

4. MODELAGEM DO MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA (Ciclo OTTO)

A linha de desenvolvimento do modelo e, simultaneamente, do programa de computador, pode ser resumida do seguinte modo. Primeiro, foi elaborado um modelo algébrico para ganhar conhecimento da física do motor e estabelecer relações entre os parâmetros de desempenho e os parâmetros do ciclo. Então, foi equacionado e implementado o modelo de uma zona. Os termos da equação diferencial exigiam o detalhamento dos componentes do motor. Portanto, foi estruturado o modelo de objetos do motor e foram implementados os componentes principais, como os cames, orifícios e válvulas. Seguiram-se os modelos de gás ideal, escoamento isentrópico, de atrito, de transferência de calor e dos coletores. Os componentes de métodos numéricos e de armazenagem de dados foram implementados nesta fase. Após isto, foi executada uma série de testes nos componentes. O modelo de duas zonas foi então equacionado e implementado, o que exigiu modificações significativas nos modelos dos componentes. Então, uma nova série de testes foi iniciada, o que levou a proposição de modelos de combustão mais complexos. A saída de dados de simulação exigiu um esforço extra para compatibilizar os dados com medidas experimentais. A interface do usuário/programa não mereceu grandes esforços, pois não era o objetivo desta etapa do trabalho.

A seguir apresenta-se uma descrição detalhada dos modelos desenvolvidos e implementados. Em alguns destes modelos percebe-se que a modelagem de objetos está mais avançada que o equacionamento e a implementação computacional do componente. Mesmo assim, decidiu-se descrever o modelo de objetos completo para que possa servir de guia para futuros trabalhos.

4.1. Modelo Algébrico Não-Ideal

Como primeiro passo para elaborar um modelo do motor de combustão interna, desenvolveu-se um modelo algébrico, baseado em metodologias expostas por Oates, 1988, para análise de ciclo de turbinas a gás aeronáuticas. Os objetivos dessa etapa são: obter entendimento físico de cada etapa de funcionamento do motor; obter as ordens de grandeza das eficiências envolvidas e correlacionar os dados de ciclo com os parâmetros de desempenho do motor.

A figura 4.1 mostra o ciclo não-ideal calculado pelo modelo algébrico para um cilindro do motor FIAT FIRE 1.3 (quatro tempos, 4 cilindros em linha, 1240 cm³). Este tipo de gráfico é chamado de diagrama indicador e permite caracterizar as diferentes etapas de funcionamento do motor, ou seja, do ciclo. Como a queima é feita a volume constante, o ciclo é do tipo Otto. O modelo algébrico descrito a seguir é dividido, conforme as etapas do ciclo, em (ver figura 4.1): admissão (0-1), compressão (1-2), combustão (2-3), expansão (3-4), exaustão de pressão ou “blow-out” (4-5), exaustão (5-6). A última etapa de expansão (6-0) ocorre instantaneamente no cilindro e coletores.

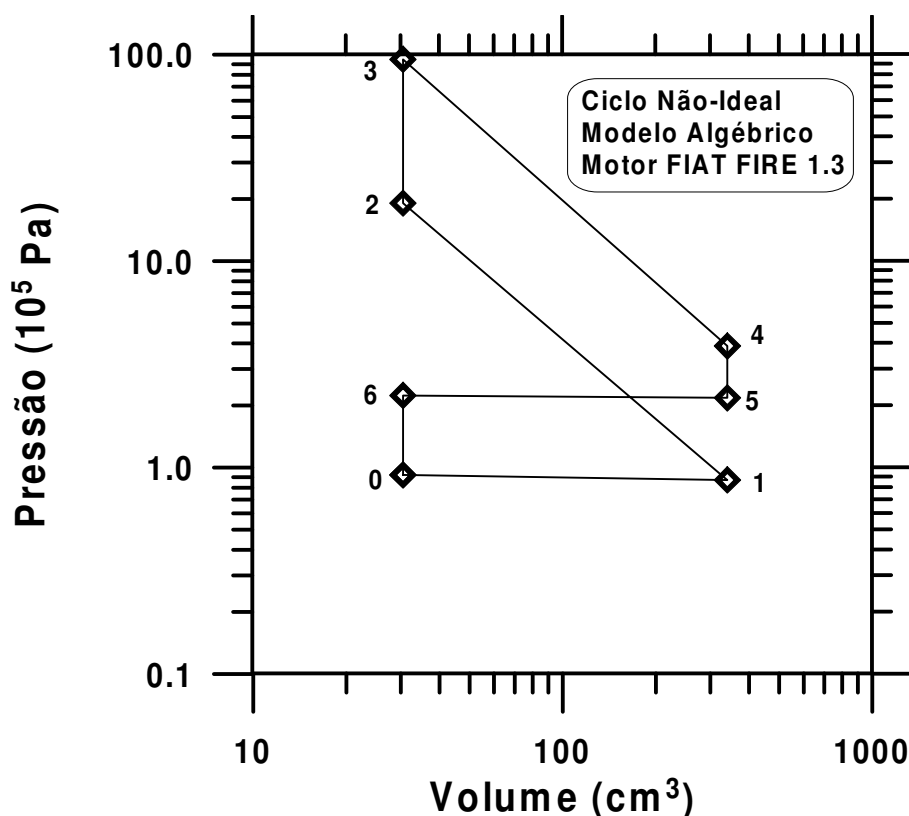
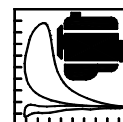


FIGURA 4.1 – Ciclo não-ideal calculado pelo modelo algébrico para um cilindro do motor FIAT FIRE 1.3

Admissão (0-1)

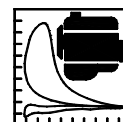
$$\tau_{ad} = \frac{T_{1}^{stag}}{T_0} = 1 \quad (4.1)$$

$$\pi_{ad} = \frac{P_1}{P_0} = \frac{P_1 V_1 R_c T_0}{R_c T_1 P_0 V_0} = \eta_v \quad (4.2)$$

onde, τ e π são razões de temperaturas e pressões de estagnação, respectivamente. Estas razões são calculadas dividindo a condição final pela condição inicial da etapa considerada; η_v é a eficiência volumétrica na admissão (*subíndice ad*).

Neste caso, a eficiência volumétrica é representada pela redução na pressão no cilindro durante a admissão. Considerou-se também, nesta etapa, um ligeiro aquecimento para manter a temperatura constante.

O uso de propriedades de estagnação é típico nos modelos de Oates, 1988, para turbomáquinas, nas quais, as velocidades do escoamento interno podem atingir valores superiores a 0,8 Mach (início do regime transônico). No caso de motores de combustão interna, alternativos ou rotativos as propriedades de estagnação e estáticas são equivalentes, pois as velocidades são baixas durante a maior parte do ciclo.



Compressão (1-2)

$$\tau_c = \frac{T_{2 \text{ stag}}}{T_1} = r_c^{\gamma_c - 1} \quad (4.3)$$

$$\pi_c = \frac{P_{2 \text{ stag}}}{P_1} \quad (4.4)$$

Definindo a razão volumétrica de compressão (r_c) como,

$$r_c = \frac{V_1}{V_0} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3} \quad (4.5)$$

Considerando uma compressão politrópica, cuja eficiência é dada por e_c , Oates, 1988, tem-se,

$$\tau_c = \pi_c^{\frac{\gamma_c - 1}{e_c \gamma_c}} \quad (4.6)$$

onde, γ_c é a razão de calores específicos para o gás não queimado. Considerando o gás como ar puro pode-se usar o valor de 1,4.

A hipótese nesta etapa é que a razão de temperaturas mantém a mesma relação do ciclo ideal com a razão volumétrica de compressão (eq. 4.3).

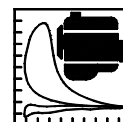
Combustão (2-3)

$$\tau_b = \frac{T_{3 \text{ stag}}}{T_2} \quad (4.7)$$

$$\pi_b = \frac{P_{3 \text{ stag}}}{P_2} \quad (4.8)$$

Considerando a combustão a volume constante, tem-se,

$$\Delta U = M c_{v_c} \left(T_{3 \text{ stag}} - T_{2 \text{ stag}} \right) = Q_b = \eta_b M_f \Delta h_f \quad (4.9)$$



Definindo a razão de mistura em massa (f) como,

$$f = \frac{M_f}{M} = \frac{M_f}{M_f + M_{ar}} \quad (4.10)$$

onde, ΔU é a variação de energia interna; Q_b é calor de combustão da mistura ar/combustível; Δh_f é a variação de entalpia na combustão por unidade de massa; M é a massa da mistura ar/combustível admitida; M_{ar} é a massa de ar; M_f é a massa de combustível; c_{vc} é o calor específico a volume constante da mistura não queimada e η_b é a eficiência da combustão. Se o valor de Δh_f for assumido como igual ao poder calorífico inferior do combustível, a eficiência de combustão coincide com a definição dada por Heywood, 1988.

Combinando as equações 4.10, 4.11, 4.7, 4.3 e 4.1, tem-se,

$$\tau_b = 1 + \frac{\eta_b f \Delta h_f}{c_{vc} \tau_c \tau_{ad} T_0} \quad (4.11)$$

Usando a equação do gás ideal na equação 4.8, tem-se,

$$\pi_b = \tau_b \frac{\bar{M}_c}{\bar{M}_b} \quad (4.12)$$

onde, \bar{M}_c é o peso molecular médio dos gases não queimados e \bar{M}_b é o peso molecular médio dos gases queimados.

Expansão (3-4)

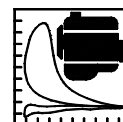
$$\tau_e = \frac{T_4^{stag}}{T_3} = \frac{1}{r_c^{\gamma_b - 1}} \quad (4.13)$$

$$\pi_e = \frac{P_4^{stag}}{P_3} \quad (4.14)$$

Considerando uma expansão politrópica, cuja eficiência é dada por e_e , tem-se,

$$\tau_e = \pi_e^{\frac{e_e(\gamma_b - 1)}{\gamma_b}} \quad (4.15)$$

Na equação 4.13, a razão volumétrica de compressão é igual a de expansão e foi considerado que a razão de temperaturas obedece a mesma relação do ciclo ideal.



Em geral, os gases queimados apresentam uma razão de calores específicos (γ_b) na faixa de 1,25 a 1,35. Sendo que o peso molecular da mistura é inferior ao do ar puro (28,85 kg/kmol). As eficiências politrópicas variam de 0,85 a 0,94.

Exaustão de Pressão (Blow-out) (4-5)

$$\tau_{bo} = \frac{T_5^{stag}}{T_4} \quad (4.16)$$

$$\pi_{bo} = \frac{P_5^{stag}}{P_4} = \frac{1}{\xi_{bo}} \frac{P_1^{stag}}{P_4} \quad (4.17)$$

onde, ξ_{bo} é a fração da queda de pressão ideal no “blow-out”.

Usando a equação do gás ideal e as equações 4.16 e 4.17, tem-se,

$$\tau_{bo} = \frac{\pi_{bo}}{\eta_{bo}} \quad (4.18)$$

onde, η_{bo} é a eficiência de retenção no “blow-out”, ou seja, é a massa de gás retida no cilindro no ponto 5 pela massa no ponto 4.

Exaustão (5-6)

$$\tau_{ex} = \frac{T_6^{stag}}{T_5} = 1 \quad (4.19)$$

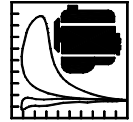
$$\pi_{ex} = \frac{P_6^{stag}}{P_5} = \xi_{ex} \quad (4.20)$$

onde, ξ_{ex} é um incremento de pressão na exaustão durante a subida do pistão. A exaustão foi considerada isotérmica.

O trabalho realizado (W), por unidade de massa (M), por ciclo, por cilindro, pode ser calculado por:

$$\frac{W}{M} = \eta_m \left(\frac{W}{M} \Big|_{ciclo} - \frac{W}{M} \Big|_{bombeamento} \right) \quad (4.21)$$

onde, η_m é a eficiência mecânica do motor que, além do atrito, inclui o trabalho consumido pelos acessórios do motor (bombas, transmissão, etc).



Para o ciclo considerado (figura 4.1), tem-se,

$$\frac{W}{M}\Big|_{\text{ciclo}} = \frac{Q}{M}\Big|_{2-3} - \frac{Q}{M}\Big|_{4-1} = c_{v_c} \tau_c \tau_{ad} T_0 (\tau_b - 1) - c_{v_b} \tau_{ad} T_0 (\tau_e \tau_b \tau_c - 1) \quad (4.22)$$

$$\frac{W}{M}\Big|_{\text{bombeamento}} = \frac{(P_6 - P_0) \Psi_d}{M} = (\pi_{ex} \pi_{bo} \pi_e \pi_b \pi_c \pi_{ad} - 1) R_c T_0 \quad (4.23)$$

O consumo específico, torque, potência e outros parâmetros de desempenho são calculados a partir da equação 4.21 e da rotação do motor.

Abaixo é apresentado o resumo do modelo algébrico para *Ciclo Não Ideal*, para motores 4 tempos, respeitando a seqüência de solução.

Dados requeridos:

$$\begin{aligned} &T_0 \text{ [K]}, P_0 \text{ [Pa]}, \\ &R_c \text{ [J/kg/K]}, \bar{M}_c \text{ [kg/kmol]}, \gamma_c, \\ &R_b \text{ [J/kg/K]}, \bar{M}_b \text{ [kg/kmol]}, \gamma_b, \\ &\Psi_d \text{ [m}^3\text{]}, r_c, N_{\text{cil}} \text{ [cilindros]}, N \text{ [rps]}, \\ &\Delta h_f \text{ [J/kg]}, f \text{ [p/p]}, \\ &\eta_v, \epsilon_c, \eta_b, \epsilon_e, \xi_{bo}, \eta_{bo}, \xi_{ex} \end{aligned}$$

Saídas:

$$\begin{aligned} &W/M \text{ [J/kg/ciclo/cilindro]}, M \text{ [kg/ciclo/cilindro]}, \\ &\eta_t, \dot{m} \text{ [kg/s]}, C_f \text{ [kg combustível/s]}, \\ &\tau_{ef} \text{ [Nm]}, P_{ef} \text{ [W]}, \text{SFC [kg combustível/s/W]}, \text{PME [Pa]}, \\ &P \text{ [Pa]}, T \text{ [K]}, \Psi \text{ [m}^3\text{]} \text{ para os 7 pontos do ciclo.} \end{aligned}$$

Sistema de Equações Algébricas:

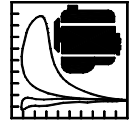
$$\tau_{ad} = 1 \quad (4.24)$$

$$\pi_{ad} = \eta_v \quad (4.25)$$

$$\tau_c = r_c^{\gamma_c - 1} \quad (4.26)$$

$$\pi_c = \tau_c^{\frac{\epsilon_c \gamma_c}{\gamma_c - 1}} \quad (4.27)$$

$$c_{v_i} = \frac{R_i}{\gamma_i - 1} \quad \text{onde, } i = c \text{ ou } b \quad (4.28)$$



$$\tau_b = 1 + \frac{\eta_b f \Delta h_f}{c_{vc} \tau_c \tau_a T_0 \text{stag}} \quad (4.29)$$

$$\pi_b = \tau_b \frac{\overline{M}_c}{M_b} \quad (4.30)$$

$$\tau_e = \frac{1}{r_c^{\gamma_b - 1}} \quad (4.31)$$

$$\pi_e = \tau_e \frac{\gamma_b}{e_c (\gamma_b - 1)} \quad (4.32)$$

$$\pi_{bo} = \frac{1}{\xi_{bo}} \frac{1}{\pi_e \pi_b \pi_c} \quad (4.33)$$

$$\tau_{bo} = \frac{\pi_{bo}}{\eta_{bo}} \quad (4.34)$$

$$\tau_{ex} = 1 \quad (4.35)$$

$$\pi_{ex} = \xi_{ex} \quad (4.36)$$

$$\frac{W}{M} = \eta_m (c_{vc} \tau_c \tau_{ad} T_0 (\tau_b - 1) - c_{vb} \tau_{ad} T_0 (\tau_e \tau_b \tau_c - 1) - (\pi_{ex} \pi_{bo} \pi_e \pi_b \pi_c \pi_{ad} - 1) R_c T_0) \quad (4.37)$$

$$M = V_d \frac{\pi_{ad} P_0}{R_c \tau_{ad} T_0} \quad (4.38)$$

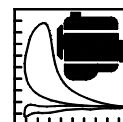
$$\eta_t = \frac{(W/M)}{f \Delta h_f} \quad (4.39)$$

$$\dot{m} = M 2 N \quad (4.40)$$

$$C_f = f \dot{m} \quad (4.41)$$

$$\tau_{ef} = M \frac{W}{M} \frac{N_{cil}}{4 \pi} \quad (4.42)$$

$$P_{ef} = \tau_{ef} 2 \pi N \quad (4.43)$$



$$\text{SFC} = \frac{C_f}{P_{ef}} \quad (4.44)$$

$$\text{PME} = M \frac{W}{M} \frac{N_{cil}}{V_d} \quad (4.45)$$

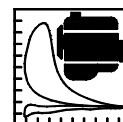
onde, η_t é a eficiência térmica do ciclo; \dot{m} é a vazão mássica da mistura; C_f é o consumo de combustível; τ_{ef} é o torque efetivo do motor; P_{ef} é a potência efetiva do motor; SFC é o consumo específico de combustível; e PME é a pressão média efetiva.

Se todas as eficiências foram igualadas a unidade, o sistema de equações se reduz ao *Ciclo Otto Ideal*. Também é possível ampliar o modelo para incluir os efeitos de subcarregamento (válvula borboleta do acelerador) e sobrecarregamento (compressores e turbocompressores).

Como os resultados deste modelo não são o foco deste trabalho, apresentam-se a seguir as conclusões que nortearam os aspectos físicos da modelagem orientada a objetos. A figura 4.2 mostra os resultados do modelo algébrico frente aos dados experimentais para o motor FIAT FIRE 1.3. As seguintes conclusões foram tiradas a partir do ajustes dos parâmetros do modelo:

- As curvas de potência e torque versus rotação do motor são retas, sendo que a potência tem sua origem em zero;
- As curvas de potência versus rotação do motor para carga parcial formam uma família de retas rotacionadas na origem comum em zero. O mesmo ocorre para o ciclo não ideal em relação ao ciclo ideal (ver figura 4.2);
- A eficiência volumétrica na admissão tem influência direta na vazão de ar e no consumo de combustível, mas apresenta pequena influência percentual nos valores de torque e potência;
- A eficiência de combustão apresenta influência direta nos valores de torque e potência, o que permite afirmar que é a controladora da posição e formato das curvas de torque e potência;
- As eficiências de compressão e expansão apresentam uma significativa influência no torque e potência, mas controlam as pressões e temperaturas do ciclo;
- As eficiências e perdas na exaustão afetam pouco o torque e potência, da ordem de alguns pontos percentuais, mas controlam a condição de saída dos gases. Isto é importante para estudos envolvendo turbocompressores;
- Os valores de eficiência de retenção na Exaustão de Pressão ('blow-out') indicam que 10 a 30 % do gás no cilindro é expulso nesta etapa, para garantir que a temperatura dos gases de exaustão se situe na faixa típica de motores ICE (400 a 900 °C).

Estes pontos ressaltam que o modelo de combustão controla os parâmetros de desempenho do motor. O segundo modelo importante é o de escoamento coletores/cilindro que regula as vazões no motor.



Pode-se notar que o modelo algébrico é pouco flexível para incluir novos componentes, pois isto implica em mudança significativa do sistema de equações. O caráter conceitual do modelo o torna adequado para discutir a física básica do funcionamento do motor. Em termos de orientação a objetos, este modelo poderia ser encapsulado numa classe chamada MotorICE, pois representa o funcionamento deste como um todo. Esta classe poderia interfacear com outras classes, tais como, de turbocompressores, de cargas e de veículos, de forma a permitir o estudo e otimização de sistemas mais complexos, não focados no motor.

A grande vantagem do modelo algébrico é sua baixa carga computacional que o torna adequado para sistemas em tempo real. Em contrapartida, o modelo algébrico exige que os valores das eficiências sejam estimados antecipadamente. Para se obter um melhor ajuste entre o modelo algébrico e os dados experimentais as eficiências volumétricas e de combustão poderiam ser representadas por funções polinomiais ajustadas a partir dos dados.

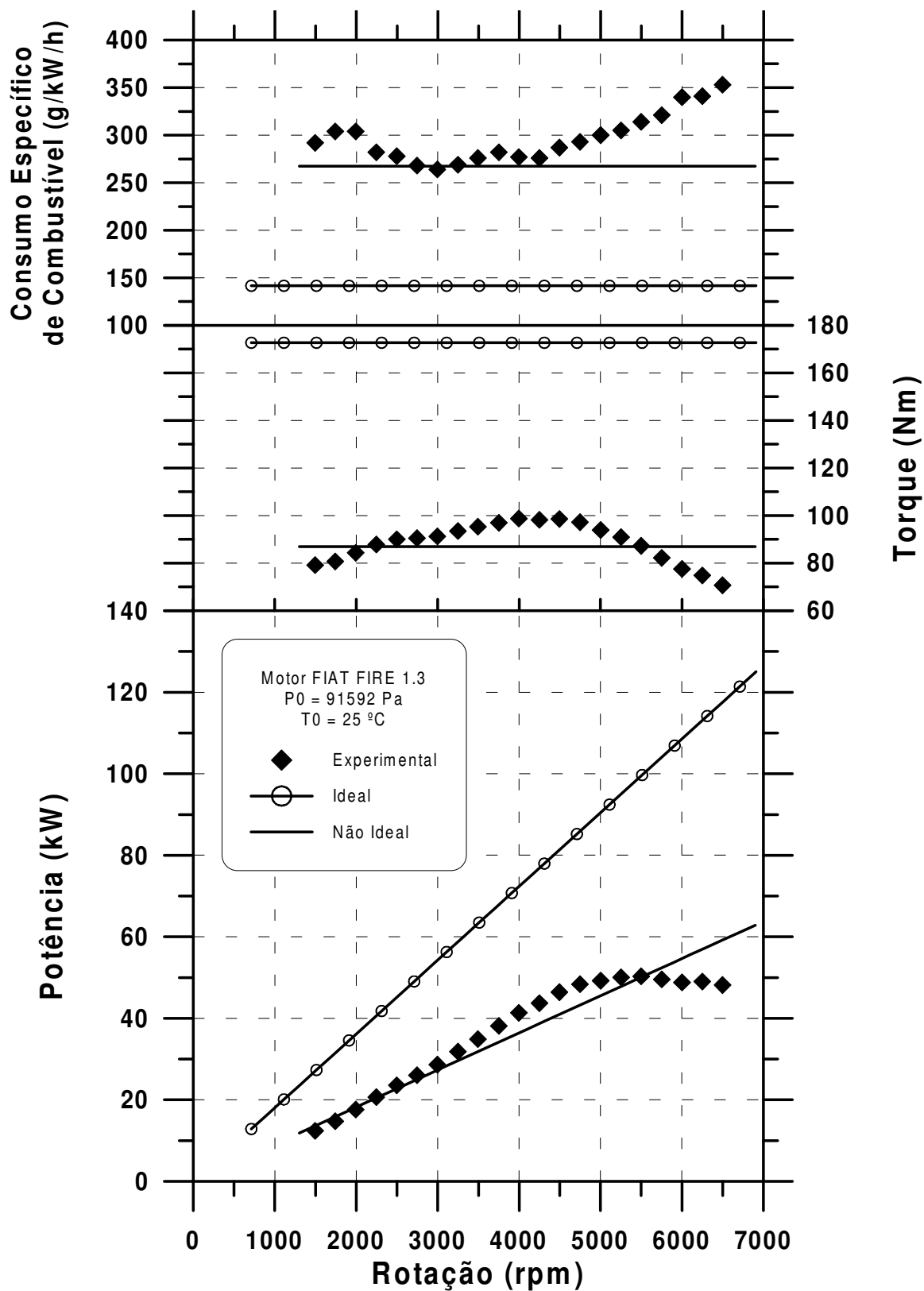
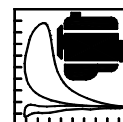


FIGURA 4.2 – Resultados do modelo algébrico para o motor FIAT FIRE 1.3