Vol. II*, 1979.
- [13] Michael, P., Anthony M. *Engine Testing—Theory and Practice*, BH, 2nd Edition, 1999
- [14] Richard, S., *Introduction To Internal Combustion Engines*, 1999.
- [15] Ferguson, Colin., *Internal Combustion Engines : Applied Thermal Sciences*, New York, NY: John Wiley, c1986
- [16] Carvalho, Márcio Augusto Sampaio De. *Avaliação De Um Motor De Combustão Interna Ciclo Otto Utilizando Diferentes Tipos De Combustíveis*, 2011.
- [17] <https://www.hisour.com>, Common ethanol fuel mixtures, 2018.