

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO PROFISSIONALIZANTE EM ENGENHARIA

DESENVOLVIMENTO DE REGULADORES MECÂNICOS DE ROTAÇÃO
CENTRÍFUGOS PARA APLICAÇÃO EM MOTORES DIESEL EQUIPADOS
COM BOMBAS INJETORAS UNITÁRIAS

Fábio Lopes Dartora

Porto Alegre, 2005

Este Trabalho de Conclusão foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de mestre em ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo orientador e pelo coordenador do Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Pedro Barbosa Mello

Orientador
Escola de Engenharia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof^a. Helena Beatriz Bettella Cybis

Coordenadora
Mestrado Profissionalizante em Engenharia
Escola de Engenharia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

BANCA EXAMINADORA

Prof. Flávio José Lorini
PROMEC/UFRGS

Prof. Eduardo Perondi
PROMEC/UFRGS

Prof. Carlos Roberto Altafini
CCET/UCS

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao colega Mestre Eng^o Marcos Roberto Rigotti, pela ajuda e o tempo de trabalho e estudo, que foi de vital importância para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor da UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), Doutor Pedro Barbosa Mello, pela orientação e atenção durante todo o decorrer da dissertação.

Ao professor da UCS (Universidade de Caxias do Sul), Doutor Carlos Roberto Altafini.

E a todos que colaboraram, de alguma forma para o desenvolvimento e concretização do presente estudo.

Dedico à Eliane,
aos meus pais Ernesto e Deotília
e a minha irmã Adriana.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma síntese sobre o dimensionamento de reguladores mecânicos de rotação para motores que usam bombas injetoras unitárias. Apresenta uma fundamentação teórica dos conceitos de reguladores, seus tipos e funções, bem como as características e aplicações de cada um, mostrando também, os principais reguladores Bosch.

O tipo de regulador abordado neste trabalho é o utilizado em motores estacionários, que por sua utilização na maioria das aplicações, não possuem sistemas elétricos e apresentam apenas regulagem mecânica de rotação. Também é possível dizer que os sistemas mecânicos são mais baratos e mais seguros para as aplicações estacionárias.

É apresentado o projeto através de modelagem tridimensional auxiliada por computador de dois reguladores existentes que serviram de referência para o acréscimo de funções, partida e aproximação, conforme se desejava acrescentar nos sistemas em estudo. A partir daí foram equacionados reguladores estudados e dimensionados através de modelagem auxiliada por computador os quais são apresentados no trabalho.

Também são reportados os resultados experimentais obtidos para um motor monocilíndrico, onde são mostrados os valores de potência, torque e consumo para esse motor operando com o regulador original e com as modificações propostas. Na performance do motor ocorreu um acréscimo de torque do motor de 12%, com o acréscimo da função de corretor de torque e uma redução de 50% no tempo de partida do motor com a implementação da função mola de partida.

ABSTRACT

This work presents an synthesis of mechanical speed governors design for engines which are assembled with single unit injection pump. It presents theory basis of governor concept, types and functions, as their characteristics and applications of them, as well as presents the main Bosch governors.

The kind of governor which was based this work is the one used in stationary engines, which for most of its applications, do not have electrical systems and presents just mechanical speed government. It is possible to affirm that the mechanical systems are cheaper for stationary applications as well as safer too.

The design is presented through tridimensional modeling, computer aided, of two existent governors which were reference to function, start and approximation increase, as was desired to improve in the studied systems. From that point were found equations on the studied governors and designed by computer aided modeling, presented in this work.

Also are reported the experimental results obtained for a single cylinder engine, presenting power, torque and consumption values of this same engine operating with original governor and a modified and improved one. The engine performance improved 12% in torque value by adding torque correction and 50% decrease in start time by adding a start spring function.

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | Introdução | 1 |
| 2. | Fundamentação Teórica | 3 |
| 2.1. | Generalidades | 3 |
| 2.1.1. | Regulagem Mecânica | 6 |
| 2.1.2. | Regulagem Eletrônica | 6 |
| 2.1.3. | Regulagem Hidráulica | 7 |
| 2.1.4. | Regulagem Pneumática | 7 |
| 2.1.5. | Regulagem por Pressão | 7 |
| 2.2. | Bombas Injetoras Individuais | 8 |
| 2.3. | Acoplamento | 11 |
| 2.4. | Reguladores em Regime Estático | 14 |
| 2.5. | Grau de Irregularidade | 15 |
| 2.6. | Grau de Insensibilidade | 16 |
| 2.7. | Estabilidade | 17 |
| 2.8. | Regulagem Proporcional | 19 |
| 2.9. | Regulagem Derivada | 21 |
| 2.10. | Regulagem Integral | 21 |
| 2.11. | Tempos de Reação | 23 |
| 2.12. | Possibilidade de Melhora | 24 |
| 2.13. | Operação Estável e Reserva de Torque | 25 |
| 3. | Reguladores Bosch | 28 |
| 3.1. | Regulagem Mecânica de Rotação | 28 |
| 3.2. | Funções do Regulador de Rotação | 29 |
| 3.3. | Regulagem da Rotação Máxima | 30 |
| 3.4. | Regulagem de Rotações Intermediárias | 31 |
| 3.5. | Regulagem de Marcha Lenta | 34 |
| 3.6. | Aproximação | 35 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.7. | Regulagens da Rotação Máxima | 39 |
| 3.8. | Regulagens da Marcha Lenta e da Rotação Máxima | 41 |
| 3.9. | Regulagens Variáveis | 43 |
| 3.10. | Regulagens Escalonadas | 44 |
| 3.11. | Reguladores Centrífugos | 46 |
| 4. | Reguladores Estudados | 48 |
| 4.1. | Regulador do Motor Monocilíndrico | 48 |
| 4.1.1. | Projeto Geométrico do Regulador do Motor Monocilíndrico | 50 |
| 4.1.2. | Condição de Operação sem Carga | 51 |
| 4.1.3. | Condição de Operação com Carga | 52 |
| 4.2. | Regulador do Motor Bicilíndrico | 52 |
| 4.2.1. | Projeto Geométrico do Regulador do Motor Bicilíndrico | 53 |
| 4.2.2. | Condição de Operação sem Carga | 55 |
| 4.2.2.1. | Condição de Operação em Marcha Lenta e sem Carga | 55 |
| 4.2.2.2. | Condição de Operação em Rotação Máxima e sem Carga | 56 |
| 4.2.3. | Condição de Operação com Carga | 56 |
| 5. | Projeto dos Reguladores | 57 |
| 5.1. | Regulador com Mola de Partida e Correção de Torque para o Motor Monocilíndrico | 57 |
| 5.1.1. | Condição de Operação sem Carga | 60 |
| 5.1.2. | Condição de Operação com Carga | 61 |
| 5.1.3. | Condição de Operação na Partida Automática | 62 |
| 5.2. | Regulador com Correção de Torque para o Motor Bicilíndrico | 62 |
| 5.2.1. | Condição de Operação com Correção de Torque | 64 |
| 5.2.2. | Condição de Operação na Partida Automática | 65 |
| 5.2.3. | Condição de Parada do Motor | 65 |
| 6. | Materiais e Métodos | 66 |
| 6.1. | Motores Utilizados | 66 |
| 6.2. | Equipamentos Utilizados | 66 |
| 6.3. | Experimentos e Resultados | 68 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 7. | Análise da Propagação de Erros e Incertezas de Dados | 74 |
| 8. | Conclusões | 76 |
| | Referências | 78 |
| | Anexos | 80 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----------|
| Figura 2.1 - Mecanismo de Regulagem. Fonte Miralles (1980) | 4 |
| Figura 2.2 - Esquema de um regulador. Fonte Miralles (1980) | 5 |
| Figura 2.3 - Bombas injetoras tipo PF. Fonte de Bosch (2000) | 8 |
| Figura 2.4 - Bombas injetoras tipo PFR e PFE. Fonte de Bosch (2000) | 9 |
| Figura 2.5 - Avanço de injeção. Fonte Bosch (2000) | 10 |
| Figura 2.6 - Efeito de regulagem R. Fonte Miralles (1980) | 11 |
| Figura 2.7 - Característica de um circuito de regulação. Fonte Miralles (1980) | 13 |
| Figura 2.8 - Característica do regulador. Fonte Miralles (1980) | 14 |
| Figura 2.9 - Zona de insensibilidade de um regulador. Fonte Miralles (1980) | 17 |
| Figura 2.10 - Possibilidade de regulagem. Fonte Miralles (1980) | 18 |
| Figura 2.11 - Mecanismo de regulagem servoassistido. Fonte Miralles (1980) | 19 |
| Figura 2.12 - Efeito de uma perturbação, ensaio prático, vê-se as formas que podem apresentar o detalhe A na figura 13. Fonte Miralles (1980) | 20 |
| Figura 2.13 - Formas que podem apresentar a curva no intervalo A da figura 12. Fonte Miralles (1980) | 20 |
| Figura 2.14 - Reação no debito em cada tipo de regulagem, segundo a forma de reação ante uma reação de n. Fonte Miralles (1980) | 21 |

| | |
|--|-----------|
| Figura 2.15 - Formas de regulagem e valor de correções. Fonte Miralles (1980) | 22 |
| Figura 2.16 - Regulagem a velocidade constate. Fonte Miralles (1980) | 25 |
| Figura 2.17 - Influência da mudança de torque com a estabilidade da rotação de um motor em operação. Fonte Khovarkh (1979) | 26 |
| Figura 3.1 - Regulagem do débito da bomba injetora. O pistão é girado mediante a haste de regulagem (cremalheira). Fonte Bosch (2000) | 28 |
| Figura 3.2 - Mapeamento do Regulador de Rotação. Fonte Bosch (2000) | 29 |
| Figura 3.3 - Âmbito de regulagem do regulador de rotação máxima. Fonte Bosch (2000) | 31 |
| Figura 3.4 - Regulagem de rotação intermediária (regulador variável). Fonte Bosch (2000) | 32 |
| Figura 3.5 - Rotações com carga, com as correspondentes rotações sem carga devidamente reguladas. Fonte Bosch (2000) | 32 |
| Figura 3.6 - Aumento da rotação com diferentes graus "P". Lado esquerdo = grau "P" pequeno, lado direito – grau "P" grande. Fonte Bosch (2000) | 33 |
| Figura 3.7 - Grau "P" de um regulador RQV em diversas rotações, ajustadas mediante a alavanca de comando. Fonte Bosch (2000) | 33 |
| Figura 3.8 - Influência do grau "P" sobre a rotação efetiva em caso de variação da carga aplicada. Fonte Bosch (2000) | 34 |
| Figura 3.9 - Regulagem no âmbito da marcha lenta. Fonte Bosch (2000) | 35 |
| Figura 3.10 - Curva da necessidade de combustível e de combustível debitado com aproximação. Fonte Bosch (2000) | 36 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.11 - Avanço da haste de regulagem da bomba injetora, com aproximação positiva. Fonte Bosch (2000) | 37 |
| Figura 3.12 - Torque de um motor Diesel, com e sem aproximação. Fonte Bosch (2000) | 38 |
| Figura 3.13 - Curva característica de débito. Fonte Bosch (2000) | 39 |
| Figura 3.14 - Regulador de rotação máxima. Fonte Bosch (2000) | 40 |
| Figura 3.15 - Regulador de rotação máxima no âmbito de regulagem de rotação. Fonte Bosch (2000) | 41 |
| Figura 3.16 - Regulador de marcha lenta e rotação máxima com aproximação. Fonte Bosch (2000) | 42 |
| Figura 3.17 - Regulador Variável (RQV). Fonte Bosch (2000) | 43 |
| Figura 3.18 - Regulador escalonado, faixa inferior de rotações não regulado. Fonte Bosch (2000) | 45 |
| Figura 3.19 - Regulador escalonado, faixa superior de rotações não regulado. Fonte Bosch (2000) | 45 |
| Figura 3.20 - Regulador RQ, RQV. Fonte Bosch (2000) | 47 |
| Figura 3.21 - Regulador RS, RSV. Fonte Bosch (2000) | 47 |
| Figura 4.1 - Regulador de um motor monocilíndrico estudado | 49 |
| Figura 4.2 - Modelagem do regulador do motor monocilíndrico | 50 |
| Figura 4.3 - Regulador de um motor bicilíndrico estudado | 53 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.4 - Modelagem do regulador do motor bicilíndrico | 54 |
| Figura 5.1 - Modelagem do regulador com sistema de mola de partida e correção de torque para o regulador do motor monocilíndrico | 58 |
| Figura 5.2 - Regulador com mola de partida e corretor de torque | 60 |
| Figura 5.3 - Modelagem do regulador com correção de torque | 63 |
| Figura 5.4 - Regulador do motor bicilíndrico com corretor de torque | 64 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Ensaio dinamométrico para o motor monocilíndrico com regulador original, Curva F | 70 |
| Tabela 2 - Ensaio dinamométrico para o motor monocilíndrico com regulador modificado, Curva F | 70 |
| Tabela 3 - Variação percentual de consumo, potência e torque do motor com regulador modificado em relação ao regulador original | 71 |
| Tabela 4 - Propagação de erros dos dados medidos de rotação e carga | 75 |

LISTA DE SÍMBOLOS

- °C – Temperatura em graus Celsius
- cv – Cavalo vapor (unidade de potência = 0,7355 kW)
- b – Débito de combustível
- d – Grau de insensibilidade
- daN.m – Deca-Newton (equivale a 10N.m) unidade de torque
- F_c – Força centrífuga
- g/cv.h – Gramas por cavalo vapor hora (unidade de consumo específico)
- g/kW.h – Gramas por kilo-Watts hora (unidade de consumo específico)
- h – Coeficiente de reação derivado
- k – Coeficiente de reação integral
- K – Coeficiente de adaptabilidade
- K_v – Coeficiente de torque ideal para motores Diesel
- kW – Unidade de potência no SI (equivale a 1kJ/s)
- n – rotação em rpm
- P e δ - Grau de irregularidade
- PFR – Modelo de bomba injetora unitária Bosch
- PFE – Modelo de bomba injetora unitária Bosch
- PP – Posição de partida (débito máximo da bomba injetora)
- r – Coeficiente de reação
- rpm – Rotações por minuto (velocidade angular do motor)
- R – Efeito de regulagem
- RQ e RQV – Tipos de reguladores Bosch
- RS e RSV – Tipos de reguladores Bosch
- t – Unidade de tempo
- tbs – temperatura de bulbo seco °C
- tbu – temperatura de bulbo úmido °C
- UB – Unidade de medida de índice de fumaça Bosch

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho propõe a apresentar uma noção sobre o funcionamento de reguladores de rotação mecânicos para motores Diesel, bem como apresentar, o dimensionamento e o acréscimo de funções em tais mecanismos, mostrando-se os cálculos e o projeto geométrico dos mesmos, para aplicação em motores mono e bicilíndricos, os quais serão alvo deste estudo.

É dada ênfase para reguladores mecânicos, pois os tipos de motores estudados aqui, na maioria de suas aplicações, não usam sistemas elétricos, ou seja, não têm partida elétrica, bateria e alternador. O estado da arte de sistemas de injeção de motores Diesel veiculares, hoje em dia, gira em torno do gerenciamento eletrônico e uso do “*common rail*”, o que não se aplica nos motores estudados.

Para tal foi realizado a revisão de literatura existente sobre reguladores e foi analisado dois tipos de reguladores, um aplicado a um motor Diesel monocilíndrico, e outro para um motor bicilíndrico, ambos fabricados pela empresa Agrale S.A. de Caxias do Sul Rio Grande do Sul.

Para os motores estudados foram desenvolvidas propostas para o acréscimo de funções de mola de partida e aproximação nos reguladores existentes, o que é também objetivo dessa dissertação. O dimensionamento de tais mecanismos deu-se através de projetos de modelagem auxiliada por computador, e o equacionamento das forças, momentos e massas atuantes nos mecanismos envolvidos no processo de regulação.

O projeto dos componentes e do sistema de regulação como um todo através da modelagem auxiliada por computador, se faz necessário para o correto entendimento do funcionamento do mesmo. Isso é também fundamental para a comprovação da viabilidade de acréscimo de componentes como, molas, alavancas, eixos e demais peças, as quais são responsáveis pelas novas funções, que se deseja obter.

O passo seguinte é o equacionamento e cálculo das massas, molas, e deslocamento e ângulos de giro das alavancas, para a obtenção das forças e momentos que agem sobre o sistema. Essa fase é fundamental para o funcionamento dos reguladores em estudo.

No trabalho são apresentados esquemas e figuras dos reguladores estudados, bem como o projeto das propostas de novas funções para os mesmos. Para validação do dimensionamento dos mecanismos estudados foram realizados ensaios experimentais em banco de provas, dinamométricos com motores protótipos, cujos resultados foram expressos em tabelas e gráficos, no decorrer do trabalho.

A revisão bibliográfica deste trabalho é realizada no capítulo 2, porém devido a escassez de literatura sobre o assunto, poucas informações são referenciadas sobre o tipo de regulador usado nos motores estacionários de pequeno porte.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Generalidades

Um motor Diesel necessita de regulagem de rotação, para manter sua rotação dentro de limites desejados nas variações de cargas impostas ao motor (Heisler, 2002). Essa estabilidade é obtida conforme a habilidade do sistema de combustível em manter uma rotação uniforme.

O regulador assegura a estabilidade da rotação de um motor Diesel, (Cruvru, 1978). Com o aumento da rotação causado por uma diminuição da carga imposta ao motor, o regulador, entra imediatamente em ação e corrige a posição de seus conjuntos de alavancas alterando o débito através da cremalheira da bomba injetora. Inversamente se a rotação do motor diminui devido ao aumento da carga o regulador muda a posição da cremalheira para a nova posição de equilíbrio.

A principal característica para um regulador cumprir com sua finalidade é ser estável em todas suas rotações (Pezzano e Klein, 1960). Ou seja, uma abertura progressiva de seus corpos centrífugos corresponder também a um aumento progressivo de sua velocidade de rotação do motor.

Em motores Diesel, o processo de mistura ar combustível ocorre com a aspiração de ar limpo e em excesso para dentro do cilindro, seguido de injeção de combustível sob pressão e ignição desta mescla por compressão, (Giacosa, 2001). Para uma determinada vazão de injeção e sem um sistema de regulagem, se ocorrer uma diminuição de carga de trabalho, o motor aumentará sua rotação podendo chegar o colapso de algum componente interno. Por outro lado, um aumento de carga faz diminuir a sua rotação e conseqüentemente não há aproveitamento de forma eficiente da potência do motor.

Considera-se ainda que é quase impossível para um operador comandar diretamente o débito de injeção de uma bomba, sem um regulador para controlar a rotação do

motor dentro de valores pré-determinados para qualquer regime de trabalho.

A principal função do regulador é limitar a rotação máxima de um motor (Bosch, 2000). Este deve manter o limite de rotação especificado pelo fabricante, pois o motor Diesel, sem carga e volume suficiente de injeção “dispararia” até a autodestruição. Além disso, as rotações devem ser reguladas dentro de uma determinada ou toda faixa de rotação. Dependendo do tipo de regulagem, isto envolve, por exemplo, marcha lenta e rotação máxima.

O regulador tem ainda outras funções: modificação do volume a plena carga dependente da rotação (aproximação), da carga e da pressão atmosférica ou a dosagem do volume de combustível necessário para a partida. Para essas tarefas o regulador determina o volume de débito através da posição da haste de regulagem. Esta leva o êmbolo da bomba, para a posição correta. Para bombas injetoras em linha são empregados reguladores mecânicos ou eletrônicos. Reguladores pneumáticos não são mais usados devido aos avanços das leis de emissões (Bosch, 2000).

Na figura 2.1(a), pode ser visto esquematicamente um motor que aciona um gerador ou outra máquina qualquer. Deseja-se que a velocidade de giro não dispare ou que se mantenha dentro de pequenos limites. O que deve ser inicialmente definido é um padrão para esta velocidade ou valor de referência desejado para comparar com o passar do tempo a variação da velocidade (Miralles, 1980).

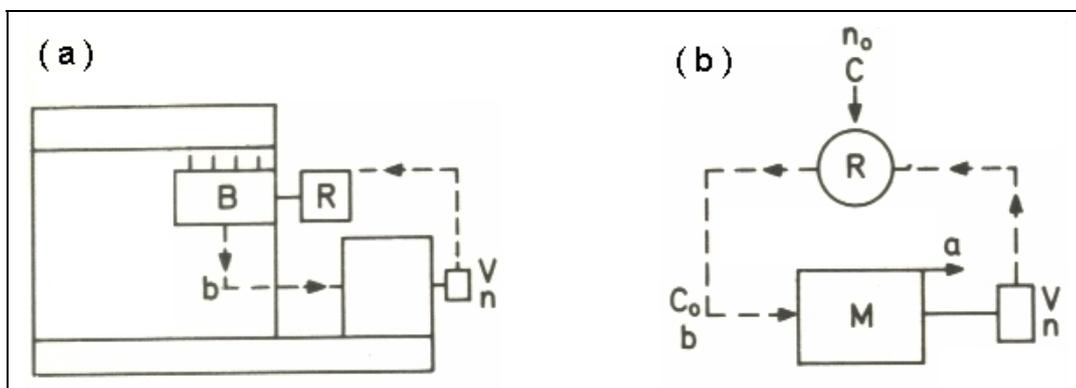


Figura 2.1 – Mecanismo de Regulagem. Onde: V = Velocidade de saída = Valor a regular; Q = Carga da máquina = Variável imposta; n_0 = Velocidade de regulagem; R = Regulador; c_0 = Reação conseguida variando o débito de alimentação; M = Motor; B = Bomba de injeção; C = Débito. Fonte Miralles 1980

Essa frequência de giro pode ser dada por um diapásão, um pêndulo, um cristal de quartzo etc., porém o normal, simplesmente neste caso, é a posição de equilíbrio entre as massas centrífugas e molas opostas R como ilustrado na figura 2.2.

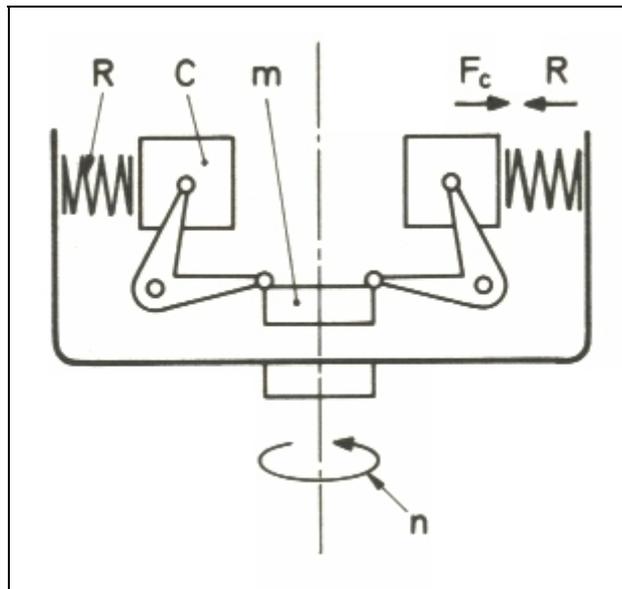


Figura 2.2 – Esquema de um regulador: Mecanismo que busca o equilíbrio entre uma força centrífuga F_c e a reação das molas R , Velocidade em r/min $n = (30.\omega) / \pi$; ω é a velocidade angular em $rad(s)$. Fonte Miralles 1980

Quando o motor entra em funcionamento aciona o regulador criando a força centrífuga $F = m.\omega^2.r$, proporcional às massas girantes, ao quadrado da velocidade angular e ao raio de giro. Esta força centrífuga põe em tensão a reação das molas opostas R e as comprime até $R = F_c$. Vê-se claramente que separando-se da posição de equilíbrio, a velocidade de giro sobe ou desce e com ela a posição da massa m .

Considerando-se o esquema da figura 2.1(b), por exemplo, toma-se à velocidade de acionamento V do regulador R e ela é comparada com a desejada n_0 . Se resultarem velocidades iguais, nada se move, caso contrário às massas se moverão para fora, se V for maior e para dentro, se V for menor. Com isso a massa m subirá ou baixará, provocando uma reação no débito da bomba de injeção.

Conclui-se que, quando o motor aumentar a rotação o débito deve ser reduzido e o motor se desacelerará e se desacelerando, agregará alimentação e o motor se reanimará, ou seja, aumentará a rotação (Miralles, 1980). Porém, se considera que ao mesmo tempo em que isto ocorre o circuito se fechará, pois ao frear ou aumentar o giro do motor, a massa m voltará a sua posição de equilíbrio. Este circuito esquemático de regulagem corresponde a figura 2.1(b).

2.1.1.Regulagem Mecânica

Para a regulagem mecânica existem diversos reguladores (Bosch, 2000):

- regulador de rotação máxima, limita a rotação máxima;
- regulador de marcha lenta e rotação máxima (emprego principalmente em motores veiculares), regula a marcha lenta e a rotação máxima, mas não a faixa intermediária. A influência sobre o volume de injeção se dá através do pedal do acelerador; e
- regulador universal, que além da marcha lenta e rotação máxima, também regula a faixa intermediária de rotação. As constantes exigências à “qualidade” do gás de escape, ao consumo de combustível, ao conforto e a potência do motor imprimem a evolução da tecnologia Diesel. Conseqüentemente, crescem as exigências feitas ao sistema de injeção, principalmente ao regulador.

2.1.2.Regulagem Eletrônica

A regulagem eletrônica Diesel (EDC Electronic Diesel Control) satisfaz as altas exigências feitas ao sistema de regulagem, possibilitando a medição elétrica bem como o processamento eletrônico flexível de dados (Bosch, 2000). Circuitos de regulagem com atuadores elétricos, comparados com os reguladores mecânicos convencionais, oferecem tanto melhores como novas funções de regulagem. Os reguladores eletrônicos consistem em:

- diversos tipos de sensores;
- unidade de comando eletrônica; e

- mecanismo atuador montado à bomba injetora.

2.1.3. Regulagem Hidráulica

O princípio de funcionamento em que se baseiam os reguladores hidráulicos, que são usados nas bombas distribuidoras rotativas, é que o débito se faz muitas vezes por regulagem da pressão. Neste sistema de regulagem, aproveita-se as características dos circuitos hidráulicos, ou seja, a servoassistência, o isocronismo, o amortecimento e o grau de irregularidade, (Miralles, 1988).

2.1.4. Regulagem Pneumática

De todas os sistemas de regulagem este é o pior, pois a regulagem é obtida com uma margem de erro de 12 a 25% é o menos adequado para um motor Diesel (Miralles, 1988). Entretanto, é o mais simples e barato, razão pela quais muitos motores as usam. É fácil encontrar tal sistema de regulagem, já que são empregados preferentemente em veículos de passeio.

O funcionamento deste tipo de regulador consiste em uma membrana, quando o motor está em funcionamento à posição desta membrana (e com ela a vareta de regulagem) depende da magnitude dada pela diferença de pressão entre os dois lados da membrana, de acordo com cada carga aplicada ao motor. Neste caso, para uma posição determinada da borboleta de regulagem, se o motor recebe mais ou menos carga, diminui ou aumenta rotação.

2.1.5 Regulagem por Pressão

Não é sempre a velocidade de giro o valor da regulagem. É usual também que seja a pressão na bomba de alimentação, (Miralles, 1980). Sabe-se que a velocidade de saída de um líquido por um orifício vale:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot p} \quad (12)$$

onde g é a aceleração da gravidade (\approx constante) e p a pressão. As regulagens por pressão de alimentação da bomba são sempre volumétricas e, portanto, o débito que estabelece é proporcional à velocidade de giro n . Como a seção de passagem ou saída é sempre a mesma, resulta que também v é proporcional a n e, portanto, a pressão p é proporcional a n^2 ou ainda, proporcional a ω^2 . Isso é a mesma coisa que regular diretamente por n . Neste caso, é a variação da pressão que deve ser compensada por uma mola oposta, a qual fixa a posição da cremalheira ou débito da bomba de injeção.

2.2. Bombas Injetoras Individuais

Para o estudo de reguladores de rotação de motores Diesel, se torna imprescindível um breve conhecimento sobre bombas injetoras. No caso em estudo o regulador será totalmente independente da bomba. Esse é o caso das bombas unitárias sem eixo de cames. A regulagem está intimamente ligada à injeção e ao longo desta explanação, para um melhor entendimento, serão abordadas as bombas, utilizadas com os reguladores, objetos deste estudo.

As bombas injetoras mostradas nas figura 2.3 e 2.4 são individuais e do tipo PF, cuja concepção consiste de um cilindro do tipo PF, (F = acionamento externo) e não possuindo eixo de comando próprio.

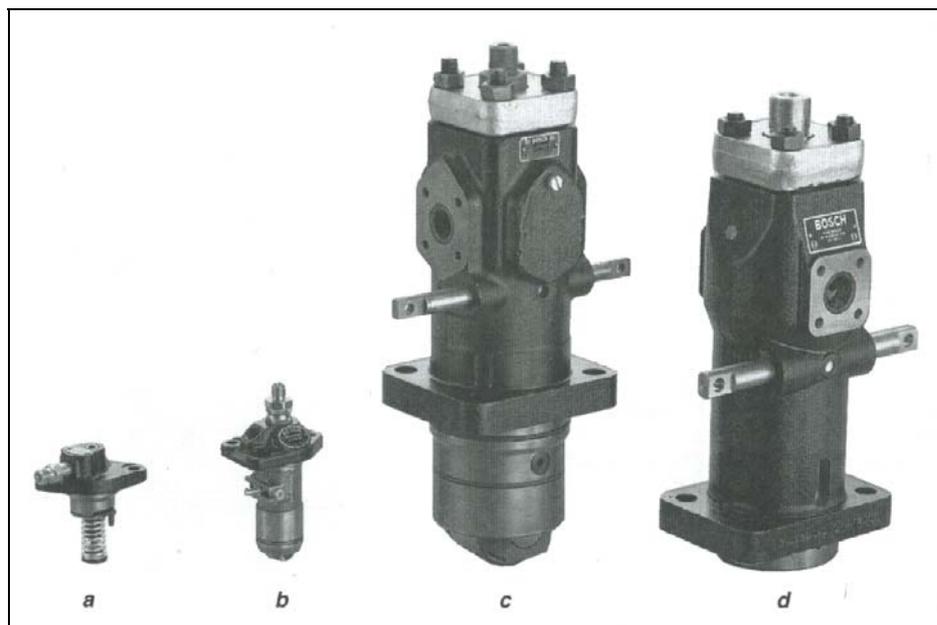


Figura 2.3 – Bombas injetoras tipo PF, comparação de tamanhos: a) tipo PFE 1 Q; b) tipo PFR 1 K;

c) tipo PFR 1 W e d) tipo PF 1 D. Fonte Bosch 2000

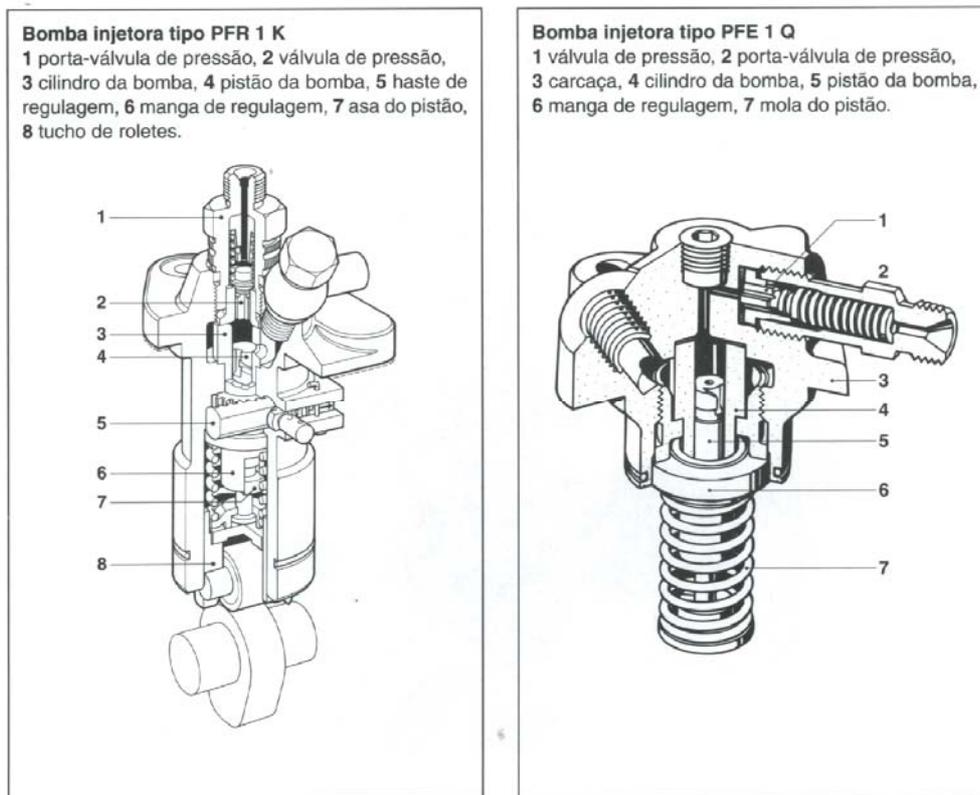


Figura 2.4 – Bombas injetoras tipo PFR e PFE. Fonte Bosch 2000

Bombas injetoras PF e bombas injetoras PE (em linha), são análogas em seu funcionamento. As bombas injetoras PF são adequadas para os motores pequenos, médios e grandes. São fixadas ao motor através de um flange. O emprego de bombas injetoras PF permite a aplicação de tubulações de injeção muito curtas em motores de cilindros múltiplos, sendo que cada cilindro do motor é atribuída uma bomba injetora. Assim o motor de múltiplos cilindros também é equipado com apenas um tipo de bomba e tubulação de pressão. A bomba injetora PF é equipada com um dispositivo de fixação, que mantém a bomba injetora em seu volume de plena carga, para evitar trabalhos de regulagem adicionais na instalação da bomba injetora.

Em motores de grande porte, o regulador é montado diretamente à carcaça do motor. A variação de volume determinada por ele para regulagem de rotação, é transmitida às diversas bombas por um conjunto de hastes integradas ao motor, (Bosch, 2000).

São empregados reguladores mecânico-hidráulico, eletrônicos e em raros casos reguladores exclusivamente mecânicos. Um elemento intermediário flexível no conjunto de hastes de transmissão para cada bomba injetora permite a regulagem, mesmo no caso de bloqueio do mecanismo de regulagem em uma das bombas.

Os ressaltos de acionamento, para as diversas bombas injetoras PF, encontram-se no eixo de comando das válvulas do motor. Por isso, a regulagem da injeção por deslocamento relativo ao eixo de comando, em relação às engrenagens motrizes, não é possível, (Bosch, 2000).

Através do deslocamento de um elemento intermediário, por exemplo, de uma alavanca oscilante entre o eixo de comando e tucho de roletes, pode ser provocado um ângulo de avanço de alguns graus. Com isto é possível obter uma otimização de consumo e emissões ou uma adaptação à disposição de ignição perfeita, para diversos tipos de combustíveis, figura 2.5.

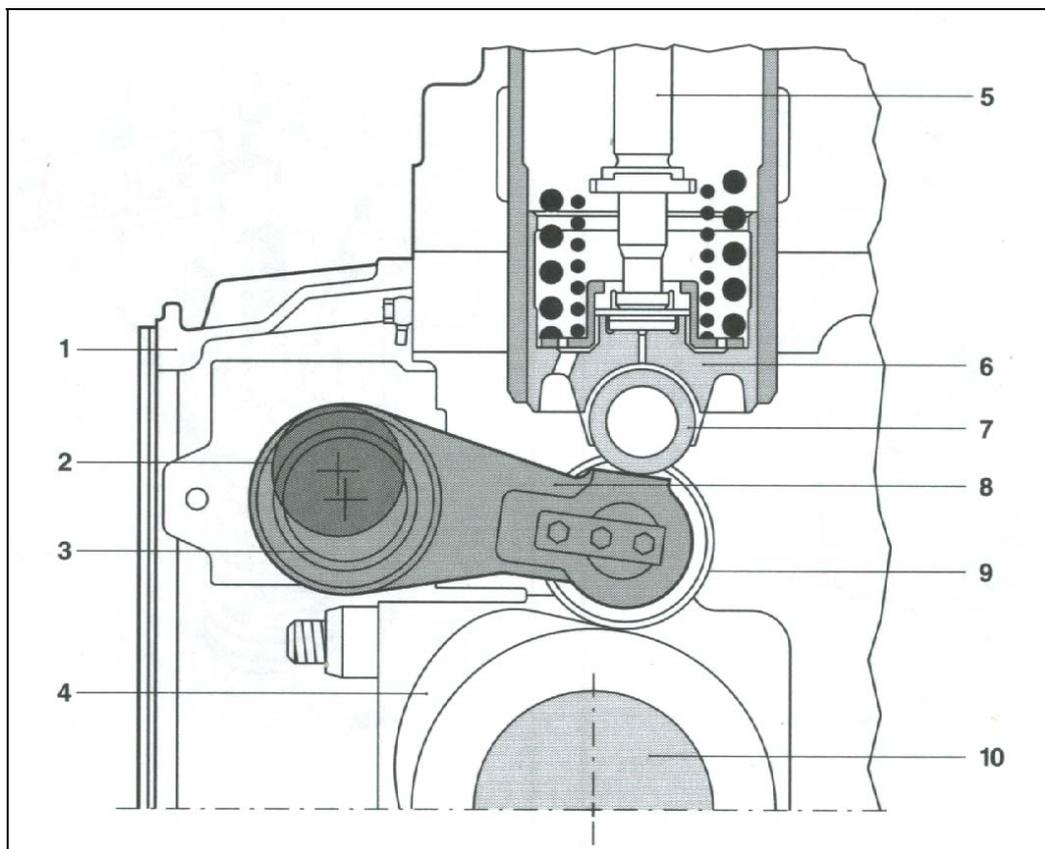


Figura 2.5 – Avanço de injeção. No mancal excêntrico da alavanca oscilante. 1 - motor; 2 – contorno do eixo de regulagem; 3 – mancal da alavanca oscilante; 4 – ressaltos de injeção; 5 – pistão da

bomba; 6 – tucho de roletes; 7 – rolete do tucho; 8 – alavanca oscilante; 9- roldana do excêntrico; 10 – eixo do comando do motor. Fonte Bosch 2000

2.3. Acoplamento

Num circuito de regulação como mostrado na figura 2.1, nota-se que há uma correlação fixa entre o débito c e *velocidade* v , diz-se que é um acoplamento de variáveis (Miralles, 1980). Não existindo energia externa será sempre estável, porque as perdas (atritos, amortecimentos, desenvolvimento calorífico, etc.) o estabilizarão, porém isso não representa a realidade do sistema de regulação. Este acoplamento do débito e da velocidade pode, sempre receber energia do motor e então, a menos que se pretende minimizar a correspondência entre c e v , ou seja, diminuir o erro ou aumentar a reação da velocidade v sobre o débito c . Alcançar-se-á o que se chama “condição de bombeio”, e diz-se que o conjunto começará a apresentar oscilações entrelaçadas como apresenta a figura 2.10(b), mostrada mais adiante.

Pode-se definir várias características de regulação como o coeficiente de reação. Supõe-se que um motor sem regulador está em estado de equilíbrio, com uma pequena carga, a bomba injeta um débito b fixo e o motor gira a n_0 rotações, (Miralles, 1980). Veja-se a figura 2.6, onde após um tempo t o motor sofre um pequeno aumento de carga.

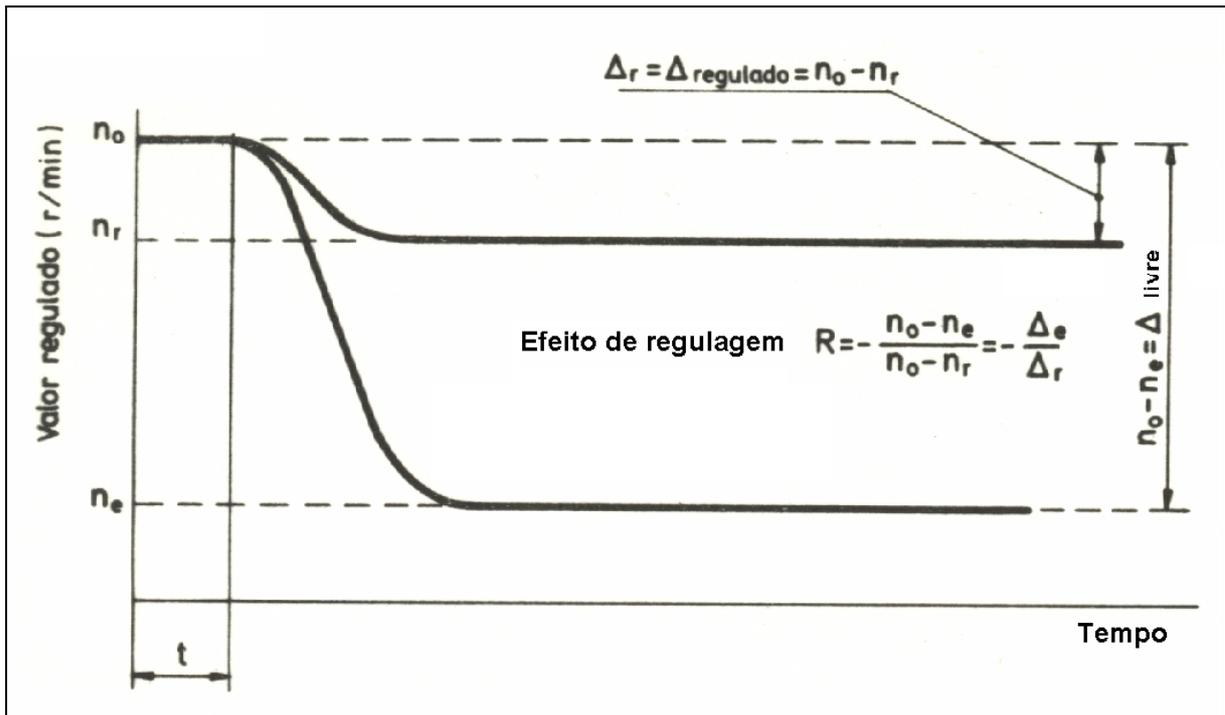


Figura 2.6 – Efeito de regulagem R. Fonte Miralles 1980

Como a bomba não injeta mais, diminui a rotação, e passa a ser n_e o novo estado de equilíbrio sem regulador. Com o regulador agindo e devido à reação do mesmo ocorre o aumento de débito da bomba, a velocidade de giro só cairá até n_r e pode-se dizer que o efeito de regulagem R é:

$$R = \frac{n_0 - n_e}{n_0 - n_r} = \frac{\Delta_e}{\Delta_r} \quad (1)$$

O efeito de regulagem é a capacidade que tem um regulador de reduzir a aceleração ou a desaceleração R vezes. Deseja-se que n_0 não varie, então deve-se comparar n_r com um n_0 constante e não com a própria velocidade de equilíbrio do motor e portanto proporcionado por uma fonte exterior, que tenha essa característica em função de um pequeno tempo de reação ao equilíbrio, para que os mecanismos que devem atuar possam assimilar que foi produzido esse desequilíbrio. Nesse tempo de transição o processo ocorre como vem-se explicando e tão logo se produzem a rotação n_0 .

Quando se fala de erros não se referem nunca em valores reais e sim em valores relativos, pois são adimensionais e, portanto comparáveis. Assim, por exemplo, tem-se $\Delta_e = n_0 - n_e$ e de $\Delta_r = n_0 - n_r$, porém na realidade sempre será:

$$\Delta_e = \frac{n_0 - n_e}{n_0} 100 \quad (2)$$

$$\Delta_r = \frac{n_0 - n_r}{n_0} 100 \quad (3)$$

ainda que resulte que o efeito da regulagem continue sendo:

$$R = -\left(\frac{n_0 - n_e}{n_0}\right) \div \left(\frac{n_0 - n_r}{n_0}\right) = -\frac{\Delta_e}{\Delta_r} \quad (4)$$

Deve-se ressaltar, que nem Δ_n é r/min nem Δ_n são gramas por aceleração, logo todos os erros são um percentual do valor desejado. Restringindo um pouco mais, a figura 2.7 mostra um conjunto a regular M . Uma medida do valor a regular n na saída (por exemplo, r/min) e compara-se o padrão existente como fonte de reação do regulador R , onde se corrige a deficiência, atuando sobre uma ação reguladora devidamente escolhida, por exemplo, a dosagem do fluxo b que compensa o efeito provocado pelas variações de carga ou consumo C e B representa a bomba de injeção.

Ainda é possível acontecer incrementos ou erros percentuais nas seguintes variáveis: Δ_n do valor a regular ou velocidade de giro; Δ_b do valor regulador ou dosado; Δ_c do valor perturbador ou carga.

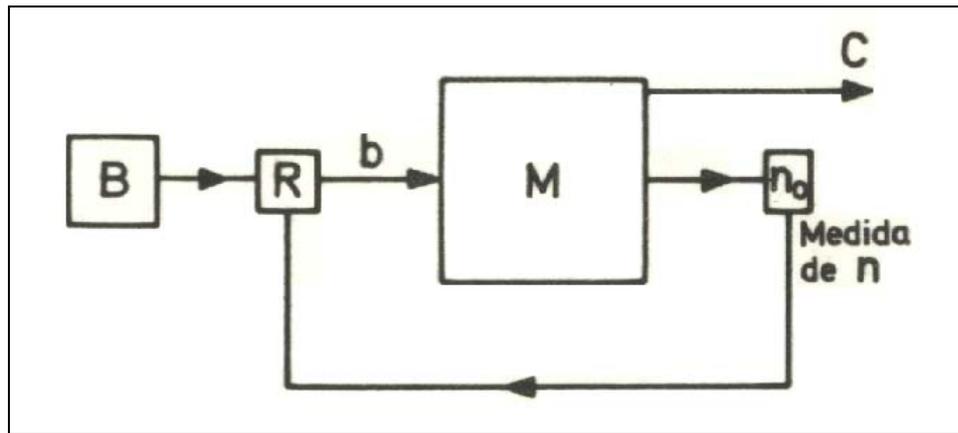


Figura 2.7 – Característica de um circuito de regulação. Fonte Miralles 1980

Dos valores e do tempo que alcançam seu equilíbrio deduzem-se valores importantes e pode-se afirmar que o coeficiente de reação r , o coeficiente de reação derivado h e o coeficiente de reação integral k são dados por:

$$r = -\frac{\Delta_b}{\Delta_n} \quad (5)$$

$$h = -r \cdot t_d \quad (6)$$

$$k = -r / t_i \quad (7)$$

2.4. Reguladores em Regime Estático

Na figura 2.8, são apresentadas curvas características de um regulador. Representando-se nas abscissas os raios de giro que tomam as massas para corresponder à alimentações extremas (sem carga e sobrecarga) e nas ordenadas os valores da força centrífuga ou reação das molas, a curva que define um regulador normal é tal como a 1-2 que corta o eixo das abscissas no ponto 7, pois representado

desta forma resulta que os valores ω_1 e ω_2 , que dão idéia da inclinação das linhas 0-1, 0-2, etc., são proporcionais as velocidades de giro. Um regulador desta classe se chama estático e pode operar, pois quando se acelera reduz o fluxo e limita a velocidade à ω_1 e quando se desacelera, ocorre o contrário.

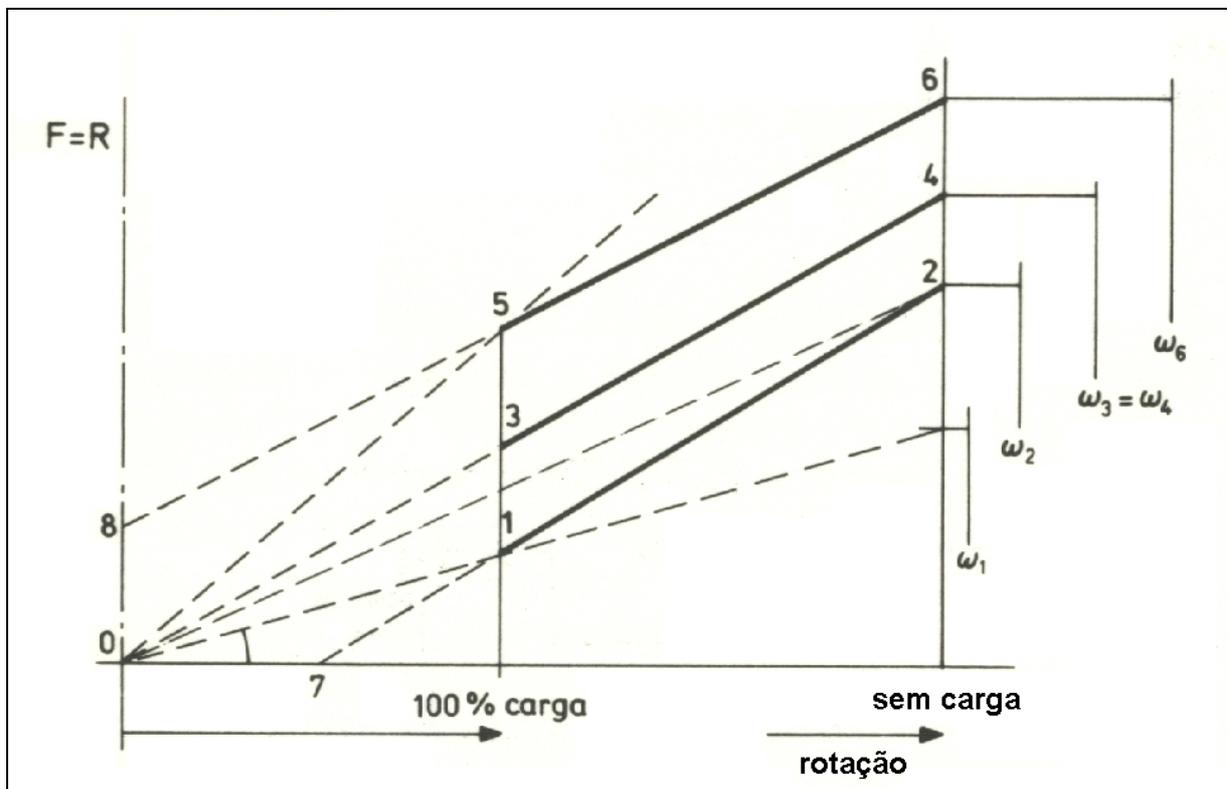


Figura 2.8 – Característica do regulador. Fonte Miralles 1980

Se a regulação corresponde à curva 3-4, nesse caso se chamaria não estático e seria um regulador sem reação, e diz-se, que não se contemplará das trocas de velocidade nem ao sentido que tenderia a atuar, pois $\omega_3 = \omega_4$.

A curva 5-6, cuja característica corta o eixo de ordenadas em 8, é a pior curva característica. Nessa situação ao acelerar o motor, o regulador acelera cada vez mais, pois ω_5 e em carga é maior que ω_6 em vazio.

2.5. Grau de Irregularidade

Para um regulador, $\omega_2 - \omega_1 = \Delta\omega$ deve ser muito pequeno para que a velocidade tenha pequenas diferenças, (Miralles, 1980). O grau de irregularidade é definido pela expressão:

$$\delta = \frac{n_2 - n_1}{n_1} 100 = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_1} 100 \quad (8)$$

Em geral δ varia entre 4 e 10%, ou seja, que entre a marcha ou velocidade de giro, com a alavanca ou pedal de aceleração no máximo, que o motor chega em vazio ou em plena carga, não se pode ter uma variação maior que entre 4 a 10%.

O grau de irregularidade, tal como definido é o grau de irregularidade permanente, porém se o regulador receber uma alteração brusca na rotação, de modo que momentaneamente se superam os limites de velocidade, alcançando valores instantâneos, tem-se o grau de irregularidade instantâneo, que visualiza-se na figura 2.10(a), n_{iM} e n_{im} , mostrada na página 18.

A velocidade n_{iM} mais distante da inicial n_0 que se alcança, define o grau de irregularidade instantâneo ou temporal dada por:

$$\delta_i = \frac{n_{iM} - n_0}{n_0} \quad (9)$$

cujo valor depende do tempo da perturbação e da rapidez com que se apresenta, diz-se do valor do erro que se pressupõe.

Outros autores calculam o grau de irregularidade com relação ao valor médio de n ou seja:

$$(n_1 + n_2)/2 = n_m \quad (10)$$

e então tem-se:

$$\delta = \frac{n_2 - n_1}{n_m} 100 \quad (11)$$

fato que não parece de todo lógico, já que o valor de referência tenderá a ser sempre a velocidade de giro a plena carga e não o valor médio.

Alternativamente pode-se dizer, que se o grau de irregularidade é de 4%, ou seja, se um motor a plena carga gira a 1500 rpm, por exemplo, sem carga girará a 1500 mais 4%. Isso significa 60 rotações a mais, resultando 1560 rpm. Outros autores preferem considerar o grau de irregularidade $\pm 2\%$, possivelmente porque representa uma variação menor, ou seja, a velocidade média de 1530 rpm pode aumentar ou diminuir de 2%, ou seja, de 30 rpm.

2.6. Grau de Insensibilidade

Quanto menor for o grau de irregularidade e isso pode ser conseguido, utilizando uma mola menos rígida, ou seja, a linha 1-2 da figura 2.9 tenderá a ser semelhante a curva 3-4, (Miralles, 1988). O grau de irregularidade melhorará, porém há um limite, isto é, antes de se chegar à posição da curva 3-4, o regulador já estará fora de ação. A semelhança do grau de irregularidade existe o grau de insensibilidade. Quer-se com isso dizer que, quando ocorre um desequilíbrio, o regulador não assimila imediatamente, até que o equilíbrio é suficiente para vencer as resistências internas do conjunto dos mecanismos. Desta forma define-se:

$$d = \frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} \quad (12)$$

onde d é o grau de insensibilidade, $\Delta\omega_0$ é variação da velocidade angular para que o regulador inicie a reação. Na figura 2.9, tem-se na curva 1-2 a linha que define um determinado regulador.

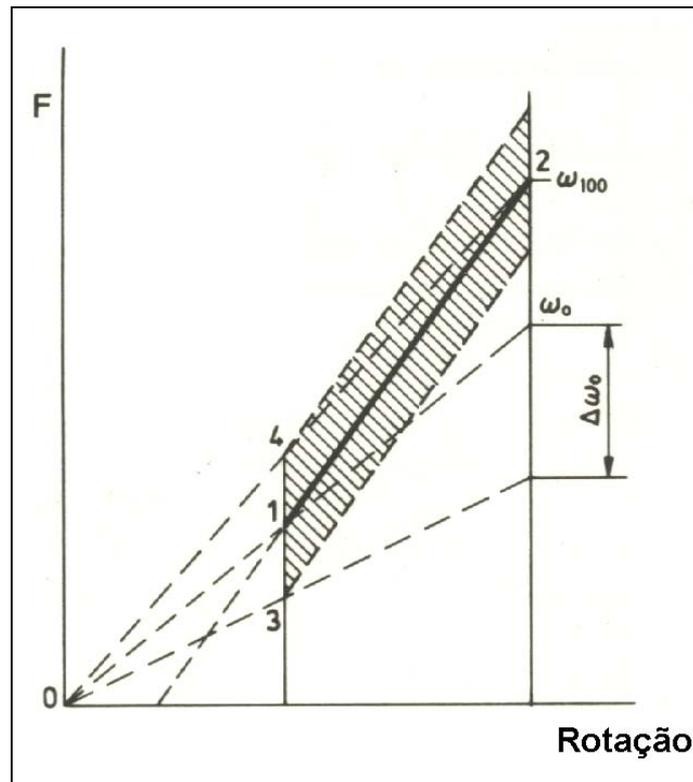


Figura 2.9 – Zona de insensibilidade de um regulador. Fonte Miralles 1980

Supondo-se que se está em equilíbrio no ponto 1 a velocidade ω_0 , se um desequilíbrio for produzido o regulador não se moverá até que se acumule um excesso de força que corresponde aos pontos 3 ou 4, conforme a velocidade diminua ou aumente. Resulta assim uma zona achurada dita de zona de insensibilidade do regulador.

2.7. Estabilidade

O grau de insensibilidade d deve ser menor que o grau de irregularidade δ , pois se a intensidade d fosse maior, quando o regulador inicia-se a correção já havia superado a irregularidade pretendida (Miralles, 1980). Porém, isso ilustra outro fenômeno próprio da regulagem.

Se a reação do regulador ocorrer tardiamente essa será muito enérgica já que finalmente é detectada uma diferença Δ_n que já cresceu demais e sua correção deverá ser excessiva. Tem-se então uma curva de correção que remotamente se

parece a da figura 6, a qual será similar a da figura 2.10a. Porém, ainda assim ao invés de se conseguir finalmente o valor estável n , resulta uma oscilação alternada ou crescente como em 2.10b. A regulagem obtida deve ser do tipo 2.10c.

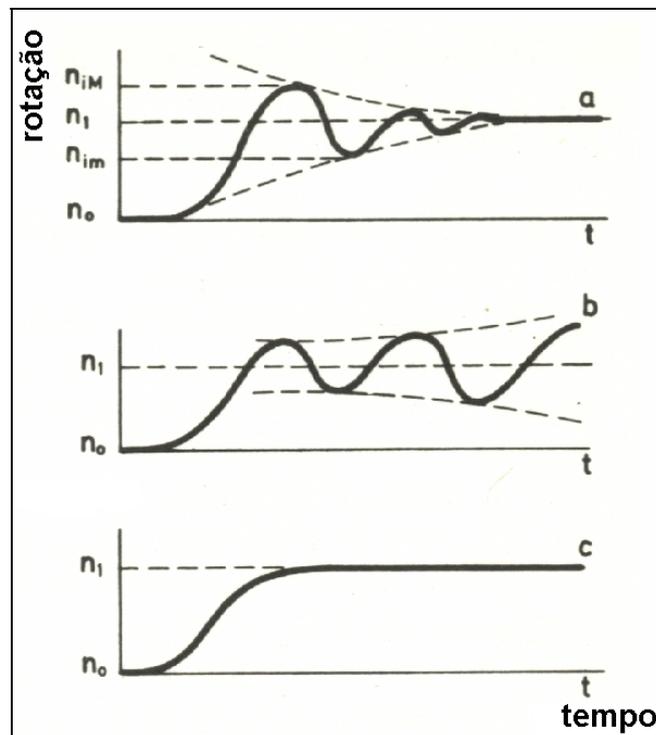


Figura 2.10 – Possibilidade de regulagem: a)Oscilante amortecida; b)Oscilante alternada; c)Estável. Fonte Miralles 1980

Às vezes é impossível que o regulador tenha força suficiente para mover com a facilidade necessária os mecanismos corretores (alavanca de regulagem da bomba de injeção). Nesses casos haverá a ação de uma servoassistência, que não é mais do que a ampliação da força do regulador por meio de uma fonte externa, que pode ser elétrica ou pneumática, mas nestes casos é quase sempre hidráulica e o líquido empregado pode ser o próprio combustível.

Se há servoassistência, o esquema da figura 2.1 passa a ser o da figura 2.11, a única diferença que o regulador R não aciona diretamente a bomba corretora B , mas através da servoassistência S que recebe a energia suplementar H . Em geral essa energia suplementar vem fornecida pelo próprio motor. O valor de comparação C pode ser externo e dado por V como já citado no caso geral.

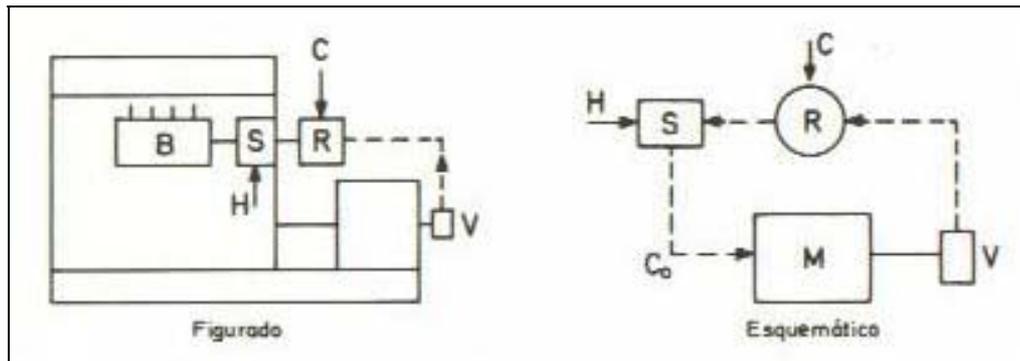


Figura 2.11 – Mecanismo de regulação servoassistido. Compara-se com a figura 1: Onde tem-se: S = servo = amplificador de sinal e de reação C_0 . H = fonte de chegada de energia adicional. Fonte Miralles 1980

2.8. Regulagem Proporcional

A regulagem proporcional é aquela em que o regulador, que frente a uma flutuação do estado de equilíbrio externo, provoca variação Δn da velocidade e que se quer governar, respondendo uma reação por meio do débito de alimentação proporcional ao erro detectado, (Miralles, 1980). A velocidade de giro n em rotações por minuto é o valor a regular ou de saída.

O débito b em $\text{mm}^3/\text{injeção}$ é a quantidade que provoca a recuperação graças à ação do regulador. Tem-se, pois, um equilíbrio entre a carga c_0 , velocidade n_0 e débito b_0 . A figura 2.12 mostra as perturbações em ensaios práticos com e sem regulador acoplado ao motor.

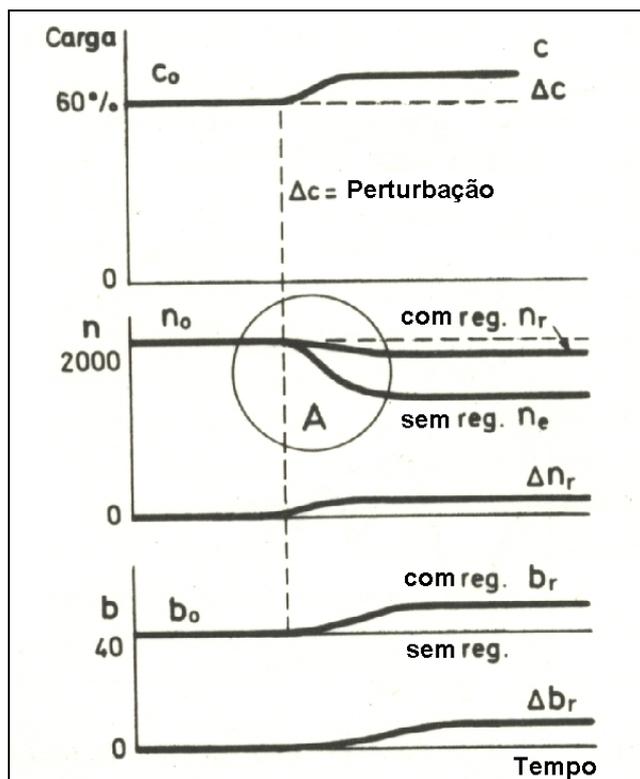


Figura 2.12 – Efeito de uma perturbação, em um ensaio. Vê-se as formas que podem apresentar o detalhe A na figura 2.13. Fonte Miralles 1980

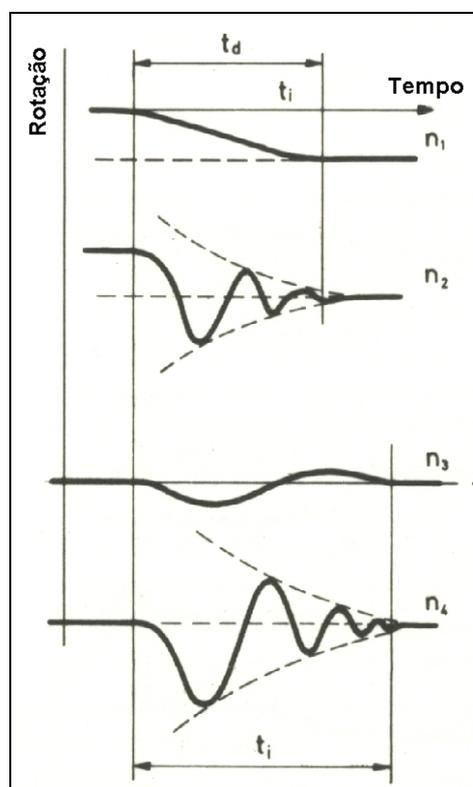


Figura 2.13 – Formas que podem apresentar a curva no intervalo A da figura 12, t_d = tempo de estabilização, t_i = tempo de recuperação. Fonte Miralles 1980

2.9. Regulagem Derivada

Utilizam-se artifícios ou métodos para que a reação seja proporcional a rapidez com que se produz um erro, isto é, a uma mudança muito brusca e a uma flutuação lenta (Miralles, 1980). Este sistema se chama regulagem derivada e é interessante, pois tem tendência a dar regulagens estáveis com graus de irregularidades pequenos, como pode ser visto nas figuras 2.14 e 2.15.

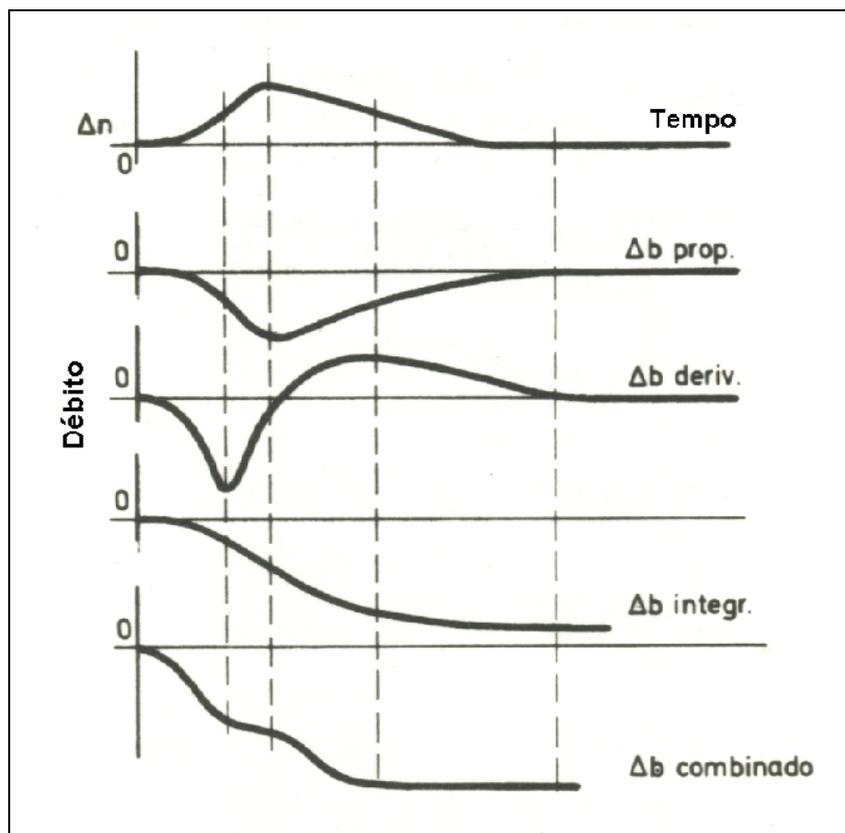


Figura 2.14 – Reação no débito em cada tipo de regulagem, segundo a forma de reação ante uma reação de n . Fonte Miralles 1980

2.10. Regulagem Integral

Existem casos em que o regulador age no sentido de aumentar ou reduzir o erro, e diz-se, proporcionalmente ao erro sem que, adicionalmente, atua a proporção em que se mantém esse erro e se chama então regulagem integral (Miralles, 1980). Isso pode ser visto nas figuras 2.14 e 2.15. Observando as curvas básicas da figura 2.15, mostra

que se produz uma flutuação de carga e a b que essa flutuação se traduz em uma variação da velocidade de giro n . Pois, sem o regulador se tenderia a um resultado parecido a c , a rotação se multiplica. Com o regulador proporcional se reduzem, curva d e com o integral pode, inclusive voltar ao seu valor de origem, pois a ação é muito brusca e rápida. Finalmente f seria uma regulação derivada.

Na figura 2.14 tem-se curvas semelhantes, porém se faz que permite adotar valores comparados da correção e para uma queda de carga, fornece erros na correção do débito, porém mediante uma perturbação com recuperação.

Reguladores derivados e diferenciais são facilmente obtidos através de mecanismos com amortecimentos viscosos, sistemas com passagem de líquido servomotor estranguladas. Na figura 2.15, são apresentadas as formas de regulação e valor de correções.

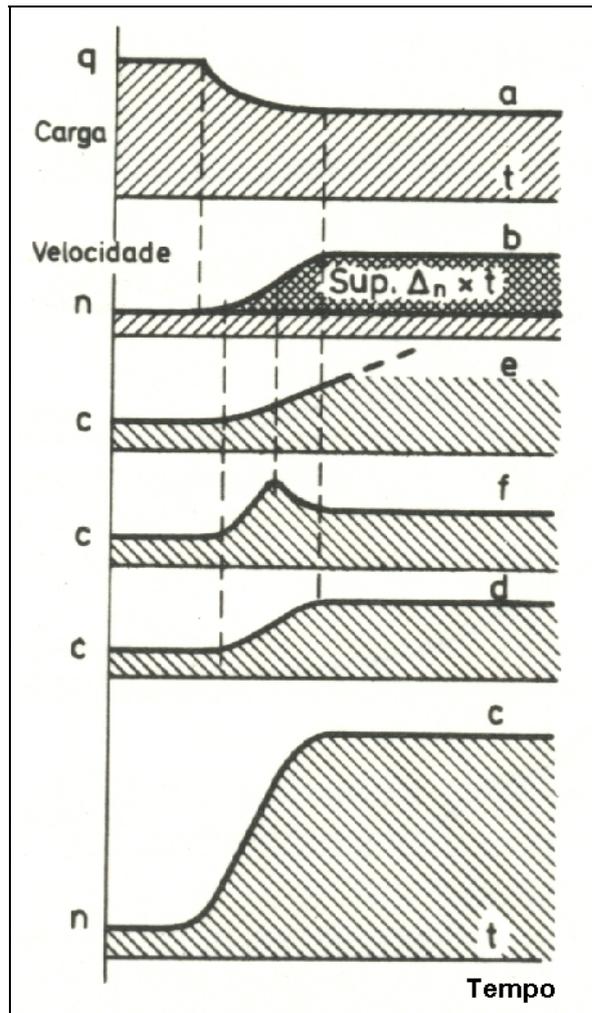


Figura 2.15 – Formas de regulação e valor de correções. a = Carga ou perturbação; b = Efeito na velocidade; c = Sem regulador; d = regulação proporcional; e = regulação derivada; f = regulação integral; n = velocidade; c = débito; q = carga. Fonte Miralles 1980

2.11. Tempos de Reação

Em uma regulação são muito importantes os tempos de reação, que dependem das inércias e das resistências a vencer, (Miralles, 1980), Tem-se inicialmente um tempo de transmissão do sinal t_s que é o tempo da flutuação iniciada no sistema regulador. É importante que t_s seja o menor possível.

O tempo de reação t_r , é o tempo que um sistema de regulação leva para ser sensível a atuação do mecanismo corretor depois de haver iniciado a reação do regulador. O tempo de perturbação t_p , muito menos importante, porém mais manejável, o qual é o tempo que uma perturbação demora em acelerar o motor. Esse valor

depende quase exclusivamente da inércia e da característica de rotação e carga aplicada ao motor.

Tem-se ainda o tempo de incremento de declive da perturbação ou tempo de aceleração da perturbação, t_A . Com base nesses tempos, pode-se concluir que sempre será mais fácil a regulação se a velocidade de transmissão do sinal é rápida, ou seja, t_s muito pequeno e se a razão entre a o tempo de e aquele de transmissão é grande, ou seja:

$$t_r / t_s > 1 \quad (13)$$

Tanto o valor da variação de n ou v em relação ao valor desejado, como a variação dependente, Δn e $\Delta n / t$ sejam adimensionais e, portanto, comparáveis, resultando que $\Delta n / t$ é uma constante do regulador que depende do tempo. É difícil de comparar com uma pendente desejada, e diz-se que a pendente ou variação do valor da reação não seria uma constante do regulador e por isso sugere-se determinar o valor para um tempo de reação igual aquele em que a diferença inicial se reduz a $1/e = 1/2,718$, ou seja, aproximadamente a $1/3$ (um terço). Nesse caso K é uma constante do regulador, isto é sua característica integral.

Isso significa que uma regulação integral é uma proporcional cujo coeficiente de reação vai crescendo à medida que transcorre o tempo de regulação. Neste tipo de regulação é característico que já não há correlação unívoca entre os valores (e) e (v) ou entre as posições da luva e cremalheira destino que depende do estado de reação. É uma regulação flutuante, de acordo com o exposto sobre (h) e (k) necessita-se fazer o traçado do problema em termos diferenciais, porém é uma forma clara para explicar o processo, ainda que matematicamente mais inexata, pois para o problema proposto é mais que suficiente.

2.12. Possibilidade de Melhora

As regulagens mais comuns são as muito proporcionais, (Miralles, 1980). Se há problemas, pode-se melhor sempre, aumentando-se a inércia ou o grau de irregularidade, tencionando-se a mola ou colocando-se uma menos rígida. Não convence em suma um t_r , tempo de reação longo e que $t_r / t_s > 1$. Na regulação integral é desejável que $t_p / t_s > 1$, ou seja, que o tempo de perturbação possa ser longo. Resulta que r e h estão limitados por t_s , o qual, deseja-se que seja pequeno.

Na regulagem derivada e a relação $\Delta t / t_s > 1$, do tempo de aceleração a tempo de chegada do sinal, o que deve ser grande. Tudo isso é interessante porque resulta que se tem um regulador instável que produz oscilações lentas e que lhe falta integração e se pode melhorar aumentando inércias ou tempo de reação. Em troca se apresentam oscilações rápidas e que lhe falta derivação e a solução pode estar em aumentar os amortecimentos ou diminuir o tempo de transmissão do sinal.

Quanto mais se pretende reduzir o grau de irregularidade δ , mais se aproxima do grau de insensibilidade d , fica mais difícil conseguir uma relação estável. Há casos em que convém ter uma irregularidade muito pequena, ou seja, uma velocidade muito constante. Nesses casos recorre-se quase sempre a servoassistência, ou seja, quando ocorre a mudança de carga imposta ao motor, uma vez conseguida a nova condição de equilíbrio do sistema de regulagem, o mecanismo de retorno à rotação padrão, isto pode ser considerado uma regulagem em dois tempos, como ilustra-se na figura 2.16.

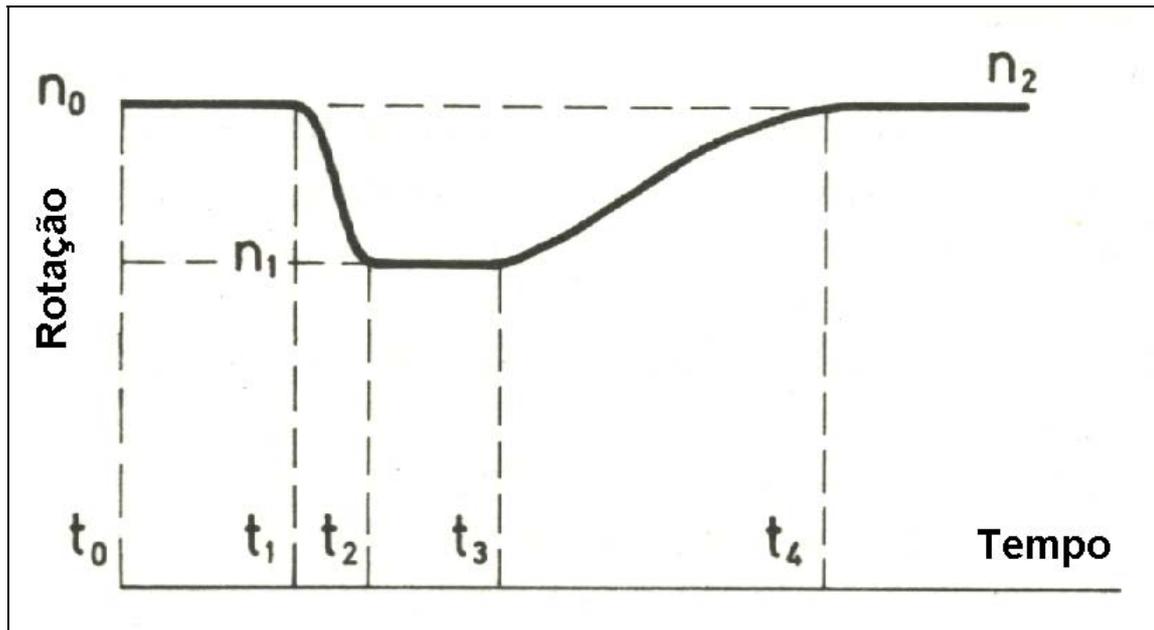


Figura 2.16 – Regulação a velocidade constante. Isocronismo: δ instantâneo; δ permanente = 0; n_0 e t_0 = valores iniciais; n_1 = diminuição da rotação; t_2 e t_4 = fim da ação do regulador; t_1 = tempo da perturbação; t_3 = tempo de recuperação.
Fonte Miralles 1980

2.13. Operação Estável e Reserva de Torque

O torque desenvolvido por um motor é estável e igual ao momento total das resistências ao movimento, (Khovarkh, 1979). Em operação o momento de resistência depende das resistências ao movimento a que o motor é submetido, e tais cargas variam dentro de grandes limites. Para um movimento estável entre o torque do motor e o momento de resistência, o motor deve restaurar com a menor variação possível de rotação quando a carga mudar.

A figura 2.17 mostra as curvas de torque ao freio de três motores e suas rotações características correspondentes. Na taxa imposta, todos os motores desenvolvem o mesmo torque.

Todos os motores podem superar o momento de resistência $T_{\Sigma 1}$, na razão de rpm do eixo do motor. Se a condição de movimento cause um acréscimo de resistência ao movimento que corresponde à curva $T_{\Sigma 2}$, as condições de equilíbrio do motor, as variações de momento com o rpm são descritas pelas curvas I e II, poder-se-

ia alcançar as rotações n_1 e n_2 e o terceiro motor não seria capaz de superar este momento.

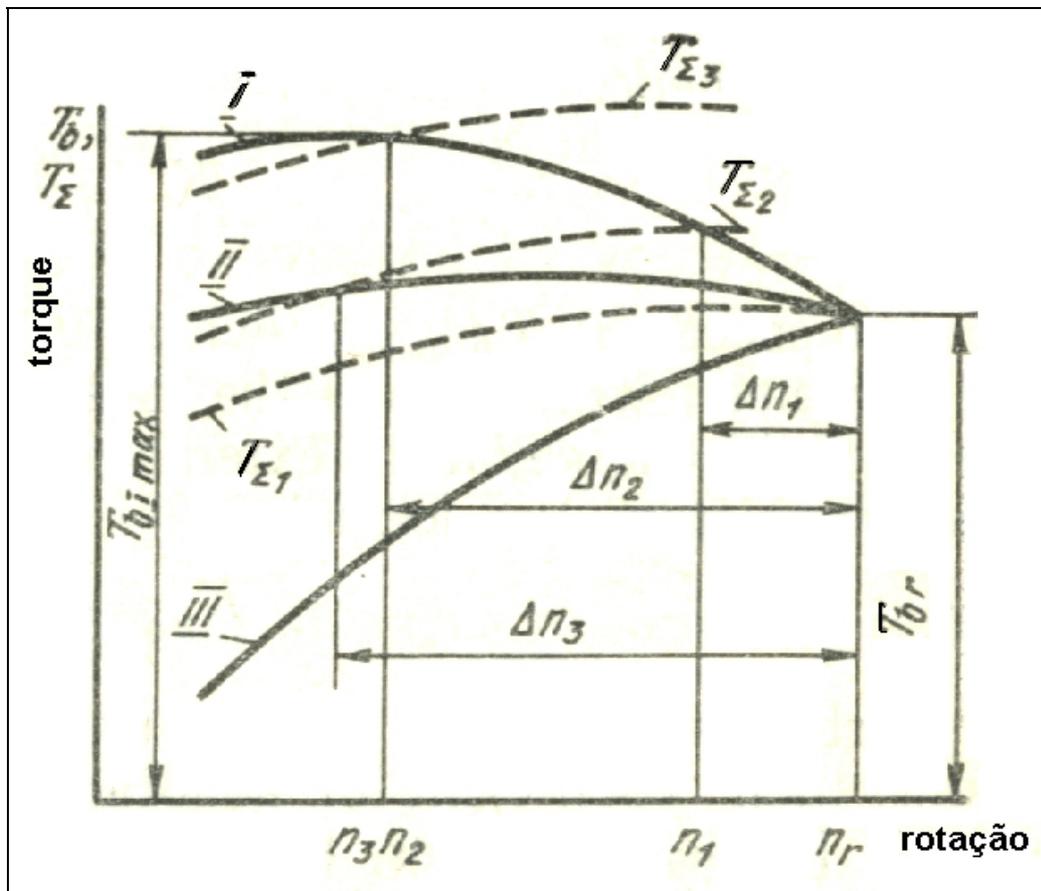


Figura 2.17 – Influência da mudança de torque com a estabilidade da rotação de um motor em operação.

Fonte Khovarkh 1979

Se a resistência de movimento é tal como a mostrada pela curva T , a razão de equilíbrio será acertada para o primeiro motor na rotação n_2 , enquanto o segundo motor será incapaz de superar este momento.

Pode ser visto na figura 2.17, que se o torque modifica ao longo da curva, a rotação do motor será alterado quando a resistência do movimento muda. A potência do motor será suficiente para superar esta resistência.

Em motores Diesel, a mudança de Δn com a mudança de resistência ao movimento não depende da carga, desde que as cargas totais e parciais características tenham pouca variação.

A estabilidade de um motor em operação é estimada de acordo com a reserva de torque determinada pela razão de máximo torque para o torque desenvolvido pelo motor na taxa imposta. Esta razão é conhecida como coeficiente de adaptabilidade.

$$K = \frac{T_{b.máx}}{T_{b.n_r}} \quad (14)$$

onde, $T_{b.max}$ é o torque máximo e $T_{b.nr}$ o torque de potência máxima.

A velocidade n , $T_{b max}$ no qual o máximo torque é obtido, é um parâmetro que mostra a faixa de velocidade dentro da qual a operação do motor é estável nas características externas possíveis. Esta faixa é obtida a partir de:

$$K_v = \frac{n_{Tb.máx}}{n_r} \quad (15)$$

onde n_r é a rotação de potência máxima.

Em motores Diesel, a curva de torque é geralmente suave e o coeficiente de adaptabilidade não deve exceder a 1,15. O valor de k_v , que é o coeficiente de torque para um rpm ideal, em motores Diesel, varia de 0,55 a 0,7.

3. REGULADORES BOSCH

3.1. Regulagem Mecânica de Rotação

Durante o funcionamento do motor Diesel, o combustível é dosado mediante a bomba injetora, sendo injetado sob alta pressão na câmara de combustão através do bico injetor. A injeção do combustível se realiza numa quantidade perfeitamente dosada de acordo com a carga do motor, no momento exato, durante um intervalo de tempo bem determinado e de uma maneira adequada ao processo de combustão.

A bomba injetora e o regulador de rotação são responsáveis pela perfeita observância das condições acima estabelecidas. A quantidade de combustível injetada por curso do êmbolo é aproximadamente proporcional ao torque do motor. O débito de combustível é ajustado girando-se os êmbolos da bomba, os quais são providos de arestas de comando (hélice), como visto na figura 3.1. Com isso, modifica-se o curso útil dos êmbolos.

Os êmbolos da bomba são girados mediante a haste de regulagem, através de um sistema de cremalheira e coroa dentada ou através de outras peças de transmissão apropriadas.

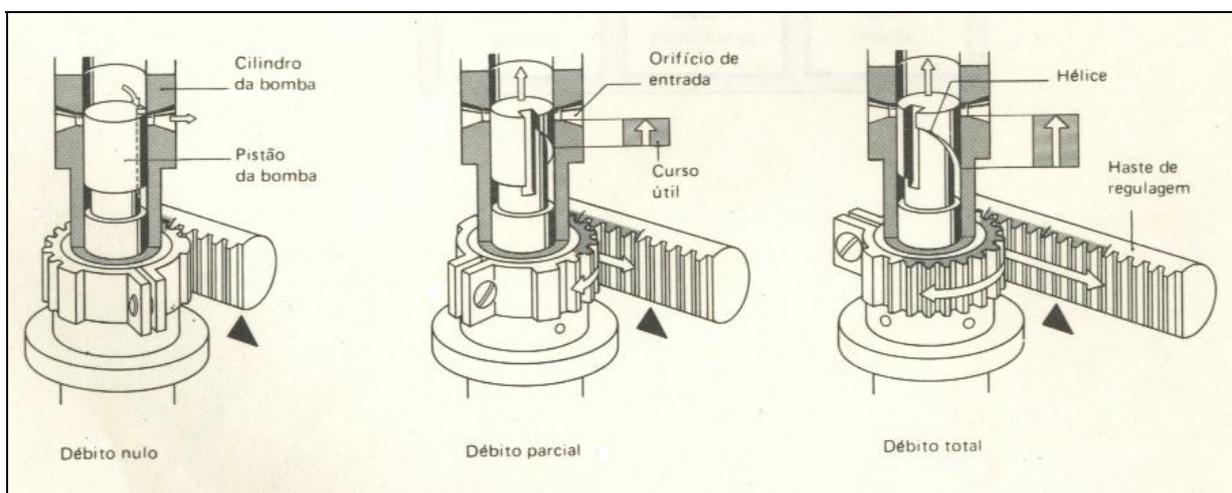


Figura 3.1 – Regulagem do débito da bomba injetora. O êmbolo é girado mediante a haste de regulagem (cremalheira). Fonte Bosch 2000

O motor Diesel exige um regulador de rotação, por não existir nenhuma posição fixa da haste de regulagem, na qual o motor Diesel mantenha constante uma determinada rotação sem o auxílio de um regulador.

Para o perfeito funcionamento do motor Diesel é, portanto, necessário um regulador de rotação, o qual pode ser do tipo centrífugo ou do tipo pneumático que opera pela velocidade do ar no tubo de aspiração do motor.

3.2. Funções do Regulador de Rotação

Todo regulador tem como função básica a limitação da rotação máxima, (Bosch, 2000). Dependendo do tipo de regulador, lhe são atribuídas outras funções como a manutenção constante de determinadas rotações como, por exemplo, a rotação de marcha lenta, ou das rotações de uma determinada faixa ou toda a faixa de rotações entre a marcha lenta e rotação máxima. Na figura 3.2, visualiza-se o mapeamento de um regulador de rotação de máxima e outro variável.

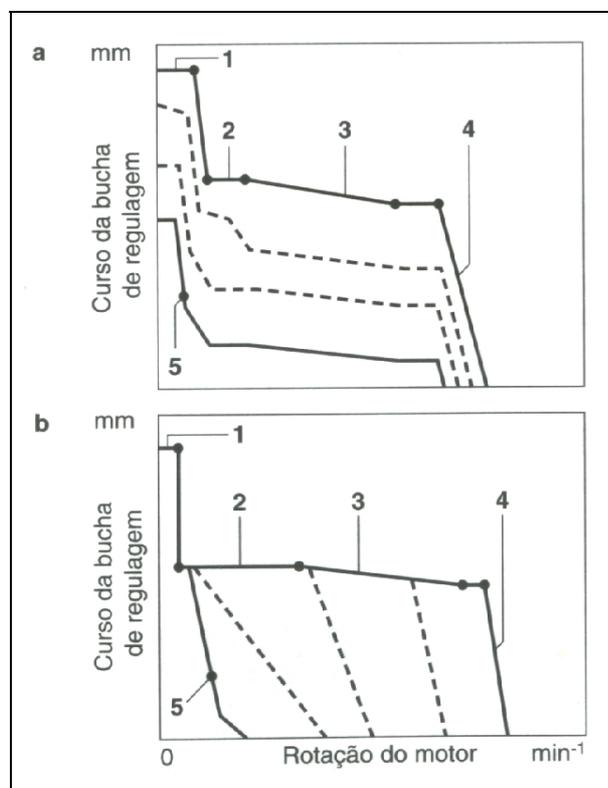


Figura 3.2 – Mapeamento do Regulador de Rotação. a) regulador de mínima e máxima; b) regulador variável. 1 - débito de partida; 2 - débito de plena carga; 3 - aproximação positiva; 4 - regulação final; 5- marcha lenta. Fonte Bosch 2000

Através das diversas funções de regulagem, tem-se vários tipos de regulagens, ou seja:

- regulagem da marcha lenta no motor Diesel a rotação da marcha lenta é determinada pelo regulador na bomba injetora;
- regulagem do limite de rotação com o pedal ou alavanca de aceleração pressionada até o limite, a rotação máxima de plena carga poderá atingir no máximo o limite de rotação da marcha lenta alta, o que determinado pelo regulador com o recolhimento da bucha deslizante em sentido fim de débito “parada do motor”. Nesse caso o motor recebe menos combustível;
- regulagem da rotação intermediária a qual é feita por reguladores variáveis. Com este regulador é possível manter as rotações entre marcha lenta e rotação máxima em limites determinados. De acordo com a carga no âmbito da faixa de potência do motor a rotação n oscila. Portanto, somente entre n_{VT} (uma rotação da curva de plena carga) e n_{LT} (motor sem aplicação de carga);
- além da função específica do regulador, lhe são exigidas ainda funções de controle;
- liberação ou corte de maior volume de combustível necessário para a partida; e
- alteração do volume de plena carga na dependência da rotação (aproximação).

Para estas funções adicionais são necessários em parte, dispositivos de adequação do débito.

3.3. Regulagem da Rotação Máxima

A rotação superior com carga n_{v0} poderá, em caso de alívio da carga e segundo o grau de irregularidade admissível, alcançar no máximo a rotação n_{l0}

(rotação superior sem carga), (Bosch, 2000). Para que isso aconteça, o regulador deslocará a haste de regulagem em direção a fim de débito, conforme figura 3.3.

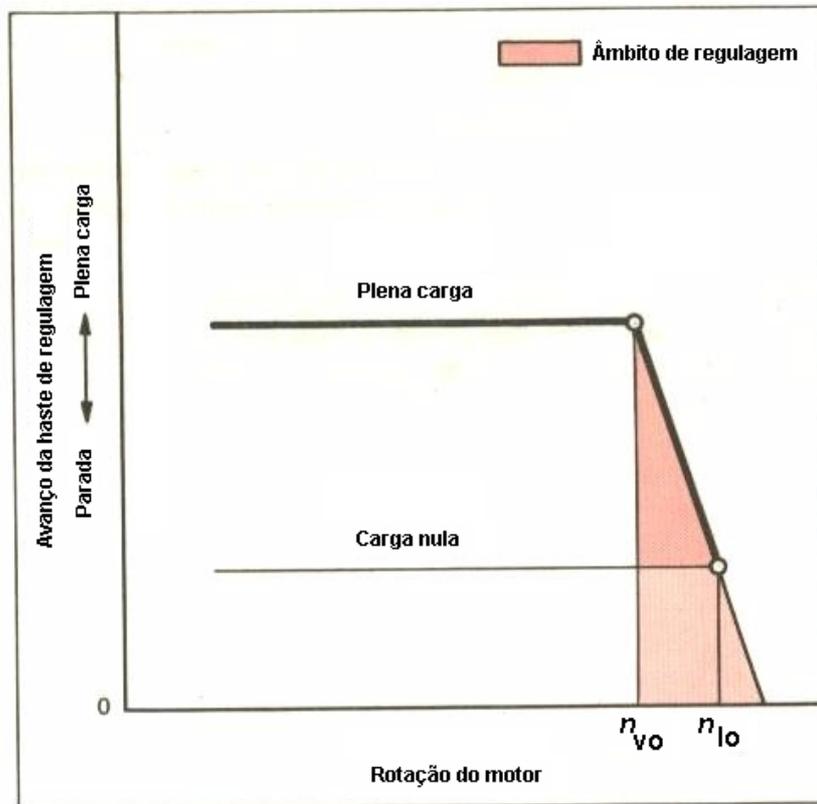


Figura 3.3 – Âmbito de regulagem do regulador de rotação máxima. Onde: n_{v0} = rotação superior com carga, n_{l0} = rotação superior sem carga. Fonte Bosch 2000

O âmbito compreendido entre as rotações n_{v0} e n_{l0} é chamado de “regulagem da rotação máxima”. O aumento da rotação de n_{v0} para n_{l0} é tanto maior, quanto maior for o grau de irregularidade. Entende-se que grau “ P ” é o mesmo que “ δ ” usado por (Miralles, 1980), ou seja, o grau de irregularidade.

3.4. Regulagem de Rotações Intermediárias

Quando se tornar necessário (por exemplo, em veículos automotores com acionamento secundário), o regulador também poderá, dentro de certos limites, manter constantes determinadas rotações entre a rotação de marcha lenta e a rotação máxima como pode ser visto na figura 3.4. A rotação n , segundo a carga aplicada, irá oscilar dentro do âmbito de potência do motor, apenas entre n_v (em caso de rotação com carga) e n_l (em caso de motor sem carga). Nas figuras de 3.5 a 3.8 vê-se a influência do grau P nas cargas, torques e rotações.

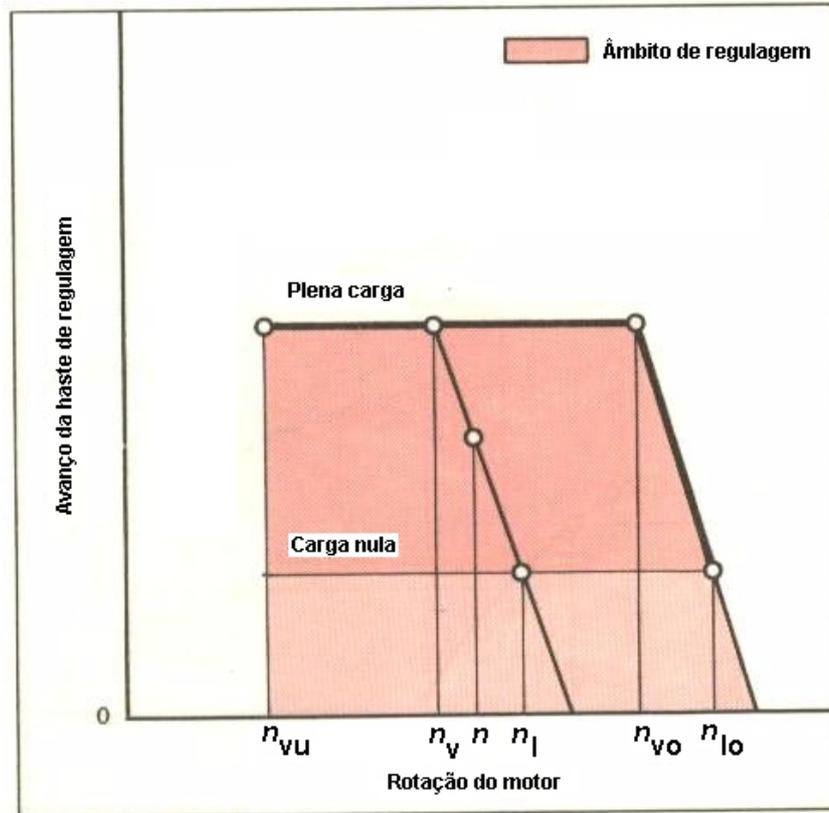


Figura 3.4 – Regulagem de rotação intermediária (regulador variável). n_{vu} = rotação de marcha lenta com carga. Fonte Bosch 2000

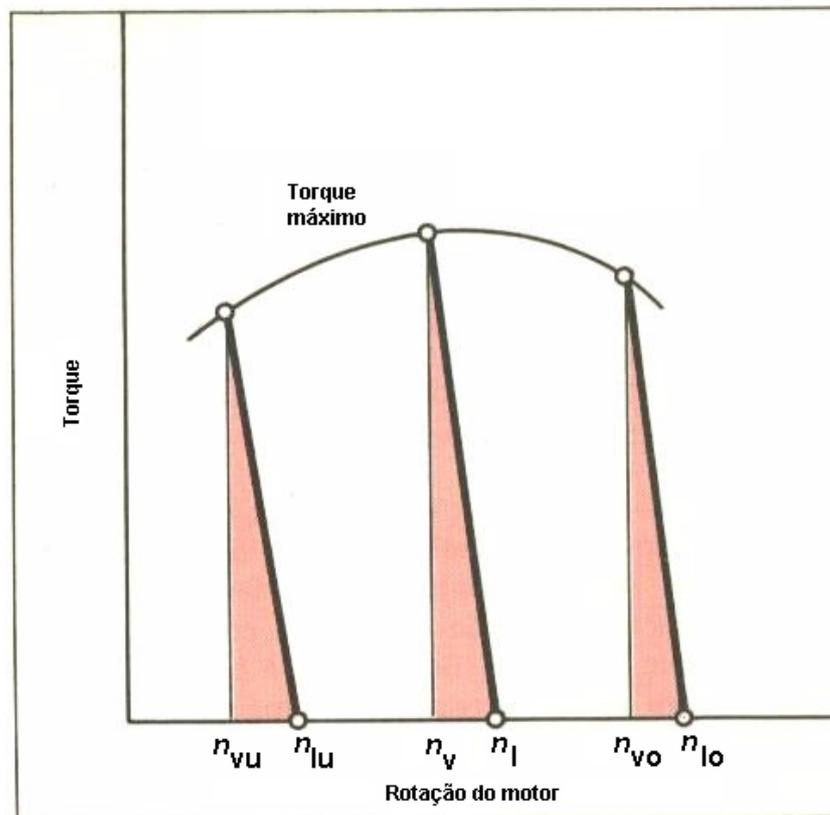


Figura 3.5 - Rotações com carga, com as correspondentes rotações sem carga devidamente reguladas. Onde n_{vu} = rotação de marcha lenta com carga; n_v = uma rotação qualquer com carga; n_{vo} = rotação superior com carga; n_{lu} = rotação de marchas lenta sem carga; n_l = uma rotação qualquer sem carga; n_{lo} = rotação superior sem carga. Fonte Bosch 2000

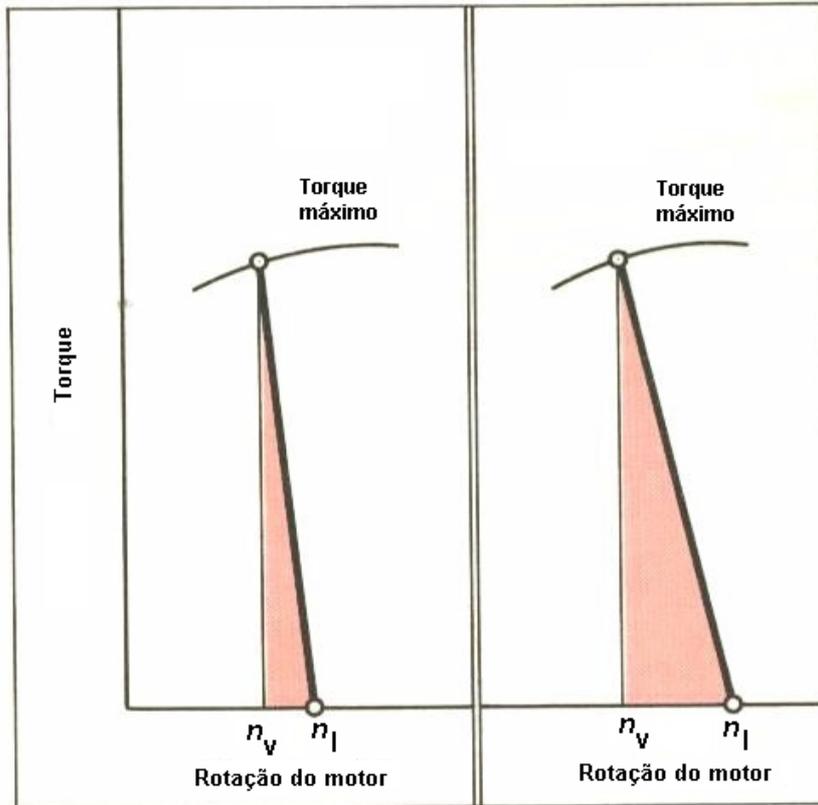


Figura 3.6 – Aumento da rotação com diferentes graus “P”. Lado esquerdo = grau “P” pequeno, lado direito – grau “P” grande. Fonte Bosch 2000

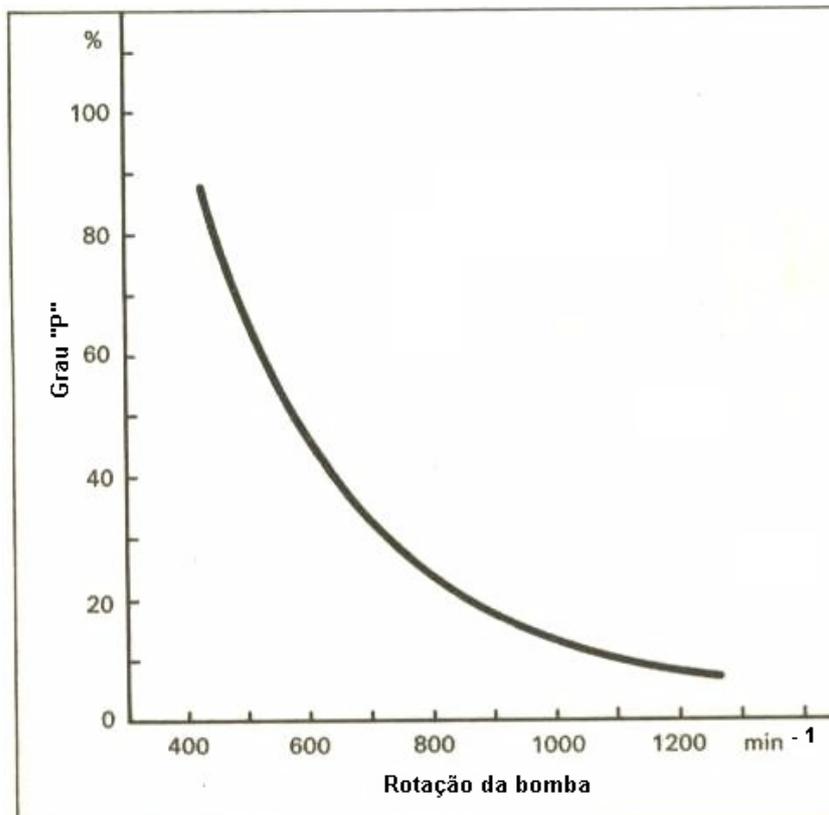


Figura 3.7 – Grau “P” de um regulador RQV em diversas rotações, ajustadas mediante a alavanca de comando. Fonte Bosch 2000

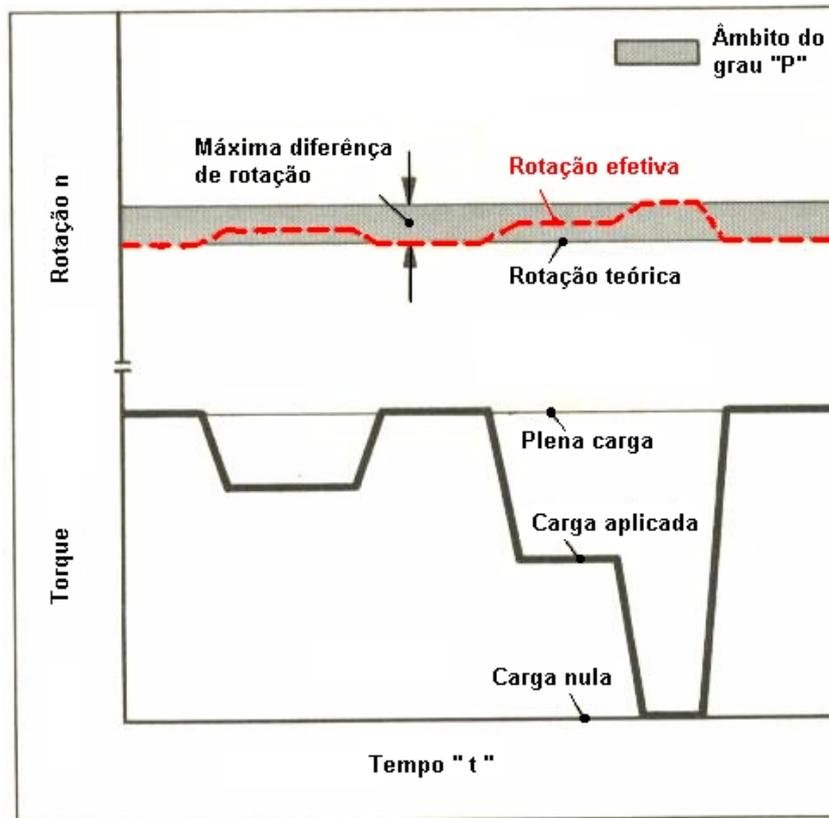


Figura 3.8 – Influência do grau “P” sobre a rotação efetiva em caso de variação da carga aplicada. Fonte Bosch 2000

3.5. Regulagem de Marcha Lenta

Uma regulagem da rotação poderá realizar-se também no âmbito inferior de rotações do motor Diesel, quando, após a partida de um motor Diesel frio, a haste de regulagem voltar da posição de partida para a posição *B*, figura 3.9, a resistência de atrito do motor ainda é relativamente grande. Para manter o motor em funcionamento, é, portanto necessária uma quantidade maior de combustível e a rotação é mais baixa do que o valor correspondente ao ponto de ajuste da marcha lenta *L*.

Após a redução do atrito, durante o aquecimento do motor, a rotação aumentará e a haste de regulagem voltará para *L*, onde é atingida a rotação de marcha lenta para o motor quente.

Exigem-se do regulador, além de sua função propriamente dita, ainda outras, tais como, a liberação ou o bloqueio automático do débito de partida, a modificação do débito de plena carga em dependência da rotação (aproximação), da pressão de carga ou da pressão atmosférica. Para isso, são em parte necessários dispositivos adicionais, que passaremos a analisar mais adiante. A regulagem no âmbito da marcha lenta pode ser vista na figura 3.9.

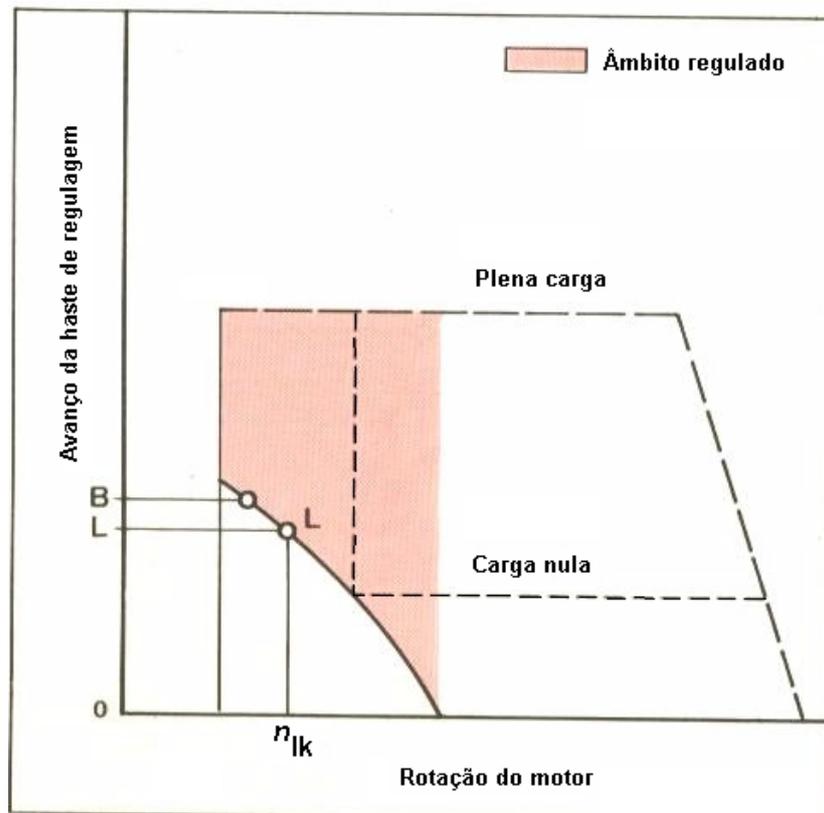


Figura 3.9 – Regulagem no âmbito da marcha lenta. Fonte Bosch 2000

3.6. Aproximação

A aproximação possibilita um aproveitamento ideal do torque do motor, (Bosch, 2000). A mesma não é propriamente um processo de regulagem, mas uma das funções de comando do regulador. Atua no débito de plena carga, sendo então injetado o maior volume de combustível, que é queimado sem despreendimento de fumaça no âmbito de rotação sujeito à carga.

A necessidade de combustível do motor Diesel não turbinado geralmente diminui à medida que aumenta a rotação do motor (relativamente menos ar, condições térmicas, alteração da mistura combustível-ar), ao passo que o volume debitado pela bomba injetora Bosch com a haste de regulação numa mesma posição, aumenta com a elevação da rotação (em um determinado âmbito), em virtude do efeito de estrangulamento no orifício de comando do elemento da bomba. Excesso de combustível injetado significa formação de fumaça ou superaquecimento do motor.

É, portanto, preciso aproximar a quantidade de combustível a injetar à necessidade do motor, figura 3.10.

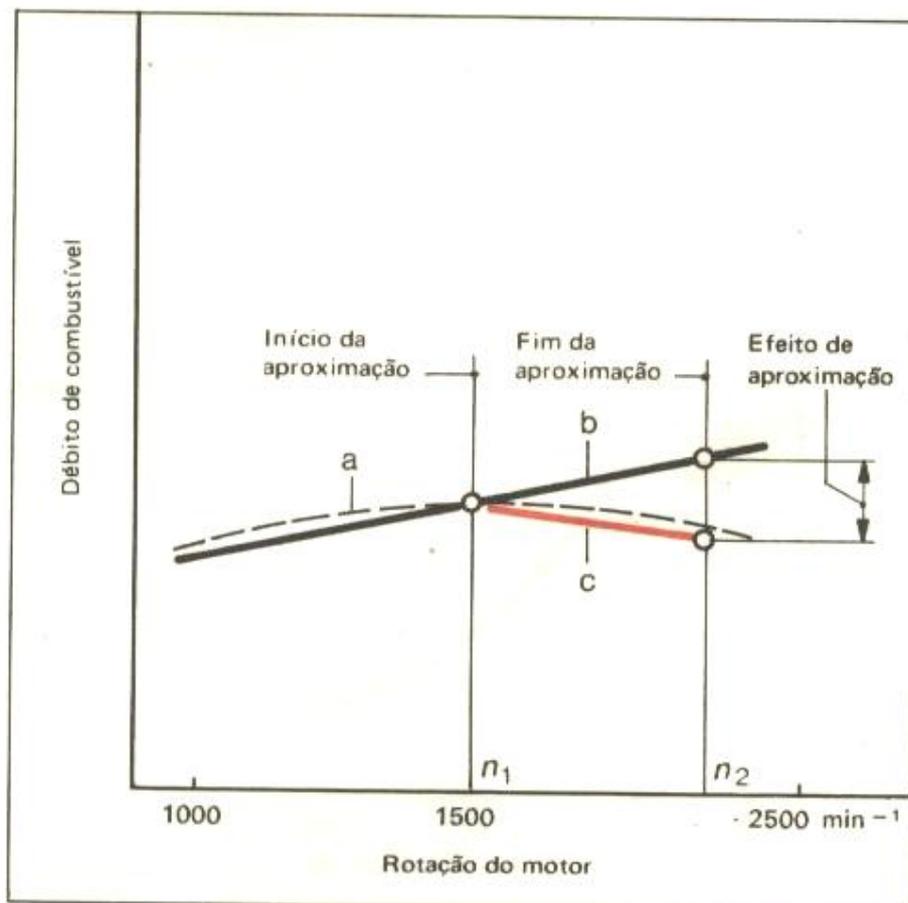


Figura 3.10. – Curva da necessidade de combustível e de combustível debitado com aproximação. Onde: a = necessidade de combustível do motor; b = débito de plena carga sem aproximação; c = débito de plena carga, com aproximação.
Fonte Bosch 2000

Em reguladores com aproximação, a haste de regulação, no âmbito de aproximação, é deslocada pelo curso de aproximação em direção a “parada do motor”.

À medida que aumentar a rotação de n_1 para n_2 , diminuirá, portanto, o débito, (aproximação positiva ou aproximação no sentido de regulagem). Quando a rotação diminuir de n_2 para n_1 , o débito aumentará, figura 3.11.

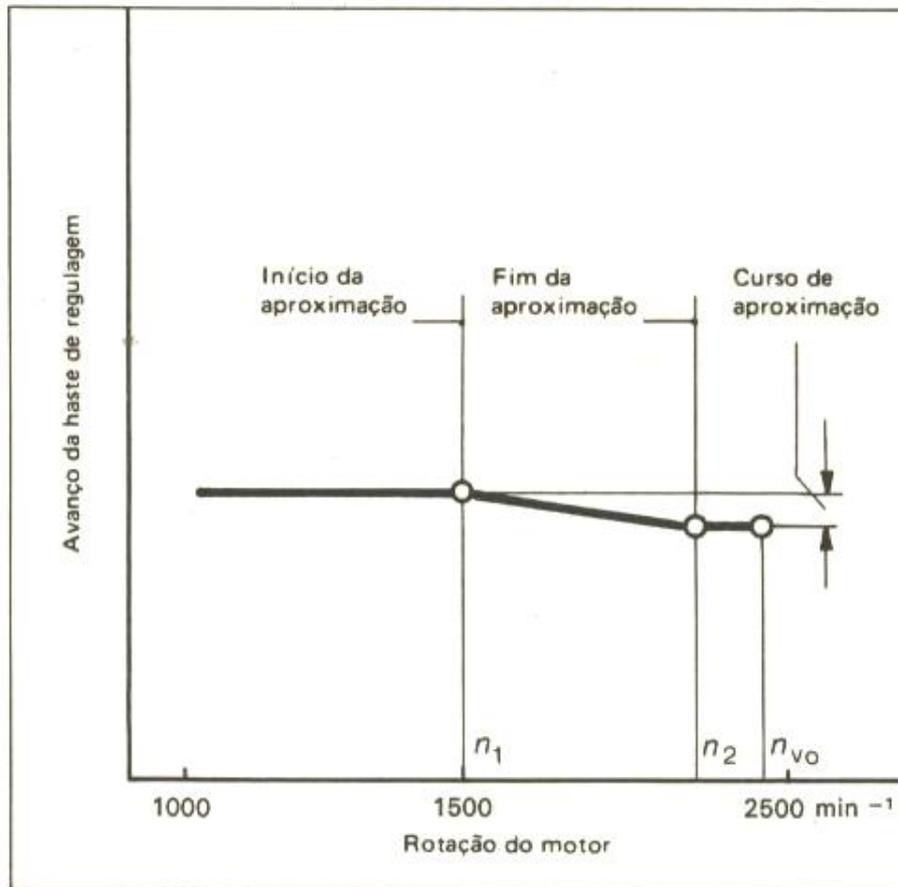


Figura 3.11 – Avanço da haste de regulagem da bomba injetora, com aproximação positiva.
Fonte Bosch 2000

Segundo o tipo de regulador, os dispositivos de aproximação acham-se dispostos de maneira diferente, quanto à sua construção, (Bosch, 2000). Os detalhes são tratados, conforme cada caso, na descrição do respectivo regulador. A figura 3.12 mostra a curva do torque de um motor Diesel com aproximação e sem aproximação, sendo no âmbito completo de rotação obtido o torque máximo, sem ultrapassar o limite de fumaça.

A necessidade de combustível do motor Diesel aspirado diminui à medida que aumenta a rotação do motor em decorrência da eficiência volumétrica, que é a

relação entre o enchimento teórico e o enchimento real do cilindro quando ocorre o ciclo de admissão do motor, (Manual técnico, 2001).

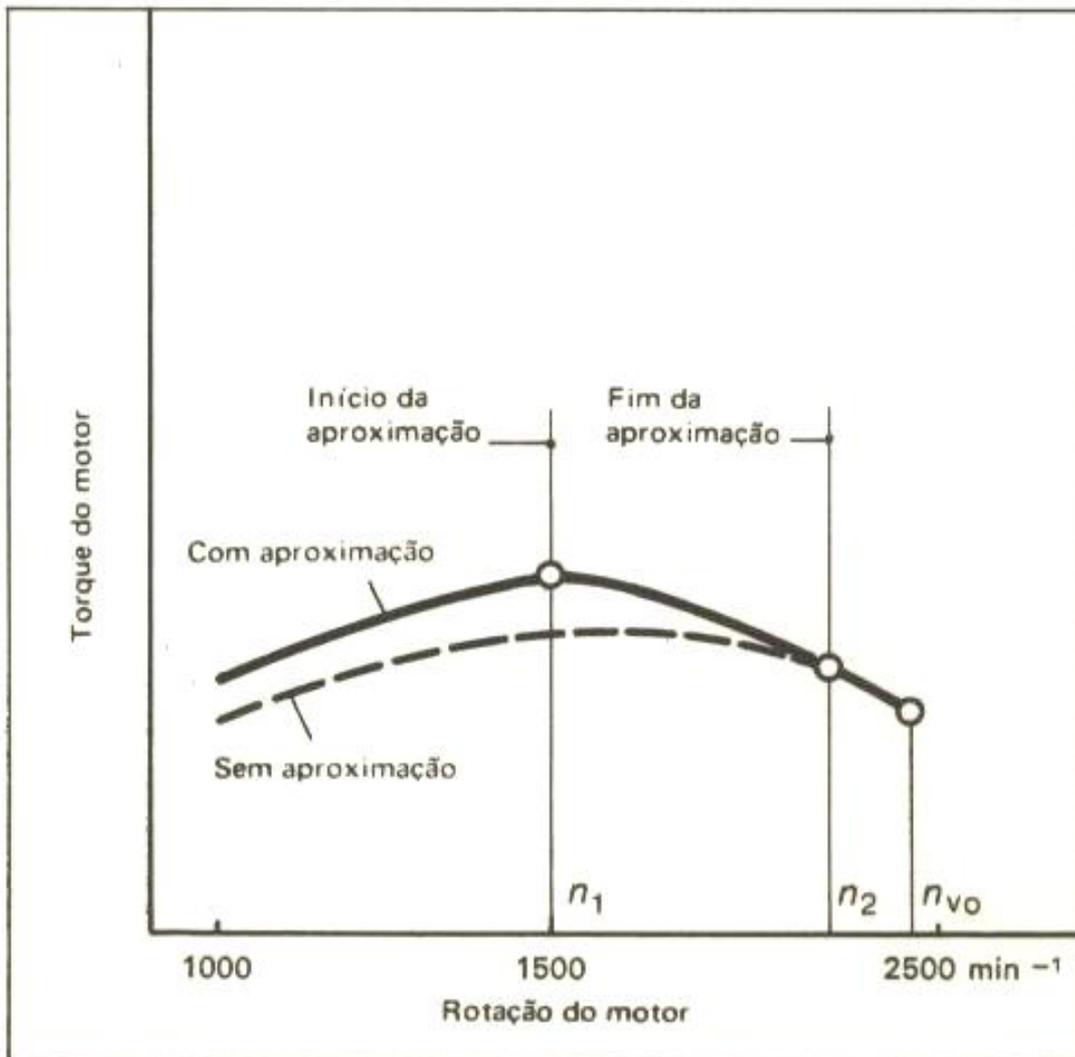


Figura 3.12 – Torque de um motor Diesel, com e sem aproximação. Fonte Bosch 2000

Em motores com turbo compressor, portanto com maior volume de ar, a necessidade de combustível para o regime de rotação de marcha lenta com carga aumentará tanto, que já não será suficiente o aumento natural do débito da bomba injetora, (Bosch, 2000). Neste caso será necessária uma aproximação, em função da rotação e da pressão do turbo, aproximação esta que poderá ser obtida, conforme as condições, somente mediante o regulador ou mediante o encosto de plena carga dependente da pressão do turbo ou então mediante ambos em conjunto.

Essa aproximação é chamada de “aproximação negativa” que significa maior aumento do débito, havendo aumento de rotação, figura 3.13. Ao contrário, tem-

se a aproximação positiva (usual), com diminuição do débito, havendo aumento da rotação.

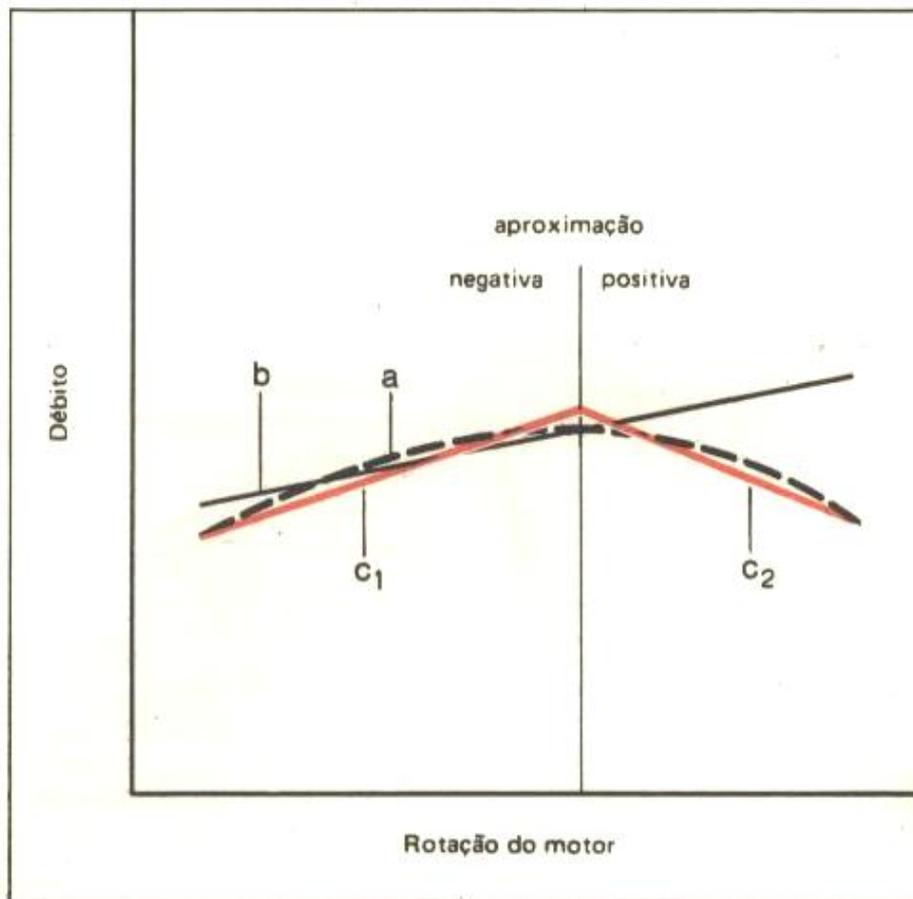


Figura 3.13 – Curva característica de débito. Onde:
a = necessidade de combustível do motor; *b* = débito de plena carga, sem aproximação;
c = débito de plena carga, com aproximação.
Fonte Bosch 2000

3.7. Regulagens da Rotação Máxima

Os reguladores de rotação máxima destinam-se a motores Diesel para acionamento de máquinas (por exemplo, geradores) em regime de rotação nominal, que pode ser visualizado na figura 3.14. O regulador precisa apenas manter constante a rotação máxima, não precisando regular a marcha lenta nem tão pouco comandar o débito de partida.

Se, em virtude da diminuição da carga aplicada ao motor, a rotação nominal n_{vo} for ultrapassada, o regulador empurrará a haste de regulagem em direção ao final de débito.

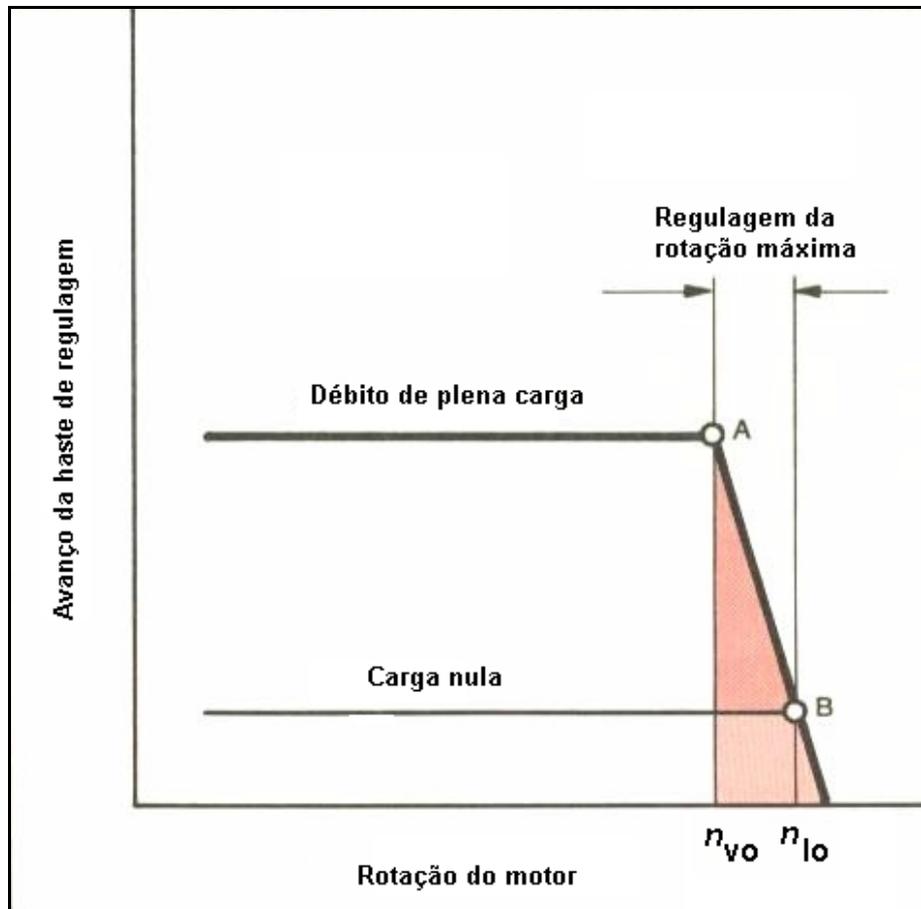


Figura 3.14 – Regulador de rotação máxima. Fonte Bosch 2000

Em outras palavras, o avanço da haste de regulagem tornar-se-á menor e o débito diminuirá. O aumento da rotação e a diminuição do avanço da haste de regulagem seguem a linha $A - B$, atinge-se a rotação superior sem carga n_{lo} , quando o motor estiver totalmente sem carga. A inclinação da linha $A - B$ é determinada pelo grau "P" do regulador.

Para grupos geradores utilizam-se reguladores cuja rotação máxima possa ser regulada dentro de limites reduzidos, quanto ao âmbito de regulagem da rotação figura 3.15.

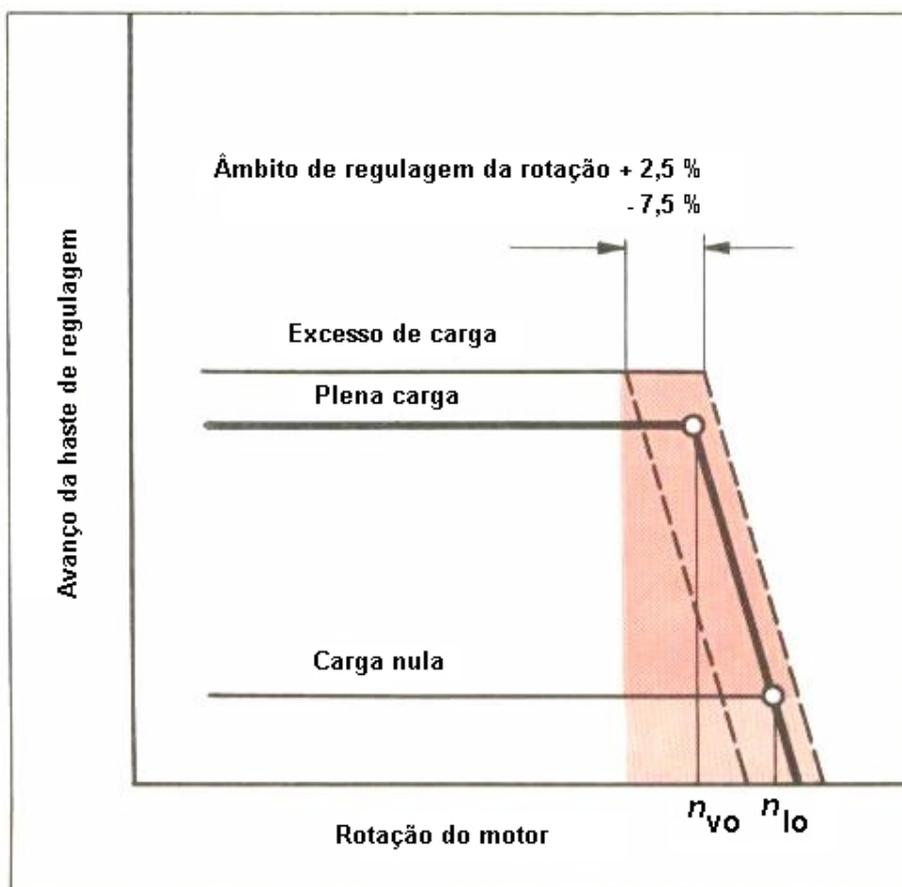


Figura 3.15 – Regulador de rotação máxima no âmbito de regulagem de rotação. Fonte Bosch 2000

3.8. Regulagens da Marcha Lenta e da Rotação Máxima

Em motores Diesel para caminhões muitas vezes há necessidade de regulagem no âmbito compreendido entre a marcha lenta e a rotação máxima, (Bosch 2000). O próprio motorista aciona com o acelerador a haste de regulagem da bomba injetora, ajustando o toque necessário. O regulador evita que o motor pare no âmbito de marcha lenta. Além disso, ele regula a rotação máxima.

Pela figura 3.16, verifica-se o seguinte, o motor frio entra em funcionamento com o débito de partida A. O motorista terá, nessa altura, acionado até o fim o pedal do acelerador. Ao liberar o pedal, a haste de regulagem voltará à posição de marcha lenta B. A rotação ajustar-se-á, durante o aquecimento do motor, ao longo da curva de regulagem da marcha lenta, em L.

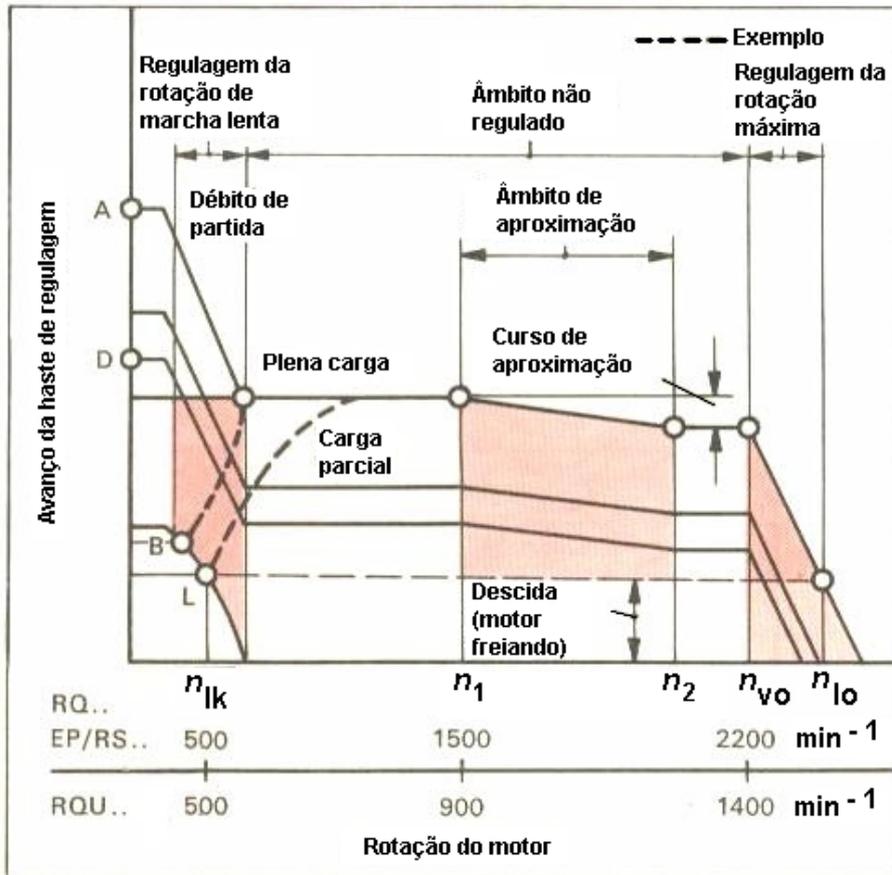


Figura 3.16 – Regulador de marcha lenta e rotação máxima com aproximação.
Fonte Bosch 2000

Estando o motor aquecido, não será necessário, em caso de uma nova partida, o débito de partida. Muitos motores podem até ser acionados com a alavanca de comando na posição de marcha lenta. Se com o motor funcionando, o motorista pisar o pedal do acelerador até o fim, a haste de regulagem irá para “débito de plena carga”. A rotação aumenta e em n_1 começará a atuar a aproximação, isto é, o débito de plena carga reduzir-se-á um pouco. Em n_2 , a aproximação deixará de atuar.

Com o pedal do acelerador pisado até o fim, é injetado débito de plena carga, até se alcançar a rotação superior de plena carga n_{vo} . A partir de n_{vo} , começará a regulagem limitadora da rotação máxima, e de acordo com o grau “P”, a rotação ainda aumentará um pouco, de modo que o avanço da haste de regulagem diminuirá e conseqüentemente cairá o débito.

A rotação superior sem carga n_{lo} será atingida quando o motor estiver completamente sem carga. Em declives, motor atuando como freio, a haste de

regulagem poderá ter seu curso reduzido até atingir o valor zero, sendo que a rotação ainda aumentará mais um pouco.

3.9. Regulagens Variáveis

Veículos com segunda tomada de força (por exemplo, para bombas de tanque ou escadas de bombeiros) ou tratores agrícolas que tenham de manter uma certa velocidade, assim como motores estacionários ou marítimos são equipados com reguladores variáveis (Bosch, 2000).

Estes regulam, além da marcha lenta e da rotação máxima, também rotações intermediárias, independentemente da carga. Das curvas características do regulador pode-se constatar: partida do motor, regulagem de plena carga (regulagem da rotação com carga) ao longo da curva característica de plena carga, com aproximação entre n_1 e n_2 até a regulagem da rotação superior com carga ao longo da ligação $n_{v0} - n_{l0}$, figura 3.17.

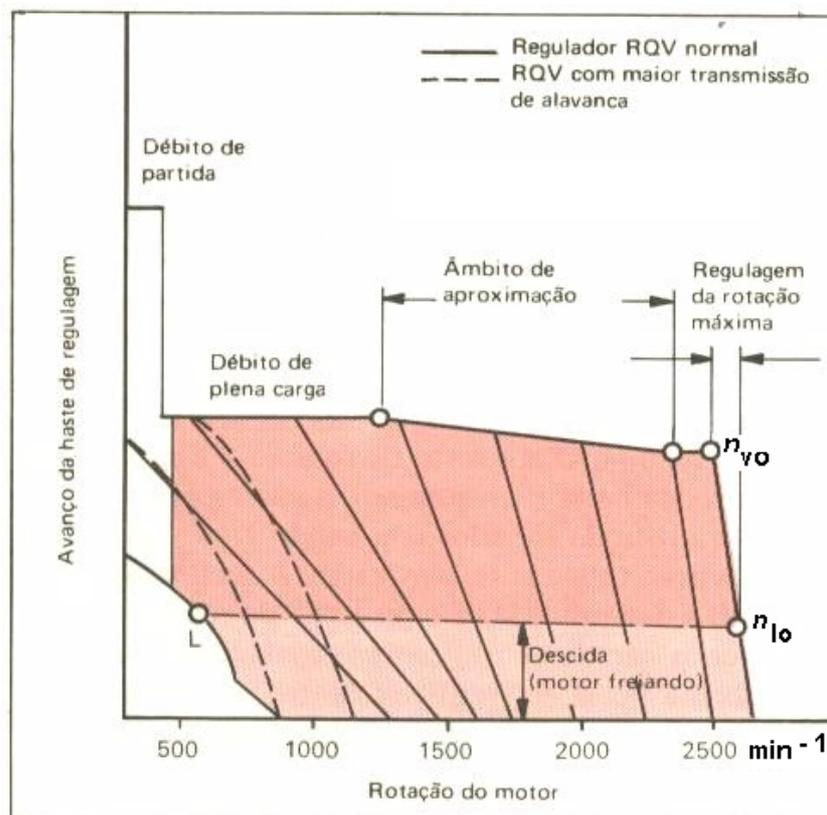


Figura 3.17 – Regulador Variável (RQV). Fonte Bosch 2000

As demais curvas mostram a regulagem em rotações intermediárias. Pode-se observar um aumento do grau “*P*” a baixas rotações. As curvas tracejadas referem-se a veículos cujas segundas tomadas de força trabalham no âmbito inferior de rotações.

Ao aumentar a carga, a rotação diminuirá menos do que no caso do regulador normal (curvas cheias). Isso é conseguido graças a uma maior transmissão da alavanca.

3.10. Regulagens Escalonadas

Se nos âmbitos de regulagem superior ou inferior dos reguladores variáveis modelos RQV ou RQUV, o grau “*P*” normal for demasiadamente grande para o caso em questão e se não houver necessidade de uma regulagem na faixa intermediária, o sensor de rotação realiza uma regulagem escalonada (Bosch, 2000). Nesse caso, não existe possibilidade de aproximação da faixa não regulada da rotação máxima.

O diagrama da figura 3.18 pertence ao tipo de regulador RQV, a etapa não regulada está situada no âmbito inferior de rotações; a etapa regulada, no âmbito superior de rotações. Na figura 3.19, pode-se constatar que as curvas pertencem a um tipo de regulador RQUV que, na faixa inferior de rotações, trabalha como regulador variável, ao qual segue uma faixa não regulada até a regulagem da rotação máxima.

Em ambas as figuras 3.18 e 3.19, as partes horizontais das curvas características representam o avanço da haste de regulagem em diversas posições de carga parcial da alavanca de comando. As curvas abaixo da linha de plena carga correspondem à regulagem a partir de rotações intermediárias.

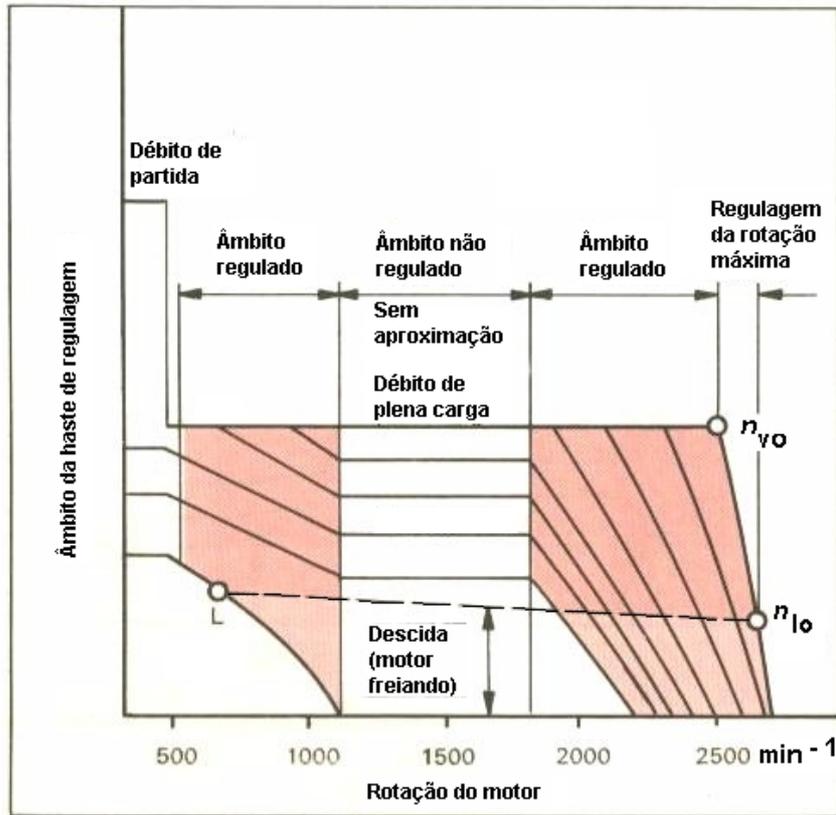


Figura 3.18 – Regulador escalonado, faixa inferior de rotações não regulada.
 Fonte Bosch, 2000

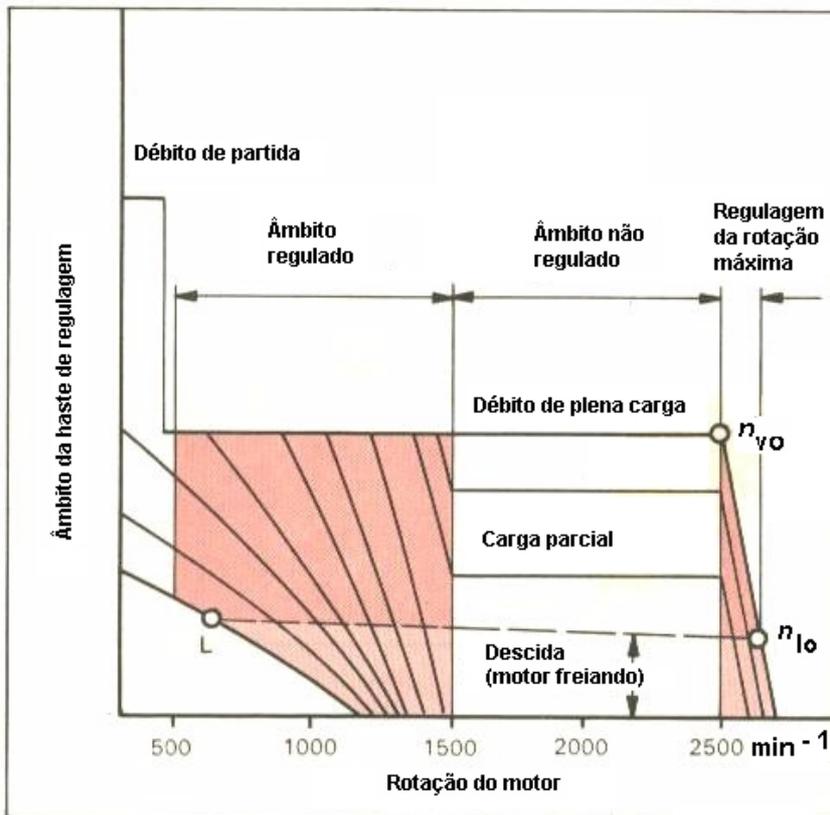


Figura 3.19 - Regulador escalonado com a faixa superior de rotações não regulada.
 Fonte Bosch 2000

3.11. Reguladores Centrífugos

O regulador centrífugo Bosch é montado na bomba injetora. A haste de regulagem da bomba injetora acha-se ligada com os sistemas de alavanca do regulador. O pedal do acelerador é ligado ao regulador através da alavanca de comando.

Existem dois diferentes sistemas que medem e regulam a rotação em reguladores centrífugos fabricados pela Bosch, os mesmos são esquematizados nas figuras 3.20 e 3.21, e são os seguintes:

- RQ, RQV, nos quais as molas de regulagem acham-se montadas nos contrapesos centrífugos;
- RS, RSV nos quais força centrífuga atua, através de alavancas, sobre a mola de regulagem, que se acha instalada fora dos contrapesos centrífugos.

Nos reguladores RQ e RQV, cada um dos dois contrapesos atuam sobre um jogo de molas, dimensionadas de fábrica para cada rotação nominal.

Nos reguladores centrífugos RS e RSV, ambos os contrapesos exercem, através do pino de regulagem, pressão sobre a alavanca de regulagem, a qual é puxada em sentido contrário pela mola reguladora basculante. Ao se ajustar a rotação mediante a alavanca de comando, a mola reguladora basculante é devidamente tencionada de acordo com a rotação desejada.

Em ambos os sistemas, as molas são dimensionadas de uma maneira tal que, na rotação desejada, a força centrífuga e a força da mola se equilibrem. Se a referida rotação for ultrapassada a força centrífuga aumentará, sendo a haste de regulagem movida através de um sistema de alavanca; isso fará o débito diminuir.

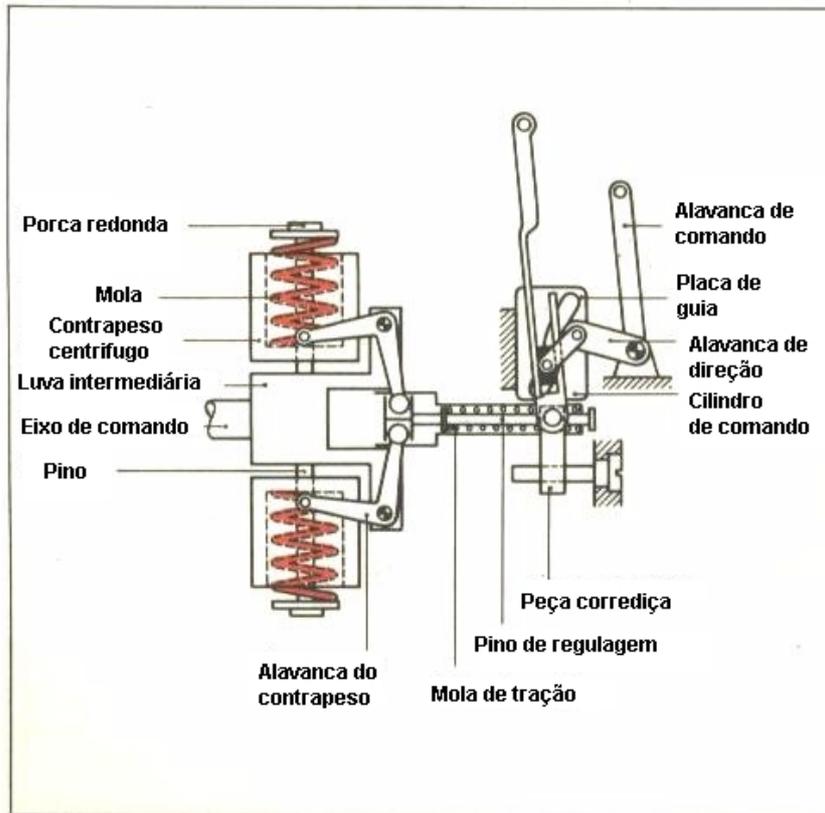


Figura 3.20 – Regulador RQ, RQV. Fonte Bosch 2000

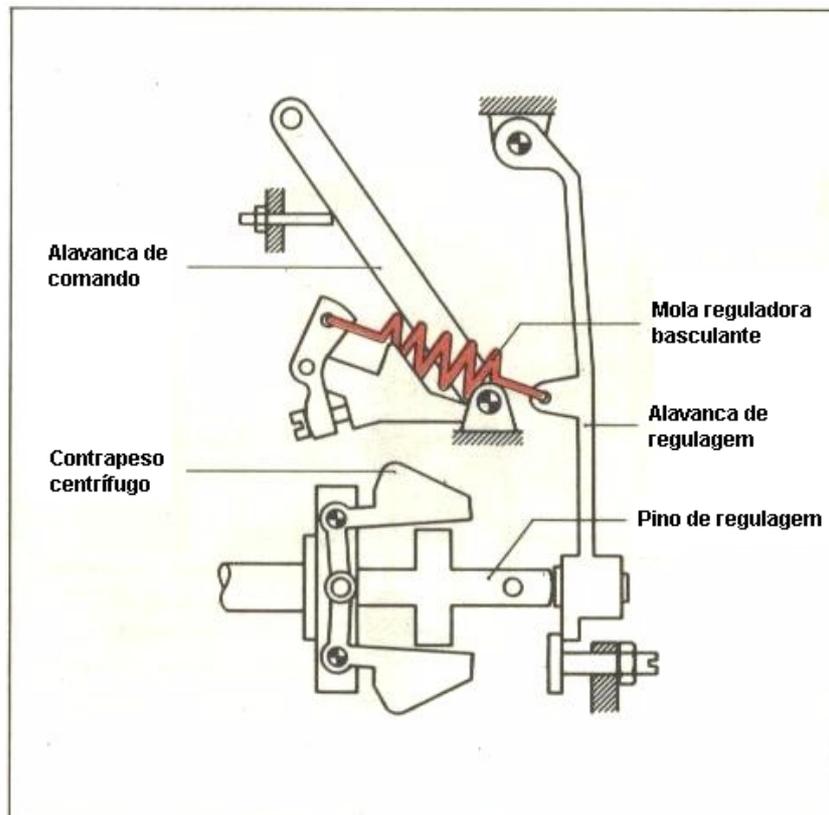


Figura 3.21 – Regulador RS, RSV. Fonte Bosch 2000

4. REGULADORES ESTUDADOS

Durante esta etapa do trabalho serão exemplificados os reguladores estudados que são usados atualmente nos motores mono e bicilíndricos. Tratam-se de um modelo de motor Diesel monocilíndrico, com regulador semelhante ao modelo RS, e o outro é um motor bicilíndrico, com mecanismo semelhante ao modelo RQ da Bosch.

São reguladores equipados com contrapesos centrífugos, cujo princípio de funcionamento consiste em contrapesos montados na engrenagem do eixo de comando, anexos I e II, que agem diretamente através de alavancas, luvas e mola de regulagem, na haste de controle do volume de injeção da bomba injetora. A regulagem da rotação de trabalho é ajustada pelo operador, através da alavanca de regulagem, dentro da faixa de rotação especificada na fábrica para cada modelo de motor.

4.1. Regulador do Motor Monocilíndrico

Na figura 4.1, mostra-se esquematicamente o princípio de funcionamento deste mecanismo de regulagem (Hatz, 1982). Pelo movimento da alavanca de regulagem da rotação (1), a mola do regulador (6) é afetada por uma determinada força. Quando o motor está em repouso a alavanca do regulador (5) está ascendente, em comparação ao limitador do volume de injeção (3) e a haste de controle (4) ajusta a bomba de injeção para o volume de vazão máximo.

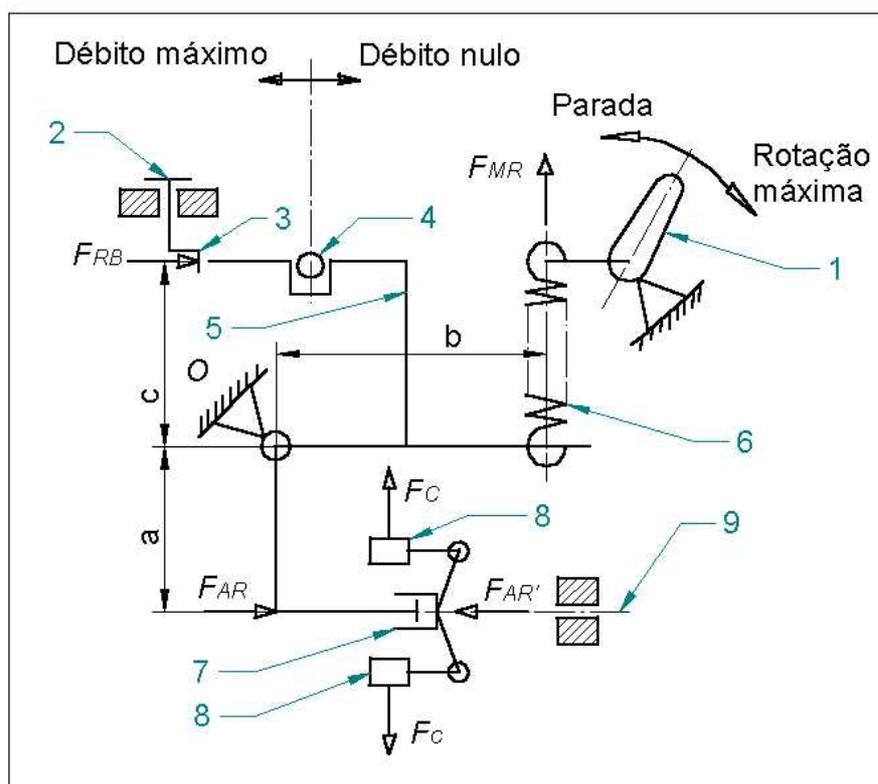


Figura 4.1 – Regulador de um motor monocilíndrico estudado. 1 - Alavanca de regulagem da rotação; 2 – Botão auxiliar de partida; 3 - Limitador do volume de injeção de parada e partida; 4 - Haste de controle do volume de injeção; 5 - Alavanca do regulador; 6 - Mola do Regulador; 7 - Luva de ajuste; 8 - Contrapesos centrífugos; 9 - Eixo de comando.

Quando o motor iniciar a elevação uniforme da rotação, e nenhuma mudança ocorrer no regulador, a rotação aumenta até que a força centrífuga (F_C) com seu componente ($F_{AR'}$) manifestado pela alavanca de razão $a:b$, supera a força da mola do regulador (F_{MR}). No momento em que o pivô da alavanca do regulador (5) gira no sentido dos ponteiros do relógio sobre seu ponto de apoio “O”, a haste de controle (4) se movimenta no sentido de reduzir o volume de injeção.

Ou seja, com o aumento da rotação seguindo uma redução de carga, a força centrífuga (F_C) do regulador supera a força pela qual a mola do regulador tem sido mantida pela alavanca de ajuste da rotação e a velocidade do motor é regulada de forma descendente, isto é, o volume de injeção é reduzido e ajustado para nova situação de carga, até que a rpm do motor tenha mantido aproximadamente a taxa inicial. Com o aumento da carga, a rotação é momentaneamente reduzida e com isso também à força centrífuga (F_C). A força da mola do regulador (F_{MR}) supera (F_C) e gira a alavanca do regulador (5) no sentido de plena carga. O volume de injeção é aumentado e a rotação do motor retorna aproximadamente à taxa de funcionamento anterior à carga ser aumentada.

4.1.1. Projeto Geométrico do Regulador do Motor Monocilíndrico

Para um melhor entendimento do mecanismo estudado, foram projetados os componentes em modelagem auxiliada por computador e simularam-se as montagens com restrições de movimento. Como pode ser visto na figura 4.2, com a modelagem se torna mais fácil à compreensão do funcionamento do mecanismo de regulação.

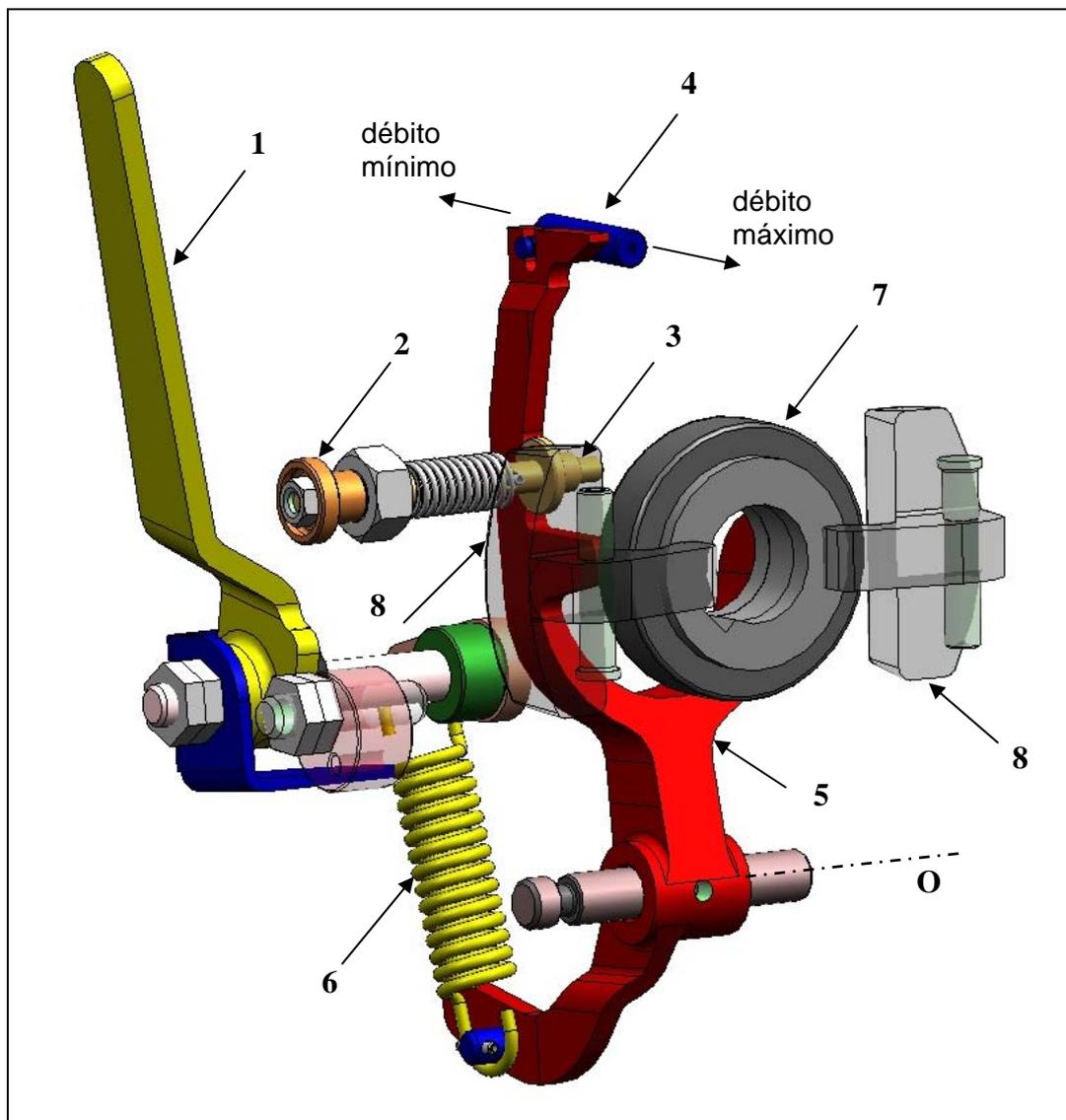


Figura 4.2 – Modelagem do regulador do motor monocilíndrico. 1 - Alavanca de regulação da rotação; 2 – Botão auxiliar de partida; 3 - Limitador do volume de injeção e de partida; 4 - Cremalheira da bomba injetora; 5 - Alavanca do regulador; 6 - Mola do regulador; 7 - Luva de ajuste; 8 - Contrapesos centrífugos.

Os movimentos são simulados através do próprio sistema de montagem dos componentes modelados, onde pode-se, determinar com precisão os deslocamentos e ângulos de giro, a que os componentes são capazes de

assumir. Pode-se assim calcular as forças e momentos envolvidos bem como os seus limites extremos.

Ainda, através da modelagem auxiliada por computador dos componentes, é possível determinar com precisão, o centro de gravidade e o peso dos contrapesos do regulador, mesmo suas geometrias sendo complexas, para atender os limites do projeto.

Na figura 4.2, o componente (5) é a alavanca que age diretamente na haste da cremalheira da bomba injetora, equilibrando a força da mola de regulagem e a das massas rotativas. O componente (2), é o botão auxiliar de partida, (3) é o excêntrico de regulagem do débito máximo e (4) a cremalheira da bomba injetora.

O componente (6) é a mola de regulagem e a alavanca (1) determina a rotação e o desligamento do motor, pelo corte do débito através da cremalheira da bomba injetora. O componente (7) é a luva de regulagem e (8) os contrapesos centrífugos.

No anexo, podem ser visto figuras de modelagem auxiliada por computador para o regulador do motor monocilíndrico, com todos os demais componentes que fazem parte do regulador, como eixo e engrenagem do comando.

4.1.2. Condição de Operação sem Carga

O objetivo do regulador neste caso é limitar a rotação para o motor não disparar. Portanto, o momento causado pela força da mola do regulador (F_{MR}) deve equilibrar o momento da força centrífuga ($F_C = F_{AR}$), ou seja, partindo-se do somatório dos momentos em torno do ponto "O", (figura 4.1), tem-se:

$$F_{AR} \cdot a = F_{MR} \cdot b \quad (16)$$

onde pode-se considerar que: $F_C \propto F_{AR'} \propto F_{MR}$

Portanto, como descrito anteriormente, $(F_{AR'})$ é proporcional a (F_C) que depende por sua vez da rotação. Logo, com o motor sem carga o equilíbrio é mantido pela força axial resultante $(F_{AR'})$ e a força da mola do regulador (F_{MR}) , uma vez que esta apresenta uma deformação “ x ”, correspondente ao regime de rotação desejado.

4.1.3. Condição de Operação com Carga

Considerando o somatório dos momentos novamente em torno do Ponto “O” figura 4.1, tem-se o equacionamento para a operação de carga a seguir:

$$F_{RB} \cdot c = F_{MR} \cdot b - F_{RA'} \cdot a \quad (17)$$

No momento em que se aplica no motor uma dada carga, a queda de rpm provoca uma diminuição da $(F_{AR'})$. A partir daí, a alavanca do regulador deslocará no sentido crescente de débito, até que o equilíbrio seja estabelecido para a nova condição de operação, através do batente de regulagem do consumo, onde atua (F_{RB}) que é a força resultante no batente de débito máximo.

Uma vez que o batente seja rígido, o mesmo não irá permitir o movimento da alavanca para novo acréscimo de carga no motor. Com isso, não haverá incremento no débito para corrigir o torque do motor. Quanto menor for a rotação do motor, neste caso, menor será $(F_{AR'})$ e maior será (F_{RB}) .

4.2. Regulador do Motor Bicilíndrico

Este regulador usa o mesmo princípio do anterior, porém, sua construção é diferente no que diz respeito à mola do regulador, que está diretamente ligada nos contrapesos centrífugos, através da luva de regulagem, conforme (figura 4.3).

Segundo (Hatz, 1982), tão logo a luva (7) alcança o conjunto de alavancas do regulador (5), aumentando a rotação, a alavanca é girada sobre seu pivô “O” e aciona a haste de controle (4) para reduzir o volume de injeção.

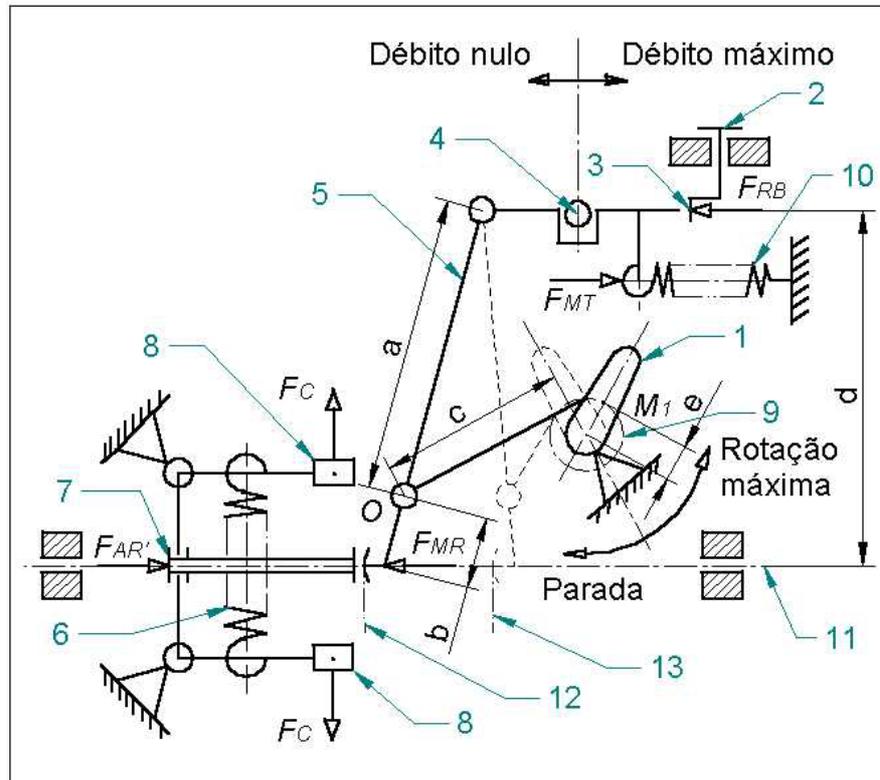


Figura 4.3 – Regulador de um motor bicilíndrico estudado. 1 - Alavanca de regulagem da rotação; 2 – Botão auxiliar de partida; 3 - Limitador do volume de injeção de parada e partida; 4 - Haste de controle do volume de injeção; 5 – Conjuntos de alavancas do regulador; 6 - Mola do regulador; 7 - Luva de ajuste; 8 - Contrapesos centrífugos; 9 – Mola auxiliar de corte de débito; 10 - Mola auxiliar de partida; 11 - Eixo de comando; 12 - Alavanca do regulador na posição de máxima rotação; 13 - Alavanca do regulador na posição de débito nulo.

A alavanca de regulagem (1) da rotação proporciona, variação contínua de rotação mínima sem carga, até a rotação superior (sem carga). A relação entre as forças é a dada pela equação a seguir:

$$F_{MR} = F_{AR} \quad (18)$$

4.2.1. Projeto Geométrico do Regulador do Motor Bicilíndrico

Da mesma forma descrita para o regulador do motor monocilíndrico, também foi elaborado o projeto para o regulador do motor bicilíndrico, como visto na modelagem auxiliada por computador da figura 4.4. Nesta figura pode-se medir os mesmos parâmetros como os citados para o regulador do motor monocilíndrico.

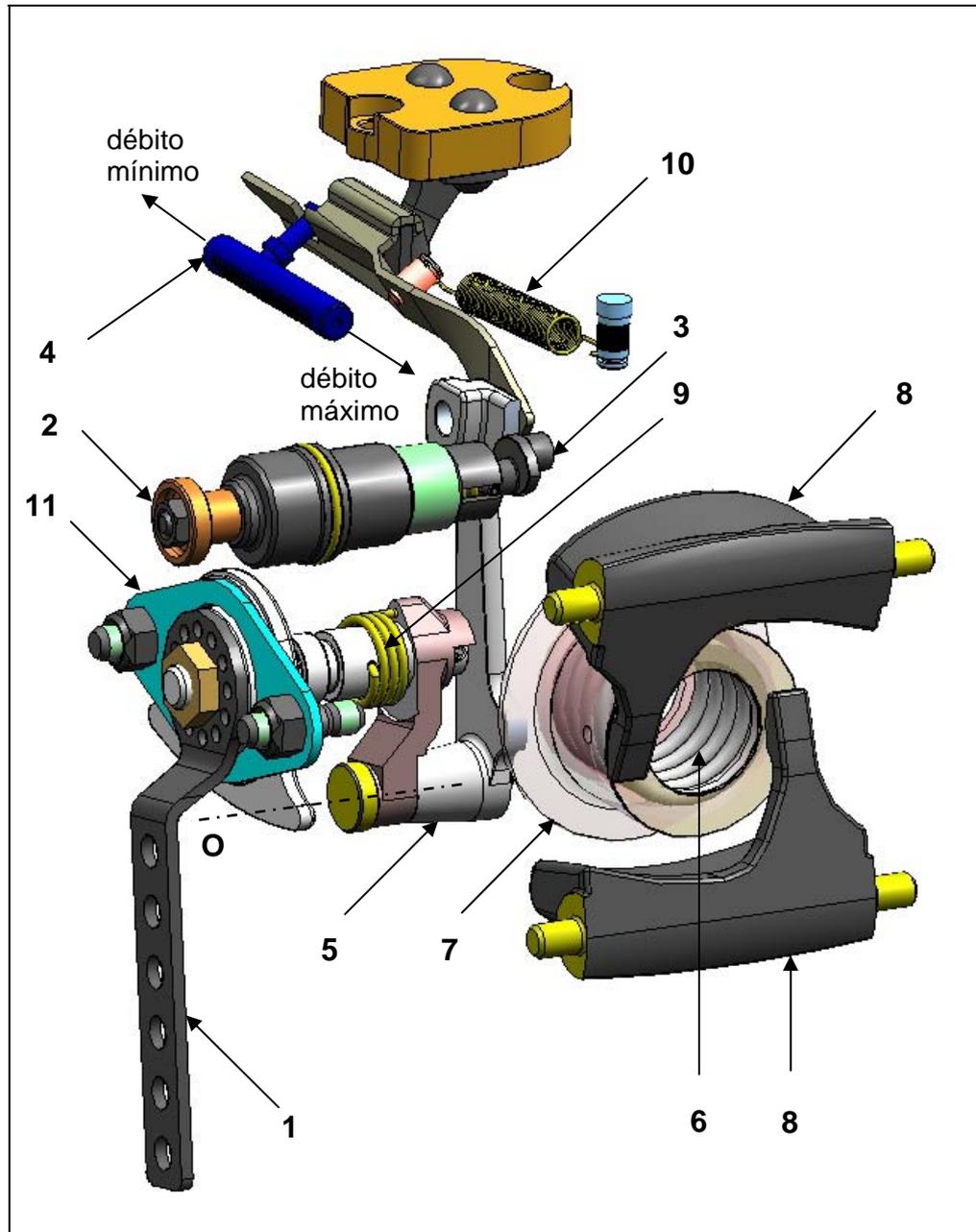


Figura 4.4 - Modelagem do regulador do motor bicilíndrico. 1 - Alavanca de ajuste da rotação; 2 - Botão auxiliar de partida; 3 - Limitador do volume de injeção de parada e partida; 4 - Cremalheira da bomba Injetora; 5 - Conjunto de alavancas do regulador; 6 - Mola do regulador; 7 - Luva de regulagem; 8 - Contrapesos centrífugos; 9 - Mola auxiliar de corte de débito; 10 - Mola auxiliar de Partida; 11 - Flange de atrito.

Na figura 4.4, o componente (5) é o conjunto de alavancas que age, diretamente na haste da cremalheira da bomba injetora, transferindo os movimentos gerados pelas forças, exercidas pela mola de regulagem e massas rotativas.

O componente (2), é o botão auxiliar de partida e (3) é o excêntrico de regulagem do débito máximo. A componente (6) é a mola de regulagem, que tem montagem coaxial com a luva de regulagem (7) e a alavanca (1) determina a rotação e o desligamento do motor, através de corte do débito por intermédio da cremalheira da bomba injetora (4).

Por sua vez o componente (9), é a mola auxiliar de corte de débito, enquanto (10) é uma mola auxiliar de partida. Os componentes (8) são os contrapesos centrífugos e (11) é a flange de atrito, que mantém o posicionamento de (1) fixo para cada rotação desejada.

Como para o motor monocilíndrico, no anexo, podem ser visto figuras de modelagem auxiliada por computador para o regulador do motor bicilíndrico, com todos os demais componentes que fazem parte do regulador, como eixo e engrenagem do comando.

4.2.2. Condição de Operação sem Carga

Para o entendimento deste sistema, é necessária a consideração do regulador em três posições distintas, que representam a marcha lenta, a rotação máxima sem carga e a operação com carga. A equação 19, vale para todas estas posições.

4.2.2.1. Condição de Operação em Marcha Lenta e sem Carga

A partir da análise das forças e momentos, figura 4.3, tem-se para a condição de operação sem carga para marcha lenta. Ainda considera-se (F_{RB}) nula o

conjunto de alavancas de regulagem (5) não encostada no excêntrico de regulagem do débito (3), o curso da luva de regulagem máximo (mola de regulagem (6) pouco comprimida), contrapesos (8) máxima abertura e (F_{BA}) é mínima, dada pelo conjunto de alavancas de regulagem (5) em posição fixa devido a flange de atrito, que age na alavanca de regulagem da rotação (1). A equação de equilíbrio é:

$$F_M \cdot b \cdot e = F_{MT} \cdot d \cdot c \quad (19)$$

Então se vê que, como o regulador do motor monocilíndrico, (F_{AR}) é proporcional a (F_C), e o equilíbrio nesta condição também é dado pelo resultado da combinação destas forças com (F_{MR}), que é a força da mola de regulagem com sua deformação correspondente a rotação imposta.

4.2.2.2. Condição de Operação em Rotação Máxima e sem Carga

A partir da análise das forças e momentos (vide figura 4.3), tem-se para a condição de operação em vazio para a rpm máxima, considerando (F_{RB}) nula, ou seja, alavanca de regulagem (5) não encostada no excêntrico de regulagem do débito (3), curso da luva de regulagem (7), mínima na posição de mola de regulagem (6) quase toda comprimida, (F_{BA} máxima). Ainda nessa condição, o conjunto de alavancas de regulagem (5) está em posição fixa devido a flange de atrito, que age na alavanca de regulagem da rotação (1). Tem-se então a equação:

$$F_{AR} \cdot b = F_{MT} \cdot d \quad (20)$$

4.2.3. Condição de Operação com Carga

Para esta condição, parte-se do equilíbrio de forças e momentos gerados pelo conjunto de alavancas de regulagem, o batente do débito máximo e a mola auxiliar de partida, para que resulte a equação:

$$F_{RB} \cdot a = F_{MT} \cdot d - F_{RA} \cdot b \quad (21)$$

Quando o motor é submetido à carga, neste caso, a diminuição da rotação resulta em redução de (F_{AR}) , e a mola de regulagem desloca a luva no sentido de débito máximo. Isto ocasiona deslocamento do conjunto de alavancas do regulador até atingir a nova condição de equilíbrio ou o batente da regulagem de consumo (3) na posição de máximo, gerando a reação (F_{RB}) , força resultante do batente. Como este batente é rígido, o mesmo limita o movimento do conjunto de alavancas garantindo débito máximo. Seguindo-se o mesmo raciocínio do regulador do motor monocilíndrico, quanto menor for o (F_{AR}) maior será o (F_{RB}) .

5. PROJETO DOS REGULADORES

Após ter-se em mente o funcionamento dos reguladores atuais dos motores em estudo, e como subsidio a fundamentação teórica e os reguladores Bosch estudados, parte-se para o projeto geométrico com intuito de avaliar a viabilidade das novas funções a serem acrescentadas ao sistema de regulagem atual ou um novo sistema será desenvolvido.

Através de software de modelagem auxiliada por computador, foi realizado o estudo geométrico de disposição do mecanismo a que se pretende desenvolver. Deve-se ressaltar que os demais componentes como carcaça do motor, tampa de comando e demais componentes próximos, também são considerados no projeto, sendo os mesmos modelados de forma esquemática ou completa, de acordo com a necessidade do estudo das folgas de projeto.

Como houve a intenção de acrescentar aos reguladores outras funções, tais como de partida automática e aproximação de torque, foi projetado o mecanismo para os reguladores dos motores mono e bicilíndricos ilustrado nas figuras 5.1 e 5.3. Foram reprojctadas e acrescentadas novas alavancas para atender as novas funções. De acordo com cada nova função, se tornou necessário dispor-se de novas molas.

Para o desligamento do motor monocilíndrico, acrescentou-se uma alavanca extra para fim de débito, pois, a mola de partida tem a função de deixar o mecanismo do regulador em posição de débito de partida e marcha lenta. Para a parada do motor é necessário acionar tal alavanca para a posição de fim de débito, assim cortando totalmente o débito de combustível.

5.1. Regulador com Mola de Partida e Correção de Torque para o Motor Monocilindrico

Este novo sistema de regulagem teve adequação dos contrapesos centrífugos, que tiveram uma redução de massa na ordem de 26,8%, e a constante da mola de regulagem com redução de 47,8%, após o redimensionamento através da modelagem tridimensional e equacionamento do sistema que pode ser visto a seguir.

Na figura 5.1, as alavancas (5) e (11) são as que agem diretamente na haste da cremalheira da bomba injetora, equilibrando a força das molas de regulagem e de aproximação e a das massas rotativas. O componente (2), é o batente de regulagem do débito máximo.

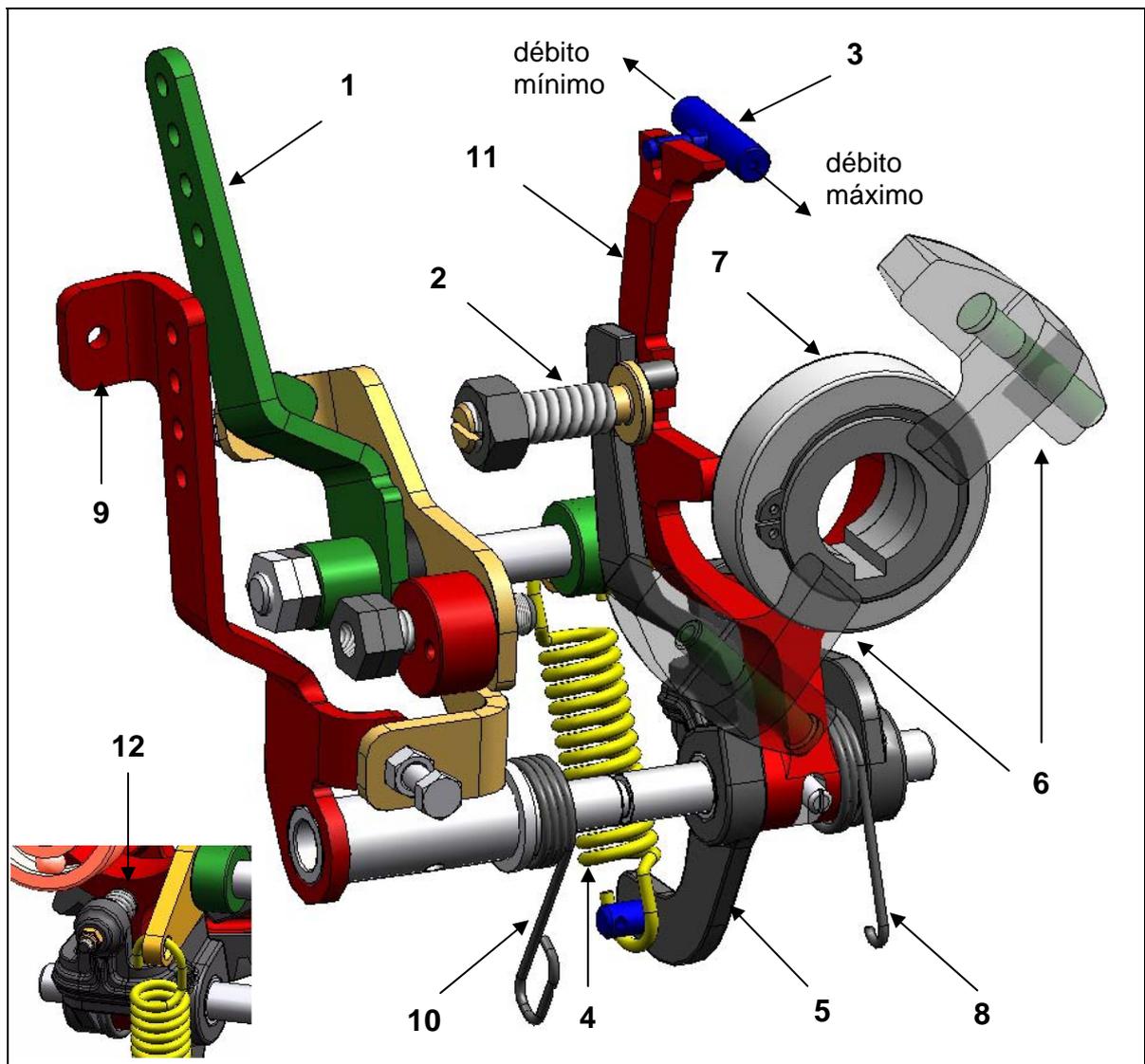


Figura 5.1 - Modelagem do regulador com sistema de mola de partida e correção de torque para o regulador do motor monocilíndrico. 1 - Alavanca de regulagem da rotação; 2 - Limitador do volume de injeção e de partida; 3 - Cremalheira da bomba injetora; 4 - Mola do regulador; 5 - Alavanca do regulador; 6 - Contrapesos centrífugos; 7 - Luva de regulagem. 8 - Mola de partida; 9 - Alavanca de corte

de débito; 10 - Mola de retorno da alavanca de corte de débito; 11 - Alavanca do regulador com função de aproximação; 12 - Mola de correção de torque.

O componente (3), é a cremalheira da bomba injetora, a alavanca (1) determina a rotação. O componente (4), é a mola de regulagem, a mola (8) é responsável pelo débito de partida, e a mola (12) é responsável pela correção de torque. Essa mola tem a função de empurrar a alavanca (11) aumentando o débito, quando (5) estiver no batente de débito máximo e a força dos contrapesos centrífugos diminui devido a carga.

A alavanca (9), determina o fim de débito, ou seja, o desligamento do motor através de corte do débito através da cremalheira da bomba injetora. A mola (10), serve para o retorno da alavanca de parada do motor a sua posição de repouso. Os componentes (6) e (7) são, respectivamente, os contrapesos centrífugos e a luva de regulagem.

A função deste regulador é semelhante ao estudado no capítulo 4, para o motor monocilíndrico, diferenciando-se apenas no aspecto dos mecanismos de regulagem de injeção, alavancas e molas agregados ao novo sistema, que são o dispositivo auxiliar de partida automático, o dispositivo de correção de débito nos momentos críticos de operação e alavanca de parada. O princípio de funcionamento do regulador pode ser descrito simplificadaamente, com base na figura 5.2, bem como todos os elementos envolvidos no mecanismo.

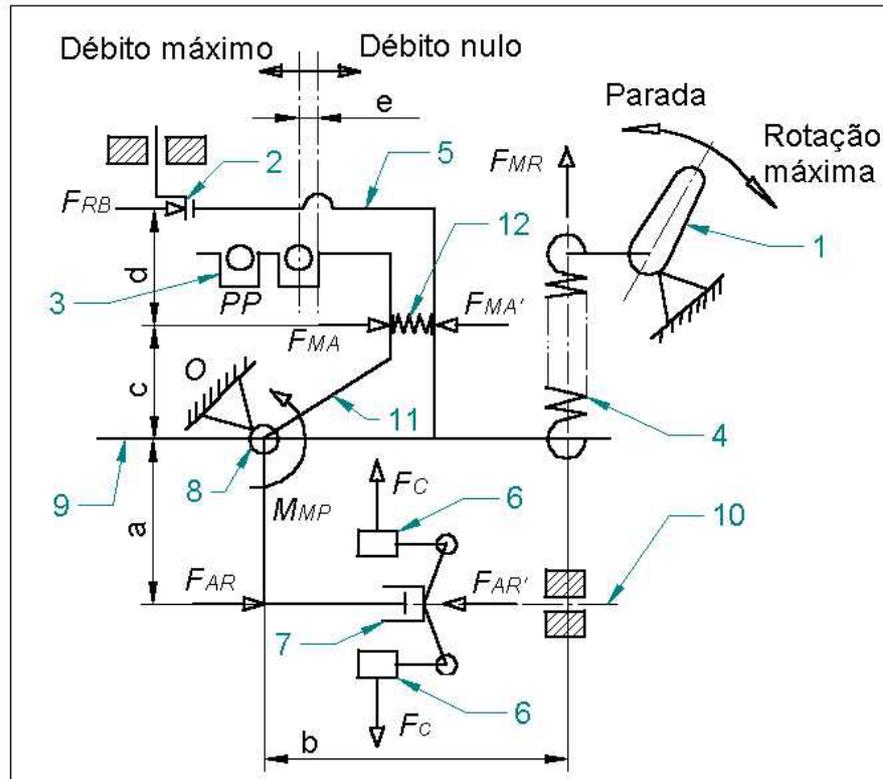


Figura 5.2 – Regulador com mola de partida e corretor de torque: 1 - Alavanca de regulação da rotação; 2 - Limitador do volume de injeção e de partida; 3 - Cremalheira da bomba injetora; 4 - Mola do regulador; 5 - Alavanca do regulador; 6 - Contrapesos centrífugos; 7 - Luva de regulação. 8 - Mola de partida; 9 - Alavanca de corte de débito; 10 – Eixo comando.; 11 - Alavanca do regulador com função de aproximação; 12 - Mola de correção de torque.

5.1.1. Condição de Operação sem Carga

Considerando-se o equilíbrio de momentos em torno do ponto “O”, da figura 5.2, pode-se avaliar como:

$$F_{AR} \cdot a = F_{MR} \cdot b + F_{MA} \cdot c \quad (22)$$

onde considera-se, $F_C \propto F_{AR'} \propto F_{MR}$

Portanto, como já descrito anteriormente para o regulador do motor monocilíndrico em questão, ($F_{AR'}$) é proporcional a (F_C) que depende por sua vez da rotação. Logo, sem carga o equilíbrio é mantido pela força axial resultante e a força da mola do regulador (F_{MR}) mais a força da mola de aproximação (F_{MA}) uma vez que esta não atuará neste regime devido a intensidade da (F_{MR}) ser ligeiramente superior a (F_{MA}) para uma deformação “x” correspondente a qualquer regime a vazio, isto é, sem carga.

5.1.2. Condição de Operação com Carga

Partindo do somatório dos momentos em torno do ponto “O” tem-se o que segue:

$$F_{AR'} \cdot a = F_{MA'} \cdot c - F_{RB} \cdot (c + d) + F_{MR} \cdot b \quad (23)$$

De modo semelhante ao regulador do motor monocilíndrico estudado, no momento em que se aplica no motor uma dada carga, a queda de rotação provoca uma diminuição da ($F_{AR'}$). A partir daí, a alavanca do regulador deslocará no sentido crescente de débito, até que o equilíbrio seja estabelecido para a nova condição de operação, através do batente de regulação do consumo, onde atua (F_{RB}), que é a força resultante no batente, sendo que neste caso, ocorrerá uma ação conjunta de ($F_{MA'}$), a força da mola aproximação.

Nesta situação, o batente não será o limite de débito máximo como no regulador estudado, pois neste caso, a mola de aproximação, item (10), do esquema da figura 5.2, irá permitir o movimento da bomba injetora num percurso descrito por ‘e’ através da alavanca intermediária, item (11) do esquema, desde que ($F_{AR'}$) sofra um decréscimo.

Caso ocorra um novo acréscimo de carga no motor, por exemplo, um momento crítico, haverá incremento no débito para corrigir o torque do motor, tendo em vista que a ($F_{MA'}$) está agora na dependência apenas de ($F_{RA'}$), pois a (F_{MR}) será equilibrada pela (F_{RB}).

Quanto menor for a rotação do motor neste caso, menor será ($F_{AR'}$) e então ($F_{MA'}$) estabelecerá o equilíbrio e após a correção de torque, que pode ser precisamente controlada para a demanda de reserva de torque pretendida, dentro de determinados limites de consumo, emissões e outros parâmetros. Partindo da equação 25, tem-se:

$$F_{MA'} \cdot c = F_{AR'} \cdot a \quad (24)$$

Da relação (26), pode-se determinar a carga da mola de aproximação, para que o efeito de correção aconteça a partir de uma determinada rotação desejada. Tal relação determina a máxima reserva de torque nos motores Diesel.

5.1.3. Condição de Operação na Partida Automática

Através da ação de (F_{MP}), que é a força da mola de partida, o posicionador da bomba injetora assume a condição (PP) posição de partida, conforme a figura 5.2. No momento que o motor entrar em funcionamento a rotação de marcha lenta por si só será suficientemente hábil para vencer (F_{MP}) em função da (F_{AR}) correspondente à marcha lenta.

A posição de partida (PP) do sistema de regulação, portanto possui um adicional de combustível numa situação que a hélice do elemento da bomba induz um avanço no ponto de injeção, fazendo que o motor entre em operação com maior facilidade. Esse efeito é desativado tão logo o motor entrar em funcionamento.

5.2. Regulador com Correção de Torque para o Motor Bicilíndrico

Seguindo os mesmos parâmetros e ferramentas de projeto descritas para o projeto do regulador do motor monocilíndrico, a figura 5.3 ilustra a proposta de sistema de correção de torque para o regulador do motor bicilíndrico.

Para este regulador inicialmente não haverá alterações no que diz respeito a mola de regulação e massa dos contrapesos centrífugos. Isto decorre de que neste sistema só houve o acréscimo de uma alavanca com um sistema de limitação para obtenção do curso de aproximação.

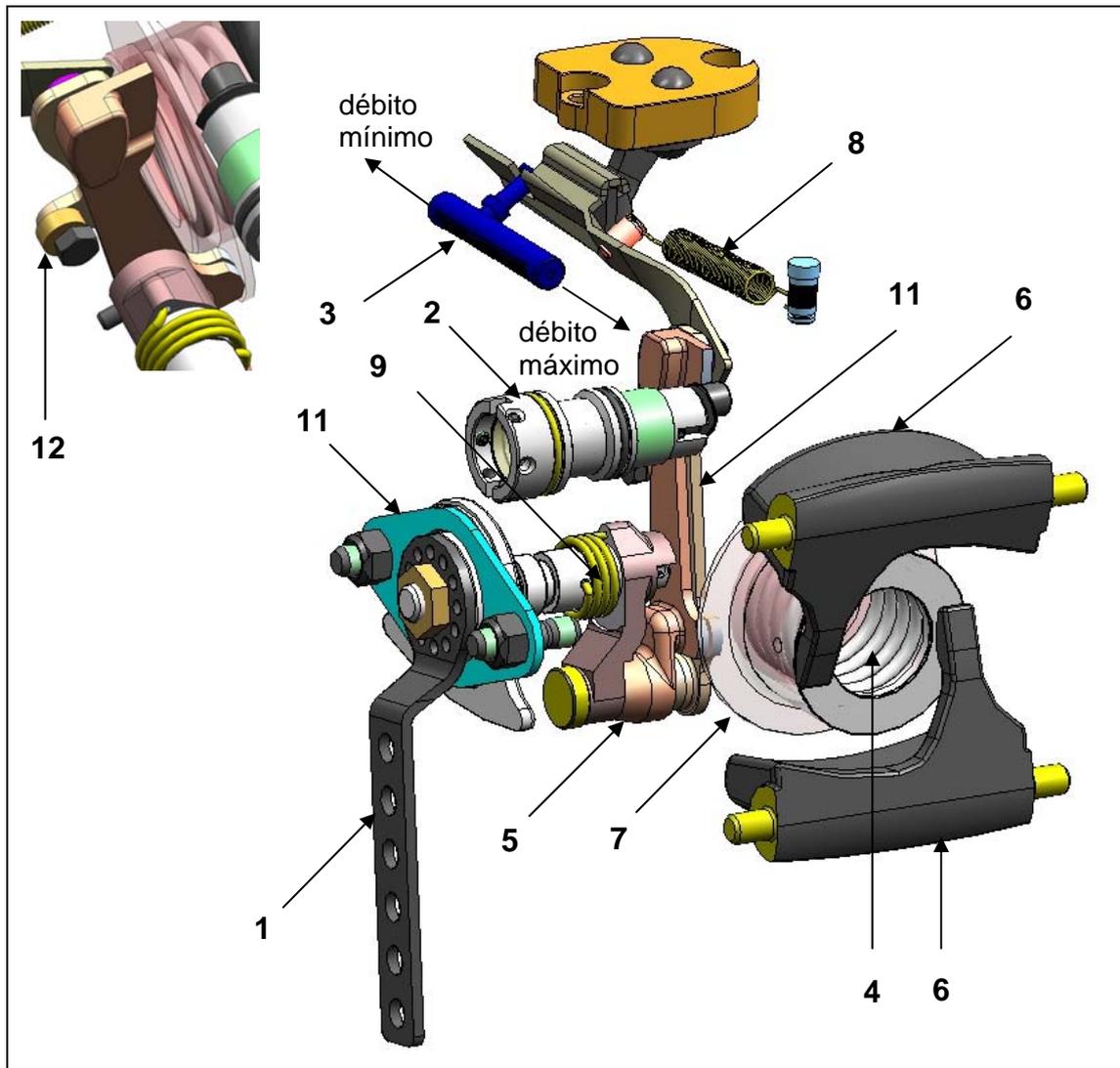


Figura 5.3 – Modelagem do regulador com correção de torque. 1 - Alavanca de ajuste da rotação; 2 - Sistema hidráulico automático de partida e excêntrico de regulação do débito máximo; 3 - Cremalheira da bomba injetora; 4 - Mola do regulador; 5 - Conjunto de alavancas do regulador; 6 - Contrapesos centrífugos; 7 - Luva de regulação; 8 - Mola auxiliar de partida; 9 - Mola auxiliar de corte de débito; 10 - Flange de atrito; 11 - Alavanca de aproximação; 12 - Excêntrico de regulação do curso de correção de torque.

A função deste regulador é semelhante ao estudado no capítulo 4, para o motor bicilíndrico, diferenciando-se apenas no acréscimo de uma alavanca (11) e o excêntrico (12), gerando um novo sistema, que é o dispositivo de correção de débito nos momentos críticos de operação. O componente (2) é o sistema hidráulico de partida automática que substitui o botão auxiliar de partida manual. Os demais itens seguem a mesma nomenclatura da figura 4.4, do capítulo 4.

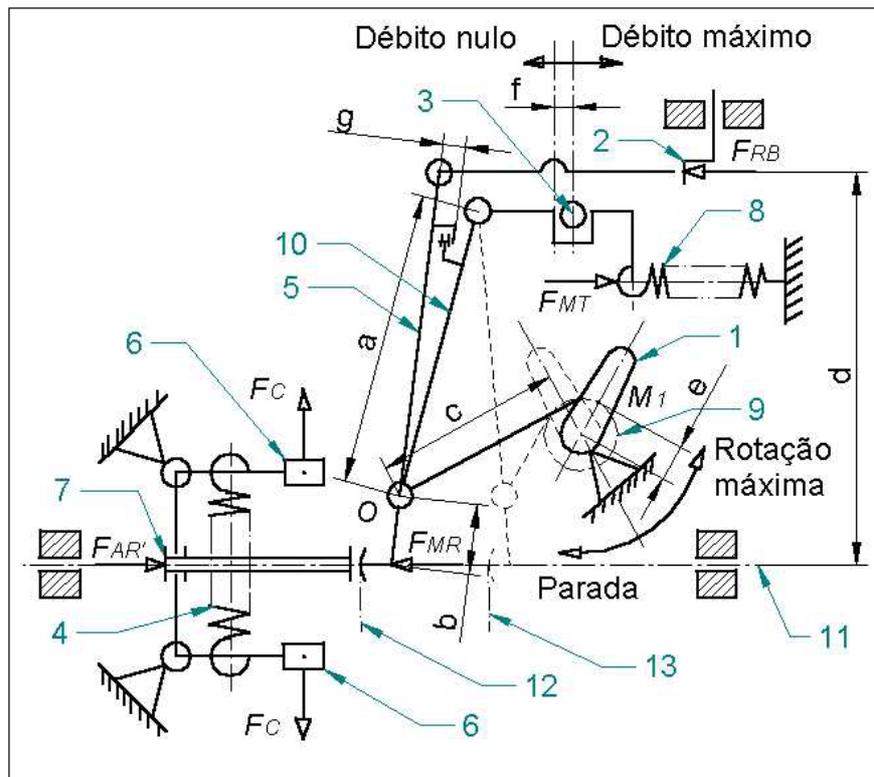


Figura 5.4 - Regulador do motor bicilíndrico com corretor de torque. 1 - Alavanca de ajuste da rotação; 2 - Sistema hidráulico automático de partida e excêntrico de regulagem do débito máximo; 3 - Cremalheira da bomba injetora; 4 - Mola do regulador; 5 - Conjunto de alavancas do regulador; 6 - Contrapesos centrífugos; 7 - Luva de regulagem; 8 - Mola auxiliar de partida; 9 - Mola auxiliar de corte de débito; 10 - Alavanca de correção de torque; 11 - Eixo comando. 12 - Alavanca do regulador na posição de máxima rotação; 13 - Alavanca do regulador na posição de parada do motor.

5.2.1. Condição de Operação com Correção de Torque

O princípio de funcionamento do regulador e da nova alavanca (10) que delimita o curso de aproximação para o mecanismo é ilustrado na figura 5.4. A alavanca tem o eixo de giro no mesmo ponto da alavanca de regulagem (5), e quando a mesma chega no batente de regulagem do débito máximo (2), ela ainda tem mais o curso “f”, que dá o incremento “e”, curso na haste da cremalheira da bomba, de débito efetuando a aproximação desejada. Nota-se que não existe uma mola de aproximação, isto se mostrou possível devido ao tipo de sistema com mola coaxial com a luva (7) e mola auxiliar de partida, onde age (F_{MT}).

5.2.2. Condição de Operação na Partida Automática

Para a partida automática será implementado, um sistema de partida hidráulico junto ao botão de partida manual, que passa a ser um botão de partida hidráulico automático, o qual funciona com o óleo do sistema de lubrificação do motor. Esse sistema fica pressurizado a partir do início de funcionamento da bomba de óleo lubrificante, que é movida pela engrenagem do virabrequim. No momento em que o motor é desligado, o excêntrico de regulagem é recolhido para a posição de repouso e o conjunto de alavancas de regulagem vai para a posição de débito de partida.

5.2.3. Condição de Parada do Motor

A condição de fim de débito continua sendo realizada pela alavanca de aceleração, que sendo girada no sentido anti-horário e com o auxílio da mola de parada (componente do sistema original de regulagem), o débito é cortado.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

6.1. Motores utilizados

O motor usado nos testes é o modelo M93, motor Diesel monocilíndrico refrigerado a ar com 14,7cv de potência a 2750 rpm, cilindrada 688cm³, diâmetro do pistão 90mm e curso 105mm, taxa de compressão 20:1, tem como principais aplicações, equipamentos agrícolas e de construção civil, grupos geradores, moto bombas e veículos agrícolas e de construção civil de pequeno porte.

Para os testes de desempenho do regulador com correção de torque para o motor bicilíndrico, serão manufaturados protótipos de acordo com a proposta apresentada no capítulo 5 e da mesma forma testadas, como no caso mostrado para o motor monocilíndrico. O motor bicilíndrico é o modelo M790, motor Diesel refrigerado a ar com 30cv de potência a 3000 rpm, cilindrada 1272cm³, diâmetro do pistão 90mm e curso 100mm, taxa de compressão 18:1, as principais aplicações são as mesmas citadas para o motor M93.

Também foram realizados testes com um motor modelo M95W, motor Diesel monocilíndrico refrigerado a água com 17,5cv de potência a 3000 rpm, cilindrada 744cm³, diâmetro do pistão 95mm e curso 105mm, taxa de compressão 20:1, as principais aplicações às mesmas do motor M93 e usa o mesmo sistema de regulagem do modelo M93. Os dados obtidos podem ser vistos no apêndice do final do trabalho.

6.2. Equipamentos utilizados

Os testes foram realizados no setor de oficina de motores e dinamometria da Agrale S.A. Os equipamentos utilizados pertencem ao departamento de Engenharia Experimental, que se apresentam a seguir.

Dois dinamômetros de bancada.

1) Schenck W130 80kW

Faixa de medição 0,0 a 40,0kg com resolução 0,10kg precisão da medição de potência é $\pm 1\%$.

2) Hoffmann 80kW

Faixa de medição 0,0 a 40,0kg com resolução 0,10kg precisão da medição de potência é $\pm 1\%$.

Medidor de Consumo AVL;

Faixa de medição 0,0 a 50,0kg/h, resolução 0,001g/s local de medição tubulação antes da bomba injetora.

Medidor de Blow by AVL

Faixa de medição 5 a 50 litros por minuto, resolução 1 litro por minuto, erro $\pm 1\%$.

Opacímetro Bosch UB com leitor analógico identificador de fumo em papel.

Faixa de medição 0,0 a 9,0UB, resolução (0 a 2UB) 0,1UB e (2 a 9UB) 0,2UB, local de medição tubulação após o coletor de escape.

Termopar Gulton tipo K Cromel Alumel;

Faixa de medição 0 a 280°C erro $\pm 2,3^\circ\text{C}$ e 280 a 1200°C erro $\pm 0,75^\circ\text{C}$, local de medição coletor de escape.

Termopar Gulton tipo J Ferro Constantan.

Faixa de medição 0 a 280°C erro $\pm 2,3^\circ\text{C}$ e 280 a 800°C erro $\pm 0,75^\circ\text{C}$, locais de medição, ar de admissão na entrada do filtro de ar, óleo lubrificante na vareta de nível do óleo e líquido de arrefecimento (somente para o motor M95W) na conexão de saída de líquido do cabeçote.

Leitor de Temperatura digital Gulton – Gulterm 700.

Faixa de medição -40 a $199,9^\circ\text{C}$, resolução $0,1^\circ\text{C}$ e 200 a 700°C , resolução $1,0^\circ\text{C}$ precisão $0,5\%$.

Leitor de Temperatura digital Gulton – Gulterm 1200.
Faixa de medição -70 a 199,9°C, resolução 0,1°C e 200 a 1200°C,
resolução 1,0°C, precisão 0,5%.

Termômetro de Mercúrio Convencional para as temperaturas ambiente de bulbo úmido e seco.

Faixa de medição 0 a 120°C, resolução 2°C e erro permitido ± 1 °C.

6.3. Experimentos e Resultados

Para validar as modificações propostas nos reguladores, foram construídos protótipos e adaptados nos motores estudados, sendo os mesmos ensaiados em banco dinamométricos, para verificação de torque e consumo. O objetivo principal é avaliar a uniformidade de rotação do motor nos regimes com e sem carga, facilidade de partida a frio e funcionabilidade do sistema.

Os ensaios dinamométricos foram baseados na norma NBR 6396, com amaciamento dos motores de 10 horas a plena carga, após realiza-se o levantamento das curvas de performance.

A norma NBR 6396 constitui, procedimento para ensaios de desempenho de motores alternativos de combustão interna. O campo de aplicação, quanto a construção dos motores aplica-se a ciclo de 2 ou 4 tempos, carburados ou com injetor, ignição por centelha ou compressão, combustível gás, gasolina, óleo diesel, álcool ou multi-combustível e alimentação natural ou superalimentação. Quanto ao uso aplica-se a motores de propulsão de máquinas estacionárias ou transportáveis como geradores elétricos, bombas d'água, compressores, máquinas agrícolas e também motores de propulsão de veículos ferroviários, fluviais ou marítimos.

Esta norma apresenta as definições de potência que deve ser expressa em cavalos vapor (cv) ou em quilowatt (kW), de consumo registrado em gramas por cavalo vapor hora (g/cvh) ou gramas por quilowatt hora (g/kWh). Fixa parâmetros para

medição de vazão de fluídos de arrefecimento, rotações do motor, rotações de regulagem do motor, graus de irregularidade, momento de força, pressão, temperatura e rendimento mecânico.

Foram realizados vários testes de acionamento do mecanismo com diversas molas. Escolheu-se a mola que proporcionou melhor estabilidade de rotação de marcha lenta e rotação livre. Na condição com carga, não foi detectada nenhuma irregularidade de funcionamento.

Os dados de índice de fumaça, temperatura e pressão do óleo lubrificante, temperatura do ar na admissão, temperatura do fluído de arrefecimento (somente para o motor M95W) e temperatura dos gases de escape foram monitorados durante os testes e se mantiveram dentro de limites considerados normais para os motores ensaiados. Os valores considerados normais são os descritos a seguir:

Temperatura ambiente de bulbo seco 17 a 24°C e bulbo úmido 14 a 17°C

Temperatura dos gases de escape a rotação de 2750rpm varia de 500 a 620°C;

Temperatura do ar na admissão medida 35°C;

Temperatura do óleo lubrificante se manteve em torno de 80°C;

Temperatura do fluído de arrefecimento para o motor M95W, variou 80 a 90°C;

O índice de fumaça medido durante os testes foi de 4,2 a 4,5UB.

O Blow by medido durante os testes ficou em torno de 6 a 7 litros por minuto.

Comparativamente com os motores com reguladores nas condições originais, sem os aparatos para as novas funções de partida e aproximação, são reportados os resultados nas tabelas 1 e 2 e gráficos 1 e 2, que são mostrados a seguir. Os mesmos demonstram os resultados de desempenho obtidos em comprovação aos dimensionamentos realizados.

Tabela 1 – Ensaio dinamométrico para o motor monocilíndrico com regulador original, curva F.

| Rotação (rpm) | Potência (kW) | Torque (daN.m) |
|---------------|---------------|----------------|
| 1800 | 6,45 | 3,42 |
| 1900 | 7,00 | 3,52 |
| 2000 | 7,35 | 3,51 |
| 2100 | 7,80 | 3,55 |
| 2200 | 8,21 | 3,56 |
| 2300 | 8,56 | 3,56 |
| 2400 | 8,99 | 3,58 |
| 2500 | 9,14 | 3,49 |
| 2600 | 9,45 | 3,47 |
| 2750 | 9,88 | 3,43 |

Tabela 2 – Ensaio dinamométrico para o motor monocilíndrico com regulador modificado, curva F.

| Rotação (rpm) | Potência (kW) | Torque (daN.m) |
|---------------|---------------|----------------|
| 1800 | 7,62 | 4,04 |
| 1900 | 8,14 | 4,09 |
| 2000 | 8,50 | 4,06 |
| 2100 | 8,79 | 4,00 |
| 2200 | 9,20 | 3,98 |
| 2300 | 9,54 | 3,96 |
| 2400 | 9,86 | 3,92 |
| 2500 | 10,11 | 3,86 |
| 2600 | 10,15 | 3,73 |
| 2750 | 10,22 | 3,55 |

O sistema de aproximação permite variar a curva de torque do motor, de modo que foi conseguido um acréscimo médio de 12% no desempenho do motor, para um mesmo acréscimo de débito. Para rotações abaixo de 2100, foi observado um aumento desordenado de débito de combustível sem o conseqüente aumento de rendimento, conforme tabela e gráfico 3.

O parâmetro de estabilização do regime de funcionamento do motor utilizado nos testes é a temperatura do óleo lubrificante, e a partir daí faz-se a regulagem do excêntrico do débito e admite-se uma tolerância de variação do consumo

de 1,5% da vazão mássica em um período de medição de 50 segundos. Isto explica a variação nula de consumo à 2750rpm na tabela 3, ou seja dentro desta tolerância considera-se que não houve variação de consumo significativa. O gráfico 3 apresenta uma variação de potência pertinente a tolerância de 1,5% do consumo na potência máxima a 2750rpm.

Tabela 3 – Variação percentual de consumo, potência e torque do motor com regulador modificado em relação ao regulador original.

| Rotação (rpm) | Variação Consumo (%) | Variação Potência (%) | Débito (mm ³ /Injeção) |
|---------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 1800 | 31,06 | 18,14 | 45,88 |
| 1900 | 27,68 | 16,29 | 46,59 |
| 2000 | 23,28 | 15,65 | 45,60 |
| 2100 | 16,42 | 12,69 | 43,63 |
| 2200 | 13,62 | 11,45 | 43,12 |
| 2300 | 12,95 | 11,45 | 43,09 |
| 2400 | 10,68 | 9,68 | 42,29 |
| 2500 | 9,92 | 10,61 | 41,68 |
| 2600 | 6,37 | 7,41 | 40,24 |
| 2750 | 0,00 | 0,00 | 38,04 |

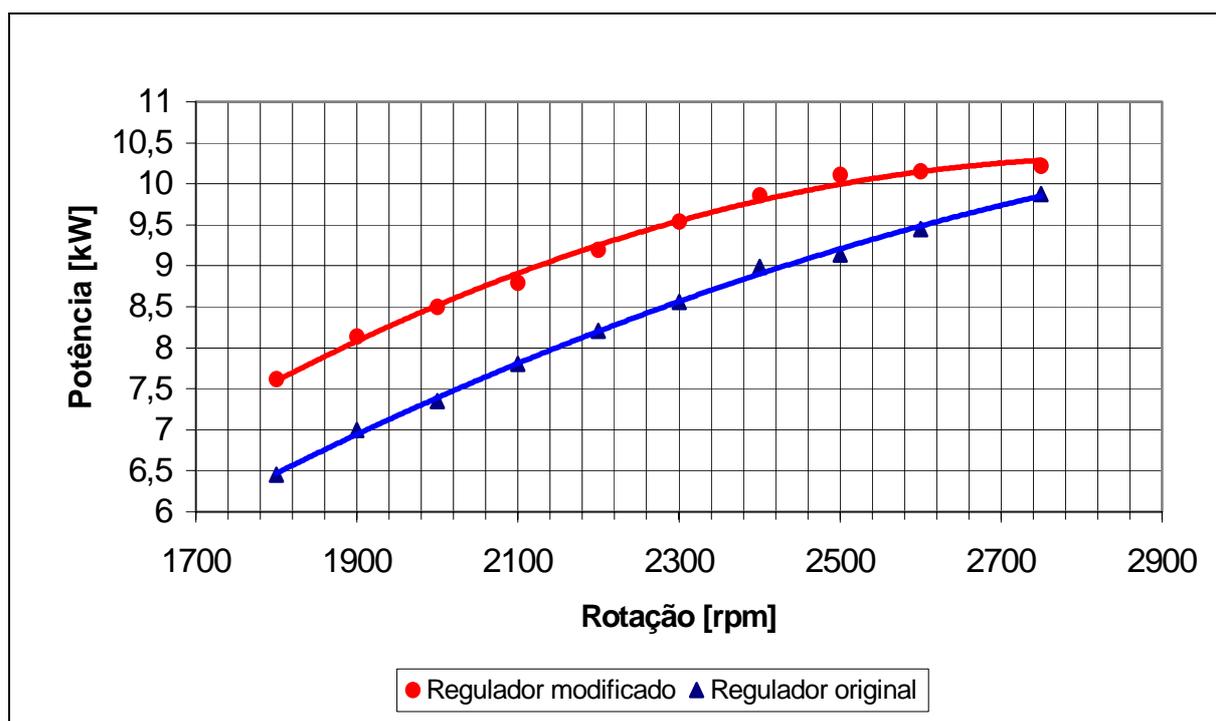


Gráfico 1 – Ensaio dinamométrico para o motor monocilíndrico - Curvas de Potência

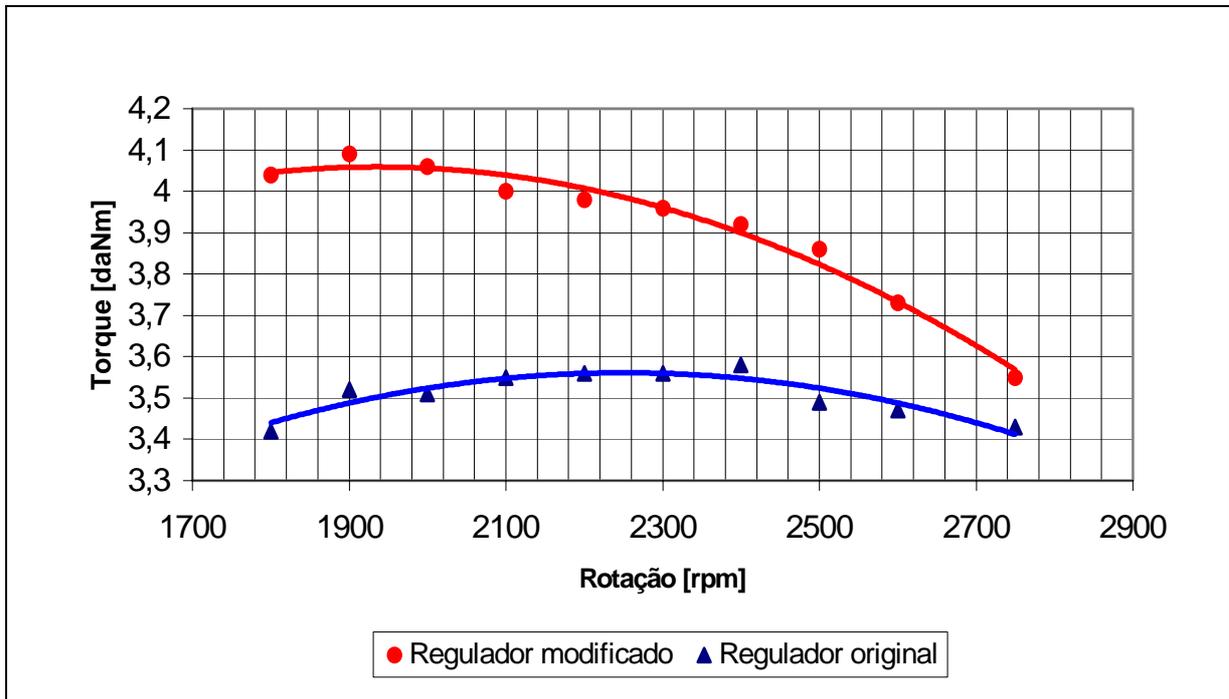


Gráfico 2 – Ensaio dinamométrico para o motor monocilíndrico - Curvas de Torque

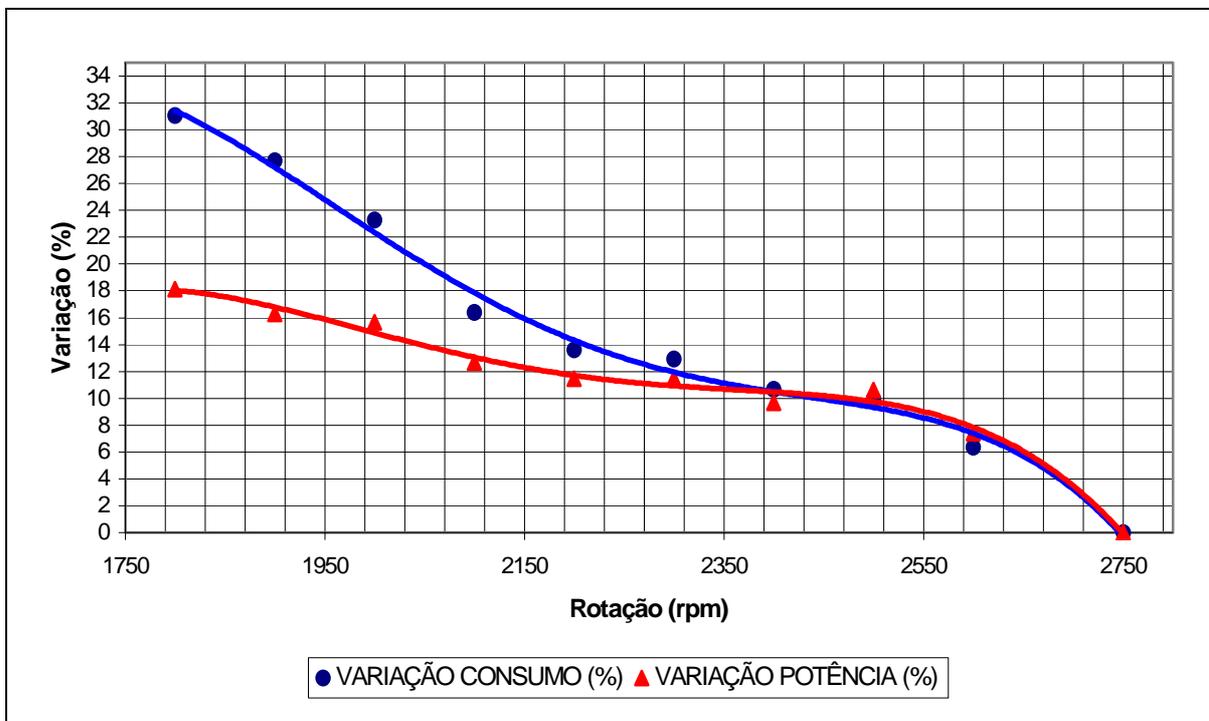


Gráfico 3 – Curvas de variação percentual de consumo e potência para o motor monocilíndrico

Dos resultados reportados na tabela 2, de ensaio do motor monocilíndrico que foi testado com correção de torque, identifica-se que a rotação onde o torque atingiu seu pico máximo $n_{Tb_{máx}}$ é de 1900rpm, a rotação de potência máxima n_r é de 2750rpm. O valor de torque máximo $Tb_{máx}$ é de 4,09 daN.m e o valor de torque em potência máxima Tb_{nr} é de 3,55 daN.m. Aplicando-se o coeficiente da rotação de reserva de torque ideal de (Khovarkh, 1979):

$$k_v = \frac{n_{Tb_{máx}}}{n_r} = \frac{1900}{2750} = 0,69$$

Aplicando-se o coeficiente de intensidade de reserva de torque de (Khovarkh, 1979):

$$K = \frac{4,09}{3,55} = 1,144 \leq 1,15$$

De acordo com os resultados acima, o conjunto apresentou resultados satisfatórios, uma vez que o mecanismo de aproximação (correção de torque) exige uma precisão apurada dos componentes, e em se tratando de componentes protótipos, algumas tolerâncias de fabricação não alcançaram as especificações requeridas, causando dessa forma, algumas distorções no comportamento dos testes, pelas folgas presentes e deformação de alguns componentes.

Esse fato pode ser comprovado através dos ensaios do motor com regulador protótipo (com correção de torque) e do motor com regulador original. Nesses testes se evidenciou uma distorção no acréscimo de consumo abaixo de 2000 rpm, pois nesta condição o motor não corresponde em termos de torque ao incremento proporcional de débito conforme gráfico 3, o que denota que o mecanismo requer alguns ajustes.

No final deste trabalho, no anexo, são apresentados vários ensaios dinamométricos para os motores monocilíndricos M93 e M95W. Parâmetros de potência, torque e consumo podem ser visualizados em tabelas e gráficos.

7. ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE ERROS E INCERTEZAS DOS DADOS

Os experimentos para a validação dos sistemas de regulação propostos realizaram-se em dinamômetros da engenharia experimental da Agrale S.A.. A seguir, mostra-se, uma breve análise da propagação de erros e incertezas de medição, dos parâmetros avaliados.

As situações que envolvem diversas medidas de um mesmo parâmetro são muito comuns em laboratórios de Metrologia e Controle Dimensional, e normalmente estão associadas ao Controle Estatístico do produto,(Rigotti, 2004). Entretanto, quando a abordagem está centralizada em dados provenientes de situações, onde o experimento não pode ser repetido, por se tratar de condições específicas, pode-se usar as teorias mostradas a seguir.

Conforme (Rigotti, 2004) apud (Kleine e McClintock, 1989), pode-se determinar como resultado do cálculo do erro uma função das variáveis independentes $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, por:

$$\Delta R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \times \Delta 1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \times \Delta 2 \right)^2 + \dots \right]^{1/2} \quad (25)$$

Segundo Rigotti (2004), a potência efetiva para o dinamômetro utilizado nos testes é dada por:

$$P (kW) = RPM \times CARGA \times CONSTANTE (0,001) \quad (26)$$

logo a combinação de erros será:

$$ERRO = RPM \times CARGA \times \left[\left(\frac{a}{RPM} \right)^2 + \left(\frac{b}{CARGA} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (27)$$

Na tabela 4, são reportados os dados de propagação de erro dos dados medidos de rotação e carga, os valores da coluna de potência não são corrigidos, pelas condições de temperatura e pressão segundo norma NBR 6396, como os das tabelas 1 e 2 do capítulo 6.

Tabela 4 – Propagação de erros dos dados medidos de rotação e carga

| | Rotação | Carga | Potência | Incertezas | | Erro (E) | Incerteza |
|-----------------------------|---------|-------|----------|------------|------|----------|-----------|
| | ±0.1% | ±1% | (kW) | (a) | (b) | (±kW) | (%) |
| Regulador Normal Monocil. | 1800 | 3,42 | 6,16 | 1,8 | 0,03 | 0,06 | 1,0 |
| | 1900 | 3,52 | 6,69 | 1,9 | 0,04 | 0,07 | 1,0 |
| | 2000 | 3,51 | 7,02 | 2,0 | 0,04 | 0,07 | 1,0 |
| | 2100 | 3,55 | 7,46 | 2,1 | 0,04 | 0,07 | 1,0 |
| | 2200 | 3,56 | 7,83 | 2,2 | 0,04 | 0,08 | 1,0 |
| | 2300 | 3,56 | 8,19 | 2,3 | 0,04 | 0,08 | 1,0 |
| | 2400 | 3,58 | 8,59 | 2,4 | 0,04 | 0,09 | 1,0 |
| | 2500 | 3,49 | 8,73 | 2,5 | 0,03 | 0,09 | 1,0 |
| | 2600 | 3,47 | 9,02 | 2,6 | 0,03 | 0,09 | 1,0 |
| | 2750 | 3,43 | 9,43 | 2,8 | 0,03 | 0,09 | 1,0 |
| Regulador Proposto Monocil. | 1800 | 4,04 | 7,27 | 1,8 | 0,04 | 0,07 | 1,0 |
| | 1900 | 4,09 | 7,77 | 1,9 | 0,04 | 0,08 | 1,0 |
| | 2000 | 4,06 | 8,12 | 2,0 | 0,04 | 0,08 | 1,0 |
| | 2100 | 4,00 | 8,40 | 2,1 | 0,04 | 0,08 | 1,0 |
| | 2200 | 3,98 | 8,76 | 2,2 | 0,04 | 0,09 | 1,0 |
| | 2300 | 3,96 | 9,11 | 2,3 | 0,04 | 0,09 | 1,0 |
| | 2400 | 3,92 | 9,41 | 2,4 | 0,04 | 0,09 | 1,0 |
| | 2500 | 3,86 | 9,65 | 2,5 | 0,04 | 0,10 | 1,0 |
| | 2600 | 3,73 | 9,70 | 2,6 | 0,04 | 0,10 | 1,0 |
| | 2750 | 3,55 | 9,76 | 2,8 | 0,04 | 0,10 | 1,0 |

As incertezas (a) e (b), são respectivamente os percentuais de erro dos valores medidos de rotação e carga, ou seja, (a) é 0,1% da rotação correspondente e (b) é 1,0% da carga medida.

O erro (E) é obtido através da equação (27) e a incerteza, ultima coluna da tabela 4 é calculada pelo percentual do quociente entre o erro (E) e a potência calculada.

8. CONCLUSÕES

O dimensionamento de reguladores de rotação mecânicos, para a condição de bombas injetoras unitárias, inicia com o projeto geométrico dos mecanismos, conjunto de massas excêntricas, conjuntos de alavancas e conjuntos de molas, bem como se o sistema está de acordo com o curso da haste da cremalheira da bomba injetora a ser utilizada.

Para o correto dimensionamento dos conjuntos e estudo de viabilidade dimensional é necessário o prévio conhecimento de quais funções serão necessárias para o sistema de regulação, e também sua disposição no interior do motor em estudo. Para o desenvolvimento deste trabalho a modelagem tridimensional auxiliada por computador, mostrou-se de fundamental importância para a compreensão e simulação dos movimentos, o que é feito através de relações de montagem a que os programas atuais têm nos seus módulos de montagem.

Da etapa de modelagem segue-se o equacionamento das forças, momentos e reações para o dimensionamento das massas excêntricas, contrapesos do regulador, utilizando as condições de contorno como as faixas de rotações desejadas e aproximações, quando é o caso. Tais formulações são obtidas a partir do estudo das restrições que o mecanismo é submetido e o somatório das forças e momentos, como se pode ver durante o desenvolvimento deste trabalho.

Os reguladores de rotação propostos foram fabricados e montados em motores protótipos. Esses motores foram ensaiados e comparativamente com os reguladores atuais, obtiveram-se os parâmetros de potência, torque e consumo. Os motores foram colocados em bancos de provas dinamométricos, onde se obteve as curvas de potência torque e consumo. Para as funções de partida, avaliaram-se a partir de teste de durabilidade dos componentes nos motores com reguladores protótipos.

De forma geral o motor monocilíndrico com regulador modificado apresentou um acréscimo médio de torque de 12% nas rotações acima de 2100 rotações por minuto. Abaixo desta rotação o débito se torna muito alto em

comparações com o ganho de torque. Isto parece indicar, que o grau de insensibilidade do mecanismo do sistema de regulador proposto deve ser melhorado para estas rotações e assim realizar-se novos ensaios dinamométricos.

Para avaliar as características dos sistemas de regulagem modificados, mostradas na fundamentação teórica e dos reguladores Bosch como deslocamento de luva de regulagem, grau de irregularidade e grau de insensibilidade se faz necessário uma bancada de teste para simular apenas o regulador e o sistema de injeção de combustível. Assim eliminaria-se a variável motor e seria possível medir o deslocamento da luva e o volume de débito nas diferentes rotações dos sistemas de regulagem atuais e modificados.

No anexo xiv, são apresentados mais quatro ensaios dinamométricos, com levantamento de curvas de potência, torque e consumo três para o motor monocilíndrico arrefecido a ar e um para o motor monocilíndrico arrefecido a água . Em tabelas e gráficos visualiza-se que a tendência de tais curvas de torque e consumo tendem a serem semelhantes às apresentadas, no capítulo 3, que são as curvas características dos sistemas de regulagem Bosch que usam a função de aproximação, ou seja, corretor de torque.

REFERÊNCIAS

- BOSCH. “**Bombas injetoras em linha**”. Gerenciamento de motores Diesel. Apostila Técnica. Edição 2000.
- BOSCH. “**Bombas distribuidoras**”. Gerenciamento de motores Diesel. Apostila Técnica. Edição 2000.
- BOSCH. “**Equipamentos de injeção para motores Diesel (2), reguladores de rotação para bombas injetoras em linha**”. Apostila Técnica.
- CHOLLET, H. M. “**Cours Pratique Pour Mécaniciens D’Automobiles**”. Tradução autorizada da edição revista e ampliada publicada em Lausanne, Suíça, Hemus Livraria e Editora 1981, São Paulo – Brasil.
- CUVRU, P Margot. “**Motores Diesel**”. Editora Hemus. São Paulo, Brasil 1978.
- GIACOSA, Dante. “**Motori Endotermici**”. 15ª Edição, Ulrico Hoepli Editore S.p.A 2000 via Hoelpi 5, 20121 Milano, Itália.
- KHOVACH, M. “**Motor Vehicle Engines**”. Mir publishers. Moscow 1979.
- MANUAL TÉCNICO. “**Curso Metal Leve: Motores de Combustão Interna**”. 11ª Edição. Agosto 2001.
- MIRALLES, Juan M. de Imperial. “**Motor Diesel, injeção: Sistemas de regulação e injetores**”; CEAC; Espanha 1988.
- MIRALLES, Juan M. de Imperial. “**Bombas de injeção Diesel**”; CEAC; Espanha 1980.

OBERT F. Edward. **“Motores de combustion interna”**, Analisis y aplicaciones. Traducción de la segunda edición en inglês. Compañia Editorial Continental, S.^a de C.V. México 1992.

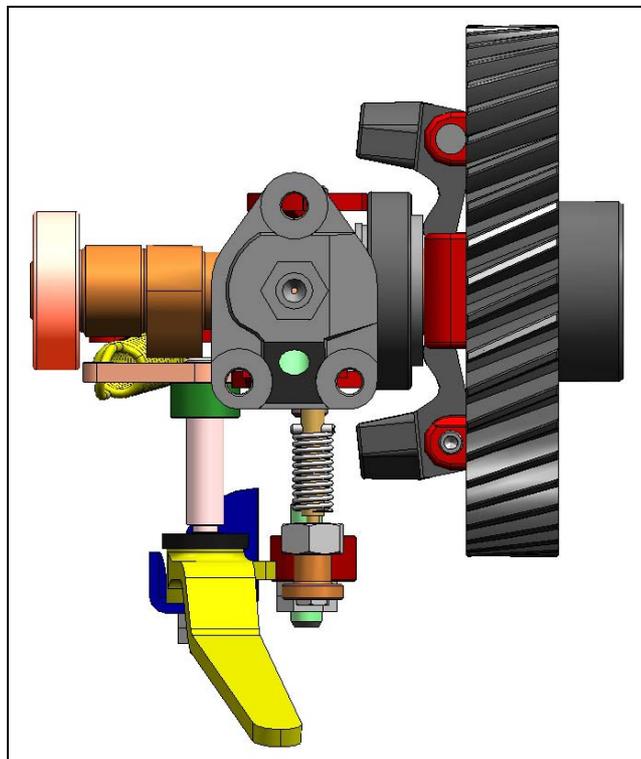
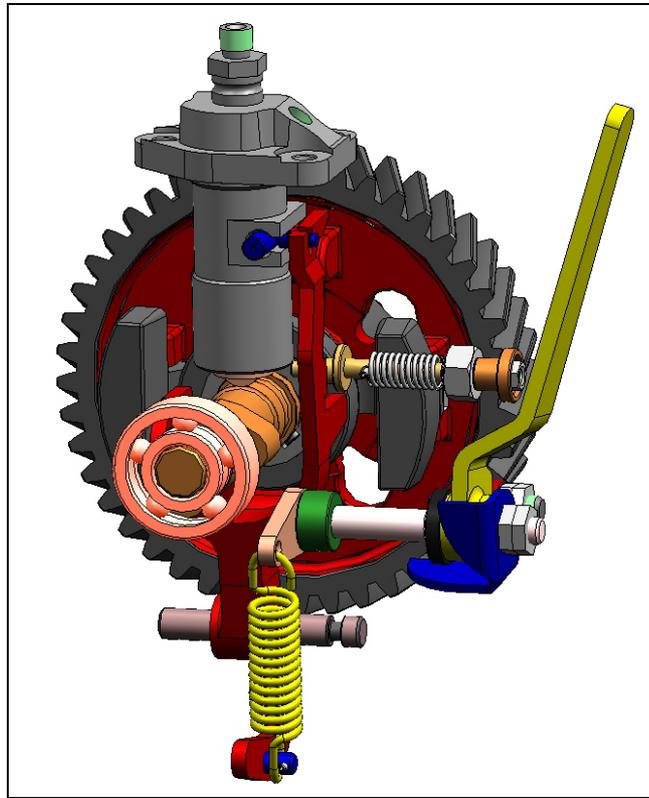
HATZ. **“ABC dos Motores”**. Apostila Técnica Hatz Motorfabric. Edição 19. 1982.

HEISLER, Heinz. **“Advanced engine technology”**. SAE International. Reprinted Butterworth-heinemann. Great Britain 2002.

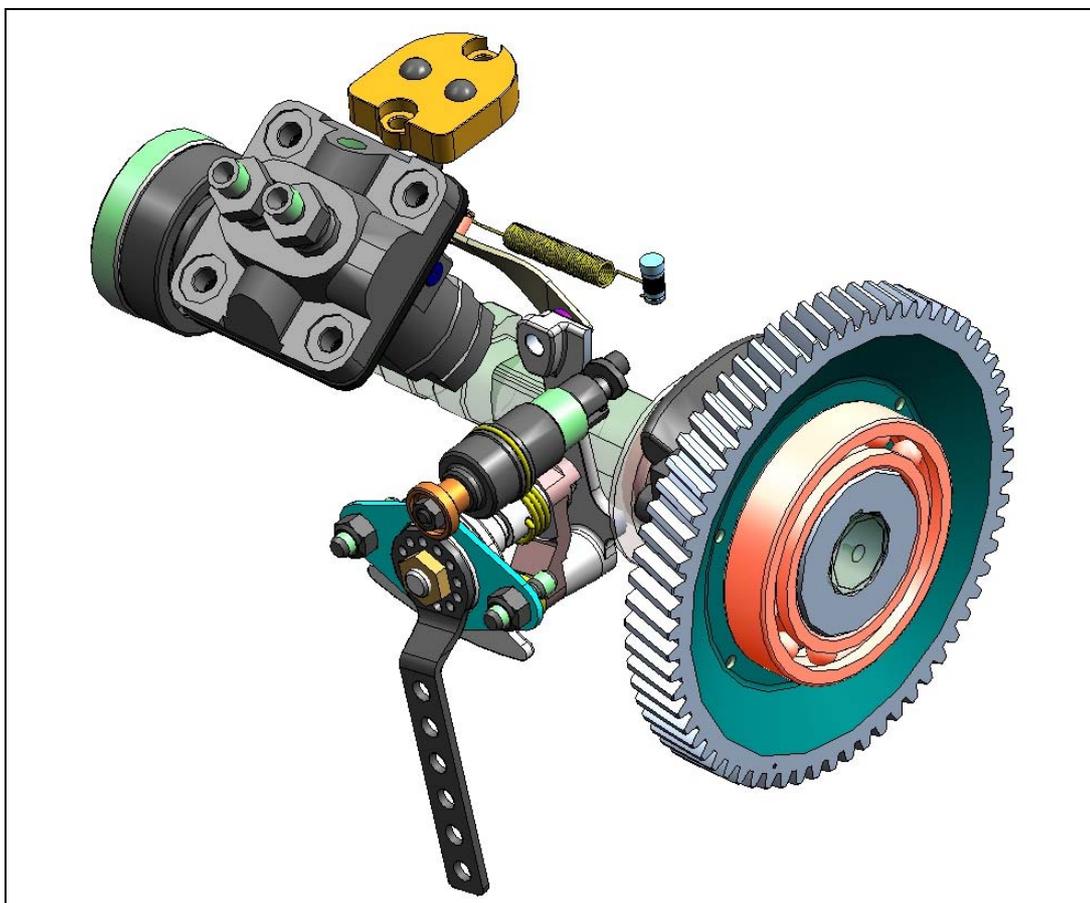
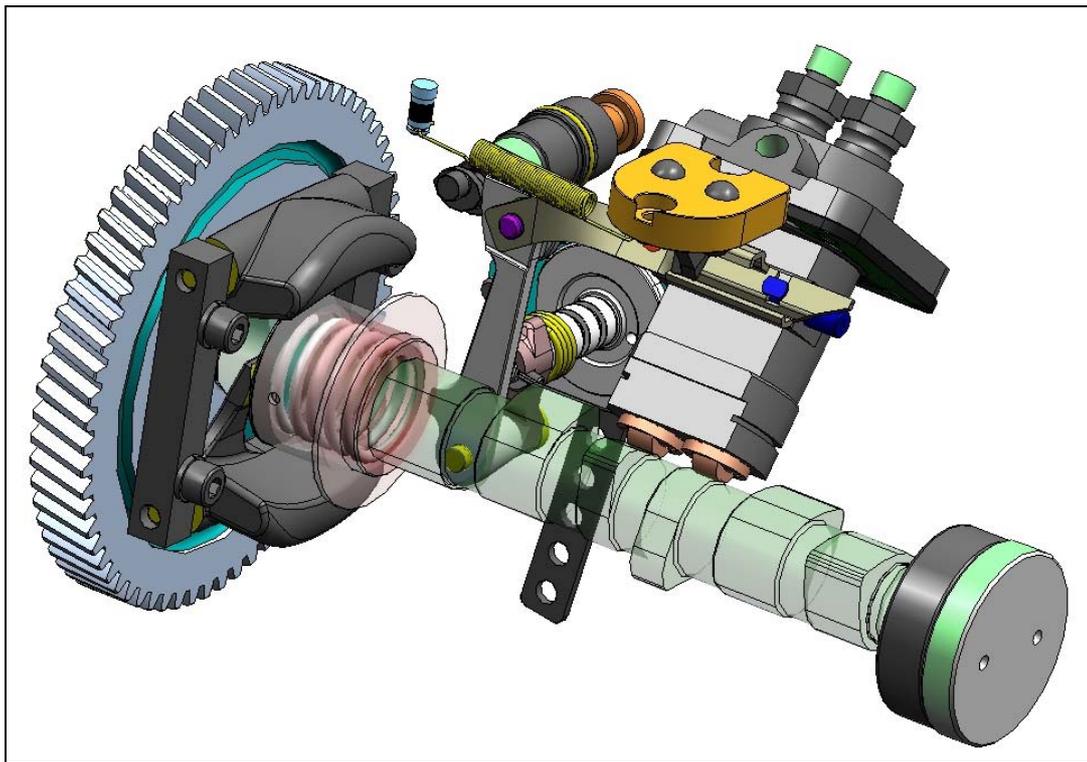
PEZZANO Pezzano. e KLEIN, Alberto. **“Construccion de los Motores Térmicos”**. Segunda Parte 1^a Edição. El Atenero Editorial. Buenos Aires 1960.

RIGOTTI, Marcos R. **“Efeito da Geometria dos Tuchos na Capacidade de Enchimento do Cilindro de um Motor Diesel”**. Dissertação de mestrado da UFRGS/PROMECS. Porto Alegre 2004.

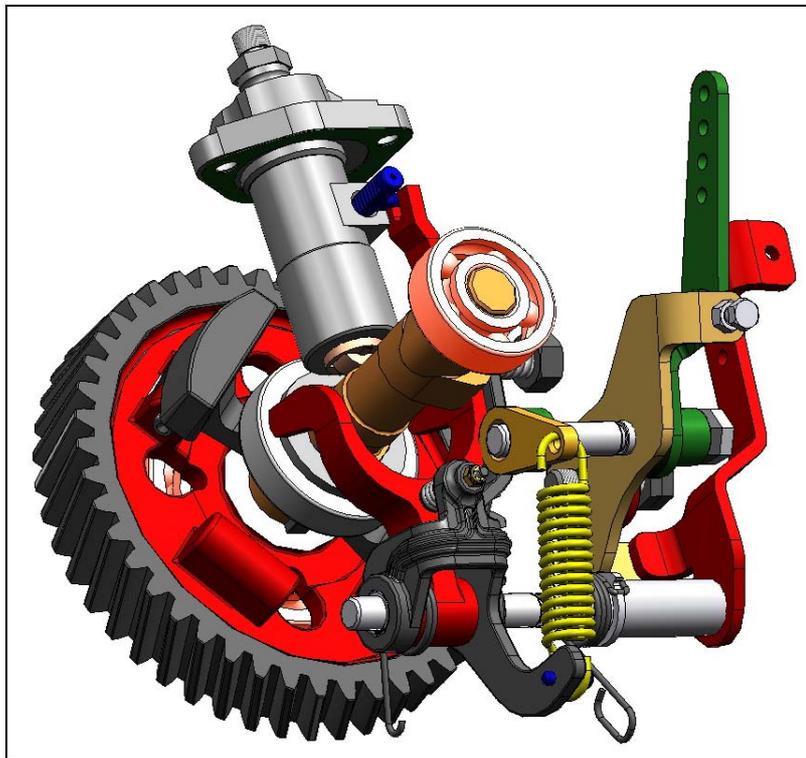
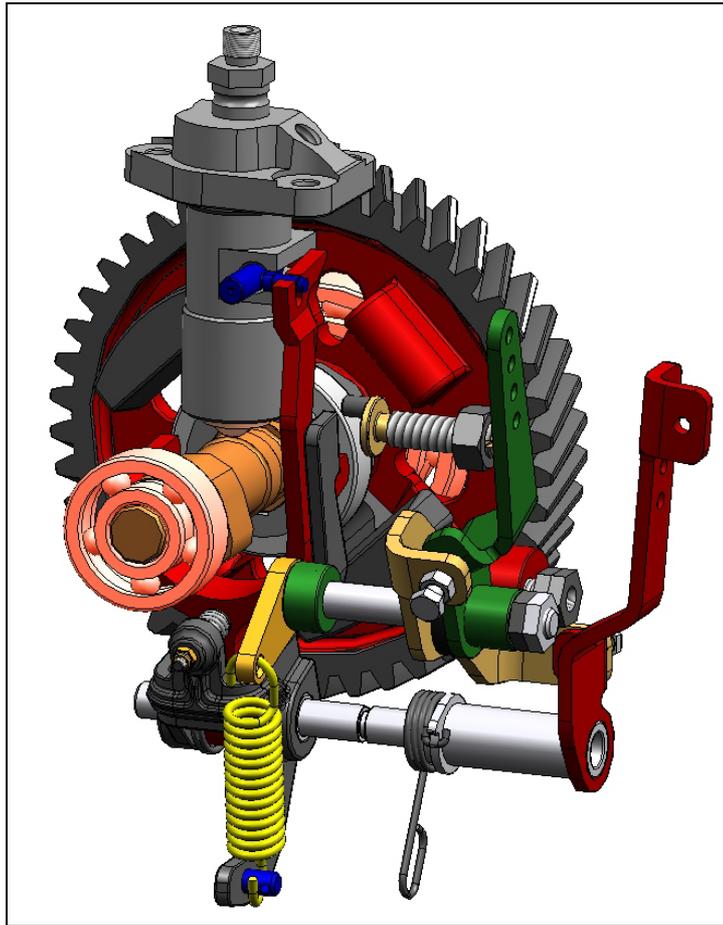
ANEXOS



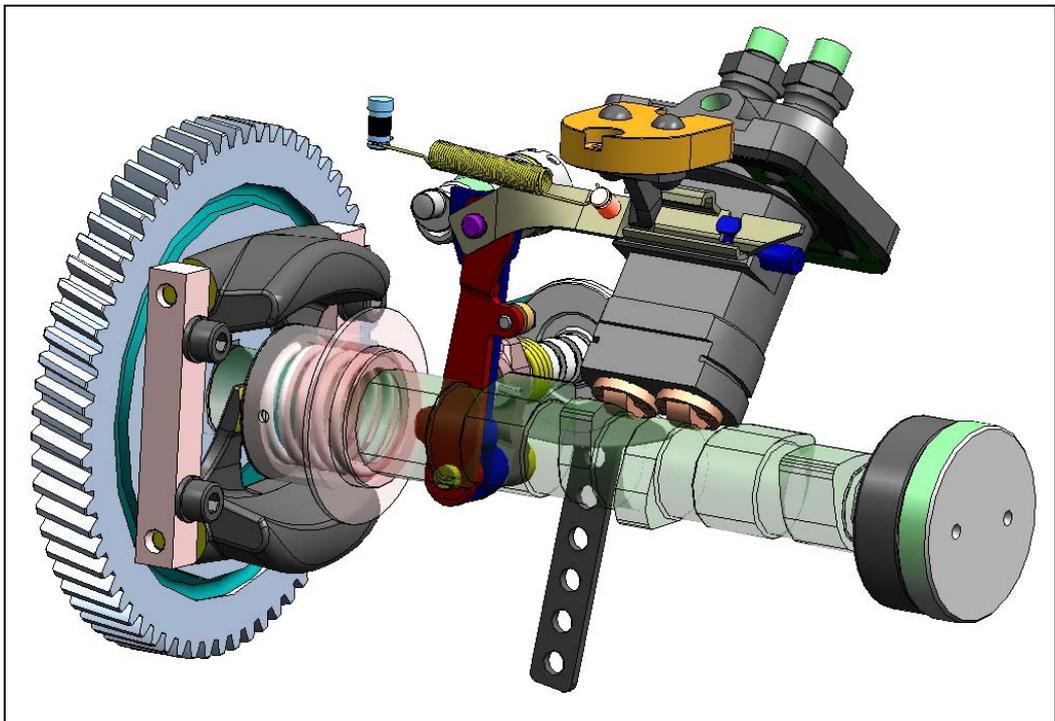
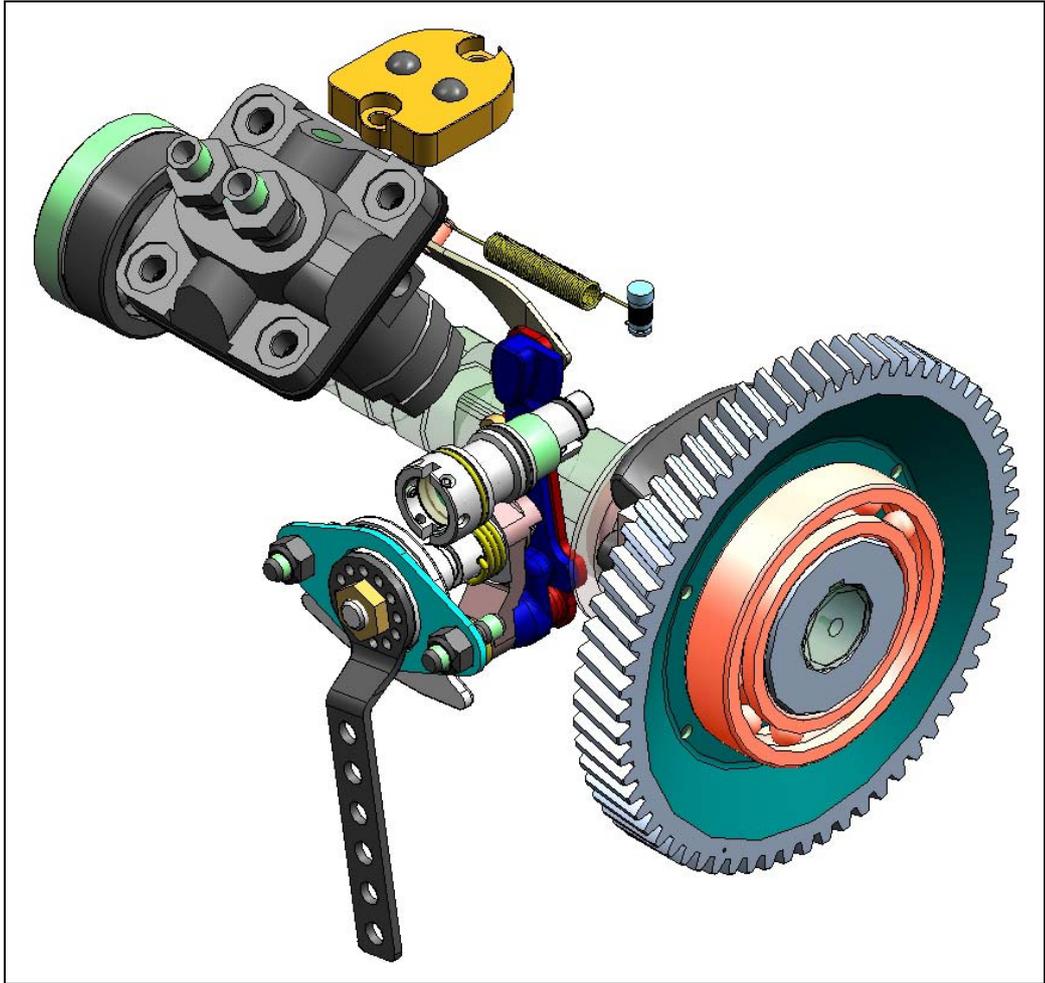
ANEXO I – MODELAGEM DO REGULADOR ATUAL DO MOTOR MONOCILÍNDRICO



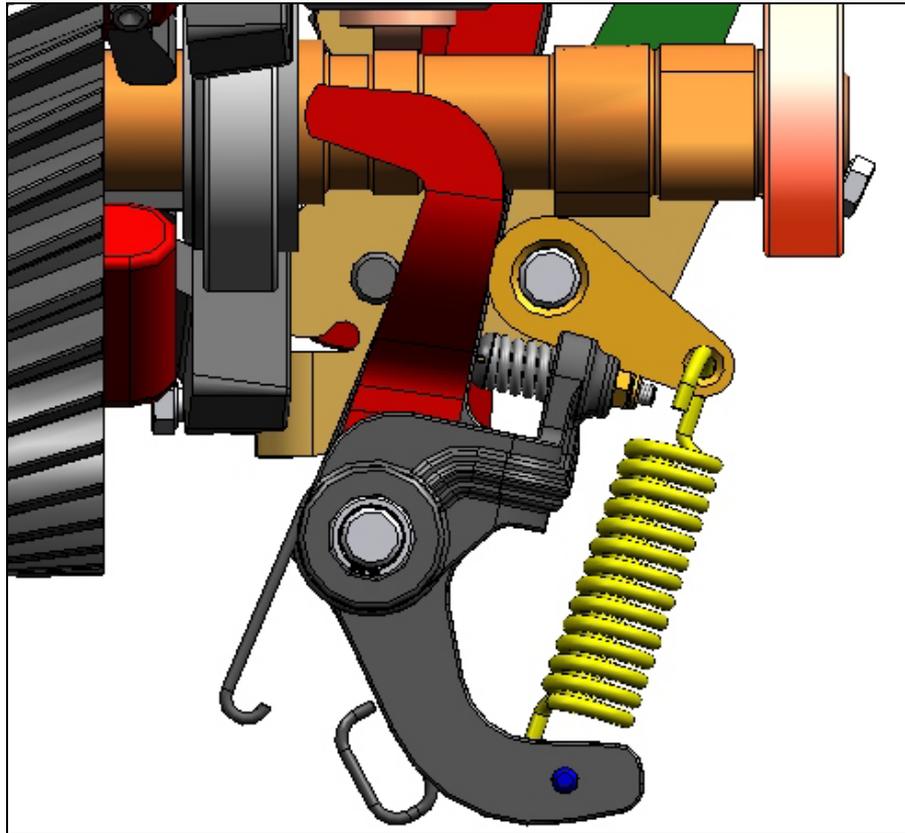
ANEXO II – MODELAGEM DO REGULADOR ATUAL DO MOTOR BICILÍNDRICO



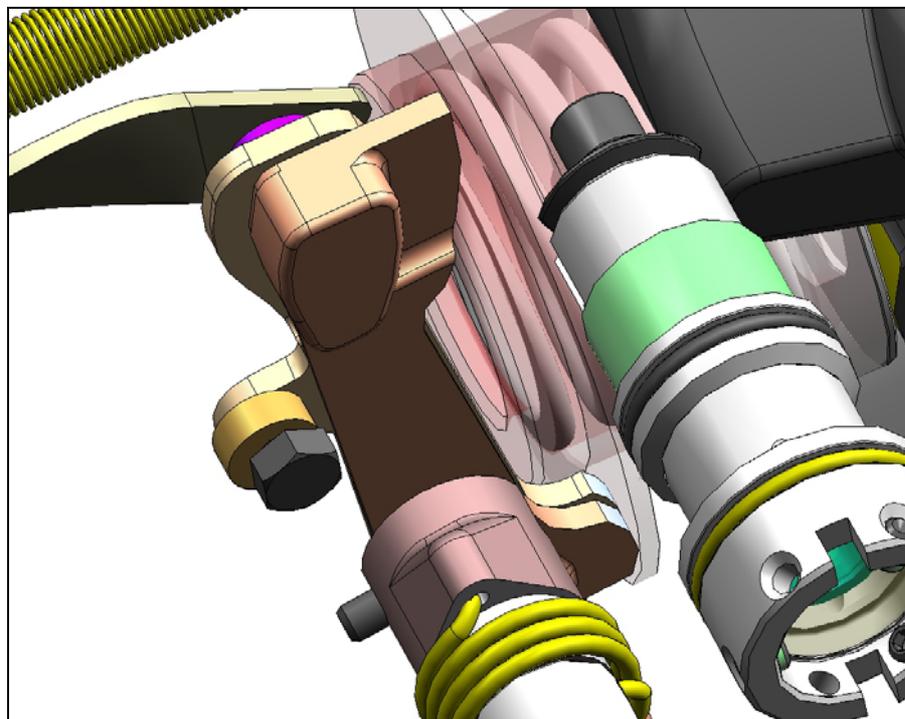
ANEXO III – MODELAGEM DO REGULADOR COM NOVAS FUNÇÕES PARA O MOTOR MONOCILINDRICO



ANEXO IV – MODELAGEM DO REGULADOR COM CORRETOR DE TORQUE PARA O MOTOR BICILÍNDRICO



ANEXO V – DETALHE DA MOLA APROXIMAÇÃO REGULADOR COM CORRETOR DE TORQUE PARA O MOTOR MONOCILÍNDRICO



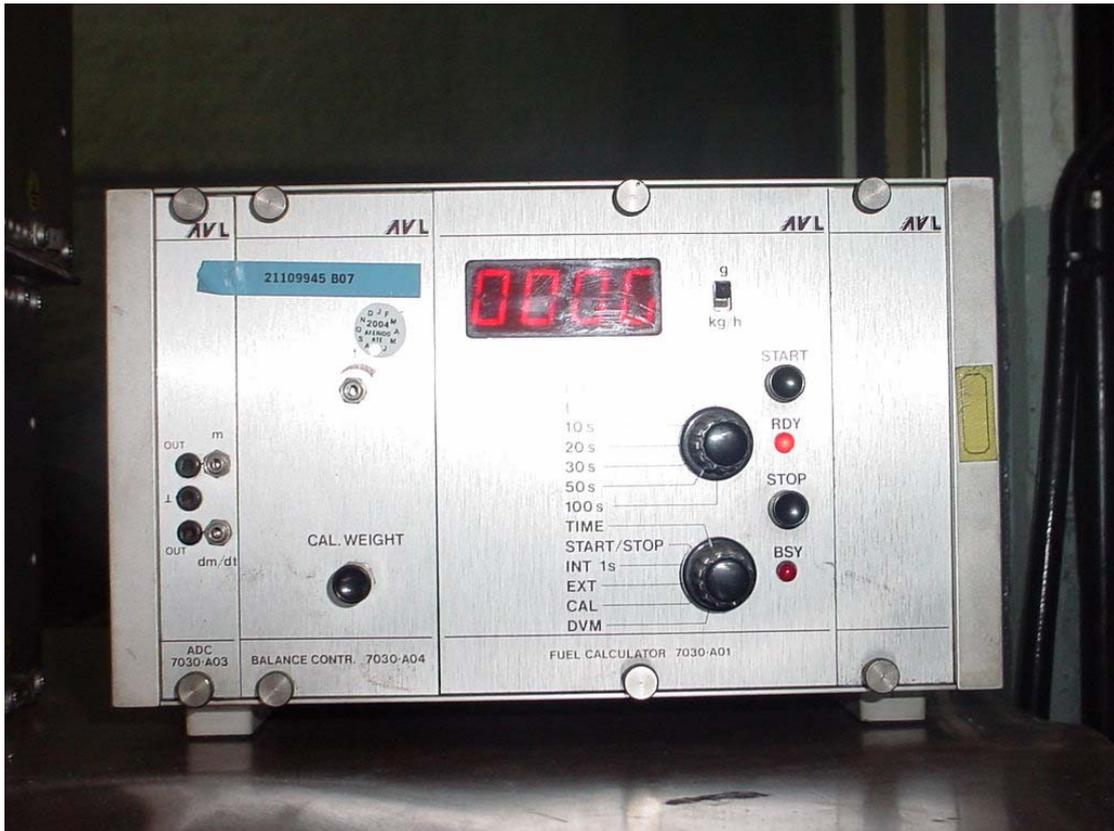
ANEXO VI – DETALHE EXCÊNTRICO DE REGULAGEM DO CURSO DE APROXIMAÇÃO, REGULADOR COM CORRETOR DE TORQUE PARA O MOTOR BICILÍNDRICO



ANEXO VII – DINAMÔMETRO DE BANCADA



ANEXO VIII – LEITOR DE BLOW BY AVL (ACIMA) E LEITOR DE ÍNDICE DE FUMAÇA BOSCH (ABAIXO)



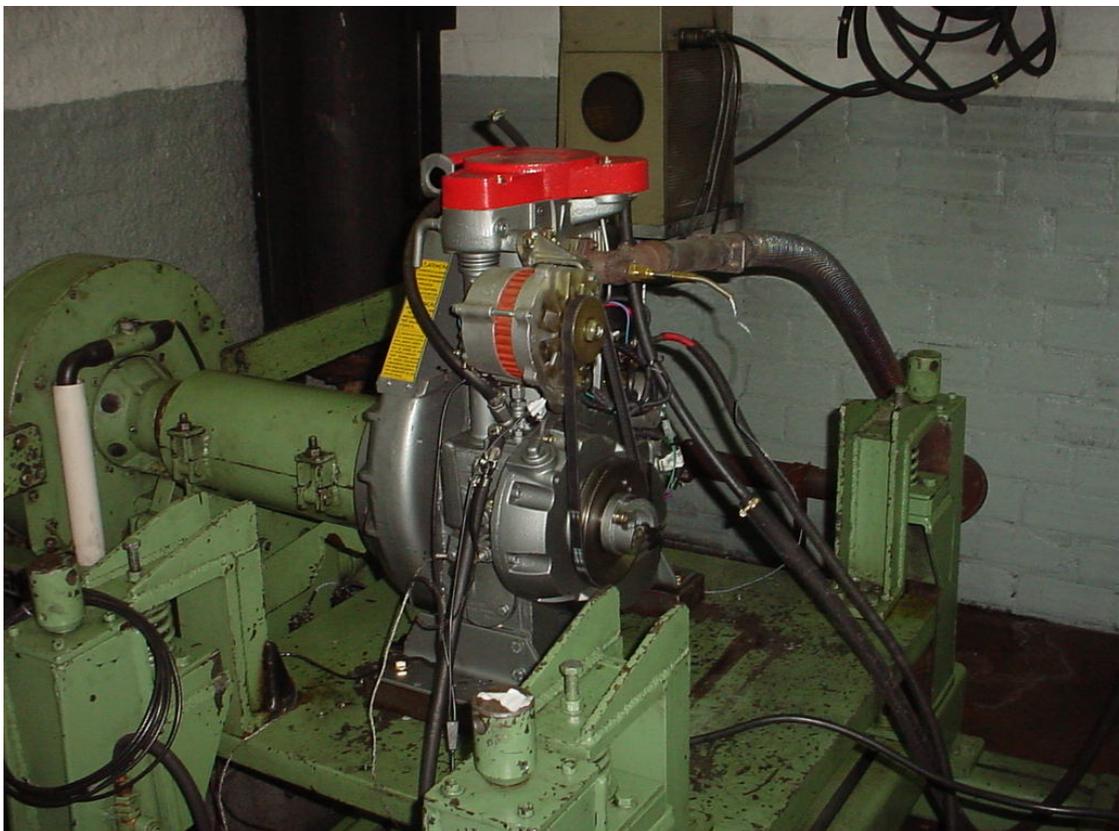
ANEXO IX – LEITOR DE CONSUMO (G/S) DE COMBUSTÍVEL AVL



ANEXO X – MEDIDOR DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL (G/S) AVL



ANEXO XI – MEDIDOR DO ÍNDICE DE FUMAÇA COM REGISTRADOR EM PAPELO (OPACÍMETRO)



ANEXO XII – MOTOR MONOCILÍNDRICO, MODELO M93, NO DINAMÔMETRO

1. REGULADOR DE ROTAÇÃO VARIÁVEL BOSCH

O regulador variável da Bosch regula todas as rotações entre partida e rotação máxima. Além da rotação da marcha lenta e da rotação nominal, o regulador variável pode regular também as faixas intermediárias. Através do pedal é possível ajustar qualquer rotação e, dependendo do grau “P”, pode ser mantida mais ou menos constante, figura 1.1.

Isto é necessário, por exemplo, quando conjuntos secundários (guincho, bomba de hidrante, guindaste etc.) forem acionados no veículo utilitário ou pelo motor estacionário. Mas ele também é muito empregado em veículos utilitários e agrícolas (tratores, colheitadeiras).

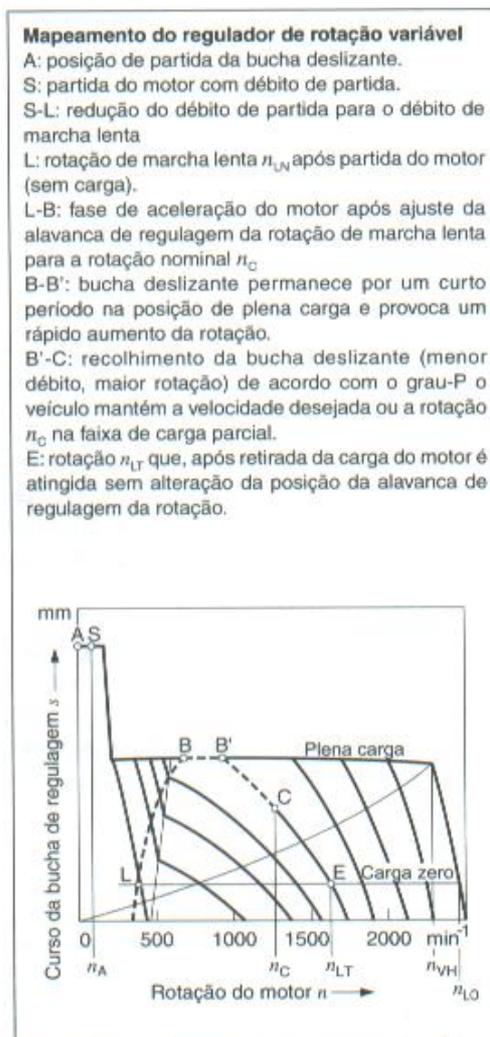


FIGURA 1.1 – MAPEAMENTO DO REGULADOR DE ROTAÇÃO VARIÁVEL.

1.1. CONCEPÇÃO

O CONJUNTO DE REGULAGEM, COMPOSTO PELA CARCAÇA DOS CONTRAPESOS E PELOS CONTRAPESOS, É ACIONADO PELO EIXO DE ACIONAMENTO. O GRUPO DO REGULADOR É DISPOSTO AO REDOR DO EIXO DO REGULADOR FIXADO NA CARCAÇA DA BOMBA. ATRAVÉS DOS CONTRAPESOS, OS CURSOS RADIAIS DOS CONTRAPESOS SÃO TRANSFORMADOS EM MOVIMENTOS AXIAIS DA LUVAS DE REGULAGEM, FIGURA 1.2. A FORÇA E O MOVIMENTO DA LUVAS DE REGULAGEM ATUAM SOBRE A POSIÇÃO DO CONJUNTO DE ALAVANCAS QUE É FORMADA POR AQUELA DE CORREÇÃO (NÃO ILUSTRADA), PELA ALAVANCA DE TENSÃO E ALAVANCA DE PARTIDA. A POSIÇÃO DO CONJUNTO DE ALAVANCAS É DEFINIDA PELA ATUAÇÃO CONJUNTA DE FORÇAS DA MOLA E FORÇA DA LUVAS. O MOVIMENTO DE AJUSTE É TRANSMITIDO PARA A BUCHA DESLIZANTE, O QUE DETERMINA O VOLUME DE DÉBITO.

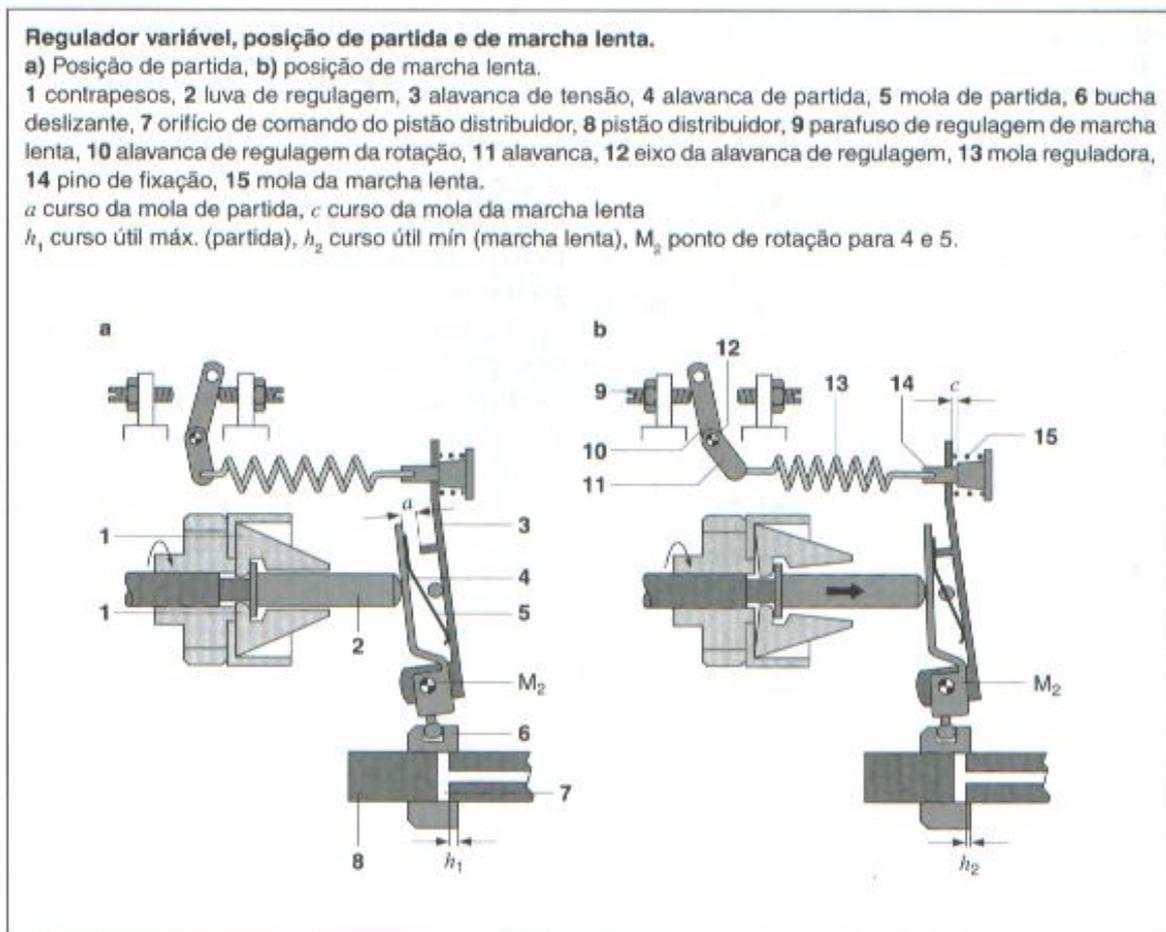


FIGURA 1.2 – REGULADOR VARIÁVEL POSIÇÃO DE PARTIDA E DE MARCHA LENTA.

1.2. COMPORTAMENTO DE PARTIDA

COM A BOMBA TIPO DISTRIBUIDORA ROTATIVA, POR EXEMPLO, COM OS CONTRAPESOS DESATIVADOS E A LUYA DE REGULAGEM ENCONTRA-SE NA POSIÇÃO DE SAÍDA, FIGURA 1.2A. A ALAVANCA DE PARTIDA É PRESSIONADA PARA A POSIÇÃO DE PARTIDA PELA RESPECTIVA MOLA. COM ISTO A ALAVANCA DE PARTIDA GIRA EM TORNO DO SEU EIXO $M2$. AO MESMO TEMPO, A BUCHA DESLIZANTE NO PISTÃO DISTRIBUIDOR É DESLOCADA PARA A POSIÇÃO DE VOLUME DE PARTIDA ATRAVÉS DO PINO DE CABEÇA ESFÉRICA DA ALAVANCA DE PARTIDA. DISSO RESULTA QUE O ÊMBOLO DISTRIBUIDOR DEVE TRANSPOR UM GRANDE CURSO ÚTIL (VOLUME DE DÉBITO MÁXIMO CORRESPONDENTE AO VOLUME DE PARTIDA) ATÉ A REGULAGEM. NA PARTIDA, TEM-SE ASSIM O VOLUME DE PARTIDA.

A alavanca de regulagem está disposta de modo giratório dentro da carcaça da bomba e pode ser deslocada através do parafuso de regulagem do volume de débito (não ilustrado na figura 1.2). A alavanca de partida e a de tensão também estão dispostas de modo giratório na alavanca de regulagem.

A alavanca de partida possui um pino de cabeça esférica na parte inferior, que entra na bucha deslizante contra o qual está fixada a mola de partida na sua parte superior. Na parte da alavanca de tensão encontra-se a mola da marcha lenta em um pino de fixação.

Além disso, a mola reguladora está enganchada no pino de fixação. Uma alavanca e o eixo da alavanca de regulagem formam a ligação com a alavanca de regulagem da rotação

UMA PEQUENA ROTAÇÃO JÁ É SUFICIENTE PARA DESLOCAR A LUYA DE REGULAGEM CONTRA A FRACA MOLA DE PARTIDA. A ALAVANCA DE PARTIDA GIRA NOVAMENTE EM TORNO DO SEU EIXO $M2$ E O VOLUME DE PARTIDA É REDUZIDO AUTOMATICAMENTE PARA O VOLUME DE MARCHA LENTA.

1.3. Regulagem da marcha lenta

APÓS A PARTIDA DO MOTOR DIESEL E AO SE SOLTAR O PEDAL DO ACELERADOR, A ALAVANCA DE REGULAGEM DA ROTAÇÃO VAI PARA A POSIÇÃO DE MARCHA LENTA, FIGURA 1.2B, ATÉ O LIMITE DO SEU PARAFUSO DE REGULAGEM.

A ROTAÇÃO DA MARCHA LENTA É SELECIONADA DE MODO QUE O MOTOR SEM CARGA OU PEQUENA CARGA, FUNCIONE SEGURAMENTE SEM RUÍDOS. A REGULAGEM É ASSUMIDA PELA MOLA DE MARCHA LENTA DISPOSTA SOBRE O PINO DE FIXAÇÃO. ELA MANTÉM O EQUILÍBRIO EM RELAÇÃO À FORÇA PRODUZIDA PELOS CONTRAPESOS.

Essa compensação de forças determina a posição da bucha deslizante para o aumento do controle do êmbolo distribuidor é, portanto, do curso útil. Em rotações acima da faixa da marcha lenta, o curso da mola c é vencido e a mola da marcha lenta permanece comprimida.

Através da mola de marcha lenta “fixa na carcaça” (LFG), a marcha lenta pode ser ajustada independente da posição do pedal do acelerador e ocasionalmente acelerada em função da temperatura ou carga.

1.4. Regime de carga

Em operação a alavanca de regulagem assume uma determinada posição na área de giro, de acordo com a rotação ou velocidade desejada. Essa posição é determinada pelo motorista, pela respectiva posição do pedal do acelerador.

Em rotações acima da faixa da marcha lenta a mola de partida e a mola da marcha lenta, não recebem pressão. Elas não influem sobre a regulagem. A regulagem é feita pela mola reguladora, figura 1.3.

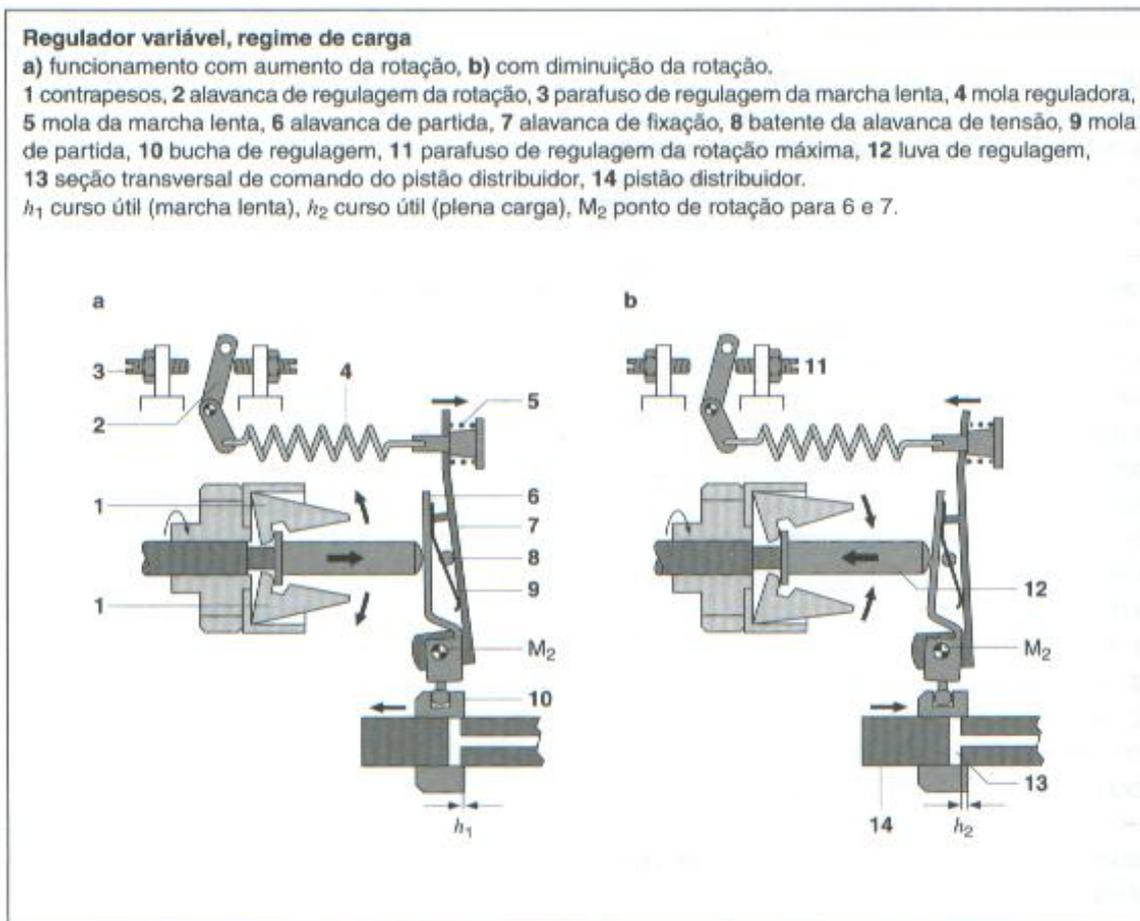


FIGURA 1.3 – REGULADOR VARIÁVEL EM REGIME DE CARGA.

Através do pedal do acelerador o condutor leva a alavanca de regulação da rotação para uma determinada posição, que deve corresponder a uma velocidade desejada (maior). Em consequência desse movimento de regulação a mola reguladora é tencionada em um determinado valor. Isto torna o efeito da força da mola de regulação maior que aquela da força centrífuga.

Alavanca de partida e alavanca de tensão obedecem à força da mola girando em torno do eixo M_2 , deslocando a bucha de regulação em sentido “plena carga” em função da relação de transmissão devido à concepção da sua construção. O volume de débito aumenta e provoca um aumento da rotação. Os contrapesos acumulam forças maiores que, através da luva de regulação, atuam contra a força da mola.

A bucha de regulagem permanece em “plena carga” até que se estabeleça um equilíbrio de momento. Se a rotação do motor continua subindo, os contrapesos se deslocam para fora; a força da luva de regulagem prepondera.

Conseqüentemente as alavancas de partida e de tensão giram em torno do seu eixo comum M_2 e empurram a bucha de regulagem em sentido de fim de débito, de modo que a seção transversal do gás de escape seja liberada antes.

O volume de débito pode ser reduzido até o “débito nulo”, o que assegura a limitação da rotação. Cada posição da alavanca de regulagem da rotação é, portanto, atribuída a uma faixa de rotação específica entre plena carga e carga nula, enquanto o motor não sofrer sobrecarga. Em função disso o regulador de rotação mantém a rotação nominal ajustada no âmbito do seu grau “ P ”, ver figura 1.1.

Se o aumento da carga, por exemplo, for tão grande, que a bucha de regulagem se encontre na posição de plena carga, mesmo que a rotação caia, o volume de combustível não pode mais ser aumentado. O motor está sobrecarregado e neste caso o condutor deverá reduzir para uma marcha inferior.

1.5. Regime de freio motor

No percurso de descida de montanhas (operação em freio motor) o veículo é o propulsor e acelerador do motor. Assim sendo a luva de regulagem pressiona a alavanca de partida e de tensão.

Ambas as alavancas modificam sua posição e deslocam a bucha de regulagem em sentido de menor débito até que na nova condição de carga, tenha se estabelecido um volume de débito respectivamente menor, que no caso limite, é zero.

O comportamento descrito do regulador variável vale basicamente para todas as posições da alavanca de regulagem da rotação, quando a carga ou a rotação, por alguma razão, se modificam tão intensamente, que a bucha de regulagem encosta totalmente na sua posição limite plena ou débito nulo.

2. REGULADOR DE MARCHA LENTA E ROTAÇÃO MÁXIMA

O regulador de marcha lenta e rotação máxima regula apenas essas duas rotações. A faixa intermediária é diretamente influenciada pelo pedal do acelerador,

figura 2.1.

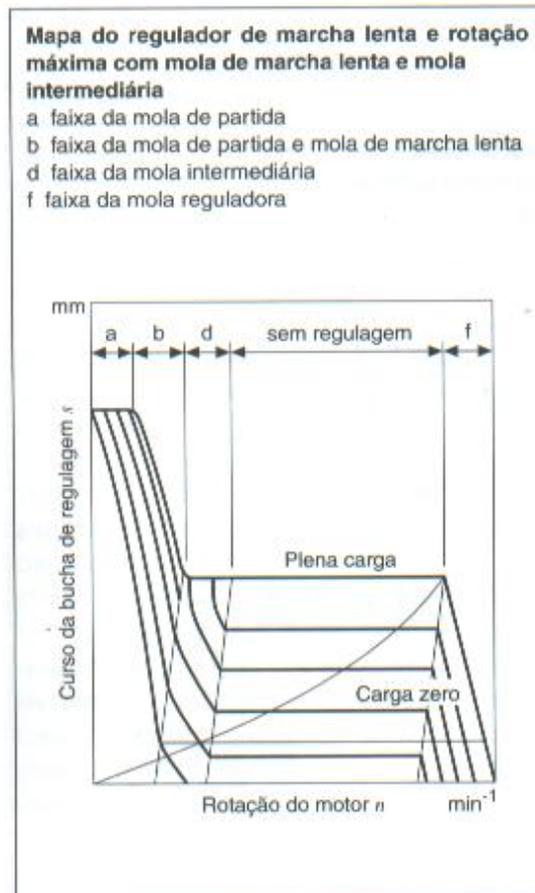


FIGURA 2.1 – MAPA DO REGULADOR DE MARCHA LENTA E ROTAÇÃO MÁXIMA COM MOLA DE MARCHA LENTA E MOLA INTERMEDIÁRIA.

2.1. Estrutura

O GRUPO DO REGULADOR COM OS CONTRAPESOS E A DISPOSIÇÃO DAS ALAVANCAS DE REGULAGEM SÃO COMPARÁVEIS AO REGULADOR DE ROTAÇÃO VARIÁVEL, JÁ DESCRITO. A ESTRUTURA DO REGULADOR DE MARCHA LENTA E ROTAÇÃO MÁXIMA DISTINGUE-SE PELA MOLA DE REGULAGEM E SUA INSTALAÇÃO.

ELA É EXECUTADA COMO UMA MOLA DE COMPRESSÃO E ACONDICIONADA EM UM ELEMENTO GUIA. A LIGAÇÃO ENTRE ALAVANCA DE FIXAÇÃO E MOLA REGULADORA É REALIZADA PELO PINO DE FIXAÇÃO.

2.2. Comportamento de partida

A LUVAS DE REGULAGEM ENCONTRA-SE NA POSIÇÃO INICIAL, PORQUE OS CONTRAPESOS ESTÃO EM REPOUSO. ASSIM, A MOLA DE PARTIDA PODE PRESSIONAR OS CONTRAPESOS PARA A PARTE INTERNA ATRAVÉS DA ALAVANCA DE PARTIDA E DA LUVAS DE REGULAGEM. A BUCHA DE REGULAGEM NO ÊMBOLO DISTRIBUIDOR ENCONTRA-SE NA POSIÇÃO DE DÉBITO DE PARTIDA.

2.3. Regulagem da marcha lenta

Após a partida do motor e alívio do pedal do acelerador, a alavanca de regulagem da rotação vai para a posição de marcha lenta em função da atuação da mola de retorno. Com o aumento da rotação, aumenta a força centrífuga dos contrapesos, figura 2.2a, cuja haste interna pressiona a bucha de regulagem contra a alavanca de partida.

A regulagem é feita pela mola de marcha lenta disposta sobre a alavanca de partida, a bucha de regulagem é deslocada em sentido “menor volume de débito”. A posição da bucha de regulagem é determinada pela atuação conjunta de força centrífuga e força da mola.

2.4. Regime de carga

Quando o condutor aciona o pedal do acelerador, a alavanca de regulagem da rotação gira em um determinado valor. A área de atuação da mola de partida e da mola da marcha lenta foi cancelada e a mola intermediária entra em ação. Com a mola intermediária se obtém no regulador de marcha lenta e rotação máxima, uma passagem mais “suave” para a faixa sem regulagem.

Se a alavanca de regulagem continuar sendo movida em sentido plena carga, o curso da mola intermediária será atravessado até que o colar do pino se apóie na alavanca de tensão, figura 2.2b. A área de atuação da mola intermediária está cancelada e a faixa não regulada, passa a ser ativa.

A faixa não regulada resulta da tensão prévia da mola reguladora. Nessa faixa de rotação ela pode ser considerada rígida. O deslocamento da alavanca de regulagem da rotação (ou acelerador) pelo condutor, pode agora ser transmitido diretamente para a bucha de regulagem, através do mecanismo do regulador.

Assim, o volume de débito é influenciado diretamente pelo pedal do acelerador. Se o condutor deseja aumentar a velocidade ou deve empreender uma subida (active), então ele precisa “acelerar”. Desejando menor potência do motor, deve-se “desacelerar” (aliviar o pé no acelerador).

Regulador variável, regime de carga

a) funcionamento com aumento da rotação, b) com diminuição da rotação.

1 contrapesos, 2 alavanca de regulação da rotação, 3 parafuso de regulação da marcha lenta, 4 mola reguladora, 5 mola da marcha lenta, 6 alavanca de partida, 7 alavanca de fixação, 8 batente da alavanca de tensão, 9 mola de partida, 10 bucha de regulação, 11 parafuso de regulação da rotação máxima, 12 luva de regulação, 13 seção transversal de comando do pistão distribuidor, 14 pistão distribuidor.

h_1 curso útil (marcha lenta), h_2 curso útil (plena carga), M_2 ponto de rotação para 6 e 7.

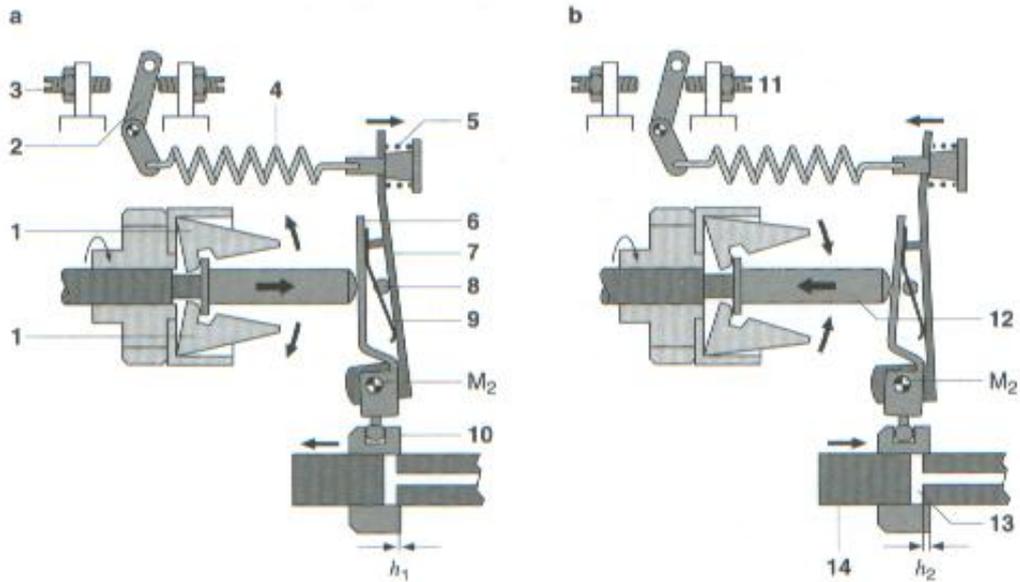


FIGURA 2.2 - MAPA DO REGULADOR DE MARCHA LENTA E ROTAÇÃO MÁXIMA COM MOLA DE MARCHA LENTA E MOLA INTERMEDIÁRIA.

HAVENDO UM ALÍVIO DO MOTOR, SOMENTE EM CASO DE POSIÇÃO INVARIÁVEL DA ALAVANCA DE REGULAGEM DA ROTAÇÃO, COM VOLUME CONSTANTE, A ROTAÇÃO AUMENTA.

A FORÇA CENTRÍFUGA AUMENTA, COM O QUE OS CONTRAPESOS PRESSIONAM A LUVA DE REGULAGEM COM MAIS FORÇA CONTRA ALAVANCA DE PARTIDA E DE TENSÃO. SOMENTE QUANDO A TENSÃO PRÉVIA DA MOLA REGULADORA TIVER SIDO SUPERADA PELO EFEITO DA FORÇA DA LUVA, O LIMITE DE REGULAGEM NA FAIXA DA ROTAÇÃO NOMINAL SE TORNARÁ ATIVO.

No alívio total do pedal do acelerador, o motor atinge a faixa superior da rotação de marcha lenta, estando assim protegido contra o excesso de aceleração. A maioria dos veículos de passeio são equipados com uma combinação de regulador variável de rotação e regulador de marcha lenta e rotação máxima (regulador de carga parcial).

ANEXO XIV

Tabela 1 - Ensaio dinamométrico do motor monocilíndrico arrefecido a água, sem mola de correção de torque, regulador atual.

| RPM | POTÊNCIA (kW) | TORQUE (dAN.M) | CONSUMO (G/kWH) |
|------|---------------|----------------|-----------------|
| 1800 | 7,40 | 3,93 | 253,74 |
| 1900 | 7,85 | 3,95 | 254,57 |
| 2000 | 8,39 | 4,01 | 255,30 |
| 2100 | 8,83 | 4,02 | 252,81 |
| 2200 | 9,30 | 4,04 | 252,72 |
| 2300 | 9,75 | 4,05 | 248,12 |
| 2400 | 10,17 | 4,05 | 246,71 |
| 2500 | 10,65 | 4,07 | 249,16 |
| 2600 | 11,24 | 4,13 | 250,52 |
| 2700 | 11,59 | 4,10 | 249,24 |
| 2800 | 11,99 | 4,09 | 248,83 |
| 2900 | 12,32 | 4,06 | 248,51 |
| 3000 | 12,59 | 4,01 | 248,39 |

Tabela 2 - Ensaio dinamométrico do motor monocilíndrico arrefecido a água, com mola de correção de torque, regulador proposto para o motor M93.

| RPM | POTÊNCIA (kW) | TORQUE (dAN.M) | CONSUMO (G/kWH) |
|------|---------------|----------------|-----------------|
| 1800 | 7,99 | 4,24 | 280,11 |
| 1900 | 8,48 | 4,26 | 280,29 |
| 2000 | 8,73 | 4,17 | 279,17 |
| 2100 | 9,19 | 4,18 | 271,45 |
| 2200 | 9,65 | 4,19 | 267,56 |
| 2300 | 10,14 | 4,21 | 260,70 |
| 2400 | 10,58 | 4,21 | 259,21 |
| 2500 | 10,99 | 4,20 | 256,39 |
| 2600 | 11,49 | 4,22 | 256,62 |
| 2700 | 11,87 | 4,20 | 253,46 |
| 2800 | 12,25 | 4,18 | 253,08 |
| 2900 | 12,38 | 4,08 | 252,66 |
| 3000 | 12,71 | 4,04 | 250,30 |

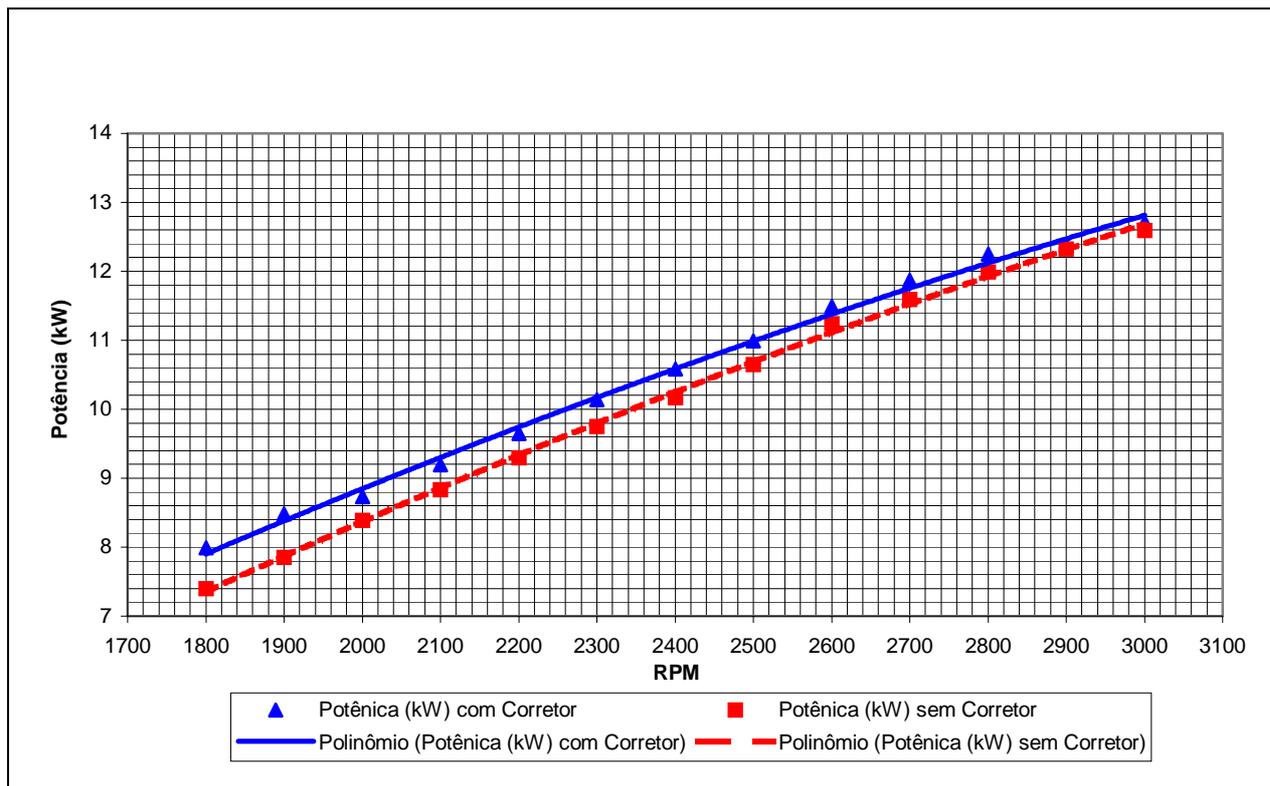


GRÁFICO 1 - ENSAIO DINAMOMÉTRICO DO MOTOR MONOCILÍNDRICO ARREFECIDO A ÁGUA, COM E SEM MOLA DE CORREÇÃO DE TORQUE, CURVA B, DADOS DAS TABELAS 1 E 2.

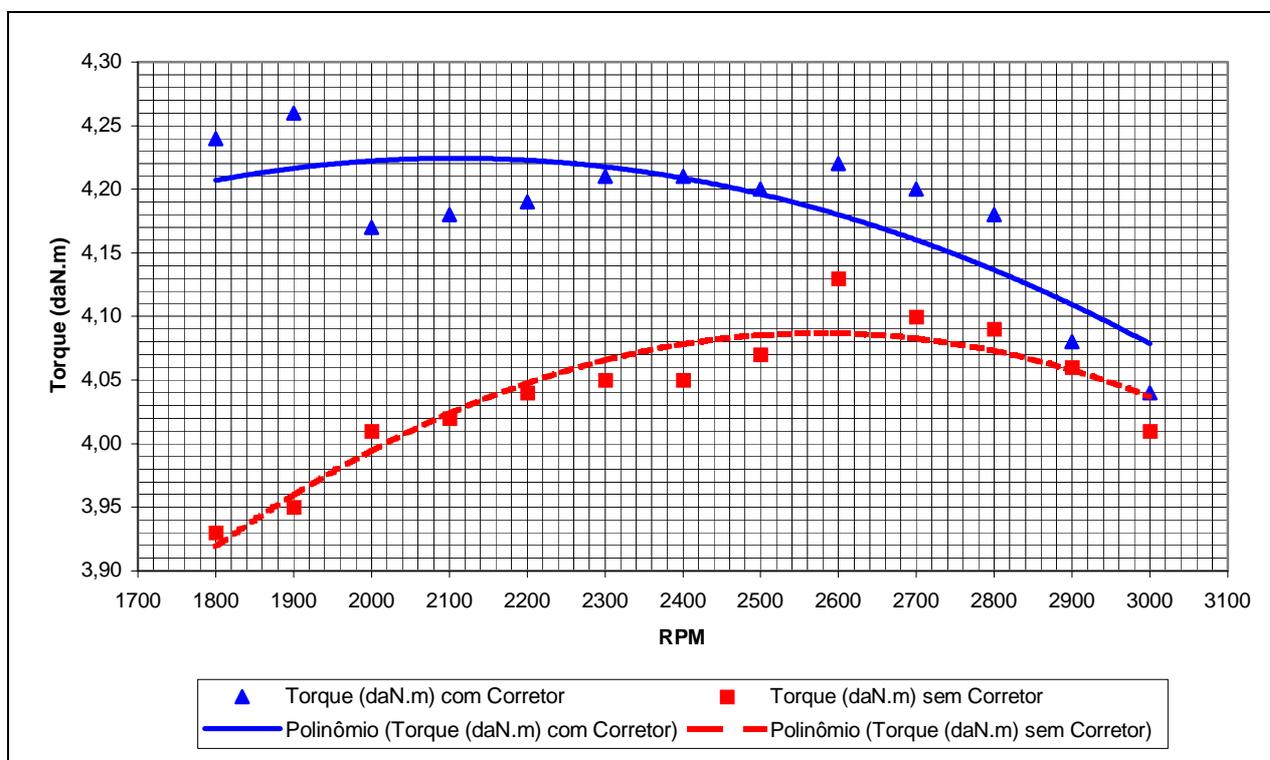


GRÁFICO 2 - ENSAIO DINAMOMÉTRICO DO MOTOR MONOCILÍNDRICO ARREFECIDO A ÁGUA, COM E SEM MOLA DE CORREÇÃO DE TORQUE, CURVA B, DADOS DAS TABELAS 1 E 2.

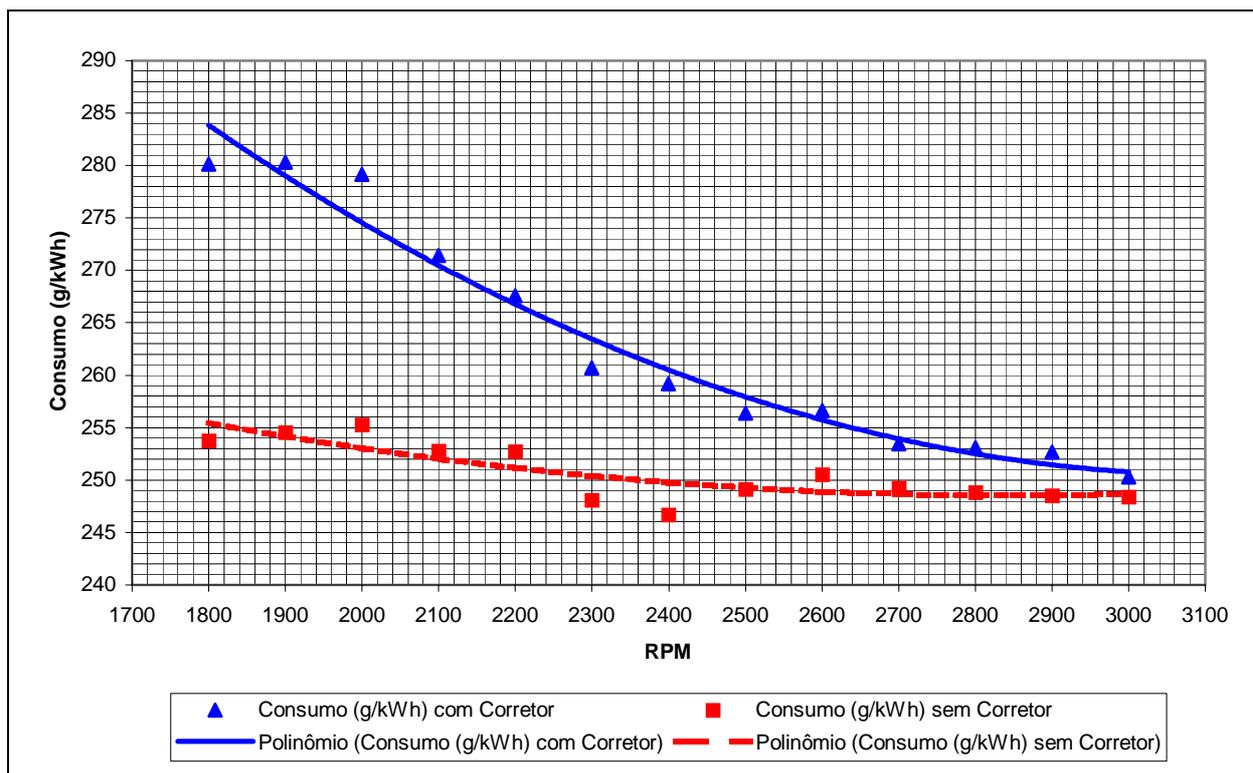


GRÁFICO 3 - ENSAIO DINAMOMÉTRICO DO MOTOR MONOCILÍNDRICO ARREFECIDO A ÁGUA, COM E SEM MOLA DE CORREÇÃO DE TORQUE, CURVA B, DADOS DAS TABELAS 1 E 2.

Tabela 3 - Ensaio dinâmico do motor monocilíndrico arrefecido a ar, sem mola de correção de torque, regulador atual Curva B.

| RPM | POTÊNICA (kW) | TORQUE (DAN.M) | CONSUMO (G/KWH) |
|------|---------------|----------------|-----------------|
| 1800 | 6,83 | 3,63 | 240,89 |
| 1900 | 7,13 | 3,58 | 245,34 |
| 2000 | 7,41 | 3,54 | 243,89 |
| 2100 | 7,71 | 3,51 | 247,71 |
| 2200 | 8,23 | 3,57 | 251,86 |
| 2300 | 8,34 | 3,46 | 255,47 |
| 2400 | 8,63 | 3,43 | 275,19 |
| 2500 | 6,67 | 3,39 | 257,14 |
| 2600 | 8,85 | 3,25 | 256,08 |
| 2700 | 8,67 | 3,07 | 261,25 |
| 2750 | 9,45 | 3,28 | 262,70 |
| 2800 | 8,90 | 3,04 | 261,69 |

TABELA 4 - ENSAIO DINAMOMÉTRICO DO MOTOR MONOCILÍNDRICO ARREFECIDO A AR, COM MOLA DE CORREÇÃO DE TORQUE, CURVA B

| RPM | POTÊNICA (kW) | TORQUE (DAN.M) | CONSUMO (G/KWH) |
|------|---------------|----------------|-----------------|
| 1800 | 6,53 | 3,47 | 240,70 |
| 1900 | 6,83 | 3,44 | 244,90 |

| | | | |
|------|------|------|--------|
| 2000 | 7,08 | 3,38 | 248,33 |
| 2100 | 7,44 | 3,38 | 249,03 |
| 2200 | 7,84 | 3,40 | 252,09 |
| 2300 | 8,07 | 3,35 | 253,57 |
| 2400 | 8,37 | 3,33 | 256,14 |
| 2500 | 6,75 | 3,34 | 257,55 |
| 2600 | 9,15 | 3,36 | 262,22 |
| 2700 | 8,73 | 3,09 | 261,95 |
| 2750 | 9,20 | 3,19 | 264,77 |
| 2800 | 9,36 | 3,19 | 267,43 |

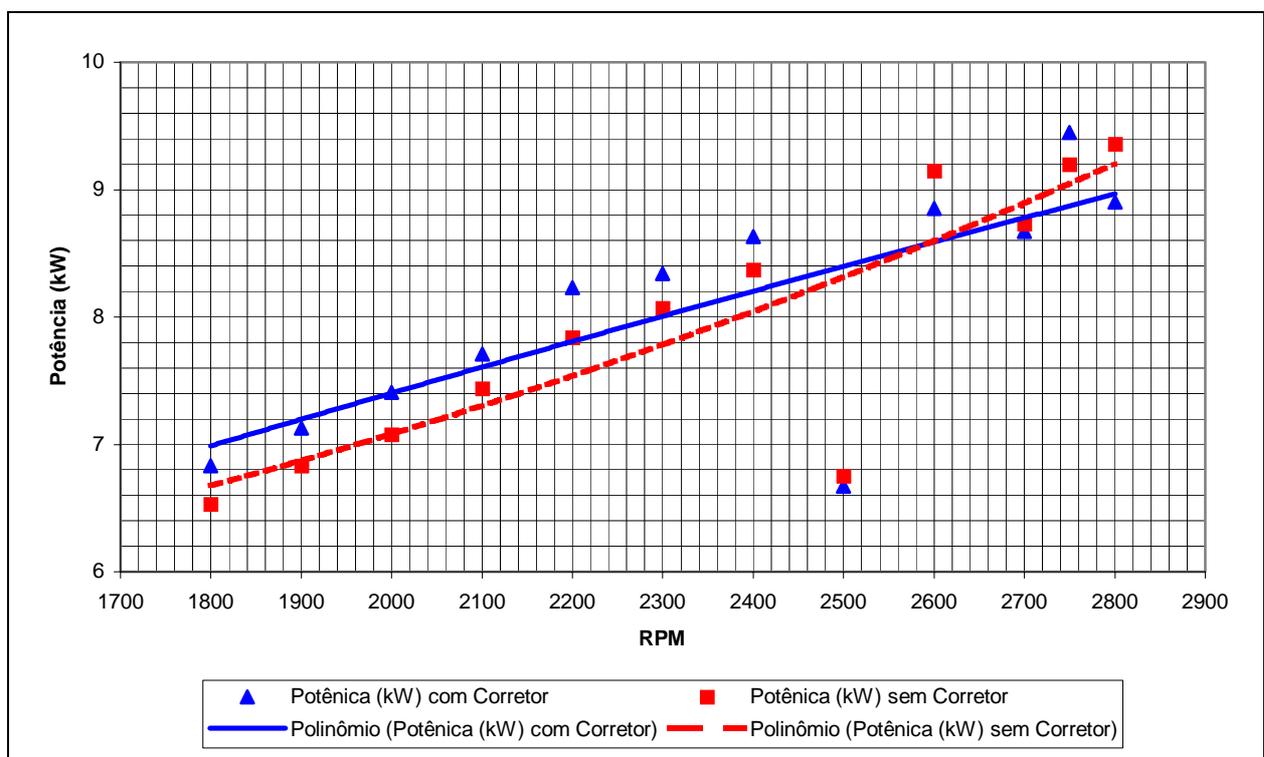


GRÁFICO 4 - ENSAIO DINAMOMÉTRICO DO MOTOR MONOCILÍNDRICO ARREFECIDO A AR, COM E SEM MOLA DE CORREÇÃO DE TORQUE, CURVA B, DADOS DAS TABELAS 3 E 4.

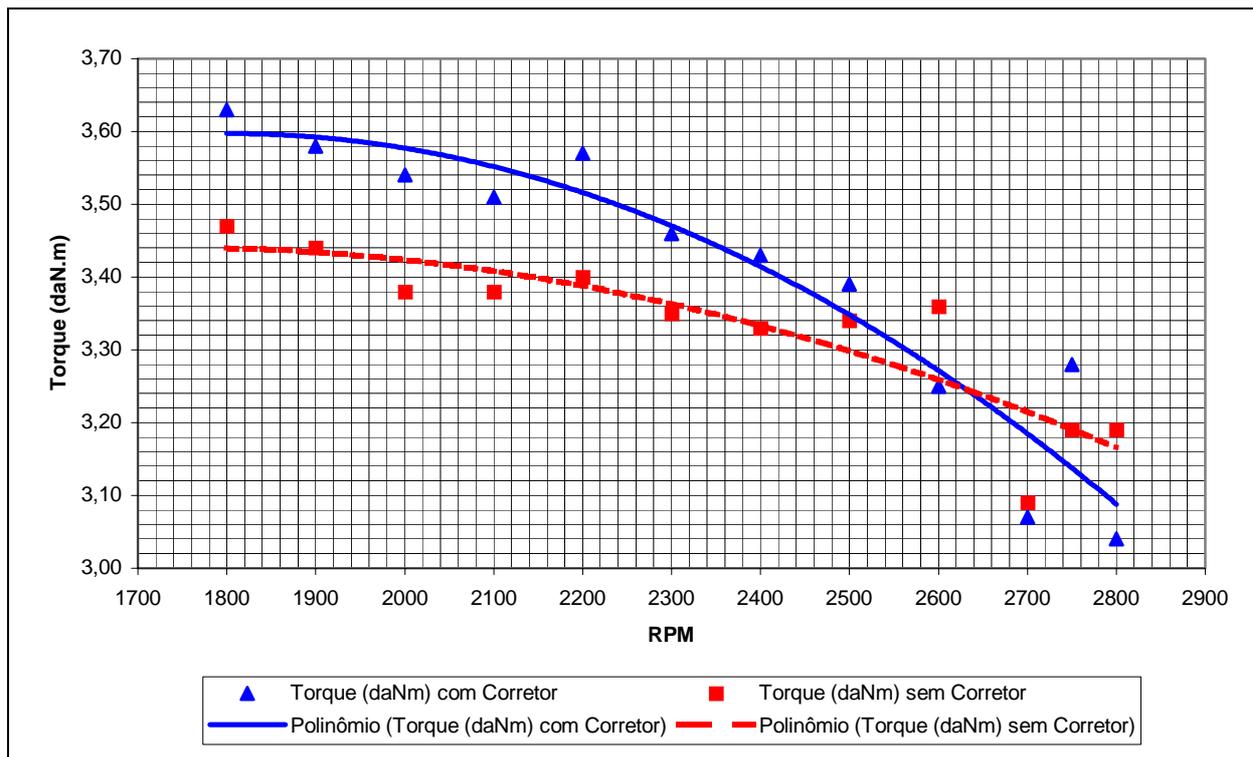


GRÁFICO 5 - ENSAIO DINAMOMÉTRICO DO MOTOR ARREFECIDO A AR, COM E SEM MOLA DE CORREÇÃO DE TORQUE CURVA B, DADOS DAS TABELAS 3 E 4.

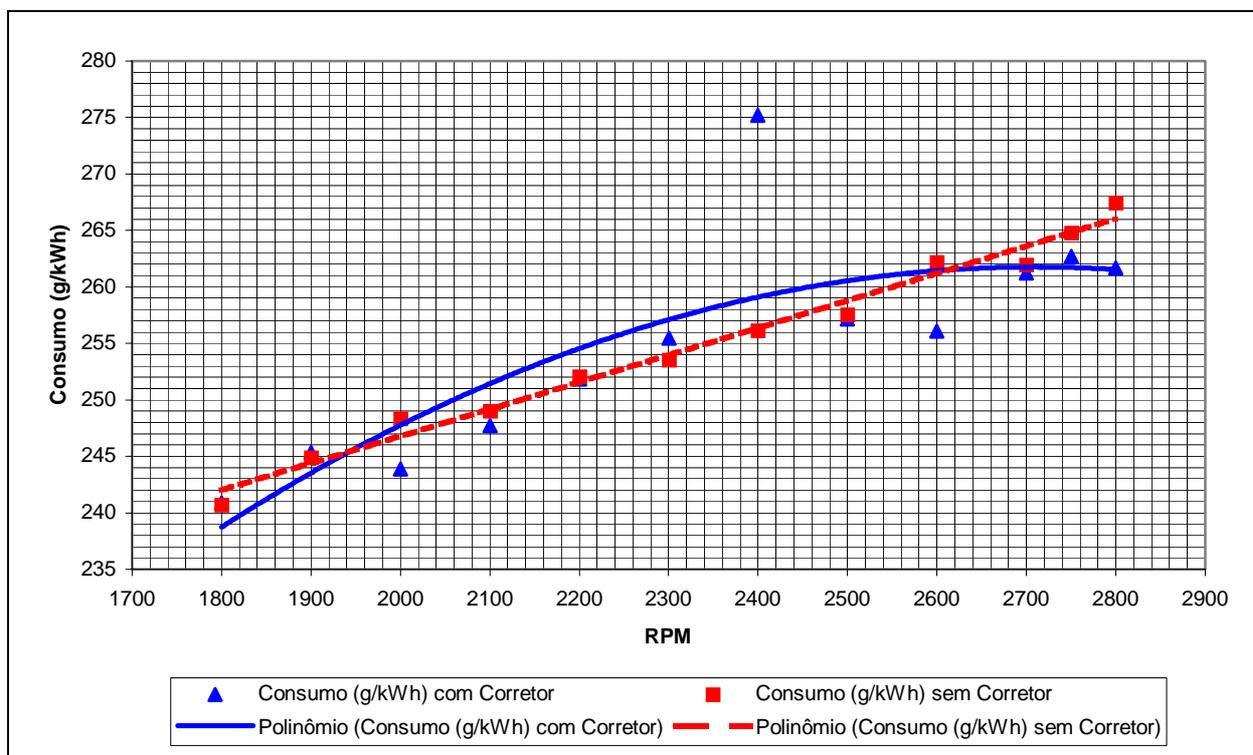


GRÁFICO 6 - ENSAIO DINAMOMÉTRICO DO MOTOR MONOCILÍNDRICO ARREFECIDO A AR, COM E SEM MOLA DE CORREÇÃO DE TORQUE, CURVA B, DADOS DAS TABELAS 3 E 4.

TABELA 5 - ENSAIO DINAMOMÉTRICO DO MOTOR MONOCILÍNDRICO ARREFECIDO A AR, SEM MOLA DE CORREÇÃO DE TORQUE, REGULADOR ATUAL, CURVA F.

| RPM | POTÊNICA (kW) | TORQUE (DAN.M) | CONSUMO (G/KWH) |
|------|---------------|----------------|-----------------|
| 1800 | 7,25 | 3,85 | 255,08 |
| 1900 | 7,72 | 3,88 | 254,92 |
| 2000 | 8,09 | 3,86 | 255,46 |
| 2100 | 8,43 | 3,83 | 257,60 |
| 2200 | 8,70 | 3,78 | 260,58 |
| 2300 | 8,93 | 3,71 | 261,68 |
| 2400 | 9,11 | 3,62 | 264,49 |
| 2500 | 9,35 | 3,57 | 266,97 |
| 2600 | 9,67 | 3,55 | 269,81 |
| 2700 | 10,05 | 3,55 | 269,85 |
| 2750 | 10,12 | 3,51 | 272,96 |
| 2800 | 10,21 | 3,48 | 274,98 |

TABELA 6- ENSAIO DINAMOMÉTRICO DO MOTOR MONOCILÍNDRICO ARREFECIDO A AR, COM MOLA DE CORREÇÃO DE TORQUE, CURVA F.

| RPM | POTÊNICA (kW) | TORQUE (DAN.M) | CONSUMO (G/KWH) |
|------|---------------|----------------|-----------------|
| 1800 | 8,06 | 4,28 | 276,35 |
| 1900 | 8,52 | 4,28 | 274,07 |
| 2000 | 8,66 | 4,14 | 265,51 |
| 2100 | 8,73 | 3,97 | 264,38 |
| 2200 | 9,48 | 4,11 | 270,10 |
| 2300 | 9,54 | 3,96 | 268,39 |
| 2400 | 9,51 | 3,78 | 267,27 |
| 2500 | 9,69 | 3,70 | 268,94 |
| 2600 | 9,66 | 3,55 | 268,08 |
| 2700 | 9,81 | 3,47 | 266,09 |
| 2750 | 10,13 | 3,52 | 272,10 |
| 2800 | 8,16 | 2,78 | 266,51 |

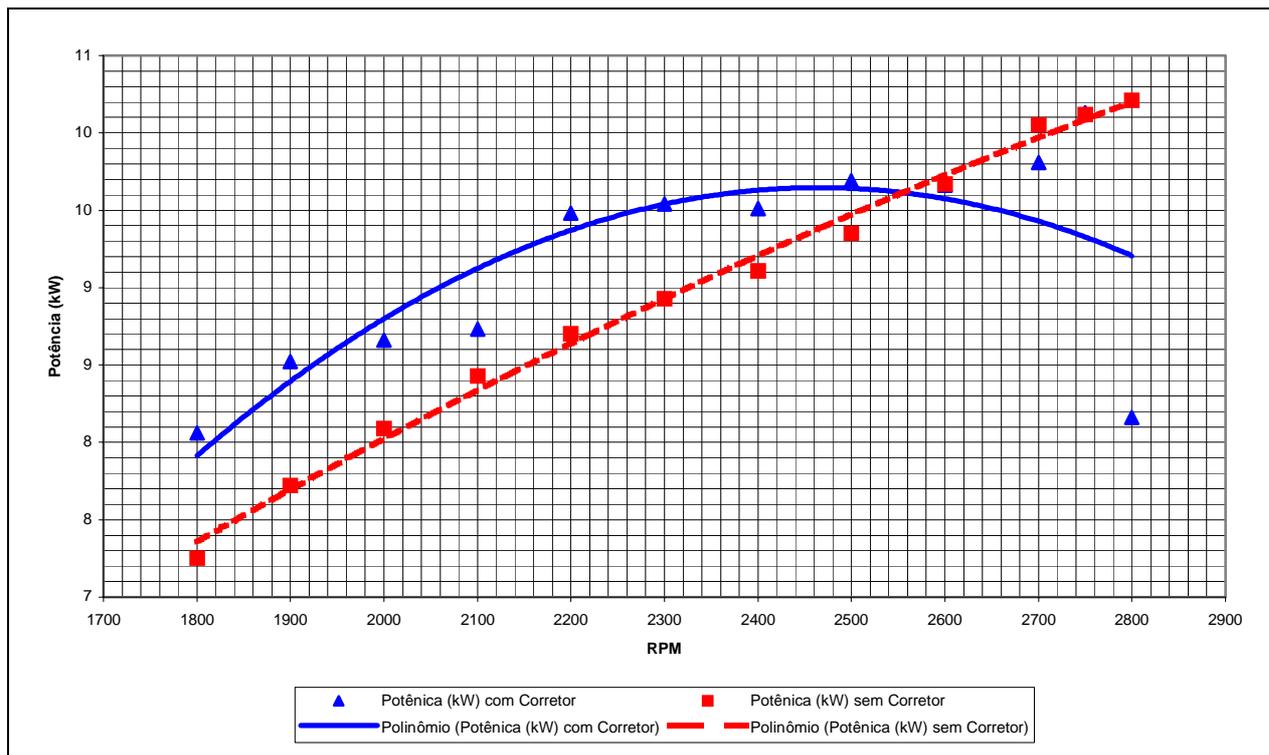


GRÁFICO 7 - ENSAIO DINAMOMÉTRICO DO MOTOR MONOCILÍNDRICO ARREFECIDO A AR, COM E SEM MOLA DE CORREÇÃO DE TORQUE, CURVA F, DADOS DAS TABELAS 5 E 6.

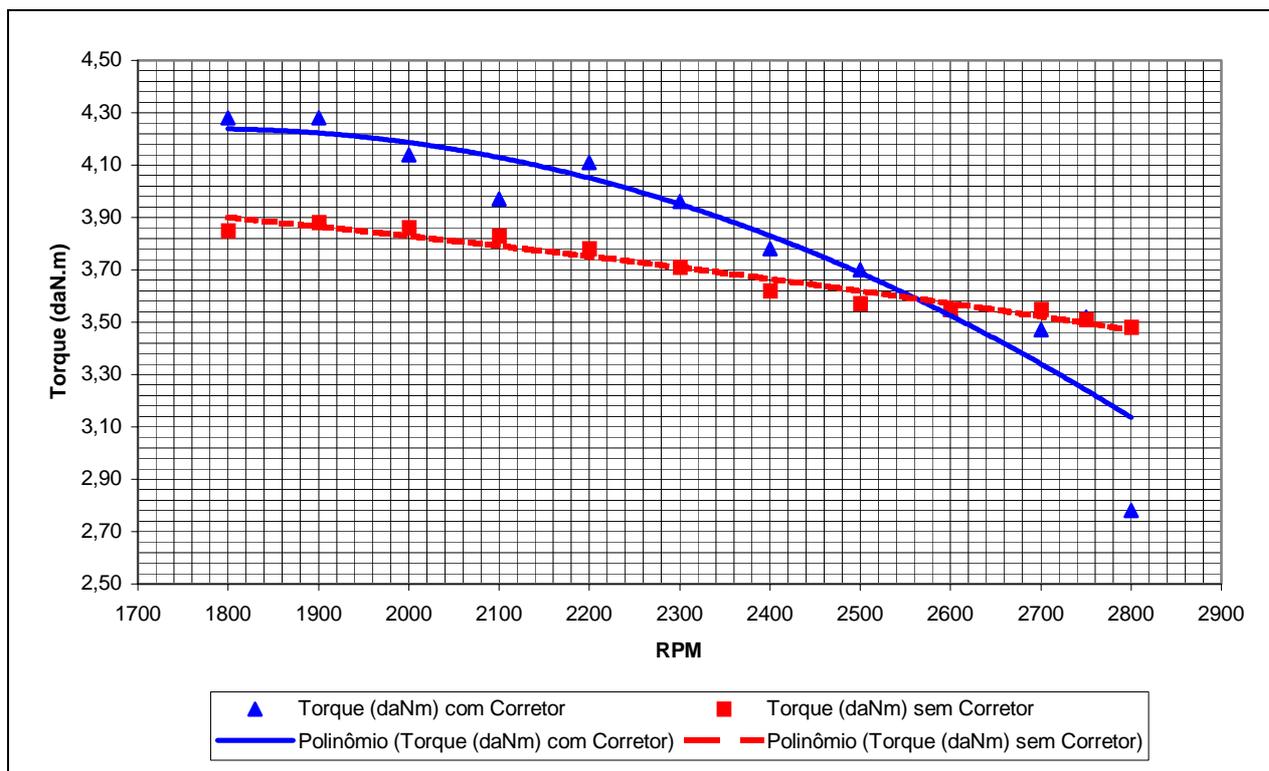


GRÁFICO 8 - ENSAIO DINAMOMÉTRICO DO MOTOR MONOCILÍNDRICO ARREFECIDO A AR, COM E SEM MOLA DE CORREÇÃO DE TORQUE CURVA F, DADOS DAS TABELAS 5 E 6.

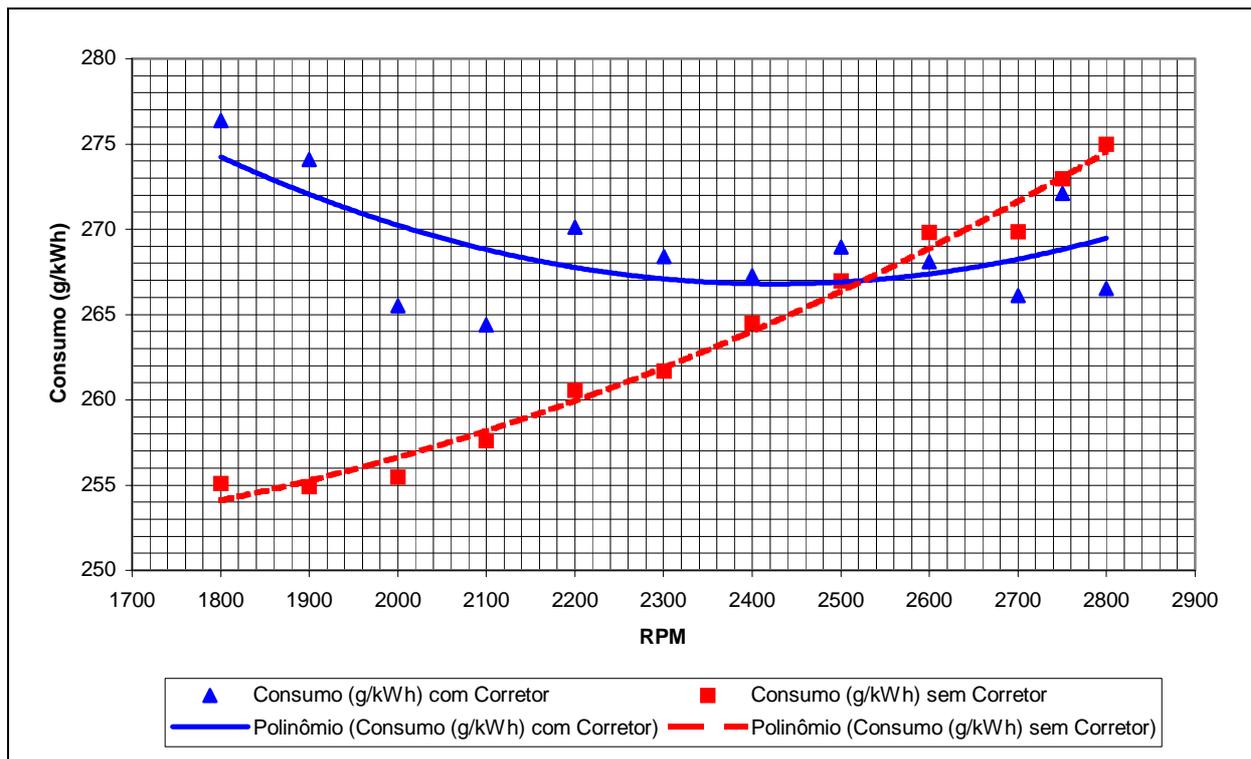


GRÁFICO 9 - ENSAIO DINAMOMÉTRICO DE UM MOTOR MODELO M93, COM E SEM MOLA DE CORREÇÃO DE TORQUE CURVA F, DADOS DAS TABELAS 5 E 6.

TABELA 7 - ENSAIO DINAMOMÉTRICO DO MOTOR MONOCILÍNDRICO ARREFECIDO A AR, SEM MOLA DE CORREÇÃO DE TORQUE, REGULADOR ATUAL, CURVA A.

| RPM | POTÊNICA (kW) | TORQUE (DAN.M) | CONSUMO (G/KWH) |
|------|---------------|----------------|-----------------|
| 1800 | 6,15 | 3,26 | 240,34 |
| 1900 | 6,58 | 3,31 | 240,70 |
| 2000 | 6,92 | 3,31 | 242,64 |
| 2100 | 7,20 | 3,27 | 246,20 |
| 2200 | 7,47 | 3,24 | 252,31 |
| 2300 | 7,76 | 3,22 | 250,89 |
| 2400 | 7,94 | 3,16 | 253,50 |
| 2500 | 8,05 | 3,08 | 256,71 |
| 2600 | 8,26 | 3,03 | 258,68 |
| 2700 | 8,31 | 2,94 | 263,59 |
| 2750 | 8,65 | 3,00 | 265,03 |
| 2800 | 8,74 | 2,98 | 266,99 |

TABELA 8 - ENSAIO DINAMOMÉTRICO DO MOTOR MONOCILÍNDRICO ARREFECIDO A AR, COM MOLA DE CORREÇÃO DE TORQUE, CURVA A.

| RPM | POTÊNICA (kW) | TORQUE (DAN.M) | CONSUMO (G/KWH) |
|------|---------------|----------------|-----------------|
| 1800 | 7,23 | 3,83 | 253,77 |
| 1900 | 7,63 | 3,83 | 256,19 |
| 2000 | 7,98 | 3,81 | 255,34 |
| 2100 | 8,38 | 3,81 | 262,81 |
| 2200 | 8,83 | 3,83 | 261,69 |
| 2300 | 9,05 | 3,76 | 262,96 |
| 2400 | 9,25 | 3,68 | 262,46 |
| 2500 | 9,56 | 3,62 | 260,78 |
| 2550 | 9,42 | 3,53 | 263,73 |
| 2600 | 9,31 | 3,42 | 260,91 |
| 2650 | 9,42 | 3,40 | 262,32 |

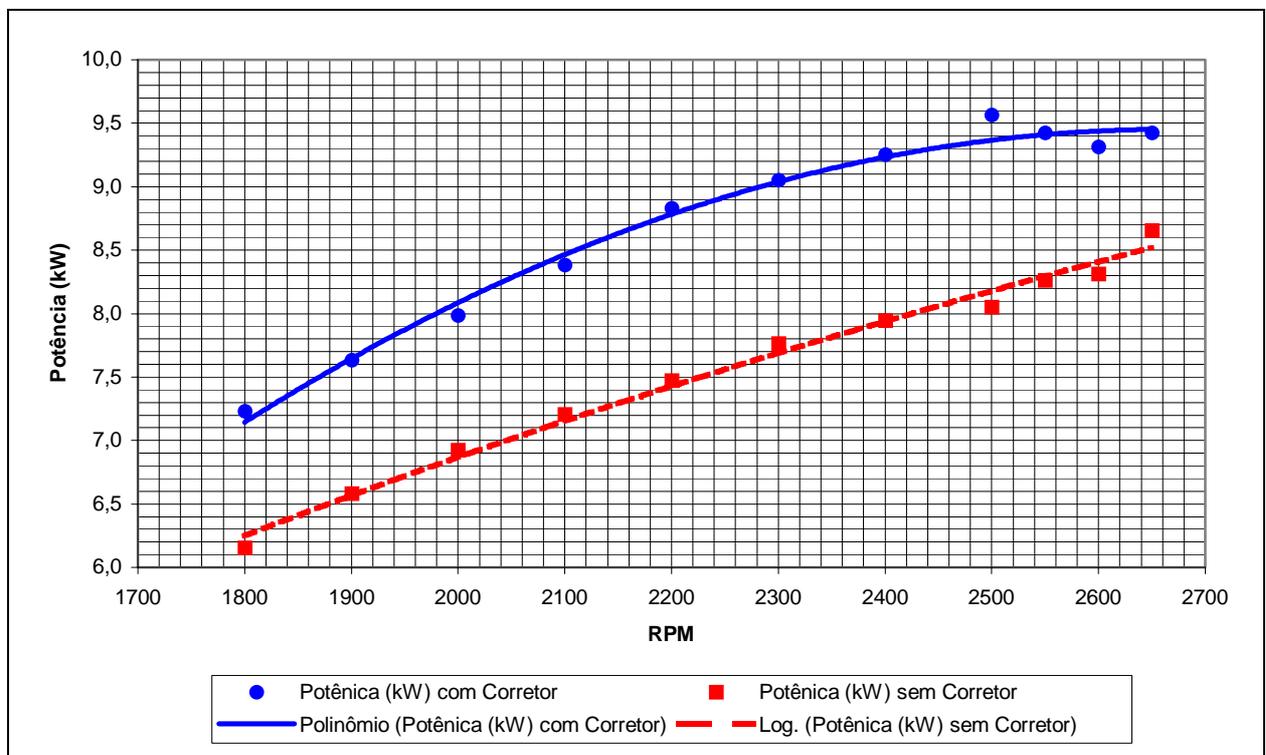


GRÁFICO 10 - ENSAIO DINAMOMÉTRICO DO MOTOR MONOCILÍNDRICO ARREFECIDO A AR, COM E SEM MOLA DE CORREÇÃO DE TORQUE, CURVA A, DADOS DAS TABELAS 7 E 8.

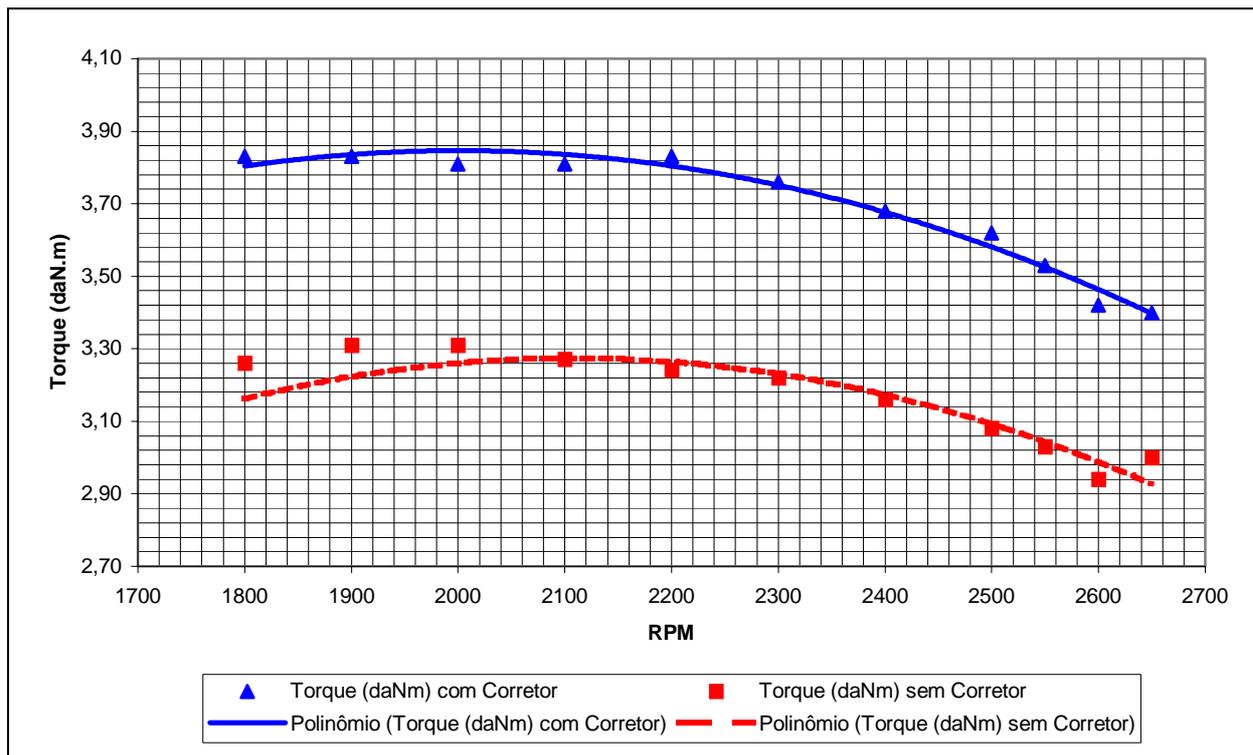


GRÁFICO 11 - ENSAIO DINAMOMÉTRICO DO MOTOR MONOCILÍNDRICO ARREFECIDO A AR, COM E SEM MOLA DE CORREÇÃO DE TORQUE, CURVA A, DADOS DAS TABELAS 7 E 8.

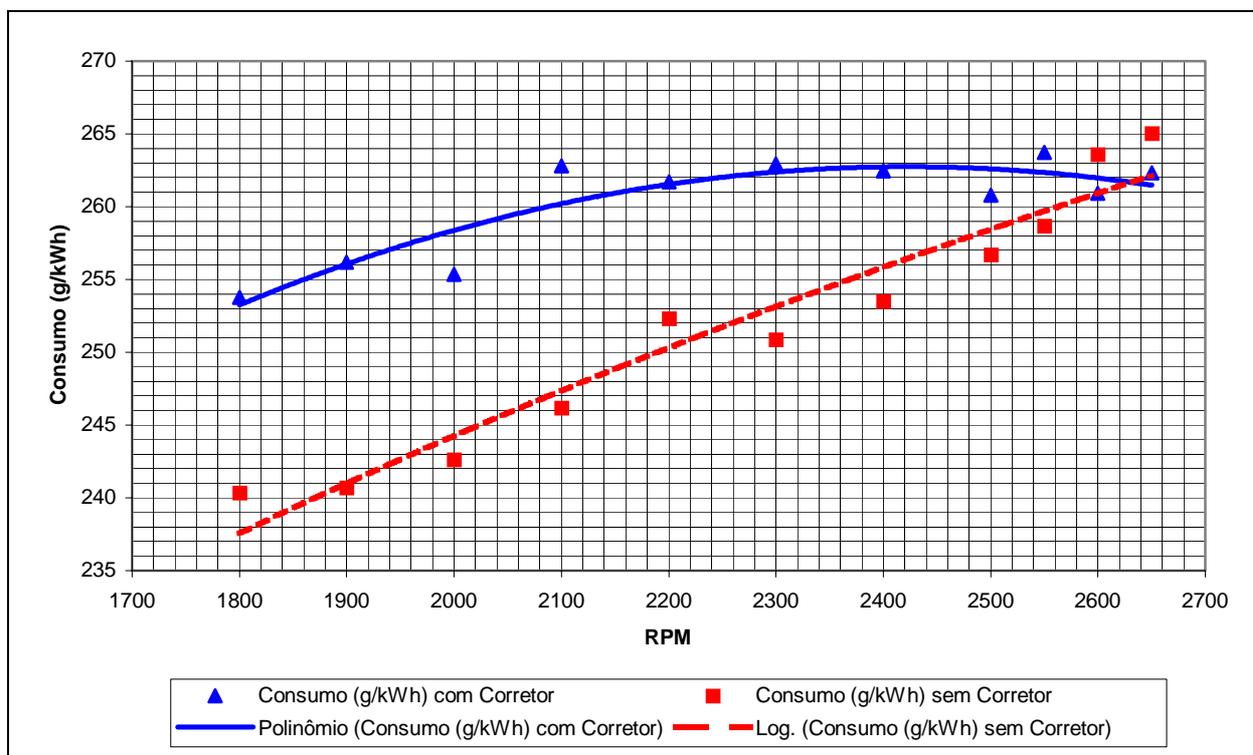


GRÁFICO 12 - ENSAIO DINAMOMÉTRICO DO MOTOR MONOCILÍNDRICO ARREFECIDO A AR, COM E SEM MOLA DE CORREÇÃO DE TORQUE, CURVA A, DADOS DAS TABELAS 7 E 8.