

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Mariana Medeiros Ghizoni

**COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DE
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO
INTERNA**

Cachoeira do Sul, RS
2021

Mariana Medeiros Ghizoni

**COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DE SIMULAÇÃO
NUMÉRICA DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheira Mecânica**.

Orientador: Prof. Dr. Juan Galvarino Cerda Balcazar

Co-orientador: Prof. Dr. Vinícius Rückert Roso

Cachoeira do Sul, RS

2021

Mariana Medeiros Ghizoni

**COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DE SIMULAÇÃO
NUMÉRICA DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheira Mecânica**.

Aprovado em 15 de julho de 2021:

Prof. Dr. Juan Galvarino Cerda Balcazar (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Prof. Dr. Vinícius Rückert Roso

Prof. Dr. Charles Rech

Prof. Dr. Cristiano Frandalozo Maidana

Cachoeira do Sul, RS
2021

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a toda a minha família, a qual me incentivou durante toda a minha vida, e me apoiou em momentos de dificuldade.

Ao meu Professor Orientador, Juan Galvarino Cerda Balcazar, e meu Professor Co-Orientador, Vinicius Rückert Roso, pela orientação, acessibilidade e paciência.

Aos professores Flavio Vanderlei Zancanaro Junior e Charles Rech, pelo fornecimento de dados de trabalhos experimentais prévios, os quais serviram de base para o presente trabalho de conclusão.

Ao Laboratório de Motores da UFSM e o Grupo de Pesquisa em Motores, Combustíveis e Combustão (GPMOT), pelos recursos utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Maria, por todo o aprendizado ao longo destes anos de graduação, os quais permitiram realizar a conclusão deste trabalho de conclusão de curso.

RESUMO

COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

AUTOR: Mariana Medeiros Ghizoni

ORIENTADOR: Juan Galvarino Cerda Balcazar

Diante da utilização de motores de combustão interna, atualmente estudos para aumento de eficiência estão cada vez mais presentes. Com os avanços tecnológicos dos computadores há uma tendência para a utilização de recursos computacionais, os quais contribuem para os projetos de motores. Neste contexto, o presente trabalho propõe a realização da simulação computacional da combustão de um motor de combustão interna através de uma modelagem numérica unidimensional no *software* GT-POWER, que utiliza um modelo Wiebe para caracterizar a combustão. As características geométricas do motor monocilíndrico Honda GX35 foram adicionadas como parâmetros de entrada de um modelo, operando no ciclo Otto, com o volume deslocado de 35,8 cm³, naturalmente aspirado e com relação volumétrica de compressão de 8:1. A simulação numérica foi realizada assumindo uma temperatura constante de 450K nas paredes do cilindro, considerando gás metano como combustível e rotação de 3600 rpm, a plena carga. Após a simulação, foram obtidos o diagrama P-V, que descreve o comportamento do volume e da pressão no sistema, a curva de pressão absoluta no interior do cilindro, dados de vazão mássica de ar na admissão, fração mássica queimada e temperatura no interior do cilindro. Os resultados foram comparados com resultados prévios, publicados em outros trabalhos, os quais analisaram o mesmo motor nas mesmas condições de operação. A simulação apresentou resultados com diferenças de vazão mássica de ar na admissão em relação aos resultados experimentais, com um valor máximo de vazão mássica numérico de 6,13g/s a 441°, enquanto o valor máximo experimental é de 4,35g/s a 475°. A curva de pressão absoluta no interior do cilindro e o diagrama P-V obtidos na simulação chegaram a valores próximos aos valores experimentais, mesmo com as diferenças de resultados de vazão mássica de ar na admissão, devido a um ajuste feito nos ângulos de FMQ 50% (ângulo em que há 50% de fração mássica queimada), ajustando o valor numérico para 33°, enquanto o valor experimental é de 41,7°. Com isso, a pressão absoluta no interior do cilindro teve um valor máximo da curva numérica de 16,47 bar, em 19,8°, enquanto que o valor máximo da curva experimental é de 16,1 bar, em 17,8°. O modelo numérico mostrou-se capaz de representar um motor de combustão interna operando nas condições específicas que foram impostas neste estudo, apresentando as maiores diferenças na comparação de valores experimentais e numéricos de vazão mássica de ar e na curva de fração mássica queimada, com um erro percentual relativo de 20,86% em na FMQ 50%.

Palavras-chave: Motor de combustão interna; simulação numérica; modelos numéricos unidimensionais.

ABSTRACT

COMPARISON BETWEEN EXPERIMENTAL AND NUMERICAL SIMULATION RESULTS OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE

AUTHOR: Mariana Medeiros Ghizoni
ADVISOR: Juan Galvarino Cerda Balcazar

In view of the use of internal combustion engines, currently studies to increase efficiency are increasingly present. With technological advances in computers, there is a trend towards the use of computational resources, which contribute to engine designs. In this context, the present work proposes to carry out a computational simulation of the combustion of an internal combustion engine through a one-dimensional numerical modeling in the GT-POWER program, which uses a Wiebe model to characterize the combustion. The geometric characteristics of the Honda GX35 single-cylinder engine were added as input parameters for a model, operating in the Otto cycle, with a displaced volume of 35.8 cm³, naturally aspirated and with a volumetric compression ratio of 8:1. The numerical simulation was performed assuming a constant temperature of 450K in the cylinder walls, considering methane gas as fuel and rotation of 3600 rpm, at full load. After the simulation, the P-V diagram was obtained, which describes the behavior of the volume and pressure in the system, the absolute pressure curve inside the cylinder, data on the inlet air mass flow, burned mass fraction and temperature inside the cylinder. The results were compared with data from experimental tests taken from works available in the literature. The simulation presented considerably different inlet air mass flow results compared to the experimental results, with a maximum numerical mass flow value of 6.13g/s at 44.1°, while the maximum experimental value is 4.35g/s at 47.5°. The absolute pressure curve inside the cylinder and the PV diagram obtained in the simulation reached values close to the experimental values, even with the differences in the inlet air mass flow results, due to an adjustment made in the angles of FMQ 50% (angle at which there is 50% of the mass fraction burned), adjusting the numerical value to 33°, while the experimental value is 41.7°. Thus, the absolute interior pressure inside the cylinder had a maximum value of the numerical curve of 16.47 bar, at 19.8°, while the maximum value of the experimental curve is 16.1 bar, at 17.8°. The numerical model was able to represent an internal combustion engine operating under the specific conditions that were imposed in this study, presenting the greatest differences in the comparison of experimental and numerical values of air mass flow and in the burned mass fraction curve, with a relative percentage error of 20.86% in FMQ 50%.

Keywords: Internal combustion engine; numerical simulation; one-dimensional numerical models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Quatro tempos de um motor de combustão interna	11
Figura 2 - Motor Honda GX35	15
Figura 3 - Motor monocilíndrico constituído no GT-Power	18
Figura 4 – Vazão mássica de ar na admissão	21
Figura 5 – Fração mássica queimada	22
Figura 6 - Pressão absoluta no interior do cilindro	23
Figura 7 - Diagrama P-V do motor GX35	24
Figura 8 - Diagrama logP-logV	25
Figura 9 – Temperatura média no interior do cilindro.....	25

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	OBJETIVO.....	8
1.2	JUSTIFICATIVA.....	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1	MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.....	10
2.2	SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	11
3	METODOLOGIA	15
3.1	CARACTERÍSTICAS DO MOTOR SIMULADO	15
3.2	MODELO DO MOTOR NO SOFTWARE	16
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	20
5	CONCLUSÕES	26
6	REFERÊNCIAS	27

1 INTRODUÇÃO

A revolução industrial evoluiu os processos de fabricação de produtos com um determinado valor agregado. Para atender a essa produção de maneira mais eficiente, com tempos de produção e custos menores, foi empregado o uso de máquinas térmicas. Dentre essas máquinas, estão os motores de combustão interna, que permitiram conciliar velocidade e qualidade na fabricação dos produtos, atendendo a demanda do período (FERREIRA, 2017).

Os motores de combustão interna têm como propósito transformar a energia térmica, proveniente da queima de combustível, em energia mecânica (HEYWOOD, 1988). Eles são mais populares pela sua aplicação em veículos automotores, que são um dos principais meios de transporte de pessoas e cargas no mundo, o que torna os motores de combustão interna dispositivos amplamente utilizados (ZANCANARO, 2014).

Diante desse grande emprego de motores de combustão interna, estudos para aumento de eficiência estão cada vez mais presentes. Com os avanços tecnológicos dos computadores há uma tendência para a utilização de recursos computacionais nesses estudos, os quais contribuem para os projetos de motores, proporcionando muitas vezes uma economia de tempo e investimentos financeiros que seriam demandados em ensaios experimentais (ZANCANARO, 2014).

Neste contexto, o presente trabalho propõe a simulação numérica de um motor de combustão interna Honda GX35, através do software GT-Power, a fim de obter resultados como a curva de pressão no interior do cilindro, e compará-los a dados experimentais extraídos dos estudos de Zancanaro (2014) deste modelo de motor, validando a metodologia selecionada.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem por finalidade comparar resultados experimentais e numéricos de um motor de combustão interna utilizando um modelo numérico computacional para obter dados simulados.

1.2 JUSTIFICATIVA

Ensaio experimentais para análise e obtenção de dados de combustão muitas vezes demandam altos investimentos de tempo e recursos financeiros. Este estudo teve como contribuição principal a previsão de dados de um motor de combustão interna através de uma

modelagem numérica unidimensional, e a comparação destes resultados com os dados de trabalhos obtidos em ensaios experimentais. Além da comparação de dados simulados e dados experimentais, foram obtidos os valores de temperatura no interior do cilindro, durante os quatro tempos do motor. A modelagem numérica unidimensional possibilitou a previsão de parâmetros importantes dos motores de combustão interna, como a pressão absoluta no interior do cilindro, vazão mássica de ar e diagrama P-V, em um curto espaço de tempo, com um custo computacional baixo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, o estado da arte dos motores alternativos de combustão interna de quatro tempos e a simulação numérica desses motores foram abordados, tratando as suas características.

2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Motores de combustão interna são máquinas térmicas que convertem energia térmica em trabalho mecânico, tendo como entradas, o ar e o combustível, e como saídas, o trabalho realizado, os gases queimados e as perdas de energia (em forma de calor, ruídos ou vibrações (BRUNETTI, 2012).

Os motores alternativos de combustão interna são assim denominados pois têm como princípio um êmbolo operando em um movimento alternativo, provocado pela combustão de um combustível específico (gasolina, diesel, álcool, gás natural veicular, etc). A combustão aumenta a pressão e fornece energia para o conjunto de biela, manivela e árvore de manivelas, que por sua vez transformam o movimento alternativo em um movimento de rotação.

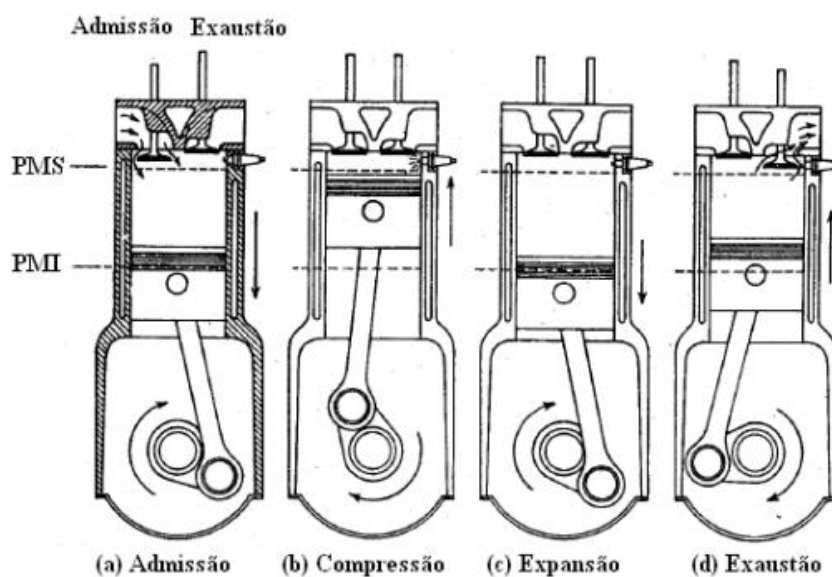
Nos motores quatro tempos, o pistão percorre quatro cursos em um ciclo completo, realizando duas revoluções. Os quatro tempos, de acordo com a Figura 1, correspondem aos tempos de admissão, compressão, expansão e escape. Onde, segundo Heywood (1988), os quatro tempos de um motor de combustão interna podem ser descritos da seguinte forma:

1. O primeiro tempo é admissão. Onde, uma válvula denominada válvula de admissão se abrirá para entrada do fluido ativo (sendo este ar ou ar/combustível, dependendo do tipo de motor), fazendo com que o pistão se desloque do ponto morto superior (PMS) ao ponto morto inferior (PMI);
2. Em seguida, no segundo tempo do ciclo, ocorre a compressão. Onde, a válvula de admissão se fechará, e o pistão comprime a mistura disposta dentro do cilindro, seguindo novamente em direção ao PMS. Com a mistura comprimida, ocorre a ignição, que acionará o processo de combustão;
3. O terceiro tempo do motor, é o tempo de expansão/explosão. A combustão causada pela ignição, provocará um aumento de pressão suficientemente grande, a ponto de fazer com que o pistão se desloque novamente para o PMI;

4. Finalmente, no tempo de escape, a válvula de escapamento se abrirá. O pistão se deslocará em direção ao PMS, conduzindo para fora do cilindro os gases provenientes da combustão, iniciando o ciclo novamente.

Para que o processo de combustão visto na Figura 1 ocorra, o combustível deve reagir com o oxigênio do ar. O sistema de ignição é o agente que iniciará a combustão. Os motores alternativos são subdivididos em dois tipos de ignição fundamentais: Motores de Ignição por Centelha e Motores de Ignição por Compressão (BRUNETTI, 2012).

Figura 1 - Quatro tempos de um motor de combustão interna



Fonte: Adaptado de Heywood (1988) por Zancanaro (2014)

Nos motores de ciclo Otto, segundo o Brunetti, 2012, o combustível é introduzido no processo de admissão. A ignição no ciclo Otto se dá por uma centelha, gerada pelo sistema elétrico do veículo, que ocorre entre os eletrodos da vela de ignição. O motor de ciclo Otto possui a resistência à autoignição do combustível como uma de suas limitações. Isso faz com que a razão de compressão desse motor seja restrita.

2.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Com a evolução das tecnologias, os recursos computacionais têm adquirido maior velocidade e confiabilidade, além de estarem cada vez mais acessíveis no mercado. Esses recursos têm contribuído para com o desenvolvimento de motores, proporcionando uma economia de tempo e investimentos financeiros. As ferramentas de análise de dinâmica dos fluidos computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) são aplicadas nesta área e, se

os resultados precisarem de um alto nível de detalhes, essas simulações podem levar semanas para apresentarem os resultados esperados, principalmente quando se tratam de modelos numéricos tridimensionais. Os softwares de modelagens unidimensionais, por sua vez, permitem avaliar as características gerais dos motores de combustão interna através de uma abordagem 1D para os cálculos de vazões de massa, considerando a configuração geométrica em uma só dimensão, não demandando um alto esforço computacional (RANZI, 2014).

Zancanaro (2014), em seus estudos, aplicou uma simulação numérica tridimensional ao motor monocilíndrico HONDA GX35, que é do mesmo modelo de motor utilizado no presente trabalho, desenvolvendo uma validação de metodologias numérica e experimental, a fim de analisar o comportamento relativo do escoamento em motores de combustão interna. A avaliação teve como base soluções numéricas pelo método dos volumes finitos, utilizando o programa comercial Star-cd/es-ice.

No final da análise, a método numérica apresentou um resultado com mesma ordem de grandeza se comparada com resultados experimentais no que se referia ao comportamento geral para a pressão interna no cilindro e vazão mássica de ar na admissão. Vale ressaltar que a modelagem em 3D requer um alto esforço computacional, e foi viável para este estudo por se tratar de uma análise específica (ZANCANARO, 2014).

Carvalho et al. (2017), em seus estudos que avalia utilizando metamodelos para identificar a influência de diferentes formulações de gasolina no comportamento do combustível, de modo a relacionar as propriedades físico-químicas dos combustíveis com a eficiência, desempenho e emissões gasosas. Metamodelos são modelos analíticos baseados em diferentes técnicas matemáticas e estatísticas utilizados para aproximar o comportamento de fenômenos complexos em função de dados multidimensionais. De acordo com um conjunto de informações coletadas em ensaios experimentais, os metamodelos foram obtidos, utilizando diferentes funções, com o objetivo de prever o torque, o consumo de combustível, a eficiência global e a emissão de CO₂. Um procedimento de validação cruzada foi aplicado, a fim de selecionar automaticamente o melhor metamodelo para cada caso. Os metamodelos puderam realizar uma estimativa dos resultados experimentais de cinco combustíveis dentro dos intervalos de confiança de 95% e na maior parte da previsão os resíduos foram menores que 3%.

Ranzi (2014) realizou a simulação computacional de emissões geradas por um motor monocilíndrico, através do software AVL BOOST, um *software* de modelagem numérica unidimensional para simulação de motores de combustão interna, com o auxílio de dados experimentais. O trabalho foi desenvolvimento primeiramente com a validação de metodologia,

avaliando aspectos gerais o motor e, posteriormente, realizando a previsão de espécies químicas geradas durante a combustão. Com base nos resultados, a metodologia foi satisfatória nas análises realizadas, podendo as diferenças entre dados experimentais e simulados serem explicadas pela variação da mistura ar/combustível em regime transiente que, como visto em ensaios experimentais, não se manteve constante.

Com base nos estudos analisados, o presente trabalho apresenta características de uma simulação unidimensional, por não estar focado em uma peculiaridade da combustão, e sim, nas características gerais, tendo suas demandas cumpridas por um *software* 1D.

Yang e Liu (2012) em seus estudos investigaram os efeitos de diferentes parâmetros da estrutura de admissão sobre o desempenho de um motor, por meio do *software* de modelagem unidimensional GT-Power, com o objetivo de melhorar a potência e reduzir as emissões de um motor Ciclo Otto com sistema de admissão aspirado que usa a gasolina como combustível. O supra estudo foi realizado com base nas análises de frequências harmônicas, que são frequências específicas de vibração capazes de ocasionar o fenômeno de ressonância.

O motor a gasolina do estudo foi configurado no GT-Power, com a inserção de dados obtidos em ensaios experimentais. Depois, o efeito harmônico do sistema de entrada foi estudado através de análises de espectro de onda de pressão. Os resultados mostraram que o efeito harmônico tem grande impacto no tipo de motor do estudo, podendo o desempenho dinâmico deste ser melhorado em todas as rotações com aprimoramentos dos parâmetros do sistema de admissão.

Lanzanova (2013), através de simulações numéricas e ensaios experimentais, realizou um trabalho de análise de desempenho de um motor monocilíndrico ciclo Otto operando com etanol em variados percentuais de hidratação. Testes em dinamômetro foram executados com o etanol hidratado comercial e com misturas de etanol e água em maiores percentuais de hidratação. As simulações computacionais que proporcionaram a análise da combustão foram realizadas por meio de software de modelagem unidimensional GT-Power.

Em suas simulações, Lanzanova (2013), conseguiu alcançar operação estável com misturas de até 40% de água em etanol, e ocorreu aumento da eficiência térmica para misturas de até 30% de água. O estudo concluiu que a utilização de etanol hidratado em alto grau pode ser uma solução viável no que se refere à redução do custo de geração de energia do motor utilizado no trabalho.

Silva (2016) realizou em seus trabalhos, através do uso do *software* GT-Power um estudo de viabilidade técnica do emprego de um sistema de turbocompressor, a fim de reduzir a temperatura do ar de admissão de motores ciclo Otto, aumentando sua eficiência volumétrica.

O motor do estudo foi reproduzido no software. Nele foi acoplado um turbocompressor de baixa temperatura (TCBT), onde seu funcionamento foi comparado ao de um turbocompressor convencional.

Nos resultados de Silva (2016) foi encontrada uma melhoria máxima de 7% no torque, a 4600 rpm, e uma temperatura mínima do ar na borboleta de 39°C, 16°C menor que a do turbo convencional. O estudo concluiu que o sistema é funcional, mas não oferece uma evolução significativa em relação à eficiência do motor, devendo ser avaliadas outras tecnologias disponíveis que ofereçam um intervalo maior com o funcionamento aprimorado.

Vieira (2017) em seus estudos realizou uma simulação numérica unidimensional de um motor de ciclo dois-tempos, a gasolina e com ignição por centelha elétrica, operando com diferentes taxas de compressão e pontos de ignição. O modelo do motor foi reproduzido no software GT-Power com os dados geométricos e parâmetros de desempenho como pressão no cilindro e potência útil obtidos previamente em ensaios experimentais.

Em seus experimentos, Vieira (2017) realizou análises para avaliar os coeficientes de descarga das janelas internas do motor. A simulação original do motor apresentou resultados com diferença inferior a 7% em relação aos dados experimentais, nos parâmetros pressão média efetiva útil e indicada, potência útil, consumo específico útil de combustível, massa de ar e massa de ar retida.

Em suas simulações que Vieira (2017) realizou com a variação da taxa de compressão e ponto de ignição indicaram a possibilidade de aumento da eficiência e potência, mas com um acréscimo da taxa máxima de aumento de pressão. Os resultados apresentados mostraram potencial de melhoria de potência e eficiência para motores de combustão interna através de aumento da taxa de compressão e avanço de ignição.

3 METODOLOGIA

Nesta seção, foi apresentada a metodologia utilizada no presente trabalho. O motor do estudo foi representado no software com o auxílio de dados do fabricante e dados de entrada experimentais, e os resultados da simulação do motor a 3600 rpm, em plena carga, foram comparados com resultados gerados dos estudos de Zancanaro (2014) - que realizou ensaios experimentais com este modelo de motor - com o objetivo de validar esta metodologia.

3.1 CARACTERÍSTICAS DO MOTOR SIMULADO

O motor selecionado para este trabalho é um monocilíndrico Honda GX35, com aplicação comercial em roçadeiras, equipamentos de construção, equipamentos agrícolas, bombas de água, entre outros, e está representado na Figura 2.

Figura 2 - Motor Honda GX35



Fonte: Honda, 2012

Na Tabela 1 estão as principais características do motor monocilíndrico Honda GX35, que é naturalmente aspirado:

Volume deslocado	35,8 cm ³
Relação volumétrica de compressão	8:1
Torque líquido máximo	1,6 Nm a 5500 rpm
Ignição	Centelha
Tipo	4 tempos arrefecido a ar

Tabela 1 – Características do motor GX35

3.2 MODELO DO MOTOR NO SOFTWARE

O *software* utilizado para este estudo é o GT-Power, da empresa Gamma Technologies. Este é um software de simulações 0D, 1D ou 3D de sistemas mecânicos ou elétricos, sendo utilizado principalmente em simulações aplicadas à área veicular. Os modelos computacionais de motores de combustão interna são constituídos no GT-Power a partir de blocos, que são encontrados na biblioteca interna do software e representam os diversos componentes do motor. Estes blocos contêm os dados e equações necessários para modelar as peças ou sistemas, além de campos em que são inseridos dados de entrada desejados pelo usuário. Assim, as simulações consistem na resolução do conjunto de equações associadas através dos blocos (Gamma Technologies, 2015).

Para solucionar as equações referentes aos escoamentos, o GT-Power realiza uma discretização das partes inseridas na montagem e, adota, para cada volume, equações de equilíbrio de energia (solução explícita) ou entalpia (solução implícita) e momentum (quantidade de movimento). A equação da conservação de energia em um volume de controle pode ser descrita como a sua taxa de variação de energia E sendo igual à soma das quantidades de energia associadas ao escoamento por meio de sua fronteira (trabalho W e calor Q). Por possuírem ordem de grandeza muito menor (Gamma Technologies, 2015) que os outros termos da equação, as trocas de calor referentes à condução nas fronteiras fluido-fluido do volume de controle são desprezadas, assim

$$\frac{DE}{Dt} = \frac{DW}{Dt} + \frac{DQ}{Dt} \quad (3.1)$$

Reescrevendo a equação (3.1),

$$\frac{d(me)}{dt} = p \frac{dV}{dt} + \sum_e \dot{m}_e H_e - \sum_s \dot{m}_s H_s - h_c A_{sup} (T_f - T_p) \quad (3.2)$$

Onde,

$$\dot{m} = \rho Au \quad (3.3)$$

onde V é o volume de controle que chamaremos de VC, H_e e H_s são as entalpias de entrada e de saída dos fluxos do VC, T_f e T_p são as temperaturas do fluido “f” e da parede “p”, h_c é o coeficiente de troca de calor por convecção, p é a pressão estática e A_{sup} é a área da superfície do VC.

A equação de conservação da quantidade de movimento pode ser definida como a soma das forças de pressão líquidas e as forças de cisalhamento, atuando nas superfícies do volume de controle, e ao fluxo líquido de quantidade de movimento pela superfície do volume de controle, sendo iguais à taxa de variação da quantidade de movimento relacionado ao volume de controle, assim

$$\frac{d\dot{m}}{dt} = \frac{dpA + \sum_e \dot{m}_e U_e - \sum_s \dot{m}_s U_s - 4C_f \frac{\rho U^2 dx A}{D} - C_{Press} \left(\frac{\rho U^2}{2}\right) A}{dx} \quad (3.4)$$

Onde os termos da equação são definidos como

$$H = e + \left(\frac{p}{\rho}\right) \quad (3.5)$$

$$h_c = 0,5 C_f \rho U_{ef} C_p P_r^{-\frac{2}{3}} \quad (3.6)$$

$$C_{Press} = \frac{p_e - p_s}{\frac{1}{2} \rho u_e^2} \quad (3.7)$$

O último termo da equação (3.4) é adicionado a fim de modelar a perda de pressão causada pelos efeitos tridimensionais do escoamento, como curvaturas, cones ou escoamentos secundários. Caso não informado pelo usuário do software, este coeficiente será calculado através de correlações empíricas (cones) e/ou tabelas (curvaturas).

Neste estudo, o método selecionado foi o explícito, pois, de acordo com o manual do *software*, este é o método que obteve os melhores resultados para situações onde existem pulsações de pressão, ocorrência de grande relevância nos sistemas de admissão e exaustão de motores de combustão interna. Neste método, o cálculo das grandezas baseia-se nos campos do passo de tempo anterior, é direto e não requer iterações. A fim de garantir estabilidade numérica, o passo de tempo Δt é imposto de forma automática, respeitando a condição de Courant (Gamma Technologies, 2015)

$$\left(\frac{\Delta t}{\Delta x}\right) (|u| + c) \leq 0,8 * tm \quad (3.8)$$

onde Δx é o menor comprimento da discretização espacial, u representa a velocidade do fluido, c é a velocidade do som, e tm corresponde ao multiplicador de passo de tempo, e pode ser especificado pelo usuário, considerando as configurações da simulação.

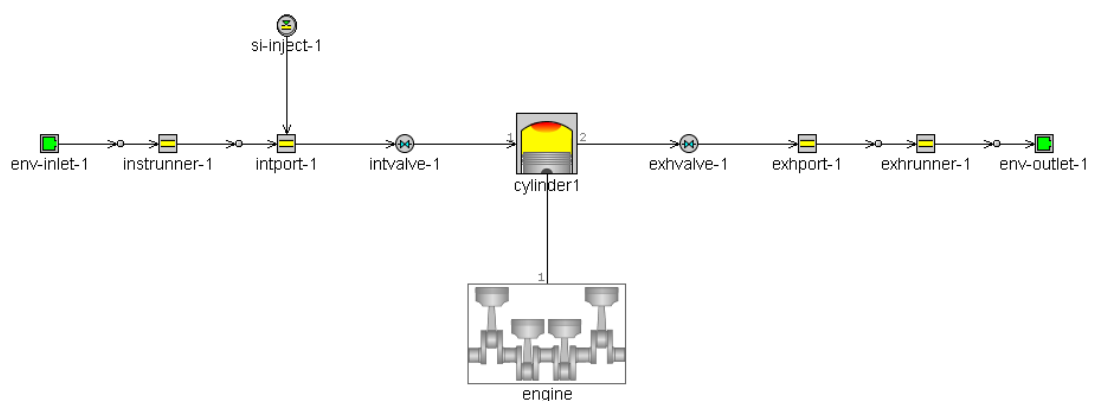
No centro dos volumes são calculadas a densidade, pressão e temperatura, enquanto que nas fronteiras são calculados os dados de ordem vetorial, como vazões e velocidades. As perdas de carga são calculadas com os valores de rugosidade do material, a partir de modelos selecionados pelo usuário, ou selecionados de forma automática pelo GT-Power, considerando as características do escoamento.

O coeficiente de transferência de calor é obtido para cada volume discretizado em função das propriedades termofísicas do fluido, da rugosidade do tubo e da velocidade do escoamento. A combustão é modelada no cilindro utilizando as informações de mistura inicial. Essas informações são empregadas ao modelo de combustão selecionado e a composição e o estado dos gases de exaustão são obtidos (Gamma Technologies, 2015). No caso deste trabalho, o modelo de combustão é o modelo de Wiebe, que representa a evolução da fração de massa queimada no tempo (HEYWOOD, 1988)

$$m_b = 1 - \exp \left[-a \left(\frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta} \right)^{m+1} \right] \quad (3.9)$$

onde m_b é a fração de massa queimada, θ é o ângulo do eixo de manivelas, θ_0 é o ângulo do eixo de manivelas no início da combustão, $\Delta\theta$ é a duração da combustão. Os coeficientes a e m são ajustados conforme os dados experimentais, e possuem valores usuais de 5 e 2, respectivamente, na literatura para motores Otto.

Figura 3 - Motor monocilíndrico constituído no GT-Power



Fonte: Autores

Os componentes básicos desta modelagem são o *EngCylinder* e *EngineCrankTrain*, que são pacotes presentes no GT-Power e fazem a representação do cilindro e do bloco do motor. Estes objetos estabelecem a geometria do motor, juntamente com outras características. Neste trabalho, estes componentes foram caracterizados a partir de dados obtidos no trabalho de Zancanaro (2014) e no site do fabricante, operando no ciclo Otto, a 3600 rpm. Além das características geométricas vistas anteriormente, foram inseridos dados de temperatura de 300K para o cabeçote, 300K para o pistão e 350K para o cilindro.

A ligação do cilindro aos dutos de admissão e exaustão se dá por meio de componentes de conexão do tipo *Valve*Conn*. Nestes componentes, foram impostos dados geométricos e as coordenadas das curvas de abertura das válvulas, tanto na admissão quanto na exaustão, fazendo com que o modelo considere o cruzamento de válvulas que ocorre no motor deste estudo. As máximas aberturas de válvulas impostas são de 2,82mm para admissão e 2,80mm para exaustão, segundo o estudo experimental de Zancanaro (2014).

Os objetos que representam as portas de admissão e exaustão (*intrunner e extrunner*) fazem a simulação de dutos e divisões de escoamento. Nestes objetos, foram inseridos parâmetros geométricos, com diâmetros dos coletores de 10mm para admissão e 13mm para exaustão.

Os objetos *inj*conn* representam os injetores de combustível. Neste componente, o combustível inserido foi gás metano, o mesmo utilizado durante os experimentos de Zancanaro (2014). A relação ar-combustível foi especificada como $\lambda = 0.977$ (que corresponde a razão de equivalência na relação ar-combustível real entre a relação considerada ideal ou estequiométrica para uma mistura), o qual foi o valor médio verificado durante os estudos experimentais.

Os ambientes externos que realizam troca de fluidos com os sistemas de admissão e exaustão são modelados por objetos do tipo *environment*. Nestes ambientes foram inseridas condições normais de temperatura e pressão (298K e 1bar).

Em todos os componentes do motor há parâmetros específicos preenchidos com valores recomendados pelo GT-Power, no manual de simulação deste tipo de motor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados e discussões obtidos na simulação numérica do motor GX 35. Resultados numéricos foram comparados aos resultados experimentais nos gráficos de vazão mássica de ar, pressão absoluta no interior do cilindro, diagrama P-V, diagrama logP-logV e fração mássica queimada.

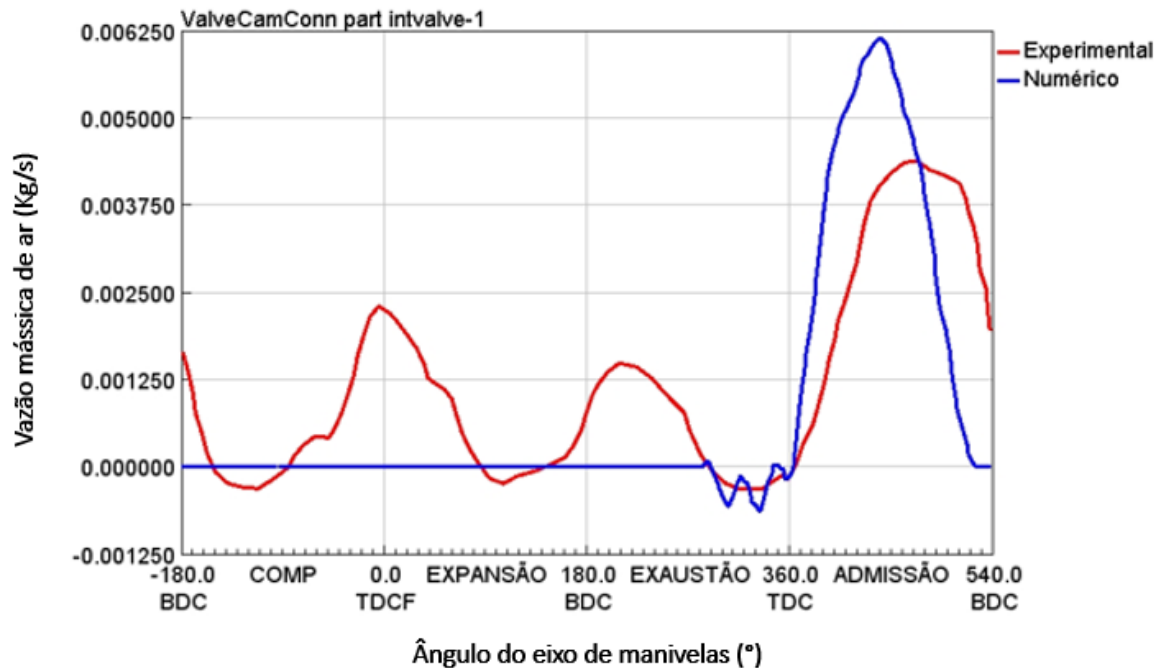
4.1 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA

Após a inserção dos parâmetros no *software*, previstos na metodologia, os gráficos experimentais foram inseridos neste trabalho para comparações com os resultados numéricos.

A figura 4 ilustra os dados experimentais e numéricos da evolução da vazão mássica de ar em função do ângulo do eixo de manivelas. O máximo valor de vazão mássica no experimento é de 4,35g/s a 475°, enquanto o valor máximo numérico chega a 6,13g/s a 441°. Observa-se uma considerável disparidade entre os resultados, e o principal fator desta diferença, segundo o estudo de Zancanaro (2014) está vinculado às diferentes perdas de cargas presentes entre os estudos. No ensaio experimental, o coletor possui uma perda de carga localizada, causada pela adaptação do sensor MAF (*Mass Air Flow*) utilizado para obter os resultados de vazão mássica de ar. Este sensor não está previsto no modelo numérico, fazendo com que este sofra menores perdas de carga, culminando em maiores velocidades e, maior massa de ar admitida (ZANCANARO, 2014).

Além disso, os resultados experimentais apresentaram duas amplitudes positivas na evolução da vazão, após o fechamento da válvula. As amplitudes positivas são maiores que as amplitudes negativas, o que indica que a massa não é conservada. Para um melhor entendimento deste fenômeno, um estudo foi realizado. Observou-se que, embora haja a afirmação dada pelo fabricante de que o anemômetro meça a vazão nos dois sentidos do escoamento, nota-se que não está medindo corretamente o escoamento no sentido da atmosfera, subestimando a vazão neste sentido. Por fim, subentendeu-se que os picos inferiores deveriam ter amplitudes negativas maiores, respeitando assim, a conservação de massa, o que não ocorreu, em razão do sensor MAF não representar corretamente a medição no sentido do escoamento contrário ao enchimento do motor (contrafluxo) (ZANCANARO, 2014).

Figura 4 – Vazão mássica de ar na admissão



Adaptação dos Autores e Zancanaro (2014)

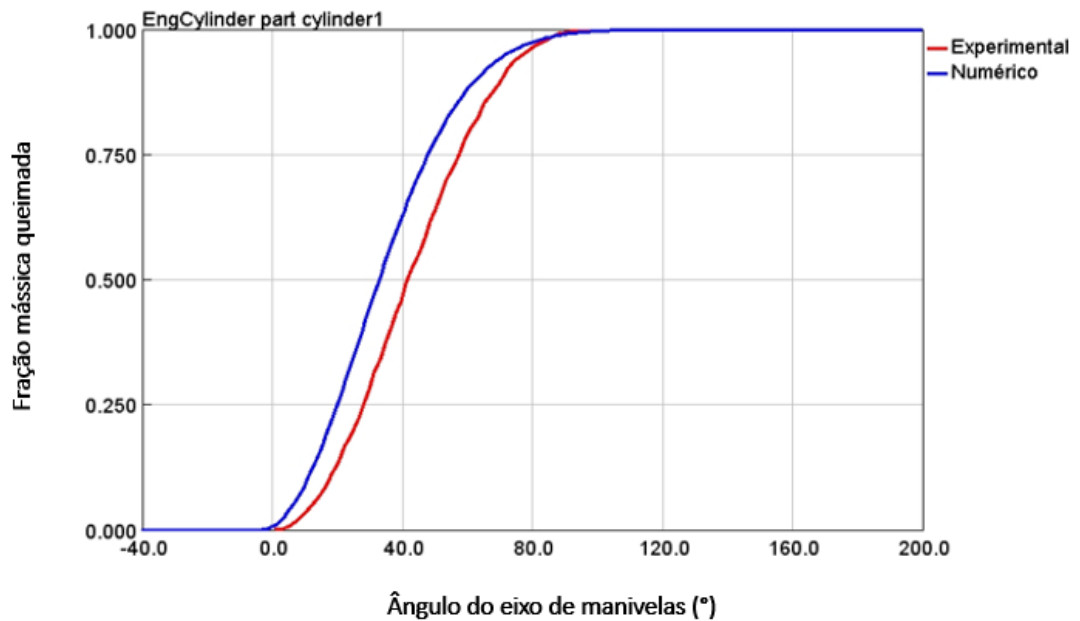
Conforme mencionado, a adaptação do sensor MAF nos ensaios experimentais resultou em uma menor vazão mássica de ar na admissão. Como o modelo numérico deste estudo não prevê a presença deste sensor, por consequência os resultados numéricos demonstraram uma maior vazão mássica de ar na admissão, o que também culminou em maiores valores de pressão no interior do cilindro. A fim de aproximar os resultados de pressão numérica aos de pressão experimental, ajustes no ângulo de ignição foram realizados, conforme a Tabela 2. Os valores de FMQ (Fração Mássica Queimada) 50% e Duração 10%-90% podem ser inseridos manualmente no GT-Power, no tipo de modelagem que foi realizada. Na simulação, foi mantida a mesma duração de combustão do estudo experimental, de 52,2°. O ângulo em que a fração mássica queimada foi de 50% (FMQ – 50%) foi estabelecido em 33°, pois foi o ângulo em que os dados numéricos de pressão ficaram mais coerentes com os dados experimentais.

	FMQ 10%	FMQ 50%	FMQ 90%	Duração 10%-90%
Numérico (GT-Power)	11°	33°	63,5	52,2°
Experimental (Zancanaro,2014)	17,9°	41,7°	70,1°	52,2°
Erro Percentual Relativo	-38,55%	-20,86%	-9,42%	0

Tabela 2 – Dados de fração mássica queimada em relação ao ângulo do eixo de manivelas

Os resultados experimentais e numéricos de FMQ estão representados na Figura 5. Logo após o início da combustão, nota-se o aumento da FMQ, em razão do início da queima de combustível. Ao longo do ciclo, observam-se as diferenças entre os dados experimentais e numéricos associados aos ajustes do ângulo de ignição, citados anteriormente.

Figura 5 – Fração mássica queimada

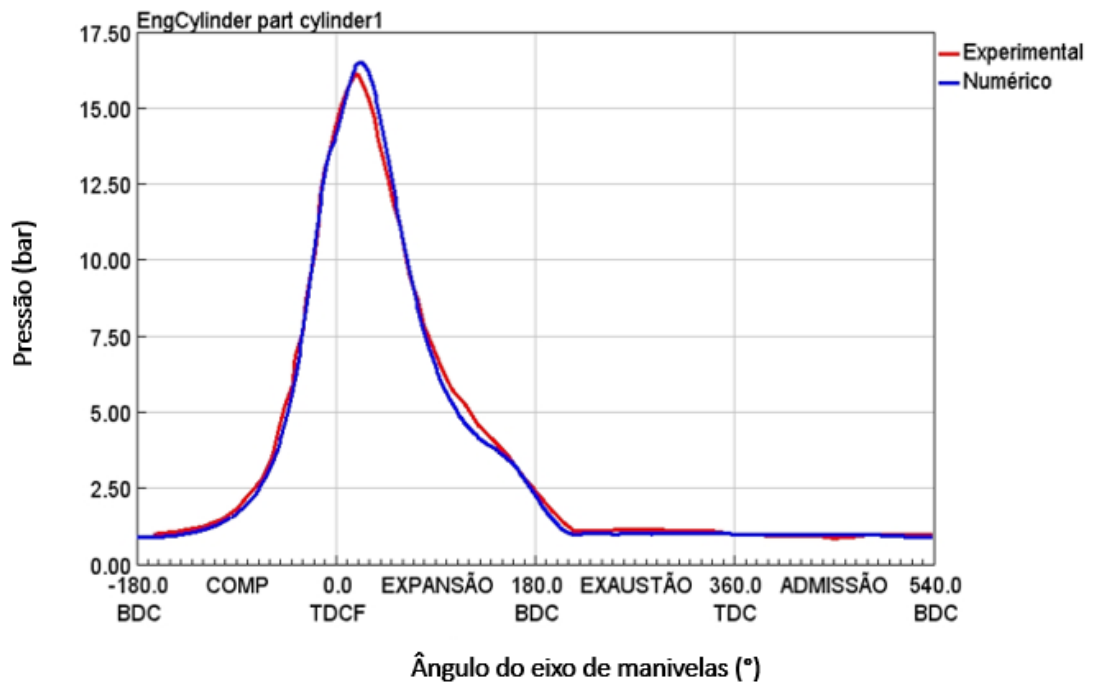


Adaptação dos Autores e Zancanaro (2014)

A curva de pressão absoluta no interior do cilindro simulada no GT-Power foi comparada com a curva de pressão absoluta experimental, obtida nos ensaios de Zancanaro (2014). Os dados de pressão absoluta no interior do cilindro estão em função do ângulo do eixo de manivelas, a uma rotação de 3600 rpm, a plena carga, e foram geradas no pós processador GT-Post. As curvas experimental e numérica são comparadas na Figura 6.

Durante os cursos de admissão, exaustão e compressão os resultados têm boa concordância, com base no baixo erro percentual absoluto, tendendo a se igualar. O pico da curva experimental é de 16,1 bar, em 17,8°, enquanto o maior valor encontrado na curva numérica é de 16,47 bar, em 19,8°. Ainda na fase de expansão observam-se discrepâncias mais acentuadas a partir de 82°.

Figura 6 - Pressão absoluta no interior do cilindro



Adaptação dos Autores e Zancanaro (2014)

A Tabela 3 apresenta os valores de erro percentual relativo dos valores numéricos e experimentais em ângulos específicos do eixo de manivelas (ângulos do início de cada tempo e ângulo onde foi observada a maior discrepância).

	Experimental	Simulado	Erro Percentual Relativo
Compressão (-180°)	0,87	0,87	0%
Expansão (0°)	14,24	14,30	0,42%
Valor Máximo	16,10	16,48	2,36%
Exaustão (180°)	2,46	2,32	-5,69%
Admissão (360°)	0,97	0,97	0%
Maior discrepância (117,8°)	5,21	4,28	-17,85%

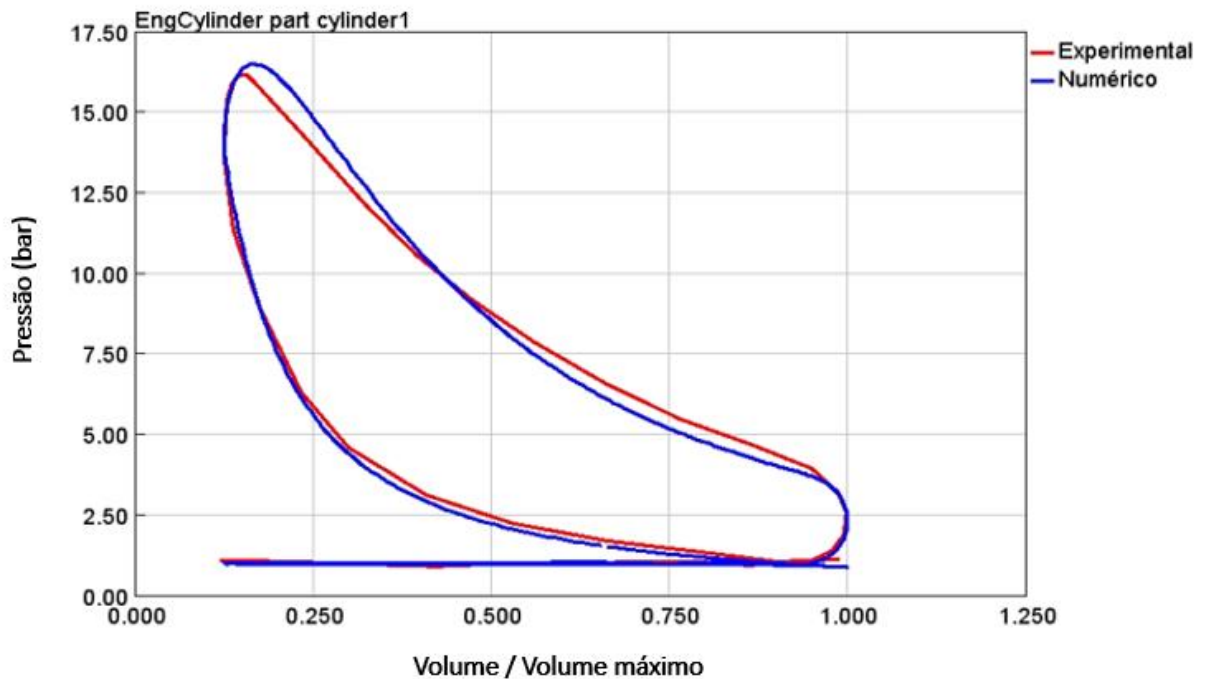
Tabela 3 – Erro percentual relativo dos dados de pressão experimentais e simulados

Na Figura 7 é apresentado o comportamento da pressão em relação ao volume deslocado, o diagrama P-V. Nos cursos de admissão e exaustão, as linhas experimental e numérica tendem a se igualar. Observa-se uma diferença entre os resultados durante a evolução do curso de compressão. No momento da explosão, as curvas tendem novamente a se igualar,

mas a partir do ápice do valor de pressão, ocorre uma diferença mais acentuada, que é observada durante todo o curso de expansão, em conformidade com os resultados apresentados para a evolução da pressão durante o ciclo.

As potências líquidas foram de 600 W para o resultado numérico e 587 W para o experimental.

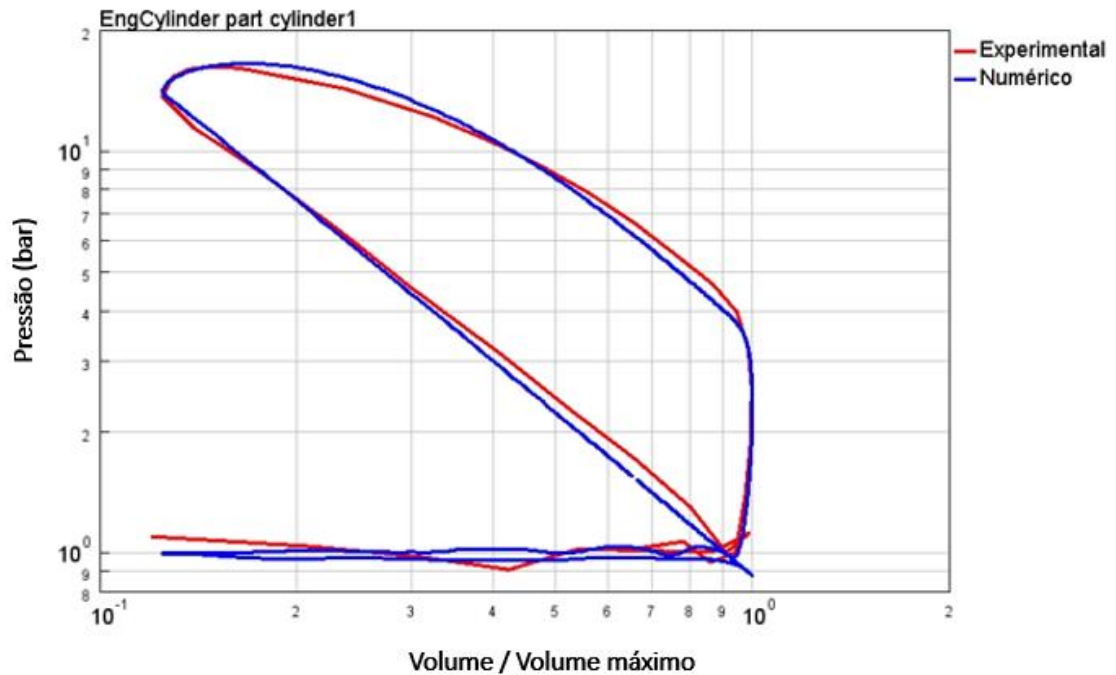
Figura 7 - Diagrama P-V do motor GX35



Adaptação dos Autores e Zancanaro (2014)

O diagrama logP-logV também foi obtido e está apresentado na Figura 8. Este tipo de diagrama é gerado em escala logarítmica, o que proporciona um aumento das discrepâncias que serão observadas. Nota-se que os resultados estão coerentes aos apresentados anteriormente para pressão no interior do cilindro, com diferenças observadas nos cursos de compressão e expansão. Neste diagrama, onde as discrepâncias são evidenciadas, é possível observar também algumas diferenças na linha inferior do diagrama, nos cursos de admissão e exaustão.

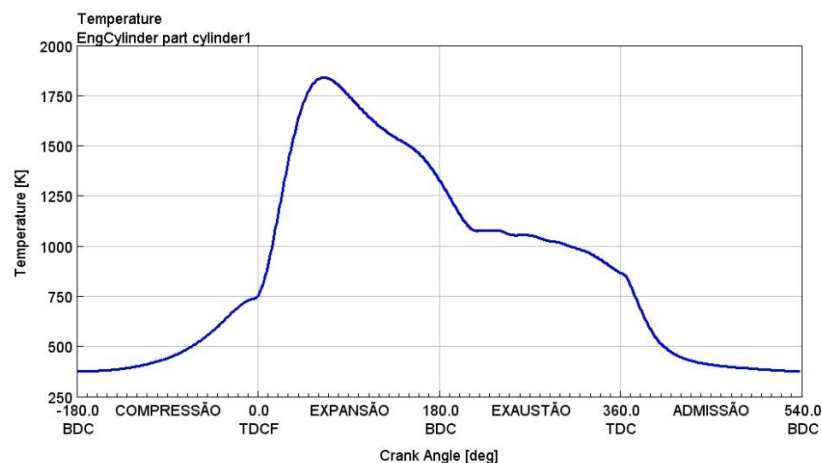
Figura 8 - Diagrama logP-logV



Adaptação dos Autores e Zancanaro (2014)

A Figura 9 apresenta os resultados numéricos para a temperatura média no interior do cilindro. É possível observar a diminuição da temperatura logo após a abertura da válvula de admissão e, posteriormente, um leve aumento à medida que a mistura ar-combustível é admitida. Em -180° em razão do fechamento da válvula de admissão e início do curso de compressão, o valor da temperatura aumenta moderadamente e, próximo a 0° este aumento é intensificado. O máximo valor de temperatura chega aos 1868 K e, após, diminui em razão da queima de combustível, expansão dos gases e abertura da válvula de exaustão (ZANCANARO, 2014).

Figura 9 – Temperatura média no interior do cilindro



Fonte: Autores

5 CONCLUSÕES

A utilização de recursos computacionais cresce cada vez dentro dos estudos de motores de combustão interna, o que viabiliza o uso de métodos numéricos para simular o comportamento desses motores em diversos cenários. Com base nisso, o presente trabalho utilizou uma metodologia numérica, visando comparar os resultados obtidos em simulação, com resultados extraídos de trabalhos prévios.

Verificou-se que a metodologia numérica deste trabalho obteve uma boa concordância em comparação aos resultados experimentais. Os resultados numéricos e experimentais de vazão mássica de ar na admissão chegaram a valores mais distantes que os outros parâmetros analisados, em vista da não previsão de um sensor MAF na metodologia numérica, o que resultou em valores maiores para a simulação.

Os valores numéricos de pressão absoluta no interior do cilindro foram próximos dos valores experimentais, indicando um erro percentual relativo de 17,85% no ângulo 117,8°. Essa aproximação de valores se deu devido ao ajuste realizado no ângulo de ignição, que reduziu a discrepância que seria causada em função da maior vazão mássica de ar obtida no estudo numérico.

Em conformidade aos dados da evolução da pressão no interior do cilindro durante o ciclo, o diagrama P-V e diagrama logP-logV também obtiveram boa concordância com os resultados experimentais. Os dados de fração mássica queimada numéricos também apresentaram discrepâncias em relação aos dados experimentais, em função do ajuste realizado no ângulo de ignição, a fim de aprimorar os resultados de pressão, com um erro percentual relativo máximo de 38,55%.

Por tudo isso, pode-se afirmar que, dentro das limitações existentes em uma realização de simulação numérica, o objetivo deste estudo foi alcançado, simulando um motor de combustão interna, e obtendo uma comparação com os resultados experimentais existentes.

A importância deste estudo consiste na possibilidade de reproduzir um motor com as suas características através de uma metodologia numérica unidimensional, realizando a previsão de diferentes dados da combustão. As metodologias numéricas unidimensionais podem auxiliar estudos, entregando resultados em menos tempo, resultando em um menor custo computacional para a simulação. Para trabalhos futuros, sugere-se realizar a simulação da combustão com diferentes tipos de combustíveis.

6 REFERÊNCIAS

BRUNETTI, F. Motores de combustão interna: Volume 1. São Paulo: Blucher, 2012. 553 p.

BRUNETTI, F. Motores de combustão interna: Volume 2. São Paulo: Blucher, 2012. 483 p.

CARVALHO, Rogério Nascimento de; MACHADO, Guilherme Bastos; COLAÇO, Marcelo José. Estimating gasoline performance in internal combustion engines with simulation metamodels. Elsevier. Rio de Janeiro, p. 230-240. jan. 2017.

FERREIRA, K. W. A história dos motores de combustão interna. 2017. Disponível em: <<https://autocarup.com.br/historia-motor-a-combustao/>>. Acesso em: 12 jun. 2019.

GAMMA TECHNOLOGIES; “GT-SUITE – Engine Performance Application Manual”, V2016, 2015.

GAMMA TECHNOLOGIES; “GT-SUITE – Flow Theory Manual”, V2016, 2015.

HEYWOOD, J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals. New York: McGraw-Hill, 1988.930 p.

HONDA. 2012. Disponível em: <https://engines.honda.com/>. Acesso em: jun. 2020.

LANZANOVA, Thompson Diordinis Metzka. Avaliação numérica e experimental do desempenho de um motor Otto operando com etanol hidratado. 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RANZI, Mateus Foresti. Análise das emissões de um motor de combustão interna. 2014. 17 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SILVA, Bruno Hartmann da. Simulação de Sistema de Turbocompressão de Temperatura de Admissão de Motores Ciclo Otto para Redução. 2016. 21 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

VIEIRA, Bruno Kovara. Modelagem unidimensional de um motor de combustão interna do ciclo de dois-tempos operando com diferentes taxas de compressão e pontos de ignição. 2017. 25 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ZANCANARO JUNIOR, Flavio Vanderlei. Análise numérica e experimental da combustão de metano em motores de combustão interna alternativos. 2014. 133 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

YANG, Xiaolong; LIAO, Cheng; LIU, Jingping. Harmonic analysis and optimization of the instake system of a gasoline engine using GT-Power. Elsevier. Changsha, p. 756-762. jan. 2012.