

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS

ESTRATÉGIA PARA CONTROLE DE OPERAÇÃO OTIMIZADA DE
MOTOR DIESEL APLICADO EM TRATORES AGRÍCOLAS

por

Nelson Luis Cappelli

ORIENTADOR: Prof. Dr. Claudio Bianor Sverzut

Bianor

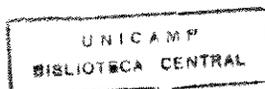
*Este exemplar corresponde a
redação final da tese
de Doutorado defendida
por Nelson Luis Cappelli
e aprovada pela Comissão
Julgadora em 21 de de-
zembro de 1995, Campinas,
de janeiro de 1996*

Tese apresentada à Comissão de Pós-Graduação
da Faculdade de Engenharia Agrícola, como
requisito parcial para a obtenção do título de
Doutor em Engenharia Agrícola.

Campinas - São Paulo - Brasil

(DEZEMBRO / 95)

Presidente da Banca



UNIDADE	00 00
N.º CHAMADA:	TUNICAMP
	C 173e
V. F.	
N.º 26945	
N.º 007196	
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	08/03/96
N.º CPD	

CM-00084802-4

C171e Cappelli, Nelson Luis
Estratégia para controle de operação
otimizada de motor diesel aplicado em tratores
agrícolas / Nelson Luis Cappelli.--Campinas,
SP: [s.n.], 1995.

Orientador: Claudio Bianor Sverzut.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Controle eletrônico. 2. Motor diesel. 3.
Tratores agrícolas. I. Sversut, Claudio Bianor.
II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Ao meu pai, Nelson (in memorian).

À minha mãe, Vera.

Aos meus filhos, Rafael e Ana Paula.

À minha companheira, Ana Maria.

AGRADECIMENTOS

Aos membros do Departamento de Máquinas Agrícolas da Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP, pelo apoio prestado durante todo o período da realização deste trabalho.

Ao convênio UNICAMP / IBAMA, que cedeu suas instalações laboratoriais para a realização dos testes experimentais.

Ao Laboratório de Instrumentação e Eletrônica do Departamento de Máquinas Agrícolas da Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP, que cedeu a instrumentação necessária à realização da parte experimental.

Ao meu comitê orientador pelas sugestões sempre precisas e valiosas.

Ao Prof. Dr. Claudio Bianor Sverzut pela orientação deste trabalho.

Ao amigo Prof. Dr. Antonio José da Silva Maciel pelo permanente incentivo.

Ao engenheiro eletrônico Claudio K. Umezu pelo apoio no projeto e realização experimental e na interpretação dos resultados.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	<i>ii</i>
AGRADECIMENTOS.....	<i>iii</i>
SUMÁRIO.....	<i>v</i>
RESUMO.....	<i>viii</i>
1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - OBJETIVOS.....	6
3 - REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA.....	7
3.1 - Energia e informação.....	7
3.2 - Perdas de energia na utilização do trator agrícola de rodas.....	9
3.3 - Métodos indiretos para determinação do desempenho de motores Diesel.....	12
3.4 - Determinação do ponto ótimo de operação.....	28
3.5 - Sistema de controle.....	36
3.5.1 - Introdução.....	36
3.5.2 - Breve histórico.....	38
3.5.3 - Modelagem matemática.....	40
3.5.4 - Identificação do sistema.....	43
4 - METODOLOGIA.....	63
4.1 - Sistema físico.....	63
4.1.1 - Identificação do comportamento do sistema físico em regime.....	64
4.1.1.1 - Curva otimizada de operação.....	65
4.1.1.2 - Determinação indireta do torque.....	66

4.1.2 - Identificação do comportamento no transiente.....	67
4.1.2.1 - Testes dinâmicos.....	68
4.1.2.2 - Modelo matemático.....	69
4.2 - Controladores do motor.....	70
4.2.1 - Controlador mecânico.....	71
4.2.2 - Controlador eletrônico.....	74
4.2.2.1 - Procedimentos para a lógica de controle.....	78
5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	81
5.1 - Comportamento em regime.....	81
5.1.1- Curva de plena carga.....	81
5.1.2 - Curvas governadas e de consumo específico constante.....	82
5.1.3 - Equacionamento das curvas em regime.....	82
5.1.4 - Curva de operação otimizada.....	84
5.1.5 - Equações para a determinação indireta do torque.....	85
5.2 - Comportamento no transiente.....	96
5.2.1- Dados originais.....	96
5.2.2 - Dados condicionados para escolha do modelo matemático.....	97
5.2.3 - Modelos matemáticos.....	97
5.2.4 - Preditor.....	101
5.3 - Controlador do motor.....	106
5.3.1 - Lógica de controle.....	106
5.3.2 - Simulação do controle.....	108
6 -CONCLUSÕES.....	113
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117
8 - SUMMARY.....	121
9 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	122

10 - APÊNDICES.....	124
10.1 - Dados observados para a curva de plena carga.....	124
10.2 - Dados observados para as curvas governadas.....	125
10.3 - Coeficientes das estruturas do modelo ARX, para $Z = 1800$ [rpm].....	130
10.4 - Coeficientes das estruturas do modelo OE, para $Z = 1800$ [rpm].....	132
10.5 - Coeficientes das estruturas do modelo ARMAX, para $Z = 1800$ [rpm].....	135

RESUMO

O trator agrícola de rodas tem sido, desde o início de sua existência, a principal unidade motora da agricultura. Seu projeto conceitual básico tem muito ainda a ser explorado. A evolução do trator agrícola de rodas aponta no sentido de melhorar seu rendimento global envolvendo alguns elementos críticos, com respeito à conversão de energia, que dentre eles destacam-se: o motor, a transmissão, a interface pneu-solo e o sistema de controle do levante hidráulico.

No presente trabalho foi estudado inicialmente o comportamento dinâmico de um motor diesel, modelo 4248, marca Perkins, normalmente utilizado em tratores agrícolas, com o objetivo de desenvolver uma estratégia de controle do motor que otimize seu desempenho, baseado em critérios de economia de energia.

A lógica de controle proposta prevê a utilização, em conjunto, do controle do motor e da transmissão do trator, objetivando a manutenção da qualidade final do trabalho agrícola. Para que isto seja conseguido, deve-se manter a velocidade de deslocamento do conjunto trator-implemento, atuando-se na relação de transmissão e no acionamento da bomba injetora, de forma a levar o motor a operar num ponto otimizado, mantendo-se a potência constante.

A fim de controlar o motor em condições ótimas de economia de energia, foi necessário definir uma curva otimizada de operação. A curva

proposta contempla o funcionamento do motor em toda sua faixa de potência disponível.

Em virtude das dificuldades da medição direta do torque e dos métodos indiretos para sua estimativa, mencionados na literatura, não atenderem adequadamente as exigências de precisão para a implementação da estratégia de controle, foi proposto um novo método.

Este método permite a estimativa indireta do torque para pequenas perturbações dinâmicas, utilizando-se apenas a posição da alavanca de acionamento da bomba injetora e da variação da rotação do motor.

Foi observado que o comportamento dinâmico do motor é bem distinto daquele mostrado pelas curvas de desempenho tradicionais.

Para fins de estabelecimento da estratégia de controle é necessário estimar a resposta do motor a uma perturbação transiente. Isto foi realizado através do estudo dos modelos matemáticos denominados ARX, OE e ARMAX.

Assim a estratégia de controle foi estabelecida levando-se em consideração: o método indireto proposto de determinação do torque em regime; a curva proposta de operação otimizada; e, finalmente, o modelo ARMAX, que descreve o comportamento dinâmico do motor.

A estratégia de controle foi simulada através de solicitações dinâmicas de torque crescente e decrescente, nas curvas governadas correspondentes a 1600 [rpm], 1800 [rpm] e 2000 [rpm]. Em todos estes casos os resultados das simulações mostraram-se adequados, indicando que a lógica do controlador manteve o funcionamento do motor seguindo a curva otimizada.

1 - INTRODUÇÃO

O trator agrícola de rodas tem sido a principal unidade motora da agricultura desde o início de sua existência.

Inicialmente foi concebido com a função única de tracionar implementos agrícolas. Com o passar do tempo novas funções foram a ele acrescentadas, tais como, a de acionar e, posteriormente, a de portar tais implementos.

Com o desenvolvimento da ciência e da tecnologia, novas tecnologias foram agregadas a fim de torná-lo mais universal em sua utilização, eficiente, seguro e fácil de operar.

Novas unidades motoras, conceitualmente distintas, têm sido colocadas à disposição, como é o caso do "Field Power Unit" (FPU), sem contudo abalar, ao menos de perto, o prestígio do trator agrícola de rodas ou mesmo sugerir que isto venha ocorrer a médio ou longo prazo.

Parece que o trator agrícola de rodas, em seu projeto conceitual básico, tem muito o que explorar de sua natureza evolutiva e talvez seja utilizado ainda, na forma convencional, por um longo tempo.

Num próximo passo, a evolução do trator agrícola de rodas deverá ser no sentido de melhorar seu rendimento global. Neste contexto, entende-se como rendimento global do trator agrícola não somente aspectos de eficiência na conversão de energia mas também da qualidade final, como um todo, de seu trabalho, passando pelo conforto e segurança do operador e por custos operacionais reduzidos.

Para que o trator agrícola tenha seu rendimento global aumentado, alguns elementos críticos relativos à conversão de energia e operacionalidade deverão ser melhor entendidos, a fim de que possam ser devidamente equacionados. Dentre eles destacam-se o motor, a caixa de transmissão, a interface pneu-solo e o sistema de controle do levante hidráulico. Acrescenta-se a isto a interação entre o trator e o implemento agrícola.

Nota-se que há uma interdependência entre os diversos elementos mencionados sendo que o desempenho de um deles afeta os demais, com ênfase maior no motor. A Figura 1.1 mostra esquematicamente esta interdependência.

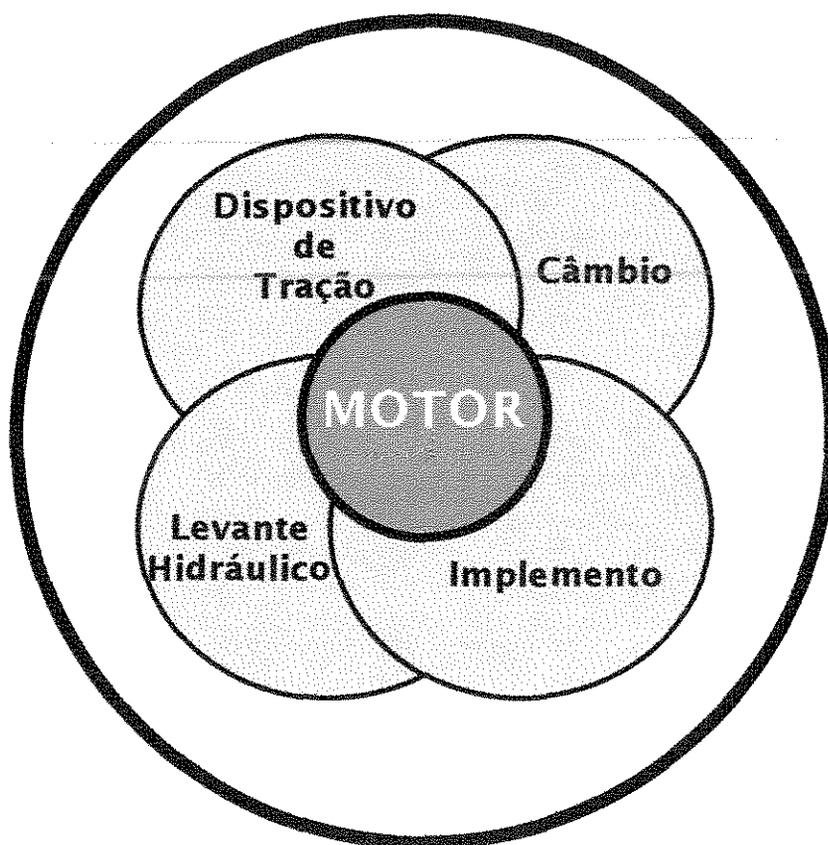


FIG. 1.1 - Interdependência entre diversos dispositivos do trator agrícola

No atual estágio de desenvolvimento dos motores são necessárias novas tecnologias, de alto custo, para se conseguir uma mínima redução no consumo específico. Este objetivo, no entanto, pode em grande parte ser alcançado apenas operando-se os motores nas condições de consumo específico mínimo, ou em outras palavras, onde for máxima sua eficiência na conversão energética. Para que o motor possa ter seu ponto de operação otimizado seria ideal utilizar-se de uma transmissão contínua. Contudo, dado às dificuldades construtivas, entre outras, uma caixa de transmissão com escalonamento e intercambialidade das relações de transmissão adequados poderia ser uma alternativa.

Nota-se ainda, que as perdas na interface pneu-solo são dadas pela somatória das perdas que ocorrem devido à resistência ao rolamento e ao deslizamento e que a eficiência de tração, para uma determinada condição de operação, é máxima para um nível de deslizamento especificado, portanto possibilita uma operação otimizada.

Contudo deve-se observar que a melhoria no rendimento global do trator envolve não somente a economia de energia, mas também, a economia de tempo na sua operação, a qualidade do trabalho final, os custos operacionais, dentre outros.

O consumo de energia poderia ser minimizado controlando-se, principalmente, o deslizamento das rodas motoras e o ponto de operação do motor. A economia de tempo de operação (aumento da capacidade operacional) poderia ser obtida, por exemplo, através do controle da força de tração (levante hidráulico) e da velocidade de deslocamento. Os custos operacionais poderiam ser otimizados controlando-se o ponto de operação do motor e o deslizamento (economia de energia) associados à velocidade de deslocamento (aumento da capacidade operacional e, portanto, economia de tempo). A qualidade final do trabalho poderia ser

preservada, por exemplo, através do controle da velocidade de deslocamento e da profundidade de trabalho do implemento.

Nota-se que o incremento no rendimento global do trator passaria, principalmente, pelo controle de forma interativa: do motor, da caixa de transmissão, do deslizamento e do levante hidráulico. Dada a complexidade desta tarefa para o ser humano realizar, uma automação destes dispositivos seria imprescindível.

Este trabalho pretende estudar e propor um controle de operação para o motor, conforme mostrado no diagrama de blocos da Figura 1.2, visando a uma futura implementação de um controlador de velocidade de deslocamento capaz de otimizar a operação do trator agrícola e, ao mesmo tempo, de preservar a qualidade do trabalho que está sendo realizado.

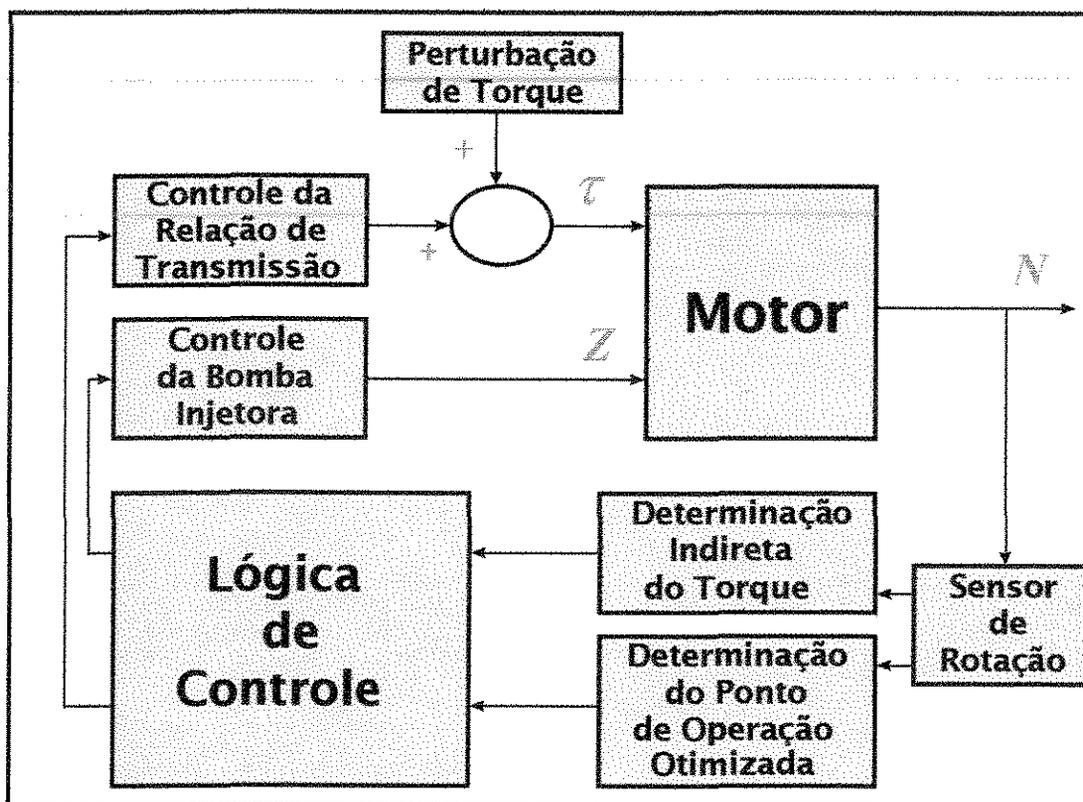


FIG. 1.2 - Diagrama de blocos de um controlador para o motor Diesel, aplicado a tratores agrícolas

O controlador de velocidade de deslocamento pode ser idealizado conforme o diagrama de blocos apresentado na Figura 1.3. Nota-se que dada uma perturbação de força ou de torque, proveniente da operação agrícola em execução, a velocidade de deslocamento deverá ser controlada a fim de manter a qualidade do trabalho.

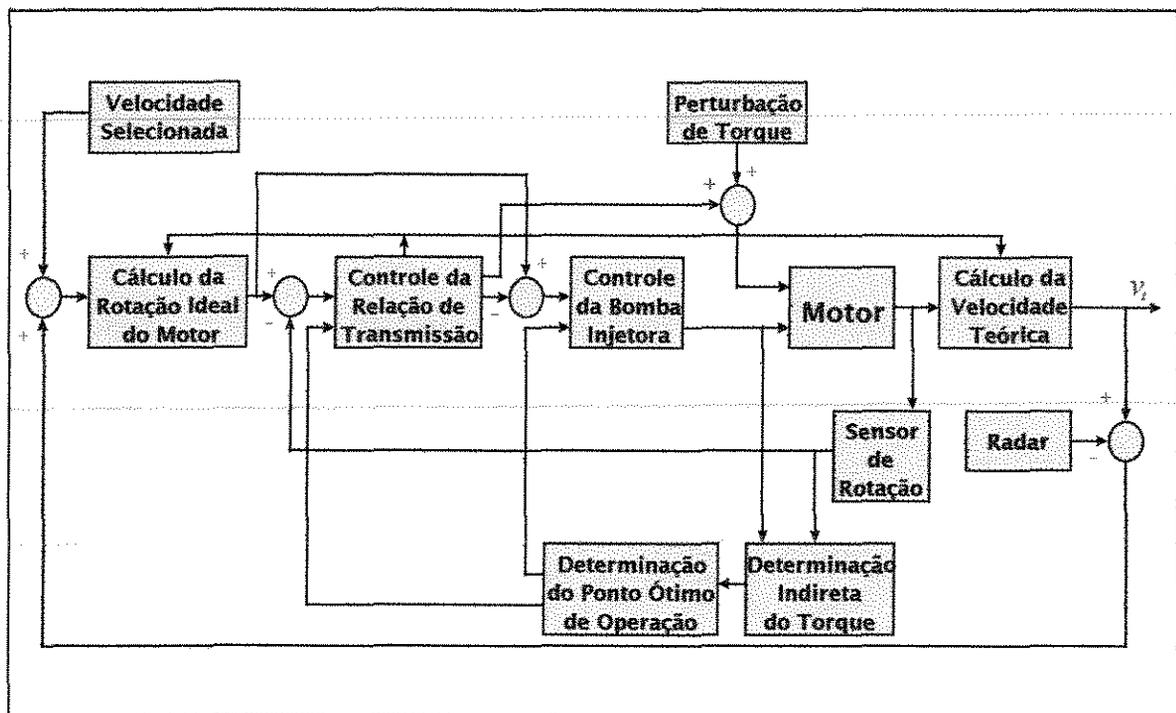


FIG. 1.3 - Diagrama de blocos de um controle de velocidade de deslocamento do trator agrícola

Observa-se que o controle de velocidade de deslocamento apresentado na Figura 1.3 opera segundo critérios de economia de energia e de manutenção da qualidade do trabalho final.

2 - OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- estudar o comportamento dinâmico do motor Diesel, aplicado ao trator agrícola;
- estabelecer um procedimento para o controle do motor, e
- testar, através de simulações, o controle estabelecido para o motor do trator agrícola.

3 - REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

3.1 - Energia e informação

CHANCELLOR (1981) discutiu as vantagens de se utilizar informações para substituir o uso de energia na agricultura. Conforme ressalta, pode-se economizar de 15% a 50% de energia nas mais diversas atividades relacionadas à agricultura. PUCKETT e ANDREW (1976) discutiram o fato de não se poder eliminar o uso da energia na agricultura sem uma queda proporcional de produção e que a opção mais viável seria o uso mais eficiente da energia disponível. Colocou ainda que a capacidade de controle que o homem tem sobre uma atividade, determina a eficiência com que a energia é utilizada e que a obtenção de informação em tempo real, permitiria ao homem utilizar-se mais eficientemente da energia ao seu dispor.

BRILLOUIN (1962) e TRIBUS e McIRVINE (1971) usaram uma interpretação liberal da Segunda Lei da Termodinâmica para explicar que energia e informação são equivalentes. Conseqüentemente, segundo os autores, para melhorar a eficiência de um sistema é necessário além da energia, a informação. A quantidade de energia requerida depende da tecnologia utilizada e seu bom aproveitamento, depende então da quantidade de informação disponível para guiar e sincronizar a aplicação de cada um dos recursos disponíveis. Eles concluem ainda que, pode-se esperar que a eficiência de um processo altamente organizado tende a

aumentar com o decorrer do tempo e à medida que mais informações são obtidas sobre o processo.

TRIBUS e McIRVINE (1971) também demonstraram que não é apenas o uso de energia que aumenta a organização de um sistema, mas a maneira com que esta energia é usada, ou seja, a energia deve ser aplicada em conjunto com a informação para que este sistema tenha o seu nível de organização aumentado. Os autores também demonstraram que a energia necessária para um microprocessador lidar com informações é inferior à energia requerida para um ser humano lidar com a mesma quantidade de informação. Conseqüentemente, sempre que possível é mais conveniente o uso da automação ao uso de seres humanos para processar rapidamente grande quantidade de informação.

A necessidade de processar mais informações, à medida que a complexidade dos equipamentos aumenta, leva o ser humano a ser confrontado com situações estressantes (ZANDER, 1970) as quais tem sido contornadas, tradicionalmente, através da limitação do grau e freqüência das variações necessárias na operação. Como exemplos desta simplificação pode-se citar: plantio em linha, oposto ao plantio a lanço, aumentando o tamanho necessário da área cultivada; cultivo ou irrigação por aspersão do campo inteiro, em oposição ao cultivo ou irrigação individual para cada planta; e colheita da planta toda, ao invés de colheita seletiva do produto. Estas mudanças foram introduzidas pela necessidade de aumentar a produtividade do ser humano e pela disponibilidade de energia a baixo custo.

Segundo CHANCELLOR (1981), uma forma de substituir energia por informação seria através da mudança no sistema, passando-se a usar informação intensiva ao invés de energia intensiva, como é o caso da irrigação por inundação do campo todo, para evitar que alguma planta seja deixada sem água, opostamente a se identificar e fornecer, somente o quanto cada planta necessita individualmente.

Especificamente quanto a utilização de sistemas de informação em tratores agrícolas, visando o incremento de sua eficiência global, tem-se conhecimento de diversos trabalhos publicados na literatura especializada e de sistemas comercialmente disponíveis no mercado. Contudo, as informações oferecidas por estes sistemas nem sempre são adequadamente aproveitadas pelo operador o que, de certa forma, contribuiu para a necessidade do desenvolvimento de sistemas automatizados. Nestes, as tarefas repetitivas, cansativas, sujeitas a falhas e erros, podem ser feitas de forma automática, deixando-se para o operador as tarefas de cunho intelectual, para as quais o ser humano tem mais aptidão.

Na literatura encontra-se mencionados alguns sistemas automatizados e outros já existem disponíveis comercialmente, porém na maioria dos casos o grau de automação ainda é limitado e/ou contempla parâmetros que nem sempre são os de interesse para a melhora da eficiência global do trator.

3.2 - Perdas de energia na utilização do trator agrícola de rodas.

O trator agrícola de rodas, quando encarado do ponto de vista de uma máquina que converte energia em trabalho útil, pode ser considerado como extremamente ineficiente, pois da quantidade total da energia contida no combustível, apenas 12% a 20% são aproveitados como tração líquida na barra .

STEINKAMPF (1980) apresenta sintetizado, na Figura 3.1, o balanço energético de um trator agrícola de rodas em trabalho de tração.

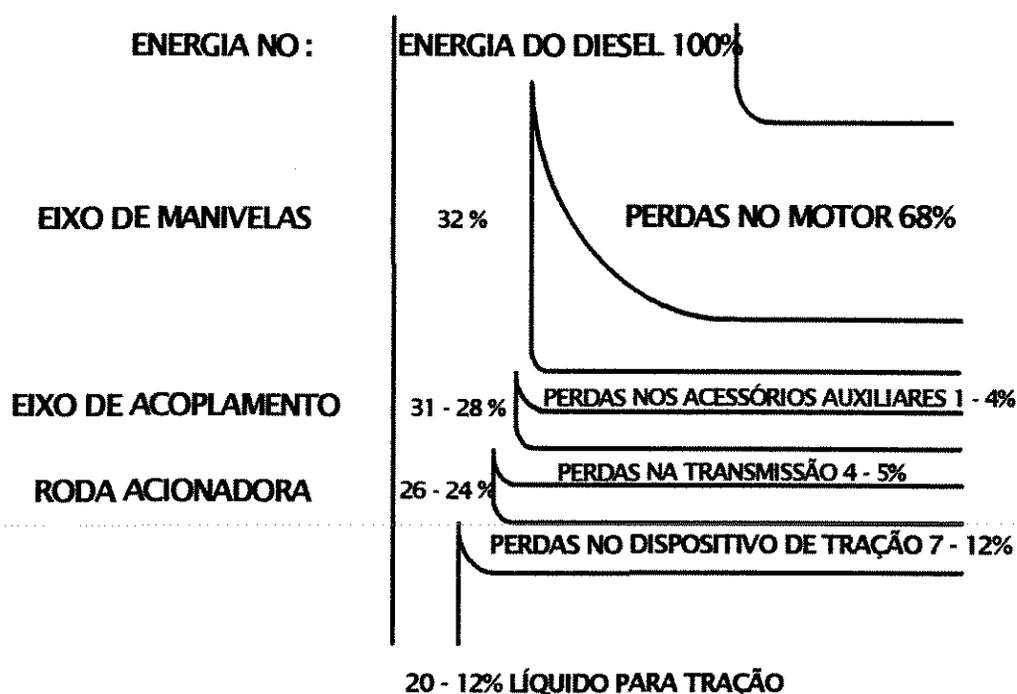


FIG. 3.1 - Balanço energético de um trator agrícola de rodas em trabalho de tração. (STEINKAMPF, 1980)

Segundo a mesma fonte, existem dois pontos onde estas perdas de energia são mais importantes, quais sejam: na conversão de energia no motor e na interface pneu-solo.

A Figura 3.2 mostra as curvas de isoconsumo de um motor Diesel e evidencia o ponto onde é mínimo o consumo específico de combustível, ou seja, onde a eficiência na conversão de energia é máxima. Já a Figura 3.3, apresenta a curva de eficiência de tração cujo ponto de máximo corresponde à mínima perda de energia na interface pneu-solo.

Sendo assim, tanto o motor quanto o dispositivo de tração possuem pontos de operação onde as perdas podem ser minimizadas, sem que haja necessidade de alterações de projeto, mas sim apenas com a otimização da operação. Apesar disto, este ponto de operação ótimo é difícil de ser identificado pelo operador, sem ter à sua disposição

sistemas de informações auxiliares ou mesmo um sistema automatizado que mantenha o desempenho global do trator em níveis satisfatórios.

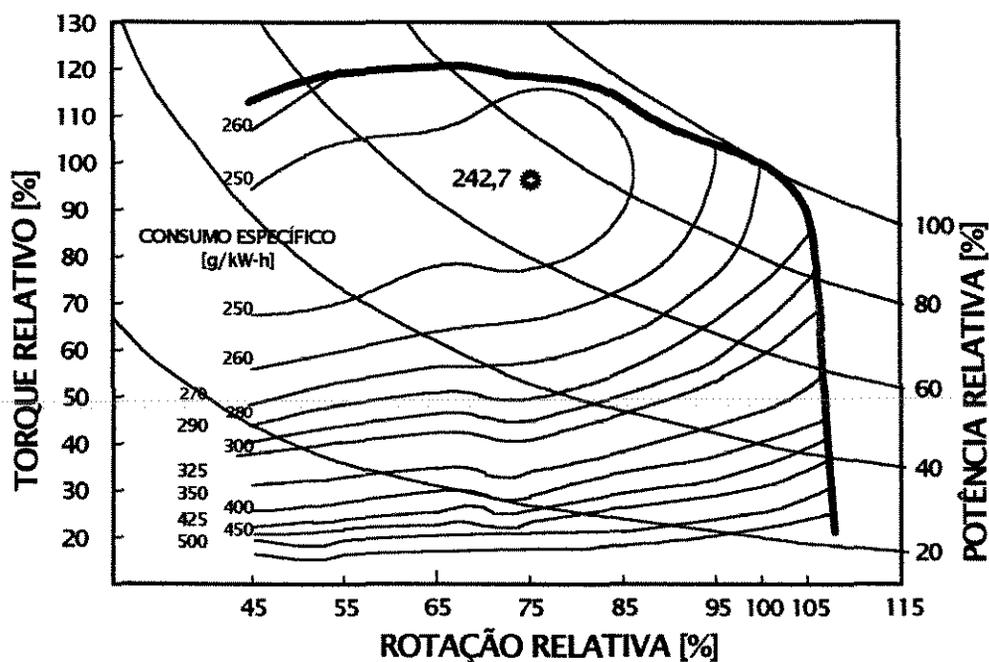


FIG. 3.2 - Curva de desempenho de um motor Diesel e curvas de Isoconsumo (CAPPELLI, 1990)

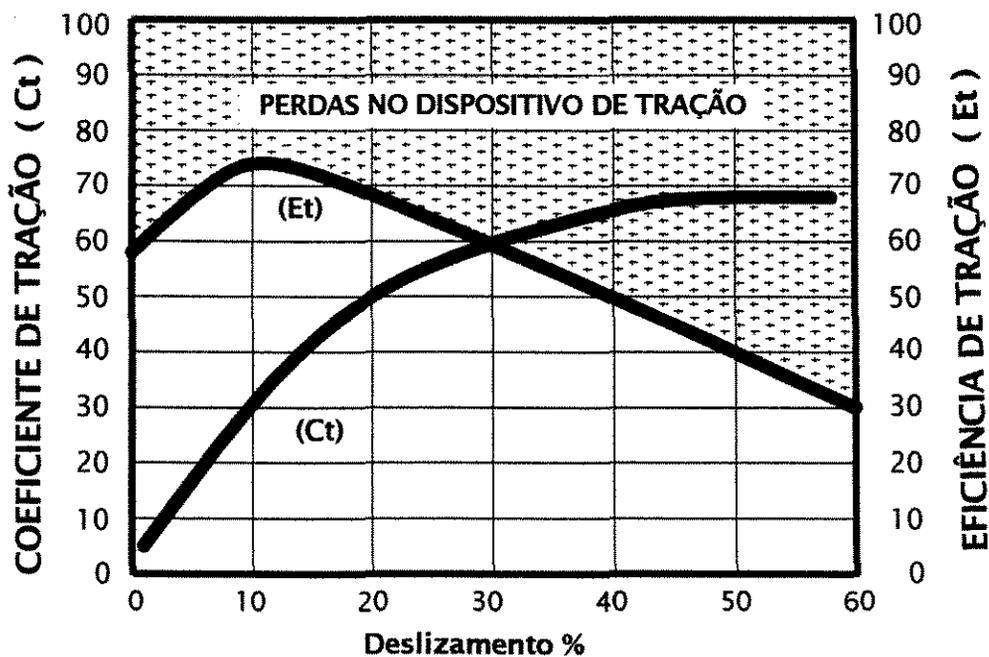


FIG. 3.3 - Curvas de Eficiência de Tração e Coeficiente de Tração (STEINKAMPF, 1980)

3.3 - Métodos indiretos para determinação do desempenho de motores Diesel

Nos últimos anos foram apresentados diversos modelos matemáticos para descrever o desempenho dos motores Diesel, utilizado nos tratores agrícolas.

A finalidade deste estudo é a de prover subsídios para a escolha adequada de um modelo matemático para simulação do desempenho do motor do trator agrícola, para ser utilizado na implementação de sistemas eletrônicos de informação ao operador e de automação de funções.

Estes sistemas eletrônicos devem contribuir para o aumento da eficiência global do equipamento, possibilitando que sejam otimizados: a distribuição de pesos, a seleção e regulagem de implementos, a escolha da marcha de trabalho, etc.

Estes modelos têm, tipicamente, sido baseados na ajustagem de uma expressão polinomial pelo método dos mínimos quadrados, envolvendo parâmetros tais como: rotação, posição da haste de acionamento da bomba injetora, duração da abertura do bico injetor e temperatura dos gases de escape.

A correlação, entre o desempenho do motor e estes parâmetros, tem sido procurada, pois a medição direta do torque na árvore de saída do motor é pouco prática e de custo elevado.

A fim de melhor entender os trabalhos dos pesquisadores deve-se admitir que o mapa de desempenho dos motores Diesel governados podem ser representados pelas seguintes curvas de contorno: eixo da rotação, curva de máxima rotação governada, curva de débito máximo da bomba injetora e pela curva de mínima rotação governada, conforme mostra a Figura 3.4.

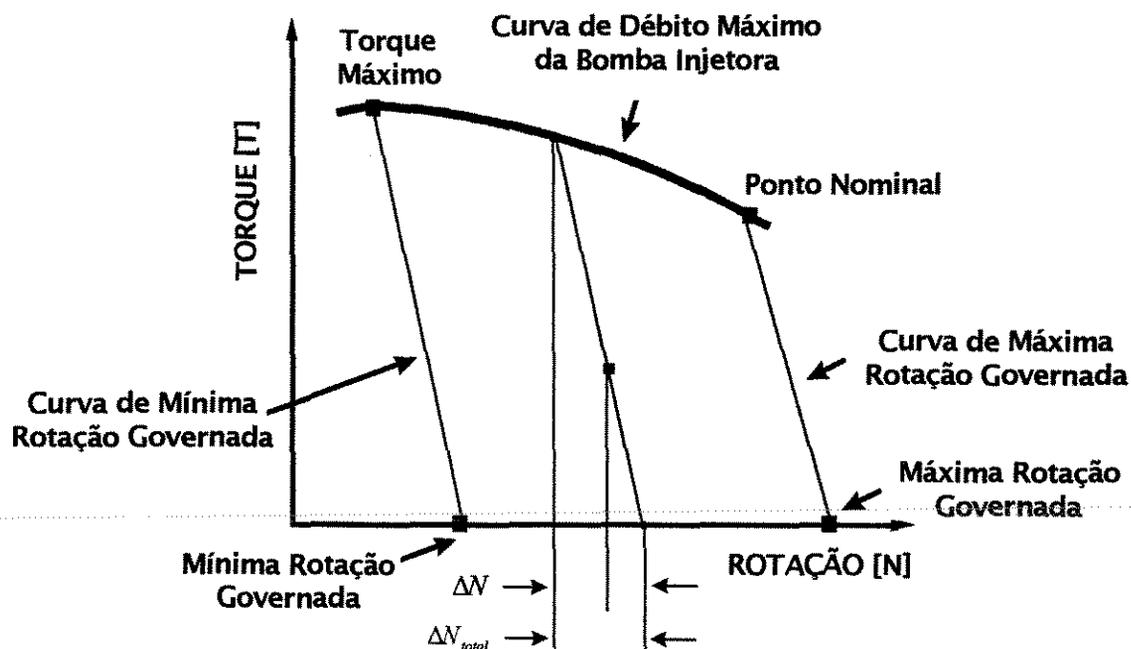


FIG. 3.4 - Mapa típico dos motores Diesel governados com as curvas de contorno especificadas

KOERTNER et al (1975) usaram a rotação do motor (N), a máxima rotação governada - sem carga - (Z) e a posição da haste de acionamento da bomba injetora (S) para correlacionar a potência (P) e o consumo horário (F). Foi encontrado que P e F eram dependentes de S , N , Z e $S \times N$.

JAHNS (1983) procurou representar o desempenho dos motores Diesel, utilizando-se de uma expressão matemática baseada em fundamentos físicos que observavam as condições de contorno de funcionamento do motor que são: a curva de débito máximo da bomba injetora, a curva de máxima e mínima rotação governada e o eixo da rotação.

O autor sugeriu que deveria haver uma expressão universal, com coeficientes específicos para cada tipo de motor, obtidos experimentalmente. Modelou, então, uma equação para o consumo

horário de combustível, cuja estrutura foi determinada para as condições de contorno de consumo horário de combustível maior que zero, quando $\tau = 0$, e pela hipótese de que a representação poderia ser da forma poligonal. Esta equação foi:

$$F = d_{11}N + d_{12}N^2 + d_{13}N^3 + (d_{21}N + d_{22}N^2 + d_{23}N^3)\tau + (d_{31}N + d_{32}N^2 + d_{33}N^3)\tau^2 \quad (3.1)$$

Os nove coeficientes d_{ij} , foram obtidos através dos valores de rotação (N) e torque (τ) em nove pontos uniformemente distribuídos na curva de desempenho do motor.

A curva de débito máximo e de atuação do governador da bomba injetora foram respectivamente representadas por:

$$\tau = u_1 + u_2N + u_3N^2 + u_4N^3 + u_5N^4 \quad \text{e,} \quad (3.2)$$

$$\tau = v_1 + v_2N + v_3N^2 \quad (3.3)$$

Os coeficientes u_i e v_i puderam ser determinados através de oito pontos sobre as curvas de contorno (curvas de débito máximo e de ação do governador da bomba).

Nota-se que, aqui também, a condição de torque nulo ($\tau = 0$) para a rotação máxima governada ($N = Z_{\max}$) não é satisfeita.

O autor do trabalho mencionou que, devido a possibilidade do desempenho do motor variar com o tempo de utilização e com a manutenção realizada, bem como, poder existir uma variação da potência nominal entre motores de mesmo modelo, uma precisão de $\pm 5\%$ seria adequada para este tipo de modelagem.

Aplicando este método WANG (1988) encontrou que a precisão da estimativa foi insuficiente e que um melhor resultado foi obtido eliminando-se os últimos dois termos da equação proposta.

PANG et al (1985) estudaram um método indireto de correlação entre o consumo horário de combustível e a diferença de temperatura do ar de admissão e dos gases de escape do motor.

Os autores mostraram que a correlação acima é dependente da rotação do motor e mencionaram que as curvas possuíam uma linearidade semelhante àquela obtida por PASCAL e BROWN (1974), quando estudaram a correlação entre a diferença de temperatura e a potência.

Os autores projetaram e construíram um circuito eletrônico capaz de corrigir a dependência, em função da rotação do motor, para uma relação funcional única. Para proceder a esta correção, utilizaram-se dos sinais provenientes de um sensor de posição da alavanca de acionamento da bomba injetora.

A equação obtida para correlacionar a diferença de temperatura corrigida (ΔT_c) e o consumo horário de combustível (F) tem a forma de um polinômio de terceiro grau,

$$F = a_0 + a_1 \Delta T_c + a_2 \Delta T_c^2 + a_3 \Delta T_c^3 \quad (3.4)$$

onde:

a_0 a a_3 - coeficientes obtidos para o motor utilizado.

Nota-se que a expressão proposta não obedece a condição de consumo horário de combustível nulo para uma condição de diferença de temperatura corrigida igualmente nula.

KIRSTE et al (1985) apresentaram um monitor indicador de desempenho de motores Diesel, baseado nas curvas de isoconsumo do

motor e em uma matriz de diodos emissores de luz (LEDs), sobre a qual foi instalada uma máscara transparente com as curvas características do motor. As curvas desenhadas na máscara apresentavam informações quanto ao torque, potência, rotação e consumo específico do motor.

Devido ao alto custo e às dificuldades de montagem, os autores eliminaram a possibilidade de se utilizar os métodos de medição direta do torque desenvolvido pelo motor e optaram por um método indireto.

Como possíveis técnicas de medição indireta do torque foram verificadas as seguintes alternativas: medição contínua do consumo horário de combustível, posição da haste de regulagem da bomba injetora e medição diferencial entre as temperaturas dos gases de exaustão e de admissão.

O método que se utilizava da medição contínua do consumo horário de combustível, segundo os autores, apresenta vantagens no que diz respeito à facilidade de instalação do transdutor na linha de alimentação, mas desvantagens quanto ao seu custo e por somente apresentar leituras com precisão em uma faixa limitada de operação. Este método foi rejeitado.

O método baseado na variação da posição da haste de regulagem da bomba injetora apresentou as seguintes desvantagens: prestava-se somente às bombas do tipo em linha, não podendo ser utilizado nas do tipo rotativo; necessitava de adaptações de alto custo e possui uma forte dependência da rotação do motor devido, principalmente, à mudança da eficiência da bomba injetora em função da rotação, o que dificultava o processamento eletrônico do sinal. Este método também foi rejeitado.

O método baseado na medição da diferença de temperaturas entre os gases de exaustão e admissão foi o que apresentou mais promissor, tendo sido adotado pelos autores. Este método apresenta também uma dependência com a rotação, mas foi possível a construção de um circuito eletrônico simples para se obter uma relação linear entre a diferença de

temperatura medida e o torque estimado. O tempo de resposta do método da diferença de temperaturas foi relativamente elevado, principalmente quando havia grandes variações de torque. Contudo, uma resposta rápida não era necessária pois poderia até dificultar a interpretação do resultado, mostrado na matriz de "LEDs".

SUMMER et al (1986) desenvolveram um método, baseado no consumo horário de combustível do motor, para se estimar o requerimento de potência de implementos agrícolas. Para isto, utilizaram-se de um freio dinamométrico, acoplado à tomada de potência do trator agrícola (TDP) e obtiveram as curvas de consumo horário de combustível do motor em função da potência na TDP, para diferentes níveis de rotação do motor.

Foi obtida estatisticamente uma correlação, entre o consumo horário de combustível e a potência na TDP, para cada nível de rotação, descrita por equações polinomiais de segunda ordem, com a seguinte forma:

$$P = a + bF + cF^2 \quad (3.5)$$

onde:

P - potência na TDP,

F - consumo horário de combustível, [l/h],

a, b, c - coeficientes.

A equação proposta apresentou um coeficiente de determinação (r^2) superior a 0,99.

O torque na TDP pode ser obtido, também estatisticamente, em função do consumo líquido de combustível do motor, definido como sendo a diferença entre o consumo total com carga e sem carga (na

mesma rotação), por 1000 rotações do motor, e expresso em $\text{cm}^3/1000$ rotações.

Desta maneira, os autores puderam eliminar o inconveniente da variação da eficiência da bomba injetora em função da rotação, como já havia reportado KIRSTE et al (1985), ou seja, introduziram uma correção em função do nível de rotação desenvolvido pelo motor.

A equação obtida e mostrada a seguir apresentou um coeficiente de determinação (r^2) de 0,999.

$$\tau = a(\Delta F) + b(\Delta F)^2 \quad (3.6)$$

onde:

τ - torque na TDP, [N.m];

ΔF - consumo líquido de combustível., [$\text{cm}^3/1000$ rot.];

a, b - coeficientes.

Embora possua um alto coeficiente de determinação e satisfaça a condição de $\tau = 0$ para $\Delta F = 0$, a Equação 3.6, para a estimativa do torque na TDP, apresenta inconvenientes na sua utilização devido a dificuldade de se determinar, de maneira prática, o consumo líquido de combustível (ΔF).

CHANCELLOR e SMITH (1985) utilizaram um potenciômetro para determinar a posição da haste de acionamento da bomba injetora e expressaram o torque do motor como sendo;

$$\tau = d + e\delta + fN + g\Phi \quad (3.7)$$

onde:

Φ - indicação do potenciômetro;

N - rotação (para cinco níveis distintos);

d, e, f, g - coeficientes dependentes do nível de rotação,

$\delta = 0$ ou $\delta = -1$ - depende da direção em que o potenciômetro for deslocado.

Os autores notaram que o torque também poderia ser função da rotação, mas não investigaram uma possível correlação.

A expressão para o torque não tem uma forma universal, pois depende da instalação do potenciômetro na bomba injetora e não se obtém o valor de $\tau = 0$ para a máxima rotação livre.

SCHROCK et al (1986), estabeleceram correlações para a potência (P) e o consumo horário (F) usando a rotação (N) e a posição da haste da bomba injetora (Z). As expressões encontradas foram da forma:

$$P = a_0 + a_1N + a_2Z + a_3N^2 + a_4Z.N \quad \text{e,} \quad (3.8)$$

$$F = b_0 + b_1N + b_2Z + b_3N^2 + b_4Z^2 + b_5Z.N \quad (3.9)$$

A medição da posição da haste da bomba injetora (Z) depende de qual equipamento está sendo utilizado e a expressão da potência indica uma potência não nula para $N = 0$ ou para qualquer rotação máxima livre.

McKiernan et al (1987), citados por HARRIS e PEARCE (1990), investigaram o uso da diferença de temperatura (ΔT) e a duração da abertura do bico injetor (D) para a estimação da potência e do consumo horário. Concluíram que ΔT respondia lentamente à variação das condições de operação, concordando com KIRSTE et al (1985), e para D concluíram ter obtido uma boa correlação.

As expressões derivadas foram:

$$\tau = a_0 + a_1N + a_2D + a_3N.D + a_4N^{0.5} \quad \text{e,} \quad (3.10)$$

$$F = b_0 + b_1N + b_2D + b_3N.D \quad (3.11)$$

A Equação 3.10 não satisfaz a condição $\tau = 0$ e $D = 0$, como esperado. Similarmente, o consumo não é nulo para $D = 0$.

SOUZA e MILANEZ (1988) estudaram três métodos para determinação indireta do torque desenvolvido pelo motor Diesel. Foram utilizados tratores agrícolas com motores distintos. Os dados foram obtidos através da tomada de potência do trator (TDP) e corrigidos para a condição atmosférica padrão. Os métodos estudados foram o da medição do consumo horário de combustível, da medição da diferença de temperatura entre os gases de escape e de admissão do motor e da posição do acionamento da bomba injetora.

Em todos os casos foi observado uma dependência do torque em função da rotação desenvolvida pelo motor, conforme já havia sugerido KIRSTE et al (1985), quando estudaram a estimação do torque em função da posição da haste de regulagem da bomba injetora. Fato também notado por PANG et al (1985), quando estudaram a diferença de temperatura dos gases de escape em função do consumo horário de combustível.

Para o método da medição do consumo horário de combustível foi realizada uma regressão linear múltipla e obtida a seguinte equação, para a estimação do torque (τ);

$$\tau = a_0 + a_1G + a_2G^2 + a_3N + a_4N^2 \quad (3.12)$$

onde:

G - massa de combustível injetada por cilindro e por ciclo,

a_0 a a_4 - coeficientes determinados pelos testes de desempenho de cada motor.

Todos os motores estudados apresentaram o torque estimado em função do consumo horário de combustível e da rotação com coeficientes de determinação múltipla superiores a 0,998.

Os autores mencionam que este método é o de maior precisão e também de maior custo, concordando portanto, com o afirmado por KIRSTE et al (1985).

Nota-se que a expressão proposta não satisfaz a condição de torque nulo ($\tau = 0$) quando a massa de combustível consumida for nula ($G = 0$), ou mesmo, quando a rotação desenvolvida (N) for a máxima sem carga, ou seja, a máxima rotação admitida pelo governador da bomba injetora ($N = Z$).

O método da diferença de temperatura entre os gases de escape e de admissão do motor (ΔT) permitiu estabelecer a seguinte equação para a estimação do torque (τ);

$$\tau = b_0 + b_1\Delta T + b_2\Delta T^2 + b_3N.\Delta T + b_4N^2 \quad (3.13)$$

onde:

b_0 a b_4 - coeficientes determinados pelos testes de desempenho de cada motor.

Todos os motores estudados apresentaram o torque estimado em função da diferença de temperatura e da rotação com coeficientes de determinação múltipla superiores a 0,995.

Neste caso, a condição satisfeita deveria ser a de $\tau = 0$ para $\Delta T = 0$ ou $N = Z$, o que não ocorre com a utilização da equação proposta.

O método da medição da posição da haste de regulação da bomba injetora foi realizado para duas zonas de operação do motor, a curva de débito máximo e a curva de atuação do governador da bomba injetora.

Para o motor naturalmente aspirado obteve-se, respectivamente:

$$\tau = d_0 + d_1N + d_2N^2 \quad \text{e,} \quad (3.14)$$

$$\tau = h_0 + h_1N + h_2Z \quad (3.15)$$

Para o motor turbo-alimentado obteve-se, respectivamente;

$$\tau = d_0 + d_1N + d_2N^2 + d_3N^3 \quad \text{e,} \quad (3.16)$$

$$\tau = h_0 + h_1N + h_2Z + h_3Z^2 \quad (3.17)$$

onde:

Z - máxima rotação livre para uma dada posição de acionamento da bomba injetora,

d_0 a d_3 e h_0 a h_3 - coeficientes determinados pelos testes de desempenho de cada motor.

A correlação para os testes realizados para a zona de torque máximo possui um coeficiente de determinação múltipla médio de 0,981 e, para a zona de atuação do regulador da bomba injetora, este coeficiente foi de 0,954.

Neste método, deve-se aplicar as duas equações para um dado N e Z e o torque estimado será aquele de menor valor obtido.

Aqui, mais uma vez, a condição esperada de $\tau = 0$ quando $N = 0$ ou $N = Z$, não é satisfeita pelas equações propostas. Os autores apresentam este método como sendo o mais apropriado e de menor custo, pois necessita somente da medição da rotação, porém para sua perfeita aplicação em sistemas de monitoramento de desempenho de motores Diesel é necessário a medição de Z , o que implica em alguma adaptação no equipamento utilizado. Uma solução seria o uso de uma medição semelhante àquela utilizada por PANG et al (1985).

CAPPELLI (1990), com a finalidade de levantar dados para a construção de um sistema de informação ao operador, estudou a correlação entre o torque, a potência, o consumo horário e o consumo específico em função da diferença de temperaturas e da rotação do motor. Para o estabelecimento desta correlação utilizou-se de um trator agrícola acoplado através da tomada de potência (TDP) a um freio dinamométrico.

O autor, assim como outros já haviam anteriormente sugerido, observou a ocorrência de relações lineares entre o torque, a potência e o consumo horário em relação à diferença de temperatura, para cada nível de rotação, o que permitiu a obtenção de relações matemáticas através de uma regressão linear múltipla.

Para o consumo específico, o autor observou a ocorrência de uma relação não linear em função da diferença de temperatura, para cada nível de rotação.

Uma análise de variância foi realizada para os dados do torque (τ), potência (P) e consumo horário (F) e apresentaram, respectivamente, coeficientes de determinação múltiplas de 99,83 %, 99,78 % e 99,86 %. Já as equações obtidas pelas regressões lineares múltiplas foram:

$$\tau = a_0 + a_1\Delta T + a_2N + a_3\Delta T^2 + a_4N^2 + a_5\Delta T.N \quad (3.18)$$

$$P = b_0 + b_1\Delta T + b_2N + b_3\Delta T^2 + b_4N^2 + b_5\Delta T.N \quad (3.19)$$

$$F = c_0 + c_1\Delta T + c_2N + c_3\Delta T^2 + c_4N^2 + c_5\Delta T.N \quad (3.20)$$

onde:

a_i, b_i, c_i - coeficientes obtidos através do ensaio do motor.

O autor concluiu que o desempenho do motor, definido pelo seu ponto de operação, pode perfeitamente ser determinado pela diferença de temperatura e da rotação e pela aplicação das equações propostas, e que a resposta lenta às variações de temperatura não era crítico para a construção do sistema de informação.

Contudo, o equacionamento matemático proposto também não satisfaz as condições de $\tau = 0$, $P = 0$ e $F = 0$ para $\Delta T = 0$ ou $N = 0$.

HARRIS e PEARCE (1990) realizaram um trabalho cujo objetivo principal era de desenvolver um modelo que estimasse o torque, a potência e o consumo horário, usando medições simples das variáveis independentes Z e N .

O modelo procurado deveria, ainda, ser universalmente aplicável, incorporando coeficientes específicos de cada tipo de motor e a quantidade de dados requeridos para a determinação destes coeficientes, deveria ser minimizada a fim de reduzir o trabalho de levantamento de dados através da TDP do trator.

Seguindo o sugerido por JAHNS (1983), os autores estabeleceram uma precisão de $\pm 5\%$ como sendo aceitável na aplicação do método.

O modelo baseia-se nas seguintes hipóteses básicas:

- 1 - a curva de máxima rotação governada e do máximo débito se interceptam no ponto de potência nominal do motor;

- 2 - os motores de mesmo modelo possuem a mesma curva de débito máximo, desde o ponto de torque máximo até o ponto de potência nominal;
- 3 - nos motores de mesmo modelo, o ponto de operação pode se deslocar à esquerda e à direita de uma curva de rotação governada qualquer; e
- 4 - que qualquer curva de rotação governada pode ser definida pela rotação livre do motor ($\tau = 0$), denotada por Z .

Testes realizados mostraram que para qualquer curva de rotação governada, o torque e o consumo são funções da queda de rotação (ΔN) em relação a Z . Isto sugeriu que o modelo deveria ser investigado com o uso de N e Z como variáveis independentes.

Sabendo-se que $N = Z - \Delta N$, o modelo pode então ser utilizado através da medição de N e da determinação de Z através da medição da posição da haste de acionamento da bomba injetora.

O plano $\tau - N$ do mapa de desempenho do motor, mostrado na Figura 3.4, pode ser substituído pelo $\Delta N - Z$. A curva de máxima rotação governada tornou-se a curva $Z = Z_{\max}$, a curva de débito máximo tornou-se a curva $\Delta N = f(Z)$, a curva de mínima rotação governada tornou-se $Z = Z_{\min}$ e, finalmente, o eixo da rotação tornou-se $\Delta N = 0$, como mostra a Figura 3.5.

Seguindo a modelagem de JAHNS (1983), os autores escreveram as expressões que se seguem para o consumo horário, a potência e o torque.

$$F = (b_{11}Z + b_{12}Z^2 + b_{13}Z^3) + (b_{21} + b_{22}Z^2 + b_{23}Z^3) \cdot \Delta N + (b_{31}Z + b_{32}Z^2 + b_{33}Z^3) \cdot \Delta N^2 \quad (3.21)$$

ou, para Z constante,

$$F = b_1 + b_2 \Delta N + b_3 N^2 \quad (3.22)$$

Esta expressão satisfaz a condição de que $F = f(Z)$ para $\Delta N = 0$, isto é, o consumo horário de combustível é usado para suprir as perdas internas do motor quando o torque de saída for nulo.

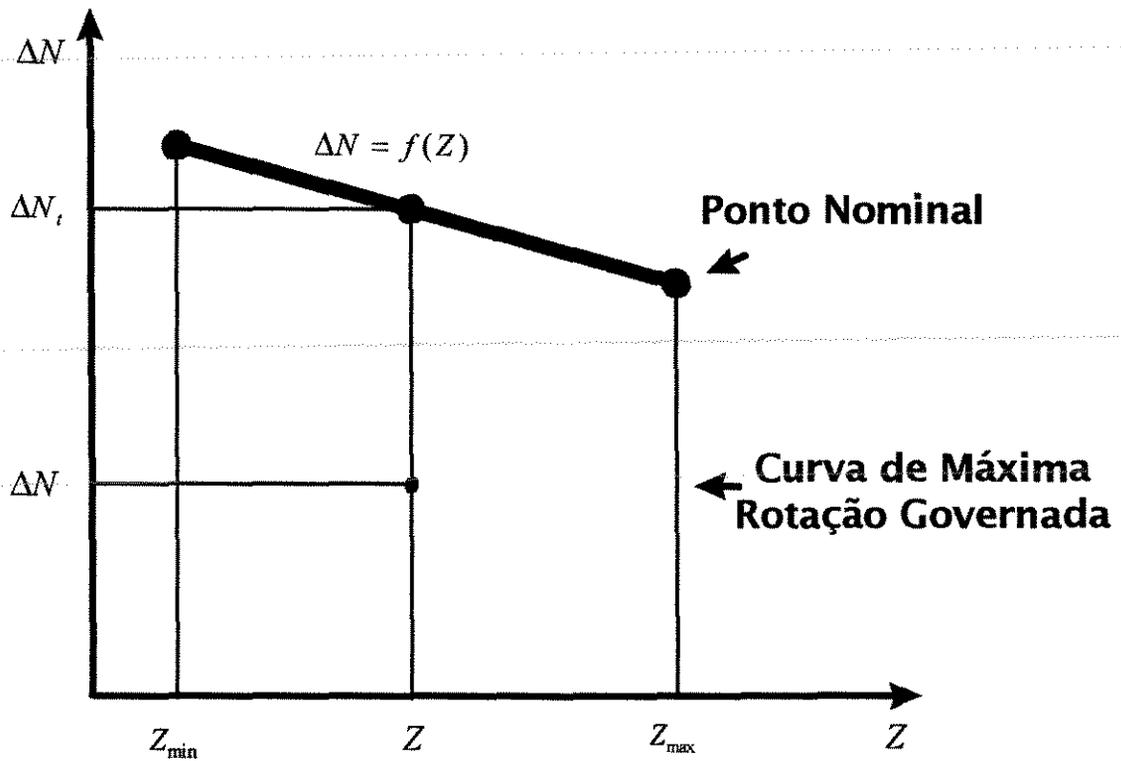


FIG. 3.5 - Curvas de contorno do desempenho do motor Diesel governado no plano $\Delta N - Z$

$$P = (a_{11} \Delta N + a_{12} \Delta N^2 + a_{13} \Delta N^3) + (a_{21} \Delta N + a_{22} \Delta N^2 + a_{23} \Delta N^3) \cdot Z + (a_{31} \Delta N + a_{32} \Delta N^2 + a_{33} \Delta N^3) \cdot Z^2 \quad (3.23)$$

ou, para ΔN constante,

$$P = a_1 + a_2 Z + a_3 Z^2 \quad (3.24)$$

Esta expressão satisfaz a condição de potência nula ($P = 0$) para $\Delta N = 0$, isto é, para torque nulo.

$$\begin{aligned} \tau = & (c_{11}\Delta N + c_{12}\Delta N^2 + c_{13}\Delta N^3) + (c_{21}\Delta N + c_{22}\Delta N^2 + c_{23}\Delta N^3).Z + \\ & + (c_{31}\Delta N + c_{32}\Delta N^2 + c_{33}\Delta N^3).Z^2 \end{aligned} \quad (3.25)$$

ou, para ΔN constante,

$$\tau = c_1 + c_2 Z + c_3 Z^2 \quad (3.26)$$

Esta expressão satisfaz a condição de torque nulo para ΔN nulo.

Os coeficientes a_{ij} , b_{ij} e c_{ij} podem ser determinados através de nove pontos tomados no ensaio da TDP, ou usando-se uma técnica de ajustagem multilinear para um grande número de pontos medidos. Estes pontos devem, preferencialmente, incluir os valores correspondente a $\Delta N = 0$ e o ponto de intersecção das curvas de rotação governada e de débito máximo e, ainda, ser distribuídos uniformemente na região de operação do motor.

Cinco curvas de rotação governada, com cinco pontos em cada uma, devem ser suficientes para se ter uma boa ajustagem quando se deseja obter os nove coeficientes para cada variável. Neste caso, os valores típicos de r^2 para a ajustagem do torque, potência e consumo horário estão na faixa de 0,99 a 0,999.

O modelo foi testado em três tratores distintos e obteve bons resultados.

CAPPELLI e SVERZUT (1993) analisando os métodos indiretos de determinação do torque desenvolvido pelos motores Diesel concluíram que o método proposto por HARRIS e PEARCE (1990), além de ser uma

solução universal, necessita apenas de 25 pontos de medição, enquanto os outros apresentados necessitam usualmente de 50 a 250 pontos de medidas.

Nota-se que dentre os métodos indiretos de determinação do desempenho dos motores Diesel, aplicados a tratores agrícolas, este último é o que apresenta maior facilidade para a implementação de um controlador eletrônico, pois necessita da medição apenas de Z e de N para a obtenção dos demais parâmetros de operação do motor.

3.4 - Determinação do ponto ótimo de operação

O ponto ótimo de operação do motor pode ser definido como sendo aquele que, para um determinado nível de potência constante, o torque e a rotação assumem valores que tornam mínimo o consumo específico de combustível.

A determinação do ponto de operação otimizado do motor Diesel pode, segundo WANG e ZOERB (1989), ser obtido por dois métodos distintos.

O primeiro método baseia-se no Teorema da Razão Constante e que o consumo horário de combustível pode ser expresso pela equação de JAHNS (1983) modificada para:

$$F = c_1N + c_2N^2 + c_3N^3 + c_4N \cdot \tau + c_5N^2 \cdot \tau + c_6N^3 \cdot \tau + c_7N \cdot \tau^2 \quad (3.27)$$

O consumo específico de combustível pode ser expresso por:

$$F_s = \frac{F}{P} = \frac{f(N, \tau)}{P} \quad (3.28)$$

O consumo e a potência são funções do torque e da rotação. Para um nível constante de potência, o torque é função da rotação. Então, o consumo específico é função somente da rotação.

O consumo específico mínimo para um determinado nível de potência pode ser encontrado pela diferenciação da Equação 3.28 com respeito a N e igualando-se a zero.

$$\left. \frac{d\tau}{dN} \right|_P = - \frac{\frac{\partial f(N, \tau)}{\partial N}}{\frac{\partial f(N, \tau)}{\partial \tau}} \quad (3.29)$$

Para uma dada potência, o consumo específico é mínimo se a Equação 3.29 for satisfeita. Uma expressão alternativa para o lado direito da Equação 3.29 pode ser encontrada mantendo-se F constante, então, τ varia com N de acordo com a Equação 3.27. Diferenciando-se a Equação 3.27 com respeito a N , o resultado é:

$$0 = \frac{\partial f(N, \tau)}{\partial N} + \frac{\partial f(N, \tau)}{\partial \tau} \cdot \left. \frac{d\tau}{dN} \right|_F \quad \text{ou,} \quad (3.30)$$

$$\left. \frac{d\tau}{dN} \right|_F = - \frac{\frac{\partial f(N, \tau)}{\partial N}}{\frac{\partial f(N, \tau)}{\partial \tau}} \quad (3.31)$$

onde:

$\left. \frac{d\tau}{dN} \right|_F$ - derivada do torque em relação a rotação para o consumo constante.

Das Equações 3.29 e 3.31, a seguinte relação é obtida:

$$\frac{d\tau}{dN}\Big|_P = \frac{d\tau}{dN}\Big|_F \quad (3.32)$$

A Equação 3.32 mostra que se o motor opera em um ponto otimizado, a inclinação da curva $\tau - N$ para a potência constante e a inclinação da curva $\tau - N$ para o consumo constante, são iguais. Disto decorre o Teorema da Razão Constante.

Para a obtenção da equação da curva $\tau - N$ otimizada, assume-se que F é constante, e, diferenciando-se a Equação 3.27 com respeito a N , rearranjando-se têm-se a equação:

$$\frac{d\tau}{dN}\Big|_F = \frac{c_1 + 2c_2N + 3c_3N^2 + (c_4 + 2c_5N + 3c_6N^2) \cdot \tau + c_7\tau^2}{c_4N + c_5N^2 + c_6N^3 + 2c_7N \cdot \tau} \quad (3.33)$$

Como a potência é função do torque e da rotação, pode ser expressa por:

$$P = \beta \cdot N \cdot \tau \quad (3.34)$$

Assumindo-se P constante, diferenciando-se a equação acima com respeito a N e rearranjando, resulta em:

$$\frac{dT}{dN}\Big|_P = -\frac{\tau}{N} \quad (3.35)$$

Através das Equações 3.31, 3.32 e 3.34, tem-se que:

$$\frac{\tau}{N} = \frac{c_1 + 2c_2N + 3c_3N^2 + (c_4 + 2c_5N + 3c_6N^2) \cdot \tau + c_7\tau^2}{c_4N + c_5N^2 + c_6N^3 + 2c_7N \cdot \tau} \quad (3.36)$$

Rearranjando, tem-se:

$$c_7\tau^2 - (c_3N + 2c_6N^2)\tau - (c_1 + 2c_2N + 3c_3N^2) = 0 \quad (3.37)$$

A Equação 3.37 é tida como a equação otimizada de $\tau - N$. Um exemplo de aplicação pode ser observado na Figura 3.6.

A Equação 3.37 é utilizada para se obter a rotação otimizada para um dado torque. Para aplicação em sistemas de informação ao operador, ou mesmo sistemas semi ou totalmente automatizados, seria mais conveniente se obter a rotação otimizada para uma dada potência. Neste caso, τ pode ser substituído por $P/\beta N$.

A obtenção da Equação 3.37 é relativamente complicada e não pode ser obtida sem testes dinamométricos, além de que, dentro do plano $\tau - N$ de utilização do motor, a Equação 3.37 é apropriada apenas para uma faixa intermediária de potência.

Um método simples que não requer estes testes é o segundo método apresentado por WANG e ZOERB (1989), que consiste numa aproximação da equação $\tau - N$ otimizada.

Como se nota, a Equação 3.37 não é linear, o segundo método aproxima a Equação 3.37 a uma reta passando por dois pontos, o primeiro definido como sendo aquele em que a rotação é 80 % da nominal e o torque 100 % do nominal, o segundo ponto é definido como sendo aquele em que a rotação é 50 % da nominal e o torque 65 % do nominal.

A reta otimizada passa então pelos pontos $(N, \tau) = (80\%, 100\%)$ e $(N, \tau) = (50\%, 65\%)$. Em geral a equação otimizada de $\tau - N$ é expressa como sendo:

$$\frac{N}{N_n} = 0,86 \cdot \frac{\tau}{\tau_n} - 0,06 \quad (3.38)$$

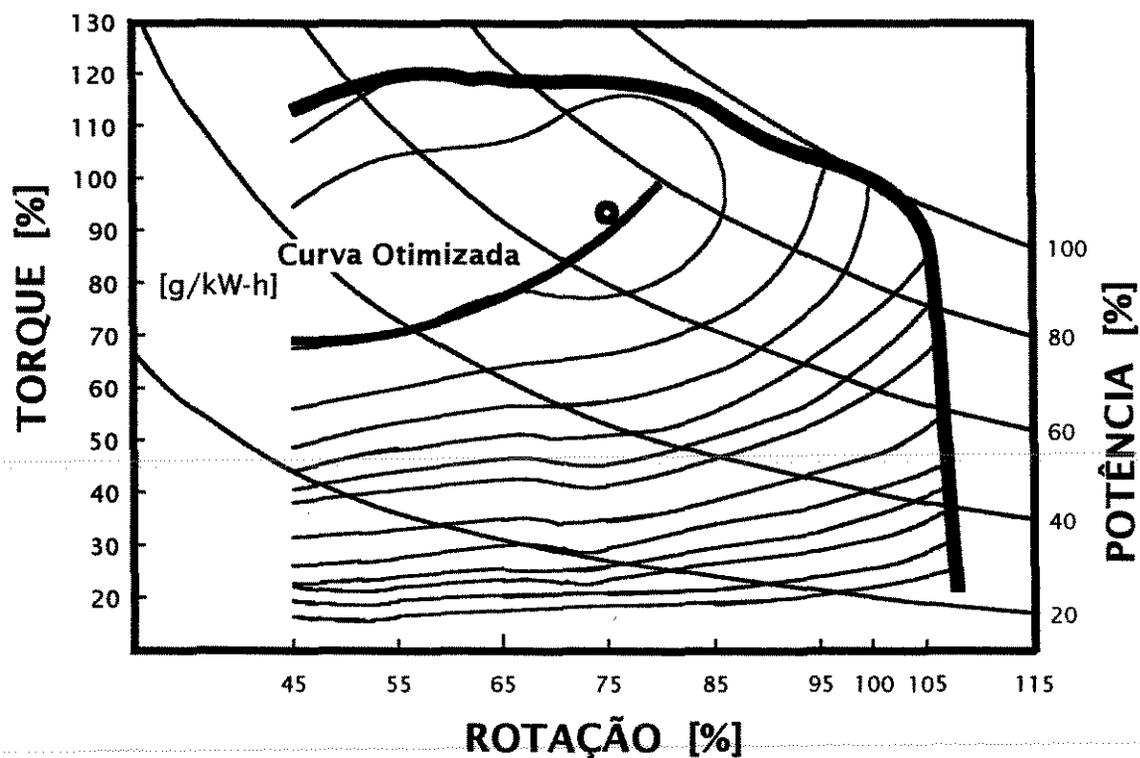


FIG. 3.6 - Curvas de desempenho, típica de um motor Diesel, mostrando a curva da equação $\tau - N$ otimizada

A reta aproximada pode ser observada no exemplo da Figura 3.7.

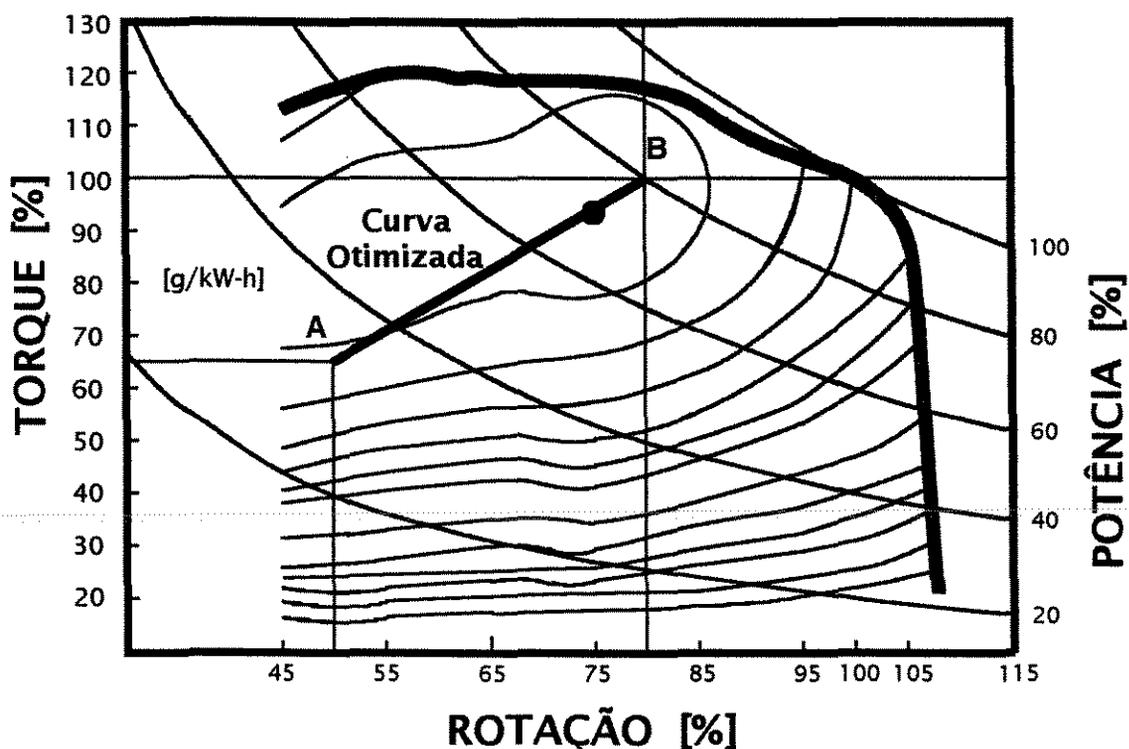


FIG. 3.7 - Curva de desempenho, típica de um motor Diesel, mostrando a reta aproximada para a otimização de $\tau - N$

Os autores afirmaram que a Equação 3.28 deve ser utilizada como uma referência para a operação otimizada dos motores Diesel, não definindo, portanto, um ponto exato de máxima eficiência. Afirmaram ainda, que sob as condições de operação do trator agrícola, a equação pode ser aplicada na maioria dos casos.

Nota-se, porém, que a reta aproximada, a exemplo do método da razão constante, contempla apenas uma faixa intermediária de potência. Operações cujo requerimento de potência estão fora desta faixa não podem portanto ser otimizadas por um destes métodos.

GUI et al (1989) apresentaram um critério para controlar o trator agrícola, com motor Diesel acoplado a uma transmissão de variação contínua, tal que o motor opera ao longo de uma curva otimizada de operação.

Os autores mencionam que o governador convencional do motor controla a rotação somente para os conjuntos de pares (rotação,torque) entre os pontos A e B, mostrados na Figura 3.8, enquanto que entre os pontos B e C o motor opera apenas em sobrecargas momentâneas. A curva otimizada de operação é estabelecida com início no ponto D, com o motor na rotação de marcha lenta, e sobe rapidamente até o ponto E, entre o ponto E e F, a curva otimizada percorre uma região de baixo consumo específico, e entre os pontos F e B, o motor opera em sua máxima capacidade de fornecimento contínuo de torque.

Observa-se que a curva otimizada de operação foi acrescida dos segmentos D - E e B - F em relação ao proposto por WANG e ZOERB (1989), contudo os autores não discutem os fundamentos para a adoção deste critério.

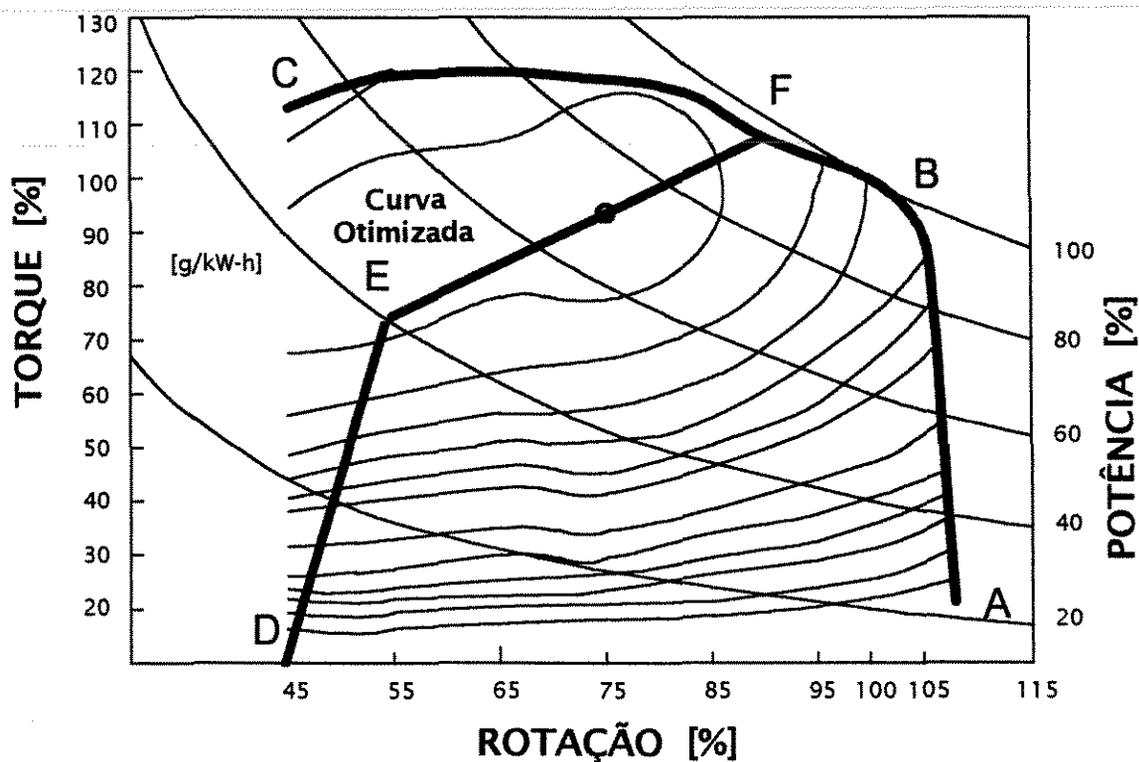


FIG. 3.8 - Curva otimizada proposta por GUI et al (1989)

SOUZA e SANTA CATARINA (1994) estudaram as curvas otimizadas propostas por WANG e ZOERB (1989) baseadas no teorema da razão constante e na reta aproximada e sugeriram uma outra curva otimizada que denominaram nova aproximação. Esta nova aproximação linear passa pelo ponto nominal do motor, ou seja, rotação e torque de potência máxima e pelos pontos de 50 % da rotação nominal e 80 % do torque nominal. Para isto, os autores basearam-se na observação de motores testados e nas hipóteses que a curva otimizada de operação tem o comportamento de uma linha reta e que esta curva intercepta a curva torque-rotação, para o motor totalmente acelerado, próximo ao ponto de potência máxima.

Os autores concluíram que a curva denominada de nova aproximação linear fornece uma boa precisão com um desvio médio de 0,1 %.

CAPPELLI e SVERZUT (1993) mencionam que aqui, como nas demais áreas da ciência, não existe uma solução única, onde os resultados são maximizados e os custos/dificuldades são minimizados, uma solução de compromisso deve ser escolhida em função das finalidades a que se destina.

Se uma solução universal, com um menor grau de precisão, for procurada, uma combinação do método de HARRIS e PEARCE (1990) com o ponto de operação otimizado sugerido pelo método da Reta Aproximada de WANG e ZOERB (1989) poderia ser uma boa escolha.

Se o que se procura é fazer simulações mais precisas, um método indireto que se utiliza do consumo horário de combustível em combinação com a equação do ponto de operação otimizado, baseado no Teorema da Razão Constante, proposto por WANG e ZOERB (1989), poderia ser a melhor opção.

Contudo, nota-se que para operação, dentro de um critério de economia de energia, a níveis de potência abaixo da faixa contemplada

com a curva dos pontos otimizados, deve-se considerar a possibilidade de utilização da técnica marcha para cima - acelerador para baixo, mencionada por SCHROCK et al (1986).

Para a finalidade de implementação de um controle eletrônico do motor, qualquer uma das soluções apresentadas, não possibilita a operação do motor em toda sua faixa útil de potência, com exceção da formulada por GUI et al (1989), que mesmo assim apresenta a desvantagem de não ser contínua.

3.5 - Sistema de controle

3.5.1- Introdução

FRANKLIN et al (1986) mencionam que a palavra controle possui um conceito muito geral. O termo pode ser usado para se referir a circunstância puramente humana e às vezes um tanto vaga, pode também se referir a uma interação homem-máquina específica, como na condução de um automóvel onde é necessário o controle do veículo, ou finalmente, pode ainda envolver somente a máquina, como no controle ambiental onde podemos usar um aquecedor para manter a temperatura dentro de limites desejados no inverno ou um aparelho de ar-condicionado, para o mesmo fim, durante o verão. Nos últimos dois casos as variáveis sujeitas a algum tipo de controle é vasta, sendo limitada somente pela imaginação. Nos mecanismos, por exemplo, o controle tem sido aplicado a posições, velocidades, forças, etc. Já no corpo humano, ainda como exemplo, tem sido aplicado na pressão sanguínea, quantidade de açúcar no sangue, diâmetro da pupila dos olhos, etc.

Já OGATA (1990) coloca que o controle automático tem tido um papel de vital importância no avanço da engenharia e da ciência. Em

adição à sua importância nos veículos espaciais, mísseis, pilotos automáticos de aeronaves, sistemas robotizados e outros, o controle automático tem sido parte integrante e essencial dos modernos processos industriais e de manufatura.

FRANKLIN e POWELL (1980) classificam que o controle de sistemas físicos podem ser do tipo contínuo (analógico) ou do tipo discreto (digital). Os controles do tipo digital tem ultimamente sido largamente utilizados dado sua flexibilidade e disponibilidade de microprocessadores e microcontroladores para sua implementação.

O processo a ser controlado é chamado de planta ou de sistema físico e pode ser qualquer processo cuja resposta satisfatória dependa da atuação do controlador. No presente estudo, o controle deverá atuar no motor do trator agrícola que será denominado, de agora em diante, como sistema físico, quando o assunto for seu controle.

Entende-se por resposta satisfatória que a saída do sistema físico deve ser forçada a seguir um sinal de referência de entrada apesar da presença de perturbações na operação. É ainda essencial que a saída siga o sinal de referência mesmo se a dinâmica do sistema físico mudar ligeiramente durante a operação. O processo de manter a saída próxima ao sinal de referência é denominado geralmente como o processo de regulação. Um sistema que tenha regulação adequada, na presença de perturbações, é um sistema com uma apropriada rejeição à perturbação. Um sistema que tenha regulação adequada em face às mudanças nos parâmetros do sistema físico é um sistema com baixa sensibilidade a estes parâmetros. Um sistema que tenha uma adequada rejeição à perturbação e baixa sensibilidade é chamado de robusto.

A maneira pela qual se obtém uma regulação robusta é através do controle das entradas do sistema físico. Isto é conseguido de forma vantajosa com a utilização de um sistema de controle de malha fechada ou de realimentação. Um sistema de controle de malha fechada ou de

realimentação é aquele em que a saída do sistema físico é medida e comparada diretamente com o sinal da entrada da referência. Aqui o termo sistema de controle de malha fechada será preferido em relação ao sistema de controle com realimentação.

3.5.2 - Breve histórico

PHILLIPS e HARBOR (1991) mencionam que um dos primeiros sistemas de controle que se tem notícia, data do segundo século antes de Cristo e refere-se a um relógio de água. Neste relógio o tempo era determinado pela medição dos pingos de água, a uma taxa constante, proveniente de um reservatório com um orifício. Para assegurar um intervalo de tempo constante entre os pingos de água foi necessário manter o nível do reservatório constante. Isto pode ser obtido pelo uso de uma válvula flutuante que servia como sensor e atuador do sistema de controle (sistemas semelhantes são até hoje utilizados nos reservatórios domiciliares de água). Os pingos de água eram retidos em um recipiente graduado onde se podia ter a relação entre a quantidade de água acumulada e o tempo transcorrido (este princípio de integração é até hoje utilizado nos computadores digitais).

Diversos foram os sistemas de controles inventados desde o utilizado no relógio de água até o advento da máquina a vapor, porém um marco na história foi o controle da rotação destas últimas pelo governador centrífugo de Thomas Mead em 1787. Matthew Boulton e James Watt inventaram em 1788 um governador que utilizava o princípio da força centrífuga atuando em duas massas (esferas) que se distanciavam quando a rotação no eixo da máquina a vapor aumentava, fazendo com que um mecanismo atuasse em uma válvula na linha de vapor diminuindo o fluxo, o que causava a diminuição da rotação. Uma diminuição da rotação fazia com que a válvula abrisse e o fluxo de vapor

aumentasse, que por sua vez aumentava a rotação. Este sistema de controle permitia uma pequena flutuação em torno do valor desejado. Para eliminar esta instabilidade, foi necessário modelar matematicamente o dispositivo físico; isto é, foram necessárias equações matemáticas cujas soluções descrevessem a operação do dispositivo. Estas necessidades precederam as atuais de modelamento matemático, análise e projeto.

OGATA (1990) apresenta o regulador centrífugo de James Watt como sendo o primeiro trabalho significativo no controle automático. Outros trabalhos relevantes o autor atribui a: Minorsky, em 1922, que desenvolveu controladores para navegação e mostrou como a estabilidade poderia ser determinada através de equações diferenciais que descrevem o sistema; a Nyquist, em 1932, que desenvolveu um procedimento relativamente simples para determinar a estabilidade de um sistema de malha fechada com base na resposta de um sistema de malha aberta a uma entrada senoidal e, finalmente, a Hazen, em 1934, que discutiu o projeto de servomecanismo para sistemas de controle de posição.

O mesmo autor menciona que durante a década de 1940, os métodos de resposta de frequência tornaram possível o projeto de sistemas lineares de controle de malha fechada. Entre o fim da década de 1940 e início da de 1950, o método de localização das raízes de Evans foi totalmente desenvolvido.

Os métodos da resposta de frequência e da localização das raízes, que formam a essência da teoria clássica de controles, conduzem a sistemas que são estáveis e satisfazem critérios de desempenho que são mais ou menos arbitrários. Tais sistemas são, em geral, aceitáveis, mas não de alguma forma otimizados. Desde a década de 1950 a ênfase do projeto tem mudado para projetos de sistemas, de alguma maneira, otimizados.

Como os equipamentos modernos estão se tornando cada vez mais complexos, a descrição dos sistemas de controle moderno requer um grande número de equações. A teoria clássica de controle, que lida com sistemas de uma única entrada e uma única saída, torna-se imprópria para sistemas com múltiplas entradas e saídas. Desde a década de 1960, devido a disponibilidade de computadores digitais, tornou-se possível a análise de sistemas complexos no domínio do tempo, fazendo com que a teoria moderna de controles, que se baseia na análise e síntese no domínio do tempo fazendo uso de variáveis de estado, se desenvolvesse para competir com a crescente complexidade dos sistemas físicos e os rigorosos requerimentos de precisão, peso e custos das aplicações militares, espaciais e industriais.

Recentes desenvolvimentos na teoria moderna de controle estão no campo da otimização de controles dos sistemas determinísticos e estocásticos, bem como nos controles adaptativos e auto-ajustáveis de sistemas complexos.

3.5.3 - Modelagem matemática

PHILLIPS e HARBOR (1991) mencionam que o modelo matemático de um sistema é definido como sendo um conjunto de equações usado para representar um sistema físico. Mencionam ainda, que deve-se entender que nenhum modelo matemático de um sistema físico é exato e que pode-se melhorar a precisão de um modelo pelo aumento da complexidade das equações, mas nunca se obtém a exatidão. Segundo os autores, normalmente esforça-se em obter um modelo adequado para o problema sem que o mesmo seja excessivamente complexo.

OGATA (1990) apresenta o modelo matemático como sendo a primeira e mais importante etapa na análise de um sistema dinâmico. O modelo matemático pode assumir diversas formas. Segundo o autor,

dependendo-se da particularidade do sistema, uma determinada representação matemática pode ser mais conveniente do que outras. Ainda menciona que, em problemas de otimização de controles, com algoritmos implementados com auxílio de computadores, é quase sempre vantajoso usar um conjunto de equações diferenciais de primeira ordem. Já para a análise de resposta transiente ou análise de resposta em frequência de sistemas de uma única entrada e uma única saída, entende que a representação através de funções de transferência (fdt) poderá ser mais conveniente.

O autor conclui que deve-se procurar uma solução de compromisso entre a simplicidade e a precisão do modelo e que, se uma extrema precisão não for necessária, pode ser preferível a obtenção somente de um modelo razoavelmente simplificado que seja adequado para o problema sob consideração.

Conclui ainda que na simplificação de modelos matemáticos frequentemente é necessário ignorar certas propriedades físicas inerentes ao sistema. Se, por exemplo, os efeitos causados na resposta dinâmica forem pequenos, será obtido um bom ajuste entre os resultados da análise do modelo matemático e do resultado dos estudos experimentais do sistema físico.

OGATA (1987) menciona a existência de duas abordagens para a obtenção do modelo matemático de um sistema físico. Uma delas é a obtenção do modelo baseado nas leis físicas e a outra é através do uso da experimentação. De forma geral, contudo, pode não ser possível obter um modelo preciso somente aplicando-se as leis físicas, devendo-se, alguns parâmetros do sistema físico, serem determinados experimentalmente.

Menciona ainda que, a técnica de construção de modelos matemáticos e a estimativa de parâmetros com valores otimizados por meio de experimentos é chamada identificação do sistema. Um modelo

matemático envolvendo parâmetros é tido como sendo uma descrição paramétrica do sistema físico.

Segundo o autor, a determinação de modelos matemáticos de um sistema, através da abordagem da resposta de frequência, não é um problema de identificação do sistema, já que a função de transferência do sistema físico é obtida como função da frequência e, portanto, a curva de resposta de frequência não é paramétrica.

O autor menciona que, dado os objetivos do projeto, deve-se escolher o modelo matemático que descreva razoavelmente o comportamento dinâmico do sistema físico e que se utilize do menor número de parâmetros possíveis. O problema de estimativa dos parâmetros do modelo é então formulado como um problema de otimização e deve minimizar ou maximizar um determinado índice de desempenho.

LJUNG (1987) enfatiza que a maioria dos campos da engenharia baseia-se em modelos matemáticos para realizar bons projetos. Estes modelos são também instrumentos para a realização de simulações e previsões. Os modelos podem possuir várias formas e serem expressos por diversos graus de formalismo matemático. Este formalismo deverá ser determinado de acordo com a utilização a que se destina.

Os modelos matemáticos podem ser identificados como: contínuos ou discretos no tempo; concentrado ou distribuído; determinístico ou estocástico; linear ou não linear; etc., dependendo das equações diferenciais ou das equações das diferenças utilizadas.

O autor menciona que há dois caminhos, ou uma combinação entre eles, para se obter um modelo matemático.

O primeiro caminho consiste em se dividir o sistema em vários subsistemas, cujas propriedades são bem conhecidas através de experiências anteriores. Isto significa que se baseia em leis da natureza ou em relações bem estabelecidas, cujas raízes estão em trabalhos

empíricos. Os subsistemas são unidos matematicamente formando um modelo global do sistema. Este caminho é chamado de modelagem e não necessariamente envolve qualquer experimentação com o sistema real. Técnicas que consistem na subdivisão do sistema em diagramas de blocos, com blocos constituídos de elementos individuais, para posterior reestruturação, através do uso de computadores, estão cada vez mais sendo usadas e resultam em um modelo computacional ao invés de um modelo matemático.

O segundo caminho é baseado na experimentação. Sinais de entrada e saída do sistema são registrados e submetidos a uma análise a fim de se inferir um modelo. Este caminho é conhecido como identificação do sistema.

3.5.4 - Identificação do sistema

COUGHANOWR e KOPPELL (1965) mencionam a existência de diversos casos, onde a obtenção de uma função de transferência não pode ser facilmente derivada por causa da complexidade dos processos envolvidos e do seu entendimento incompleto. Nestes casos, a função de transferência do processo pode ser obtida através de testes dinâmicos.

Os autores mencionam que para os processos lineares com uma fdt, $G(s)$, a resposta a uma excitação senoidal é determinada simplesmente por $G(j\omega)$, o que sugere imediatamente que o processo inverso, ou seja, a obtenção de $G(s)$ através de $G(j\omega)$ seja uma maneira experimental de determinação de $G(s)$, denominado método da resposta em frequência.

Devido a não linearidade da maioria dos processos, o método da resposta em frequência só pode ser aplicado com uma amplitude suficientemente pequena para que o processo responda

aproximadamente de forma linear, fazendo com que a resposta seja uma onda senoidal de mesma freqüência da excitação.

Do ponto de vista comercial os testes necessários consomem muito tempo e possuem dificuldades experimentais, já que, devem ser repetidos a diversas freqüências e devem ser mantidos por um tempo suficiente para que os transientes sejam eliminados e somente a resposta de freqüência seja observada.

Os autores Lees e Hougen (1956), citados por COUGHANOWR e KOPPELL (1965), demonstraram que virtualmente os mesmos resultados podem ser obtidos pelo método do teste com uma perturbação impulsiva.

Os autores mencionam que o método do teste impusivo consiste em introduzir no processo uma perturbação de forma arbitrária, que afasta o processo momentaneamente de seu regime permanente, mas que seja suficientemente pequeno para que se tenha assegurado a operação na faixa linear.

O teste com uma perturbação impulsiva é experimentalmente mais conveniente mas requer um maior esforço computacional.

Outro teste relativamente simples de ser realizado para descrever o comportamento dinâmico de um processo é o teste da função degrau, onde a fdt $G(s)$ é obtida pela curva de resposta no tempo a uma excitação do tipo degrau. As constantes da fdt podem ser obtidas através de computação.

O método do degrau é aproximadamente equivalente ao do pulso no que diz respeito à facilidade experimental e ao volume computacional.

As maiores dificuldades na computação estão relacionadas à obtenção precisa das constantes de tempo da fdt e na identificação de constantes de pequena magnitude que ocasionam atenuação na resposta de freqüência à freqüências elevadas.

A computação empregada nos dois últimos métodos não é necessária no primeiro, pois o diagrama de Bode é obtido diretamente.

Eles mencionam que existem, ainda, outros métodos para a determinação do comportamento dinâmico de processos, tais como: o que envolve o teste da rampa, teste de impulso, métodos estatísticos e outros.

De acordo com LJUNG (1987) o procedimento para identificação de um sistema físico envolve basicamente as seguintes etapas:

- projeto experimental;
- levantamento dos dados;
- cálculo do modelo, e,
- validação do modelo.

O autor apresenta, através do fluxograma lógico da Figura 3.9, um procedimento para a identificação da dinâmica de um sistema físico.

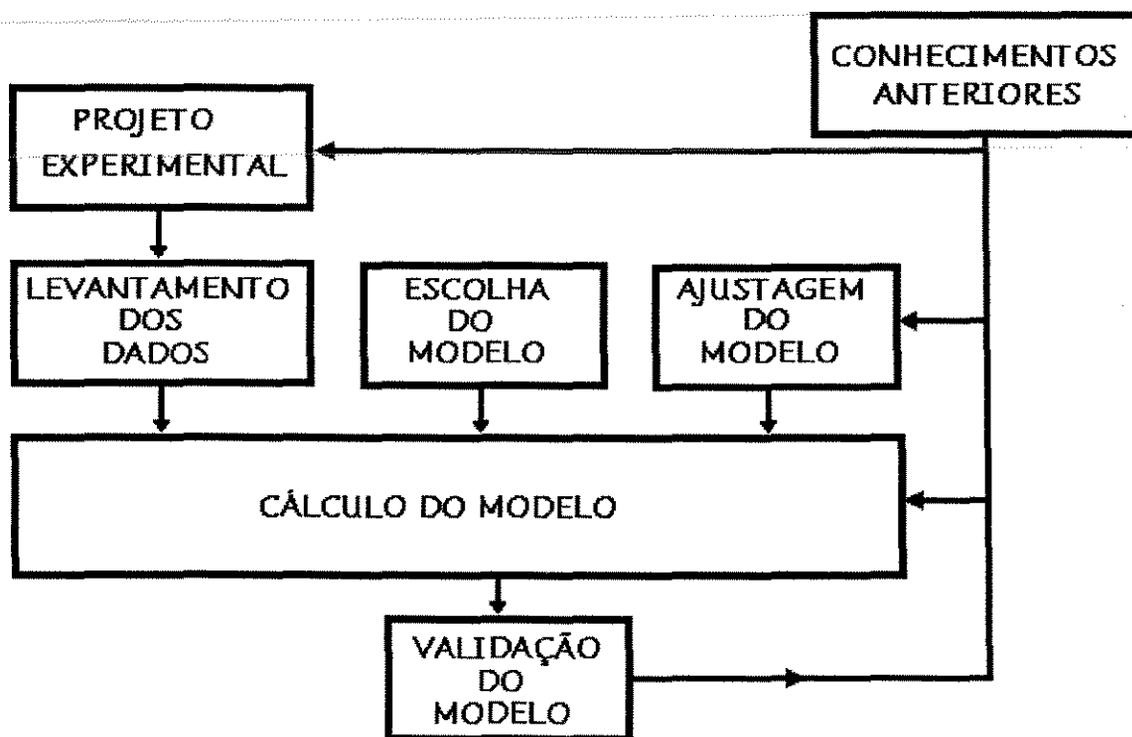


FIG. 3.9 - Fluxograma para identificação da dinâmica de um sistema físico (LJUNG, 1987)

O mesmo autor menciona que, a partir de conhecimentos anteriores sobre o comportamento do sistema, pode-se projetar um experimento e escolher alguns modelos que em princípio possam ser úteis para descrever seu comportamento dinâmico. Os dados experimentais são então coletados e introduzidos no modelo em estudo. A próxima etapa é a validação do modelo. Caso este modelo seja deficiente, deve-se ajustá-lo e recalculá-lo ou adotar um outro. Este procedimento se repete até que se obtenha uma representação matemática, a qual possa ser considerada adequada para a descrição do sistema físico em estudo.

- Projeto Experimental

O projeto experimental para identificação de um sistema físico deve observar a questão básica de como e quais devem ser as variáveis consideradas de entrada e de saída. Isto relaciona-se, principalmente, com a escolha dos sensores e seu posicionamento adequado para a medição dos sinais de entrada e de saída do sistema. Relaciona-se, também, com a possibilidade de mensuração do sinal, grau de precisão desejado no modelo, complexidade de implementação do controle, custos, etc.

- Levantamento dos Dados

Ainda segundo LJUNG(1987), devem ser definidos a frequência e o tempo de amostragem a serem utilizados para o levantamento dos dados. Isto está relacionado, principalmente, com a resposta dinâmica do sistema, com as dificuldades computacionais e laboratoriais, entre outras.

O procedimento de amostragem dos dados que são produzidos por um sistema é dependente do sistema de aquisição de dados via computador. É inevitável que a amostragem conduza a perdas de informação, sendo importante que a escolha da frequência de amostragem seja tal que as perdas se tornem insignificantes.

A frequência de Nyquist é dada como sendo metade da frequência amostragem. A parte do espectro de sinal que correspondem a frequências maiores que a de Nyquist será interpretada como contribuições de frequências mais baixas. Isto é chamado de fenômeno "alias". Isto também significa que o espectro do sinal amostrado será uma superposição de diferentes partes do espectro original. Este efeito é chamado de "folding". Caso suspeite-se que o sinal tenha uma energia não desprezível em torno da frequência de Nyquist, pode-se obter um espectro amostral sem o efeito "alias" aplicando-se, antes da amostragem, um filtro "antialiasing".

Uma frequência de amostragem, muito maior que as constantes de tempo do sistema, pode acarretar dados com pouca informação a respeito da dinâmica do sistema. Por outro lado, uma frequência de amostragem muito pequena pode ser pouco informativa, pois pode impossibilitar a redução do ruído. Uma boa escolha da frequência de amostragem deve ser uma solução de compromisso entre a redução do ruído e a relevância para a dinâmica do sistema. A escolha ótima de uma frequência de amostragem está em torno da constante de tempo do sistema.

Quando a constante de tempo do sistema não é conhecida, deve-se proceder a uma aquisição de dados mais rápida quanto possível, deixando a frequência de amostragem para uma escolha posterior, através de uma pré-filtragem do sinal digitalizado e de um desbaste nos dados originalmente registrados. Estes procedimentos estão incluído na etapa de pré-tratamento ou condicionamento dos dados.

O condicionamento dos dados está relacionado principalmente à como estes dados devem ser tratados na sua aquisição (ex.: filtragem para eliminação de ruídos) e no seu posterior processamento (ex.: eliminação de tendências).

Os dados coletados em experimentos com o propósito de identificação de um sistema, devem ser trabalhados para permitir sua utilização em algoritmos de identificação. A eles podem estar acrescentadas: perturbações de alta freqüência, ou seja, freqüências acima da de interesse do sistema dinâmico; falhas ocasionais ou dados espúrios e, finalmente, perturbações de baixa freqüência, deslocamento do valor medido, tendências, erros periódicos, entre outros.

Perturbações de alta freqüência indicam que a escolha da freqüência de amostragem e dos filtros de pré-amostragem não foram suficientemente eficazes. Se após a experimentação for observado que a freqüência de amostragem foi desnecessariamente pequena, pode-se amostrar novamente os dados, tomando-se da amostragem original, somente os dados a intervalos desejados. Deve-se, contudo, aplicar um filtro digital "antialias" antes da nova amostragem.

Falhas ocasionais na aquisição de dados ou dados espúrios podem ser cuidadosamente substituídos por dados interpolados.

Perturbações de baixa freqüência, erros periódicos, tendências, etc, não são incomuns nos dados amostrados e advém, tipicamente, de fontes externas que podem ou não serem incluídas no modelo. Há basicamente duas abordagens para tratar o problema: a primeira consiste em se remover as perturbações através do pré-tratamento dos dados; a segunda consiste em deixar que o modelo inclua estas perturbações.

Caso o propósito da obtenção do modelo seja de utilizá-lo na implementação de um controle, a freqüência de amostragem com o qual foi construído, deve ser o mesmo aplicado ao controle.

- Cálculo do Modelo

A configuração básica de um sistema de uma única entrada e uma única saída pode ser representada pela Figura 3.10.

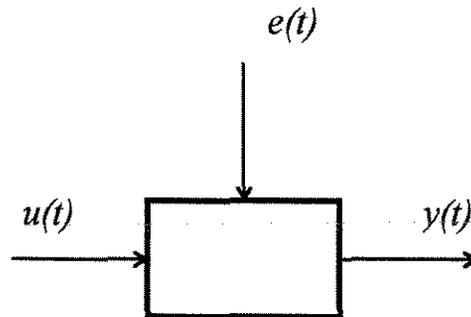


FIG. 3.10 - Representação de um sistema de uma entrada e uma saída.

Assumindo-se uma frequência de amostragem unitária, tem-se o sinal de entrada como sendo,

$$u(t); t=1,2,\dots,N$$

e o sinal de saída como sendo,

$$y(t); t=1,2,\dots,N$$

Assumindo-se que os sinais sejam relacionados por um sistema linear invariante no tempo, pode-se escrever,

$$y(t) = G(q)u(t) + v(t) \quad (3.39)$$

onde q é um operador de deslocamento e $G(t)u(t)$ representa,

$$G(q)u(t) = \sum_{k=1}^{\infty} g(k)u(t-k) \quad (3.40)$$

e,

$$G(q) = \sum_{k=1}^{\infty} g(k)q^{-k}; \quad q^{-1}u(t) = u(t-1) \quad (3.41)$$

Os números $g(k)$ são chamados de resposta ao impulso do sistema. Claramente, $g(k)$ é a saída do sistema no tempo k se a entrada é um único impulso no tempo zero. A função $G(q)$ é chamada de função de transferência do sistema. Esta função avaliada no círculo unitário ($q = e^{i\omega}$) fornece a função de transferência em,

$$G(e^{i\omega}) \quad (3.42)$$

Na Equação 3.39, $v(t)$ é um termo aditivo de perturbação imensurável (ruído). Suas propriedades podem ser expressas em termos do seu próprio espectro,

$$\Phi_v(\omega) \quad (3.43)$$

que é definido por:

$$\Phi_v(\omega) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} R_v(\tau)e^{-i\omega\tau} \quad (3.44)$$

onde $R_v(\tau)$ é a função de covariância de $v(t)$:

$$R_v(\tau) = E v(t) v(t - \tau) \quad (3.45)$$

e, E denota a esperança matemática. Alternativamente, a perturbação $v(t)$ pode ser descrita como um ruído branco filtrado:

$$v(t) = H(q)e(t) \quad (3.46)$$

onde $e(t)$ é um ruído branco com variância λ e,

$$\Phi_v(\omega) = \lambda |H(e^{i\omega})|^2 \quad (3.47)$$

As Equações 3.39 e 3.46 em conjunto produzem uma descrição do sistema no domínio do tempo:

$$y(t) = G(q)u(t) + H(q)e(t) \quad (3.48)$$

enquanto as Equações 3.42 e 3.43 constituem uma descrição no domínio da frequência.

$$G(e^{i\omega}) ; \Phi_v(\omega) \quad (3.49)$$

A resposta ao impulso, Equação 3.41, e a descrição no domínio da frequência, Equação 3.49, são chamados de descrição de modelos não paramétrico já que eles não são definidos em termos de um número finito de parâmetros. A descrição básica, mostrada na Equação 3.48, também se aplica a casos de várias variáveis; isto é, a sistemas com

vários sinais de entrada (mu) e vários sinais de saída (ny). Neste caso $G(q)$ é uma matriz $ny \times mu$, enquanto $H(q)$ e $\Phi_v(\omega)$ são matrizes $ny \times ny$.

Ao invés de especificar a função G e H da Equação 3.48 em termos de funções da variável de frequência ω , pode-se escrevê-la numa forma parametrizada, fazendo com que os parâmetros sejam os coeficientes do numerador e do denominador.

Desta forma, os coeficientes são parâmetros a serem determinados e são representados pelo vetor parâmetro θ e a descrição do modelo passa a ser:

$$y(t) = G(q, \theta)u(t) + H(q, \theta)e(t) \quad (3.50)$$

A Equação 3.50 representa um conjunto de modelos que são dependentes do vetor parâmetro θ .

Um modelo paramétrico normalmente utilizado é o modelo ARX, representado na Figura 3.11.

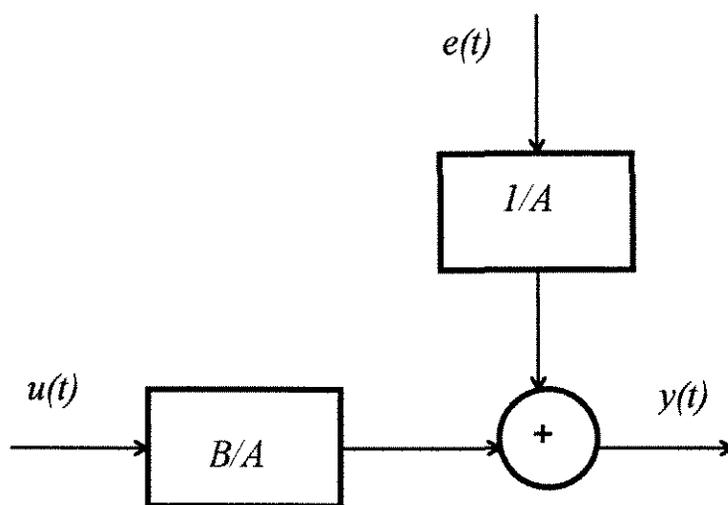


FIG. 3.11 - Representação gráfica do modelo ARX

O modelo ARX é dado por:

$$G(q) = q^{-nk} \frac{B(q)}{A(q)} \quad ; \quad H(q) = \frac{1}{A(q)} \quad (3.51)$$

onde B e A são polinômios do operador de atraso q^{-1} :

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na} \quad (3.52)$$

$$B(q) = b_1 + b_2 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb+1} \quad (3.53)$$

Aqui, os número na e nb são as ordens dos respectivos polinômios. O índice nk é o número de atrasos entre a entrada e a saída. O modelo é usualmente escrito como:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t - nk) + e(t) \quad (3.54)$$

ou explicitamente,

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{na} y(t-na) = b_1 u(t-nk) + b_2 u(t-nk-1) + \dots \\ \dots + b_{nb} u(t-nk-nb+1) + e(t) \dots \dots \dots (3.55)$$

Note que as Equações 3.54 e 3.55 também se aplicam a casos de várias variáveis, onde $A(q)$ e os coeficientes a_i tornam-se matrizes em $n_y \times n_y$, $B(q)$ e os coeficientes b_i tornam-se matrizes em $n_y \times n_u$.

Outro modelo muito comum, e mais genérico, é o modelo ARMAX, representado na Figura 3.12.

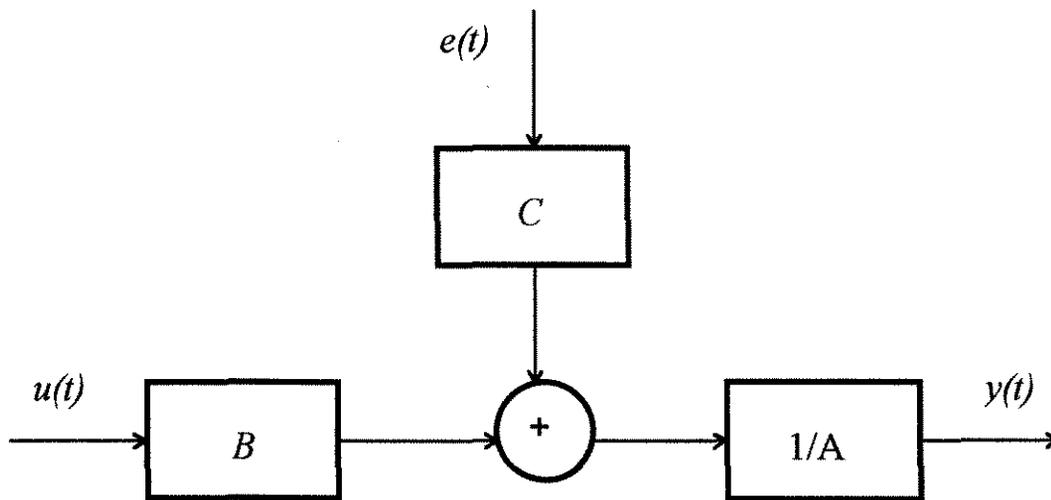


FIG. 3.12 - Representação gráfica do modelo ARMAX

O modelo ARMAX pode ser escrito como:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t - nk) + C(q)e(t) \quad (3.56)$$

Aqui, $A(q)$ e $B(q)$ são como nas Equações 3.52 e 3.53, enquanto;

$$C(q) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{nc}q^{-nc} \quad (3.57)$$

ou explicitamente,

$$y(t) + a_1y(t-1) + \dots + a_nay(t-na) = b_1u(t-nk) + b_2u(t-nk-1) + \dots + b_{nb}u(t-nk-nb+1) + e(t) + c_1e(t-1) + \dots + c_{nc}e(t-nc) \quad (3.58)$$

O modelo conhecido como Erro da Saída (OE) está representado na Figura 3.13.

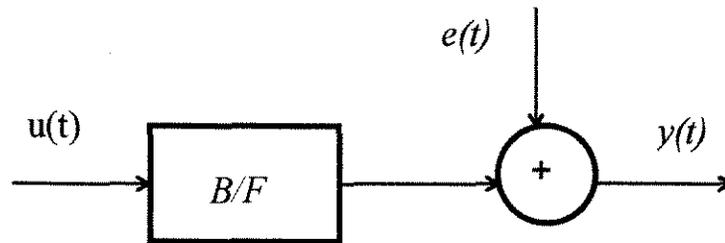


FIG. 3.13 - Representação gráfica do modelo OE

O modelo OE é representado matematicamente por;

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t - nk) + e(t) \quad (3.59)$$

com,

$$F(q) = 1 + f_1 q^{-1} + \dots + f_{nf} q^{-nf} \quad (3.60)$$

O modelo de estrutura denominado Box-Jenkins (BJ) é dado por:

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t - nk) + \frac{C(q)}{D(q)} e(t) \quad (3.61)$$

com,

$$D(q) = 1 + d_1 q^{-1} + \dots + d_{nd} q^{-nd} \quad (3.62)$$

Todos esses modelos são casos especiais da estrutura geral de modelos paramétricos:

$$A(q)y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t - nk) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t) \quad (3.63)$$

A variância do ruído branco $\{e(t)\}$ é assumindo como sendo λ .

Dentro da estrutura da Equação 3.63 virtualmente todas as estruturas usuais de modelos lineares são obtidas como casos especiais. A modelo ARX é obviamente obtido para $nc=nd=nf=0$. O modelo ARMAX corresponde a $nf=nd=0$. O modelo ARARX é obtido para $nc=nf=0$, enquanto o modelo ARARMX corresponde a $nf=0$. O modelo do Erro da Saída (OE) é obtido com $na=nc=nd=0$, enquanto Box-Jenkins corresponde a $na=0$.

O mesmo tipo dos modelos pode ser definido para sistemas com um número arbitrário de entradas. Eles tem a forma:

$$A(q)y(t) = \frac{B_1(q)}{F_1(q)}u_1(t - nk_1) + \dots + \frac{B_{m_u}(q)}{F_{(m_u)}(q)}u_{m_u}(t - nk_{m_u}) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t) \quad (3.64)$$

A estrutura geral mostrada pela Equação 3.63 pode alcançar 32 diferentes conjuntos de modelos, dependendo de quais dos cinco polinômios A , B , C , D e F forem utilizados. Na prática porém, apenas seis conjuntos de modelos, apresentados na Tabela 3.1, são utilizados.

Tabela 3.1 - Conjuntos de modelos mais comuns

Polinômios da Equação 3.63	Nome da estrutura do modelo
B	FIR (resposta ao impulso finito)
AB	ARX
ABC	ARMAX
AC	ARMA
ABD	ARARX
$ABCD$	ARARMAX
BF	OE (erro da saída)
$BFCD$	BJ (B0x-Jenkins)

- Validação do Modelo

A validação de um modelo, dentre vários de ordens e estruturas diferentes, é o problema central da identificação de um sistema. Não existe uma abordagem absoluta para validar um modelo dentre os vários possíveis.

Na validação do modelo deve-se observar questões tais como: se o modelo concorda suficientemente bem com os dados observados, se o modelo é bom o suficiente para o propósito a que se destina e, finalmente, se o modelo descreve o sistema real. As técnicas de validação de um modelo tendem a focar a primeira questão.

Os modelos apresentados na Tabela 3.1 possuem o foco de interesse nas propriedades de suas entradas e saídas. Para modelos lineares pode-se experimentar os seguintes procedimentos:

- compará-los através dos respectivos diagramas de Bode. Comparações entre a análise espectral estimada e o diagrama de Bode pode ser útil, já que são derivados de hipóteses distintas,
- comparar as saídas observadas e simulada,
- testar os resíduos para independência de entradas passadas,
- comparar os critérios de ajustagem obtidos em diferentes estruturas de modelos,
- monitorar os intervalos de confiança dos parâmetros estimados para rastrear os pólos e zeros na função de transferência polinomial.

Finalmente, o ingrediente de subjetividade na validação do modelo deve ser de relevante importância. As técnicas disponíveis devem ser vistas apenas como uma orientação para que a decisão seja tomada pelo interessado. Nas palavras de DRAPER e SMITH (1981, p. 273) "A escolha de uma variável jamais deve ser deixada somente a critério de um procedimento estatístico".

- Preditor de Uma Etapa

Considerando-se a descrição dada pela Equação 3.39, e assumindo-se que $y(s)$ e $u(s)$ são conhecidos para $s \leq t-1$, tem-se que;

$$v(s) = y(s) - G(q)u(s) \quad (3.65)$$

Como, neste caso, $v(s)$ também é conhecido para $s \leq t-1$ o problema torna-se prever o valor dado pela Equação 3.65, baseando-se nesta informação.

O preditor fica sendo então;

$$\hat{y}(t|t-1) = G(q)u(t) + \hat{v}(t|t-1) \quad (3.66)$$

como,

$$\hat{v}(t|t-1) = [1 - H^{-1}(q)]\hat{v}(t) \quad (3.67)$$

e,

$$\hat{v}(t) = [y(t) - G(q)u(t)] \quad (3.68)$$

tem-se;

$$\hat{y}(t|t-1) = H^{-1}(q)G(q)u(t) + [1 - H^{-1}(q)]y(t) \quad (3.69)$$

Com ênfase na dependência de θ , podemos descrever o preditor como sendo;

$$\hat{y}(t|t-1, \theta) = H^{-1}(q, \theta)G(q, \theta)u(t) + [1 - H^{-1}(q, \theta)]y(t) \quad (3.70)$$

O preditor do modelo ARX, Equação 3.54, com $G(q)$ e $H(q)$ expressos pelas Equações 3.52, é dado por;

$$\hat{y}(t|t-1, \theta) = B(q, \theta)u(t) + [1 - A(q, \theta)]y(t) \quad (3.71)$$

O preditor do modelo ARMAX, Equação 3.56, com $G(q) = \frac{B(q)}{A(q)}$ e

$H(q) = \frac{C(q)}{A(q)}$, é dados por;

$$\hat{y}(t|t-1, \theta) = \frac{B(q, \theta)}{C(q, \theta)} u(t) + \left[1 - \frac{A(q, \theta)}{C(q, \theta)}\right] y(t) \quad (3.72)$$

O preditor do modelo OE, Equação 3.59, com $G(q) = \frac{B(q)}{F(q)}$ e $H(q) = 1$, é dado por;

$$\hat{y}(t|t-1, \theta) = \frac{B(q, \theta)}{F(q, \theta)} u(t) \quad (3.73)$$

O preditor da estrutura geral dos modelos paramétricos, Equação 3.63, é dado por;

$$\hat{y}(t|t-1, \theta) = \frac{D(q, \theta)B(q, \theta)}{C(q, \theta)F(q, \theta)} u(t) + \left[1 - \frac{D(q, \theta)A(q, \theta)}{C(q, \theta)}\right] y(t) \quad (3.74)$$

Em muitos casos envolvendo a teoria de controle de sistemas, pode-se não utilizar de uma descrição completa das propriedades da perturbação, como na Equação 3.48, mas apenas uma descrição determinística do modelo.

$$y(t) = G(q)u(t) \quad (3.75)$$

A descrição dada pela Equação 3.75 pode ser utilizada para prever futuros valores da saída.

Sendo,

$$G(z) = b \sum_{k=1}^{\infty} (a)^{k-1} u(t-k) \quad (3.76)$$

significa que a relação entre a entrada e a saída pode ser representada por;

$$y(t) = b \sum_{k=1}^{\infty} (a)^{k-1} u(t-k) \quad (3.77)$$

$$y(t) = \frac{bq^{-1}}{1-aq^{-1}} u(t)$$

$$(1-aq^{-1})y(t) = bq^{-1}u(t)$$

ou seja,

$$y(t) - ay(t-1) = bu(t-1) \quad (3.78)$$

Dada a descrição das Equações 3.75 e 3.76, os dados $y(s)$ e $u(s)$, para $s \leq t-1$, pode-se calcular $y(t)$ por;

$$\hat{y}(t|t-1) = b \sum_{k=1}^{\infty} (a)^{k-1} u(t-k) \quad (3.79)$$

ou,

$$\hat{y}(t|t-1) = ay(t-1) + bu(t-1) \quad (3.80)$$

As Equações 3.79 e 3.80 são ambas preditores para o sistema em estudo.

Com ênfase na dependência de $\hat{\theta}$, pode-se escrever a Equação 3.80 como sendo;

$$\hat{y}(t|t-1, \hat{\theta}) = ay(t-1, \hat{\theta}) + bu(t-1, \hat{\theta}) \quad (3.81)$$

A Equação 3.81 pode ser melhor entendida através de sua representação gráfica apresentada na Figura 3.14.

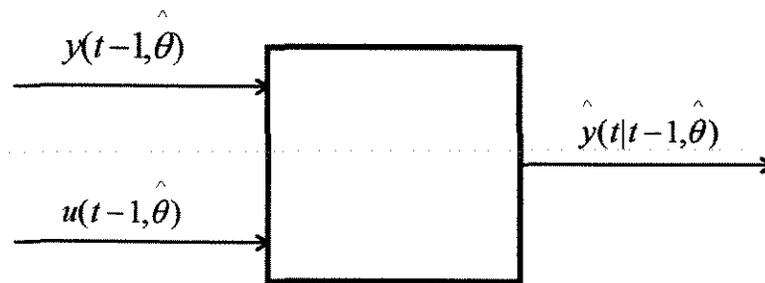


FIG. 3.14 - Diagrama de blocos do preditor determinístico dado pela Equação 3.81

4 - METODOLOGIA

4.1 - Sistema físico

O sistema físico estudado foi o motor Diesel, marca Perkins, modelo 4248 - equipado com uma bomba injetora, tipo rotativa, modelo DPA, marca CAV - aplicado ao trator agrícola marca CBT - Companhia Brasileira de Tratores S.A., modelo 4290.

Para o conhecimento do comportamento do sistema físico foram realizados ensaios com solicitações em regime e transitórias.

Os equipamentos utilizados para o levantamento dos dados foram:

- freio dinamométrico, marca SCHENCK, modelo W-400, com capacidade de frenagem de 400 [kW];
- sistema de medição de torque com célula extensométrica, marca HOTTINGER BALDOWIN MESSTECHNIK (HBM), modelo U2A, capacidade de 200 [kgf];
- medidor de rotação incorporado ao freio dinamométrico, com sensor do tipo indutivo e indicação digital;
- sistema para medição do consumo de combustível, marca ZEPPELER, modelo SVU 3-100/500, com indicador digital de tempo de consumo;
- sistema de medição de temperaturas com sensores do tipo PT-100, com indicação digital;
- barômetro, marca PRINCO, tipo coluna de mercúrio;
- microcomputador, marca DIGIMAC, modelo TS30AS, tipo notebook;
- docking station, marca DIGIMAC, modelo TDS2P;
- placa de conversão A/D, marca ADVANTECH, modelo PCL-818;

- gerador de função, marca Philips, modelo PM5132.

O combustível utilizado para a realização dos testes foi o óleo Diesel comercial.

4.1.1 - Identificação do comportamento do sistema físico em regime

Para a identificação do comportamento do sistema físico, quando solicitado com uma carga estacionária, foram levantadas a curva de desempenho do motor a plena carga e as curvas governadas, conforme a NBR - 5484/84.

A identificação do comportamento do sistema físico, quando solicitado com cargas estacionárias parciais, foi realizada com um procedimento semelhante ao descrito por CAPPELLI (1990). As curvas de consumo específico constante (Isoconsumo) também foram determinadas.

As grandezas medidas para a curva de débito máximo e para as curvas governadas foram: torque, rotação, consumo horário, pressão atmosférica, densidade do óleo Diesel em função da temperatura, temperaturas: do fluido de arrefecimento, do ar de admissão no motor, do óleo de lubrificação, de bulbo seco e de bulbo úmido.

Os dados calculados foram a potência e o consumo específico.

Para a obtenção das curvas parciais foram levantados dados que possibilitam a determinação da posição da alavanca de acionamento da bomba injetora (Z), selecionada para serem obtidas com as seguintes rotações máximas livres de 1300 a 2300 [rpm], com variação de 100 [rpm] entre pontos e, finalmente 2420 [rpm].

As curvas que representam o comportamento do motor foram expressas matematicamente (sub-item 5.1.3) para que pudessem ser utilizadas na simulação do controlador.

4.1.1.1 - Curva otimizada de operação

Vários autores, como levantado na revisão bibliográfica, sugeriram curvas para operação otimizada do motor. Entretanto, estas curvas não se mostraram apropriadas ao desenvolvimento de um controlador do motor para ser utilizado numa futura implementação do controle global do trator agrícola, conforme discutido no sub-item 3.4.

Portanto, procurou-se uma curva contínua passando pelos pontos de 1200 [rpm] e torque nulo, de consumo específico mínimo e de potência nominal. Inicialmente tentou-se ajustar a estes pontos uma curva potencial, porém sem obtenção de bons resultados. A seguir experimentou-se um segmento de círculo, obtendo-se o mesmo resultado negativo. Finalmente, conseguiu-se um segmento de elipse que mostrou-se em concordância com a curva procurada.

Esta curva, de maneira geral, aproxima-se de uma linha perpendicular às de potência constante, quando o motor opera a baixas cargas e rotações e, ao mesmo tempo, possibilita sua utilização em toda faixa útil de potência.

Assim sendo, a curva otimizada adotada, para o propósito do estabelecimento do controlador, está mostrada na Figura 5.4.

A Equação 4.1 é a de uma elipse cujo eixo das ordenadas passa pelo seu vértice esquerdo.

$$\tau^2 = \frac{2b^2}{a} N \left(1 - \frac{N}{2a} \right) \quad (4.1)$$

onde:

τ = torque [Nm];

N = rotação [rpm];

a = faixa de rotação utilizada (1200 [rpm] a 2250 [rpm]);

b = torque à potência máxima (236 [Nm]).

4.1.1.2 - Determinação indireta do torque

Analisando-se os diversos métodos indiretos de determinação do torque desenvolvido pelo motor, apresentados na revisão da bibliografia, optou-se inicialmente pelo proposto por HARRIS e PEARCE (1990), que utilizava-se da posição da alavanca da bomba injetora (Z) e da variação da rotação (ΔN).

O método foi modificado para se utilizar diretamente a rotação medida (N), ao invés da variação de rotação (ΔN). Acredita-se que este método, dentre todos os outros, seria o de menor custo e o de mais fácil implementação.

Para a obtenção de uma equação que estimasse o torque em função de Z e de N , procedeu-se a uma regressão linear múltipla considerando-se todos os dados observados, obtidos na determinação das curvas governadas, com excessão daqueles correspondentes ao torque nulo. Com este procedimento obteve-se equações para a estimação do torque ($\tau_e = f(Z;N)$ e $\tau_e = f(Z;N;Z.N;N^2)$) que apresentaram tendências na distribuição dos resíduos, o que pode ser verificado na Figura 5.5. Para eliminar esta tendência e se obter uma equação para o torque estimado corrigido (τ_e^c), introduziu-se um erro (E), obtido a partir de uma regressão polinomial em função do torque estimado (τ_e), ou seja:

$$E = f(\tau_e) \quad (4.2)$$

$$\tau_e^c = \tau_e + E \quad (4.3)$$

Este procedimento pode ser utilizado para a determinação indireta do torque para toda a faixa útil de utilização do motor. Contudo, para a finalidade da implementação do controlador, o torque foi estimado com

maior precisão, numa faixa de ± 50 [rpm] ao longo da curva otimizada, através da utilização dos dados experimentais contidos na referida faixa.

Para isto estudou-se, de forma análoga ao procedimento anterior, $\tau_e = f(Z;N)$, $\tau_e = f(Z;N;Z.N;N^2)$ e $\tau_e^e = f(Z;N;Z.N;N^2)+E$, cujos resultados podem ser observados nas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10.

Mesmo assim, para o estabelecimento do controlador, não se obteve resultados suficientemente precisos para a determinação indireta do torque na faixa mencionada (Figura 5.10).

Adotou-se, então, o seguinte procedimento:

Conhecendo-se as curvas governadas (Figura 5.3) para os níveis de Z constante ($\tau|_Z = aN + b$) interpola-se estas curvas para Z variando de 20 em 20 [rpm], na faixa útil de rotação do motor (Tabela 5.1 e Figura 5.11).

Conhecendo-se o ponto de operação do motor (N,Z) calcula-se $\tau|_Z$ para os níveis pré-estabelecidos de Z acima e abaixo do atual.

Finalmente, interpola-se os $\tau|_Z$, obtendo-se o torque sendo desenvolvido pelo motor.

Considerando-se que a função do controlador é a de manter o motor operando na curva otimizada, dentro de uma faixa de ± 5 [rpm], supõe-se aqui, que a atuação do controlador eletrônico seja feita antes da atuação do governador mecânico.

4.1.2 - Identificação do comportamento no transiente

A modelagem matemática do comportamento dinâmico do motor de combustão interna contempla fenômenos termo-físicos-químicos cujo equacionamento apresenta uma complexidade cuja descrição é desnecessária para o propósito da obtenção de uma função de transferência a ser empregada em um algoritmo de controle.

A técnica empregada para a obtenção da função de transferência foi a da identificação do sistema e o procedimento adotado, para a identificação do comportamento do motor durante a solicitação transiente, foi o sugerido por LJUNG (1987), cujo fluxograma está apresentado na Figura 3.9.

4.1.2.1 - Testes dinâmicos

Os testes dinâmicos foram realizados com o motor acoplado ao dinamômetro. Um gerador de função foi ligado ao controle do dinamômetro para que se pudesse colocar uma entrada impulsiva ou um degrau de torque de forma a poder ser reproduzida.

O torque desenvolvido pelo motor foi eleito como sendo a perturbação do sistema físico e a rotação do motor foi escolhida como sendo a variável a ser controlada.

O sinal de torque, proveniente do sensor do dinamômetro, foi obtido diretamente da saída de torque do painel de controle do dinamômetro, na forma de uma tensão equivalente.

O sinal de rotação, proveniente do sensor magnético do dinamômetro, foi transformado de freqüência para uma tensão equivalente à rotação do motor.

Tanto o sinal de tensão equivalente ao torque, quanto o sinal de tensão equivalente à rotação foram digitalizados através da placa de conversão analógica para digital, montada na "docking station". Para isto foi desenvolvido um "software" de aquisição de dados executado em um "notebook" montado na "docking station".

Dado o desconhecimento do comportamento dinâmico do sistema físico foram obtidos dados num período amostral de 20 [s], com uma freqüência de amostragem relativamente elevada (100 [Hz]), seguindo a recomendação de LJUNG (1987).

Foram obtidos onze conjuntos de dados na forma de uma entrada impulsiva de torque, em cima da curva otimizada, de $Z = 1300$ [rpm] a $Z = 2300$ [rpm] a intervalos de 100 [rpm], para a obtenção do modelo matemático que descreve o comportamento dinâmico do motor.

Outros onze conjuntos de dados na forma de uma entrada de degrau de torque foram obtidos com o propósito de validação do modelo matemático e realização de simulações do sistema de controle.

Seguindo a orientação de LJUNG (1987), foram retirados os sinais espúrios dos onze conjuntos de torque e rotação obtidos nos testes dinâmicos.

Observando-se os dados obtidos verificou-se que o motor demorava de 4 a 5 [s] para entrar novamente em regime, após ter sido submetido ao degrau de torque. Como este é o comportamento que se deseja controlar, as componentes de frequências mais elevadas foram eliminadas com a aplicação de um filtro digital passa-baixo, "Butterworth" de segundo grau, com a frequência de corte de 1,0 [Hz] em todos os conjuntos de dados.

Em seguida foi reduzida a frequência de amostragem dos dados de 100 [Hz] para 10 [Hz], tomando-se apenas um entre dez dados obtidos para cada um dos conjuntos de torque e rotação.

Os novos conjuntos de dados, filtrados e reduzidos para a frequência de amostragem de 10 [Hz], foram utilizados tanto para a obtenção como para a validação do modelo matemático.

4.1.2.2 - Modelo matemático

Dentre as estruturas dos modelos citados anteriormente, procurou-se a que melhor descrevesse a resposta dinâmica do sistema físico. Inicialmente investigou-se 48 estruturas dos modelos ARX ($1 \leq n_a \leq 4$, $1 \leq n_b \leq 4$ e $1 \leq n_k \leq 3$), 48 estruturas do modelo OE ($1 \leq n_b \leq 4$, $1 \leq n_f \leq 4$ e

$1 \leq n_k \leq 3$) e 144 estruturas do modelo ARMAX ($1 \leq n_a \leq 4$, $1 \leq n_b \leq 4$, $1 \leq n_c \leq 4$ e $1 \leq n_k \leq 3$) para $Z = 1800$ [rpm] e, posteriormente, investigou-se as mesmas estruturas dos modelos para os demais níveis de Z .

O teste do modelo foi realizado com dados da entrada de torque e da saída de rotação obtidos no dinamômetro, para o motor operando próximo à curva otimizada.

O critério para a escolha da estrutura de cada modelo obedeceu a seguinte ordem:

- 1 - estabilidade, verificada através do Diagrama de Pólos e Zeros;
- 2 - possibilidade de redução da ordem dos polinômios, pelo cancelamento de pólos e zeros;
- 3 - comportamento oscilatório, verificado graficamente;
- 4 - ajustagem da curva, verificada plotando-se a saída real de rotação (N_r) e a saída calculada com o banco de dados preparados para a validação (N_m);
- 5 - descrição do sistema físico, verificado-se a aleatoriedade do resíduo e a independência entre o resíduo da estimativa e o distúrbio, respectivamente, através da Função de Correlação e da Função de Correlação Cruzada, e, finalmente;
- 6 - variação do erro de predição que se obterá quando o modelo for aplicado como preditor, através da escolha do menor índice do Erro da Predição Final de Akaike (FPE).

4.2 - Controladores do motor

O motor Diesel, naturalmente aspirado, utilizado nos tratores agrícolas possui um governador mecânico chamado de faixa plena, ou seja, atua não somente nas rotações de marcha lenta e de máxima livre,

mas também em toda faixa útil de rotação desenvolvida pelo motor. Estes dispositivos são centrífugos e possuem atuação do tipo proporcional.

A atuação do governador mecânico é realizada, porém, somente ao longo de uma curva governada selecionada para uma determinada rotação máxima livre (Z), ou seja, para uma determinada posição da alavanca de acionamento da bomba injetora.

O controlador eletrônico em desenvolvimento deverá atuar em Z , fazendo com que o ponto de operação do motor siga a trajetória da curva otimizada. Na utilização prática, para que isto ocorra durante as operações normais do trator agrícola, tem-se a necessidade de uma transmissão contínua ou de uma caixa de marchas, com um elevado número de relações de transmissão, que permita a mudança automaticamente, mesmo sob carga, e ainda, que possua um controlador que opere em conjunto com o do motor.

Neste estudo supõe-se que o controlador do motor atuará em conjunto com o controlador de uma transmissão continuamente variável.

4.2.1 - Controlador mecânico

O governador (ou controlador) do motor Diesel aplicado nos tratores agrícolas atua nas curvas governadas, definidas por um determinado Z , quando o motor é solicitado com níveis de torque que não atinjam a curva de débito máximo, conforme está mostrado na Figura 4.1.

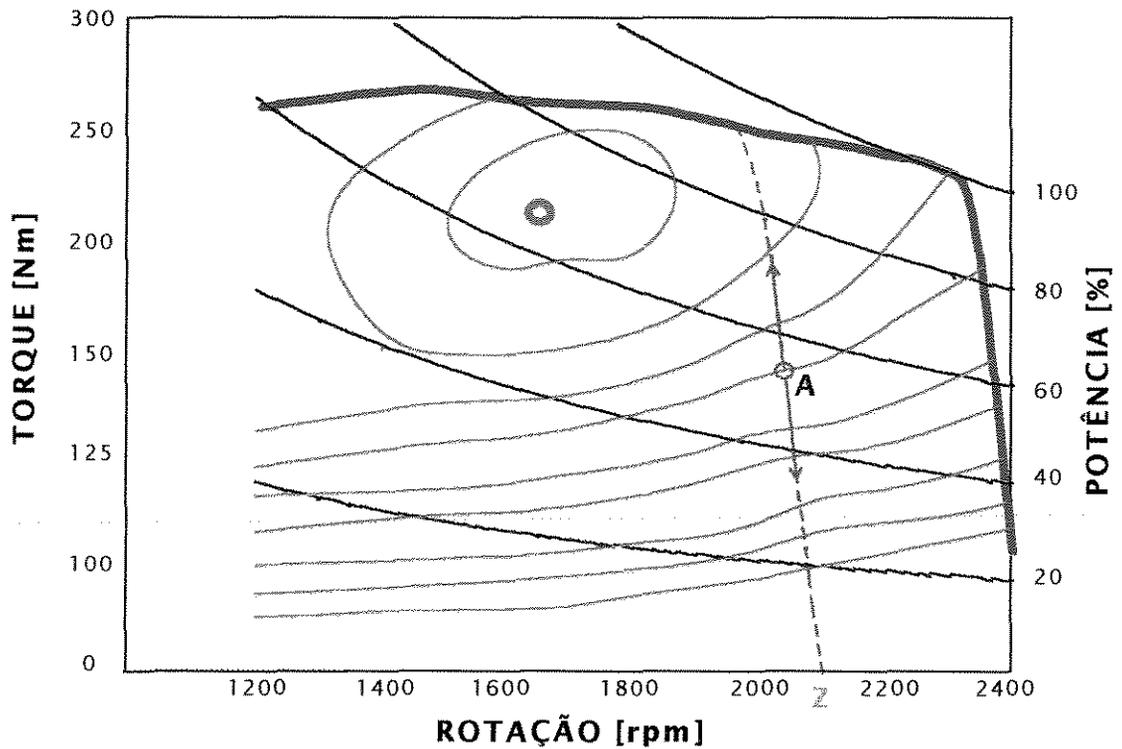


FIG. 4.1 - Modo de atuação do governador mecânico

Quando a solicitação de torque é tal que leve o motor a atuar em cima da curva de débito máximo, o governador mecânico mantém o sistema de injeção de combustível em débito máximo e o motor comporta-se como está mostrado na Figura 4.2. Nesta Figura o ponto A indica o ponto de funcionamento do motor antes de uma solicitação de torque. Mantendo-se Z constante, os pontos B e C indicam o caminho que o ponto de operação do motor percorre até atingir, após a solicitação de torque, o novo ponto de equilíbrio.

A operação na curva de débito máximo é, naturalmente, limitada a níveis de torque que não ultrapassem o máximo disponível no motor.

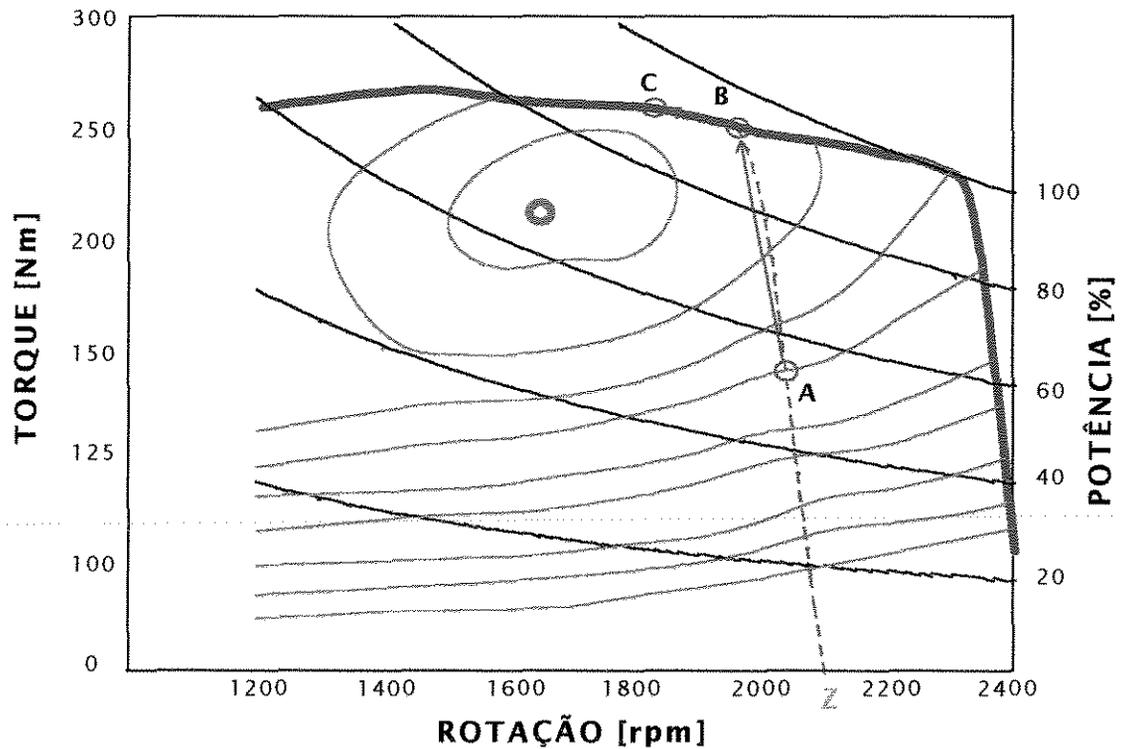


FIG. 4.2 - Operação na curva de débito máximo

O comportamento acima descrito supõe solicitações de carga lentas o suficiente para que o motor possa ser analisado como estando em regime.

Quando ocorrem solicitações dinâmicas de torque de grande magnitude, como a apresentada na Figura 5.13, o ponto de operação do motor não se desloca seguindo a curva governada para o Z selecionado e, neste caso, a determinação indireta do torque não pode ser feita utilizando-se das equações obtidas com o motor operando em regime.

Contudo, solicitações dinâmicas de torque de pequena amplitude, cuja correspondente variação na rotação não ultrapasse a 10 [rpm], como a mostrada nas Figuras 5.21 e 5.14, seguem aproximadamente a curva governada e, nestes casos, a determinação indireta do torque pode ser feita utilizando-se das equações obtidas com o motor operando em regime.

4.2.2 - Controlador eletrônico

O controlador eletrônico deverá atuar em Z de forma a localizar o ponto de operação do motor pertencente à curva otimizada e manter o funcionamento do motor o mais próximo possível da condição de regime. Isto pode ser realizado, por exemplo, a torque constante, a rotação constante ou a potência constante.

A adequação destas condições à qualidade do trabalho agrícola é discutida a seguir.

- Torque Constante

Manter o torque constante implica em não se alterar a relação de transmissão e o ponto de operação pode ser levado para a curva otimizada nos seguintes casos:

- o ponto de operação está posicionado acima da curva otimizada, como exemplificado pelo ponto B mostrado na Figura 4.3. Neste caso o controle atuará em Z elevando a rotação e, portanto, a potência, a fim de se posicionar novamente sobre a curva otimizada no ponto indicado por C na mesma Figura. A velocidade de deslocamento do trator aumentará e a qualidade do trabalho que está sendo realizado será alterada;
- o ponto de operação está posicionado abaixo da curva otimizada, como exemplificado pelo ponto E mostrado na Figura 4.3. Neste caso o controle atuará em Z diminuindo a rotação e, portanto, a potência, a fim de se posicionar novamente sobre a curva otimizada no ponto indicado por F na mesma Figura. A velocidade de deslocamento do trator diminuirá e a qualidade do trabalho que está sendo realizado será alterada.

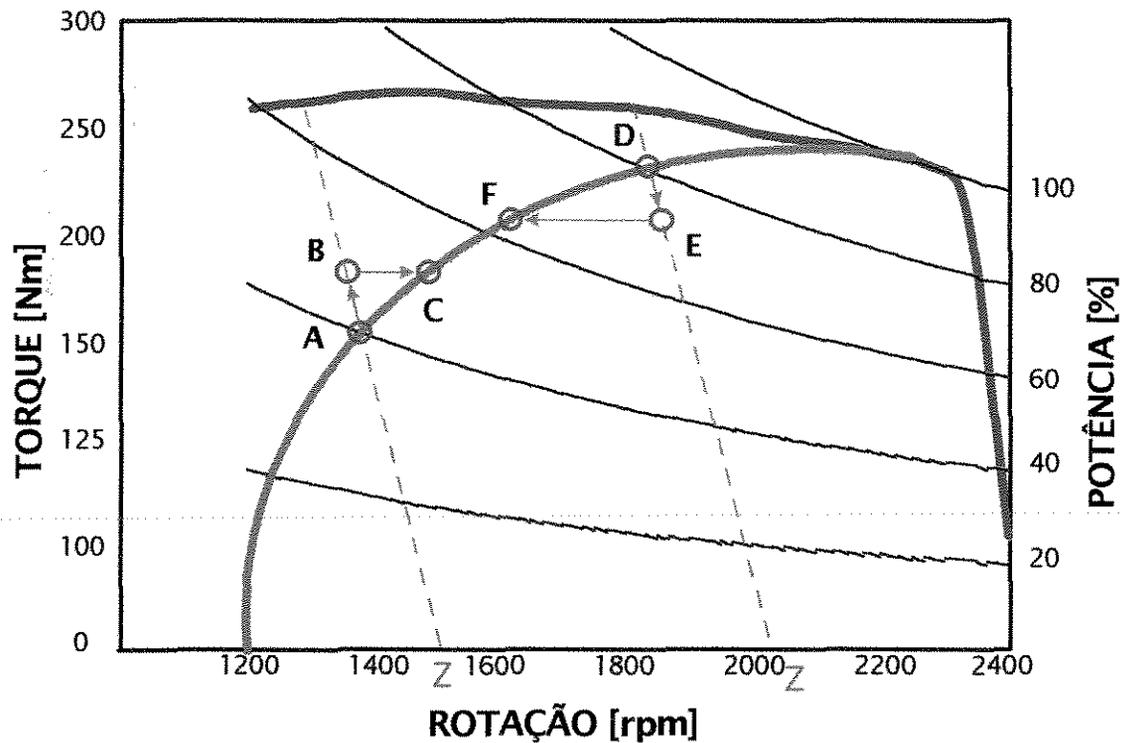


FIG. 4.3 - Critério de atuação do controle eletrônico à torque constante

- Rotação Constante

Manter a rotação constante implica em se alterar a relação de transmissão e o ponto de operação pode ser levado para a curva otimizada nos seguintes casos:

- o ponto de operação está posicionado acima da curva otimizada, como exemplificado pelo ponto B mostrado na Figura 4.4. Neste caso o controle atuará em Z e a relação de transmissão deverá ser alterada a fim de diminuir o torque e manter a rotação do motor, trazendo novamente a operação sobre a curva otimizada, conforme indicado por C na mesma Figura. O nível de potência deverá diminuir e isto só poderá ser obtido, por exemplo, diminuindo-se a profundidade e/ou a largura de corte de um implemento de preparo do solo;

- o ponto de operação está posicionado abaixo da curva otimizada, como exemplificado pelo ponto E mostrado na Figura 4.4. Neste caso o controle atuará em Z e a relação de transmissão deverá ser alterada a fim de aumentar o torque e manter a rotação do motor, trazendo novamente a operação sobre a curva otimizada, conforme indicado por F na mesma Figura. O nível de potência deverá aumentar e isto só poderá ser obtido, por exemplo, aumentando-se a profundidade e/ou a largura de corte de um implemento de preparo do solo.

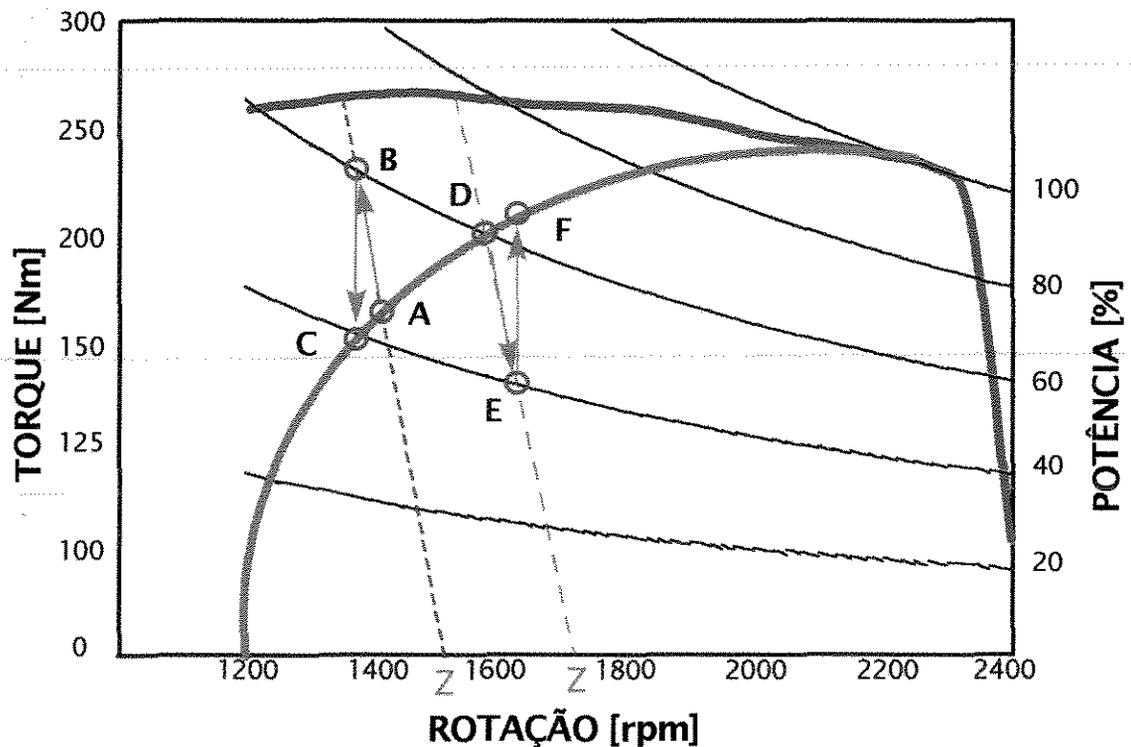


FIG. 4.4 - Critério de atuação do controle eletrônico à rotação constante

- Potência Constante

Manter a potência constante implica em se alterar a relação de transmissão e o ponto de operação pode ser levado para a curva otimizada nos seguintes casos:

- o ponto de operação está posicionado acima da curva otimizada. Neste caso o controle atuará em Z e a relação de transmissão deverá ser alterada a fim de diminuir o torque e aumentar a rotação do motor, de forma a manter a potência constante. Com isto a velocidade de deslocamento do trator deve-se manter e a qualidade do trabalho que está sendo realizado será preservada;
- o ponto de operação está posicionado abaixo da curva otimizada. Neste caso o controle atuará em Z e a relação de transmissão deverá ser alterada a fim de aumentar o torque e diminuir a rotação do motor, de forma a manter a potência constante. Com isto a velocidade de deslocamento do trator deve-se manter e a qualidade do trabalho que está sendo realizado deve ser preservada.

Este último será o critério adotado para o controlador do motor já que preserva a velocidade de deslocamento do trator e a qualidade do trabalho que está sendo realizado. Para a adoção deste modo de operação supõe-se que a solicitação externa de carga não se altere durante a atuação do controlador.

O critério adotado para o controlador do motor pode ser melhor entendido observando-se a Figura 4.5. Nesta Figura está apresentado o caminho A-B-C , onde a solicitação de torque deslocou o ponto de operação acima da curva otimizada. O controlador, nesse caso, levará ponto de operação, seguindo a curva de potência constante, novamente para a curva otimizada. O caminho D-E-F mostra uma atuação semelhante para o caso em que o ponto de operação é levado pela solicitação de torque abaixo da curva otimizada.

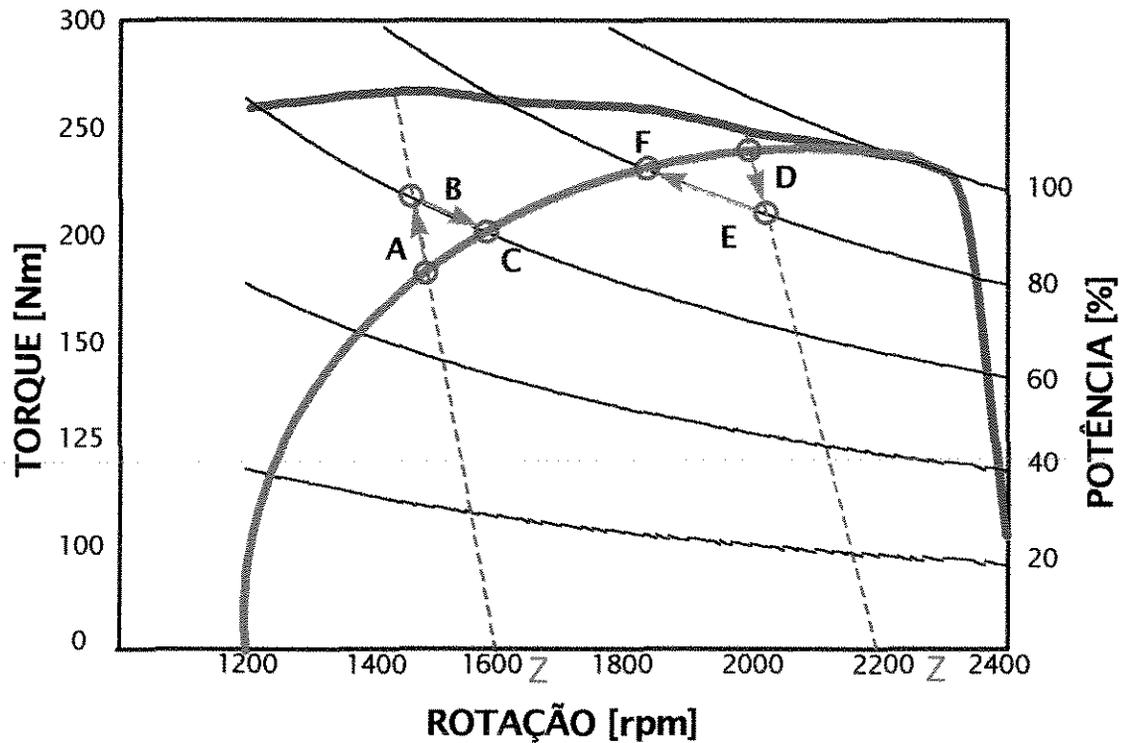


FIG. 4.5 - Critério de atuação do controle eletrônico à potência constante

4.2.2.1 - Procedimentos para a lógica de controle

O critério de operação pode ser realizado através da seqüência estabelecida no fluxograma apresentado na Figura 5.27, cujas etapas são compostas dos seguintes procedimentos:

1 - Procedimento para determinação do ponto de operação.

O ponto de operação do motor é identificado pela medição da rotação do motor, pelo conhecimento da posição da alavanca de acionamento da bomba injetora e pela determinação indireta do torque, conforme descrito no sub-item 4.1.1.2.

2 - Procedimento para a determinação da rotação otimizada (N_o).

A rotação otimizada de operação é obtida em função de N e Z , Equação 4.4, através da intersecção da curva otimizada com a curva parcial para um determinado Z .

$$N_o = f(N, Z) \quad (4.4)$$

Conhecendo-se τ e Z , pode-se calcular o sistema apresentado pelas Equações 4.5;

$$\begin{cases} \tau = \sqrt{132.00227(N_o - 1200) \left[1 - \frac{(N_o - 1200)}{1760} \right]} \\ \tau|_Z = aN_o + b \end{cases} \quad (4.5)$$

obtendo-se N_o .

3 - Procedimento para determinação da rotação predita (N_p).

O procedimento para a determinação da rotação predita baseia-se no conhecimento do torque desenvolvido em k etapas passadas (τ_r^k), na rotação desenvolvida em k etapas passadas (N_r^k), no conjunto de coeficientes do preditor (θ_p) e na resolução da Equação 3.81.

O conjunto de coeficientes do preditor (θ_p) foi utilizado para uma faixa de variação de ± 50 [rpm] do Z para o qual foi determinado.

4 - Procedimento para determinação da posição otimizada da alavanca de acionamento.

A posição otimizada da alavanca de acionamento da bomba injetora é determinada, segundo o critério escolhido de operação do controlador, em função da potência predita (P_p), Equação 4.6.

$$Z'_o = f(P_p) \quad (4.6)$$

Determina-se inicialmente N'_o para o nível de potência P_p através da intersecção da curva otimizada com a curva de potência constante, resolvendo-se o sistema apresentado pelas Equações 4.7.

$$\begin{cases} \tau = \sqrt{132.00227(N'_o - 1200) \left[1 - \frac{(N'_o - 1200)}{1760} \right]} \\ \tau = \frac{P_p}{N'_o} k \end{cases} \quad (4.7)$$

Substituindo-se N'_o na equação da curva otimizada tem-se τ'_o .

Como $\tau'_o|_Z = aN + b$, substituindo-se τ'_o tem-se N . Comparando-se N com N'_o determina-se Z'_o .

O fluxograma da Figura 5.27, descreve a seqüência de operações que compõem a lógica de controle. Este procedimento foi simulado aplicando-se carregamentos crescentes e decrescentes para os níveis de $Z = 1600$ [rpm], $Z = 1800$ [rpm] e $Z = 2000$ [rpm]. Os resultados da simulação estão apresentados no sub-item 5.3.2.

5 - RESULTADOS

5.1 - Comportamento em regime

5.1.1 - Curva de plena carga

Os dados de desempenho do motor estão apresentados no Apêndice 10.1. A curva de desempenho a plena carga com os dados observados está mostrada na Figura 5.1.

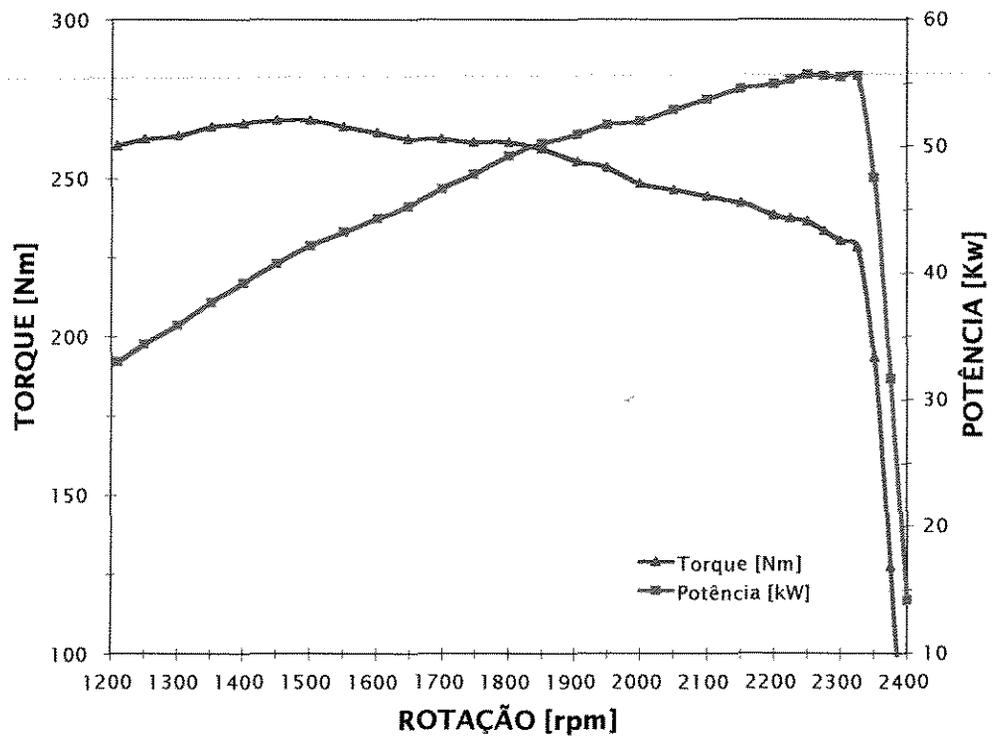


FIG. 5.1 - Curva de plena carga observada

5.1.2 - Curvas governadas e de consumo específico constante

As curvas governadas observadas e as curvas de consumo específico constante (Iso-consumo) estão mostradas na Figura 5.2.

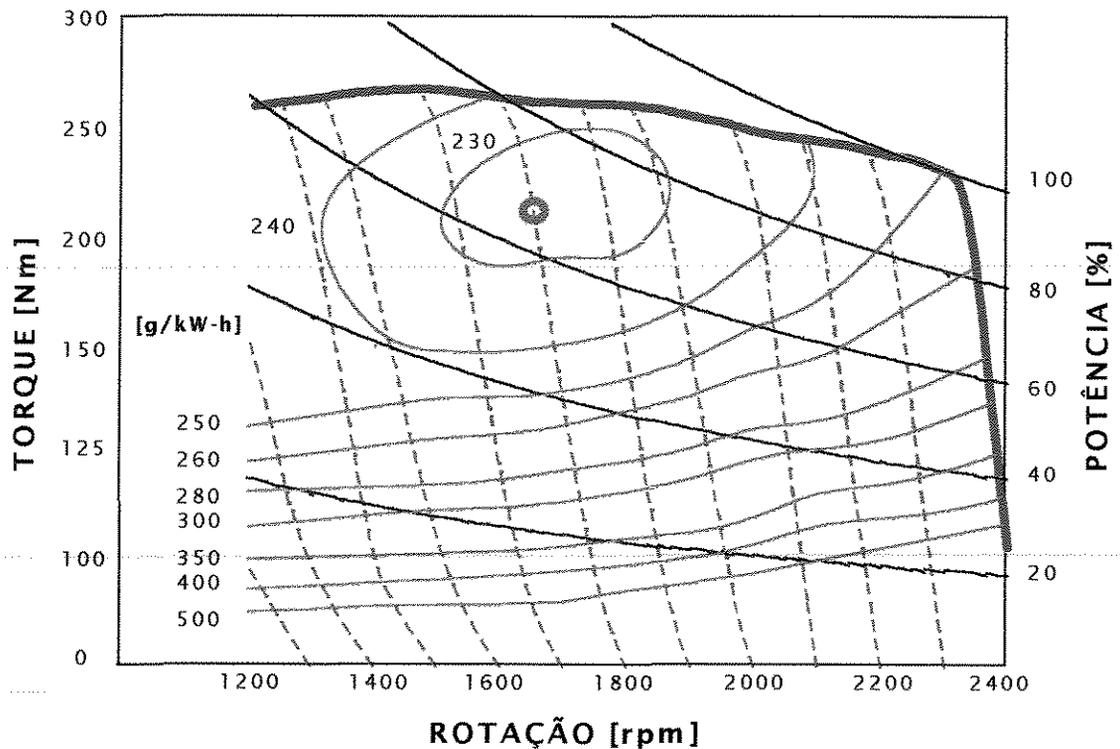


FIG. 5.2 - Curvas governadas observadas e curvas de consumo específico constante

5.1.3 - Equacionamento das curvas em regime

A região de utilização do motor está delimitada pela curva governada de $Z = 2420$ [rpm] pela curva de débito máximo, por $N = 1200$ [rpm] e por $\tau = 0$ [Nm].

A curva de débito máximo pode ser expressa pela Equação 5.1 ($r^2 = 0,988$).

$$\tau = 157.33297 + 0.14781508N - 5.0512563 \cdot 10^{-5} N^2 \quad (5.1)$$

As curvas governadas podem ser expressas pela equação de uma reta cujos coeficientes estão apresentados na Tabela 5.1.

TABELA 5.1 - Coeficientes das curvas governadas ($\tau = aN + b$)

Z	a	b
2400	-2.740000	6632.8333
2300	-2.520770	5792.6304
2200	-2.211780	4860.7750
2180	-2.232372	4860.0052
2160	-2.252964	4859.2554
2140	-2.273556	4858.4656
2120	-2.294148	4857.6958
2100	-2.314740	4856.9260
2080	-2.184258	4546.1217
2060	-2.053776	4235.3174
2040	-1.923294	3924.5132
2020	-1.792812	3613.7089
2000	-1.662330	3302.9047
1980	-1.717884	3370.0786
1960	-1.773438	3437.2526
1940	-1.828992	3504.4266
1920	-1.884546	3571.6006
1900	-1.940100	3638.7746
1880	-1.891588	3512.9659
1860	-1.843076	3387.1572
1840	-1.794564	3261.3486
1820	-1.746052	3135.5399
1800	-1.697540	3009.7313
1780	-1.669618	2925.7693

Z	a	b
1760	-1.641696	2841.8073
1740	-1.613774	2757.8454
1720	-1.585852	2673.8834
1700	-1.557930	2589.9215
1680	-1.481514	2432.7811
1660	-1.405098	2275.6407
1640	-1.328682	2118.5003
1620	-1.252266	1961.3599
1600	-1.175850	1824.2195
1580	-1.248108	1883.5946
1560	-1.320366	1962.9697
1540	-1.395354	2042.3449
1520	-1.464882	2121.7200
1500	-1.537140	2201.0952
1480	-1.410752	2007.0965
1460	-1.284364	1813.0979
1440	-1.157976	1619.0993
1420	-1.031588	1425.1007
1400	-0.905200	1231.1021
1380	-0.819872	1109.0486
1360	-0.734544	986.9951
1340	-0.649216	864.9417
1320	-0.563838	742.8882
1300	-0.478560	620.8348

A Figura 5.3 mostra comparativamente as curvas de desempenho do motor obtidas com dados experimentais e as obtidas matematicamente.

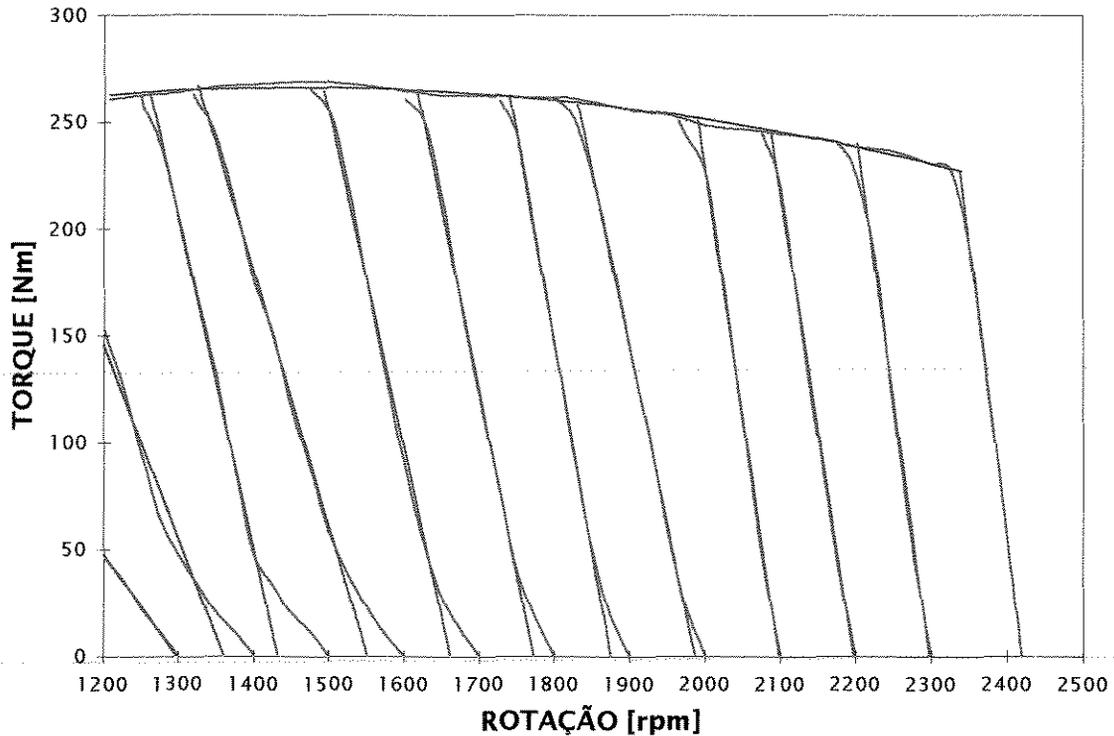


FIG. 5.3 - Curvas obtidas com dados experimentais (vermelha) e curvas obtidas matematicamente (azul)

Observando-se a Figura 5.3 nota-se que o comportamento das curvas governadas, obtidas experimentalmente, é descrito de forma satisfatória pelas equações matemáticas das curvas governadas, na faixa útil de operação do motor.

5.1.4 - Curva de operação otimizada

A Figura 5.4 mostra a curva de operação otimizada passando pelos pontos de: 1200 [rpm] e torque nulo, consumo específico mínimo (1650,210) e potência nominal (2250,236).

Substituindo-se estes pontos na Equação 4.1 tem-se a Equação 5.2 que é a equação da curva de operação otimizada.

$$\tau = \sqrt{132,00227(N - 1200) \left[1 - \frac{(N - 1200)}{1760} \right]} \quad (5.2)$$

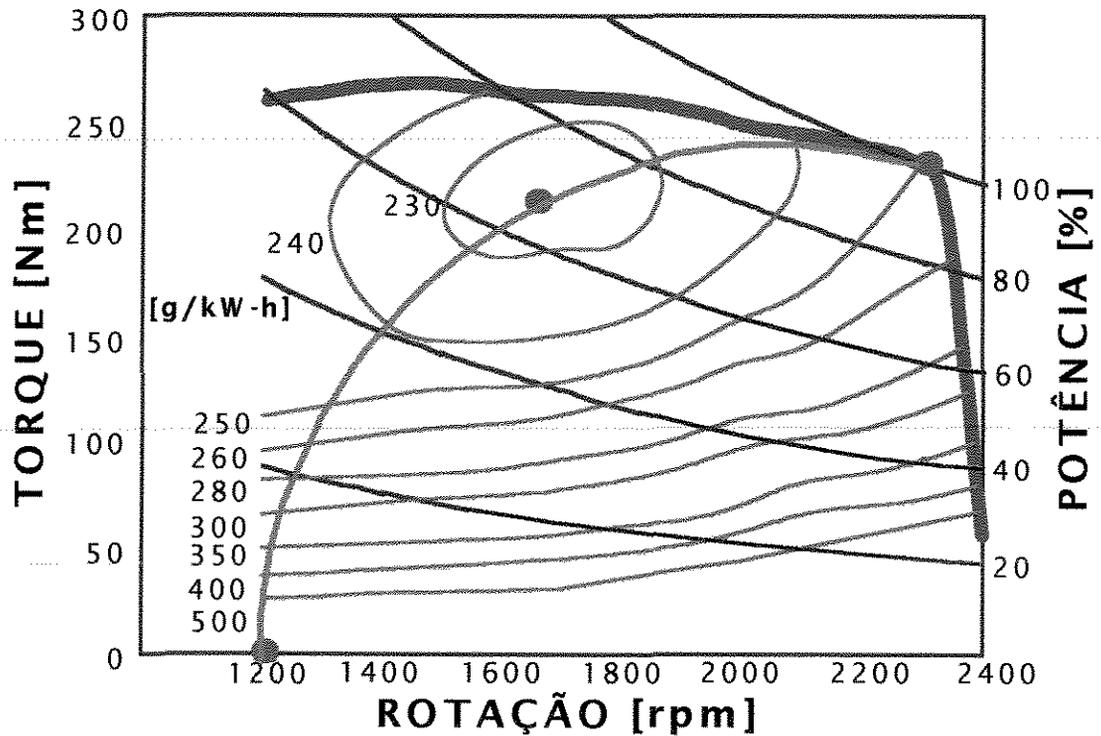


FIG. 5.4 - Curva otimizada de operação adotada

5.1.5 - Equações para a determinação indireta do torque

A equação $\tau_e = (Z; N)$ obtida através da regressão linear múltipla para toda a faixa de utilização do motor foi:

$$\tau_e = -1,21492N + 1,36364Z - 270,4263 \quad (5.3)$$

O coeficiente de determinação múltipla foi de $r^2 = 0,900$. A distribuição dos resíduos está mostrada na Figura 5.5.

A Equação 5.3 está plotada na Figura 5.7 contra a curva do torque otimizado e contra as demais equações estudadas para a determinação indireta do torque desenvolvido pelo motor.

Nota-se, pela Figura 5.5, que há uma tendência na distribuição dos resíduos devido a uma dependência entre Z e τ . Para se reduzir esta tendência, introduziu-se na Equação 5.3 um termo que representa o erro, obtido através de uma regressão polinomial de terceira ordem. O termo de erro encontrado foi:

$$E = 2,61029 - 0,73598\tau_e + 0,00841\tau_e^2 - 0,00002\tau_e^3 \quad (5.4)$$

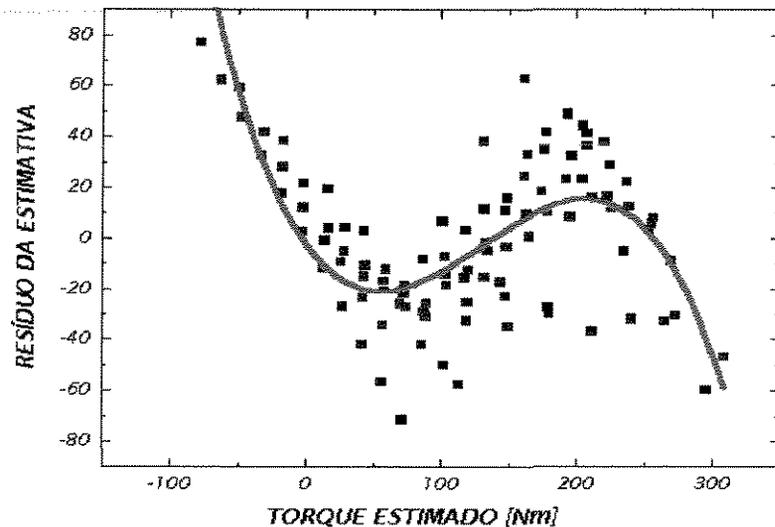


FIG. 5.5 - Distribuição dos resíduos da Equação 5.3 obtida para toda a faixa de utilização do motor

A equação corrigida para se estimar indiretamente o torque ficou sendo:

$$\tau_e^c = (-1,21492N + 1,36364Z - 270,4263) + (2,61029 - 0,73598\tau_e + 0,00841\tau_e^2 - 0,00002\tau_e^3) \quad (5.5)$$

A Equação 5.5, a exemplo da Equação 5.3, está plotada na Figura 5.7.

A fim de se conseguir um coeficiente de determinação múltipla superior ao encontrado, foi estudada a equação $\tau_e = f(Z; N; Z.N; N^2)$, através de uma regressão linear múltipla, para toda a faixa de utilização do motor. O resultado obtido foi:

$$\tau_e = -0,32107N + 0,47646Z + 0,00057ZN - 0,00059N^2 - 233,5343 \quad (5.6)$$

O coeficiente de determinação múltipla foi de $r^2 = 0,919$. A distribuição dos resíduos está mostrada na Figura 5.6.

A Equação 5.6, assim como as anteriores, está mostrada na Figura 5.7.

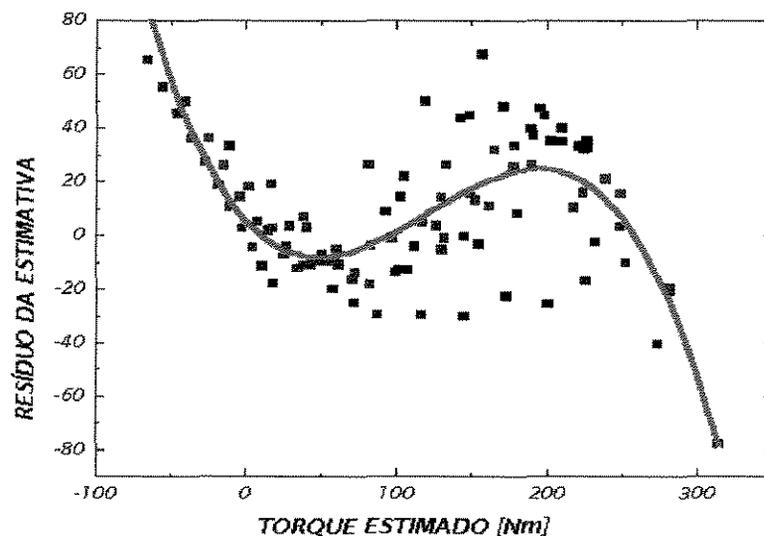


FIG. 5.6 - Distribuição dos resíduos da Equação 5.6 obtida para toda a faixa de utilização do motor

Nota-se, pela Figura 5.6, que ainda persiste uma tendência com distribuição dos resíduos semelhante à anterior, devido a dependência entre Z e τ . O mesmo procedimento, adotado para a Equação 5.3, foi também adotado para a Equação 5.6. O resultado obtido foi:

$$E = 5,03344 - 0,60149\tau_e + 0,00775\tau_e^2 - 0,00002\tau_e^3 \quad (5.7)$$

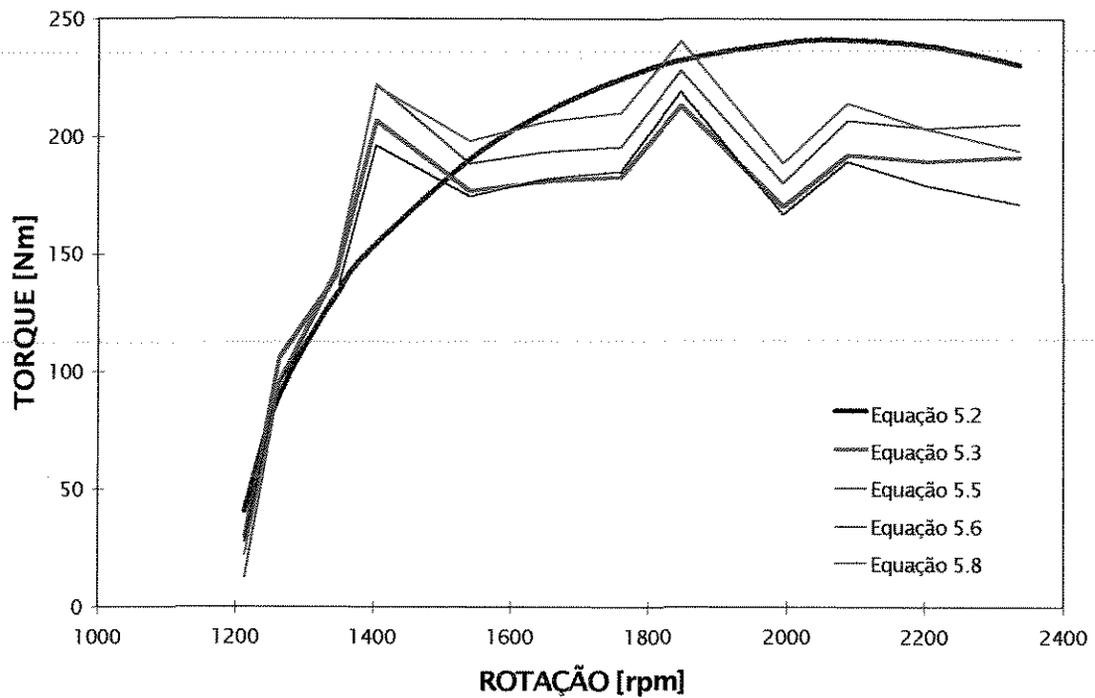


FIG. 5.7 - Curvas de torque otimizado e de torque estimado

A equação corrigida ($\tau_e^c = \tau_e + E$) para se estimar indiretamente o torque ficou sendo:

$$\begin{aligned} \tau_e^c = & (-0,32107N + 0,47646Z + 0,00057ZN - 0,00059N^2 - 233,5343) + \\ & + (5,03344 - 0,60149\tau_e + 0,00775\tau_e^2 - 0,00002\tau_e^3) \end{aligned} \quad (5.8)$$

A Equação 5.8 está plotada na Figura 5.7.

Nota-se que a introdução do termo de erro nas equações estudadas, acarretou numa melhora na estimativa do torque.

As curvas mostradas na Figura 5.7 apresentam uma inflexão em torno de 1400 [rpm] e 1800 [rpm]. Isto deve-se à inclinação das curvas governadas para $Z = 1600$ [rpm] e $Z = 2000$ [rpm] serem ligeiramente mais inclinadas, conforme pode ser observado na Figura 5.2.

As equações mostradas na Figura 5.7 não apresentaram precisão suficiente, para estimação do torque no intervalo de ± 5 [rpm] dos pontos pertencente à curva otimizada, para serem utilizadas no controlador.

Como, para a finalidade da implementação do controle do motor, basta que se tenha uma equação que estime indiretamente e com precisão o valor do torque, somente em torno da curva otimizada. Utilizou-se, então, apenas os valores experimentais de τ , N e Z , nas faixas próximas à curva otimizada. Desta forma obteve-se as Equações 5.9, 5.10 e 5.12.

$$\tau_e = -0,76112N + 0,95791Z - 279,11234 \quad (5.9)$$

A distribuição dos resíduos do torque estimado através da Equação 5.9 ($r^2 = 0,921$) não apresentou tendência, porém, como pode ser observado na Figura 5.9, não segue adequadamente a curva otimizada.

$$\tau_e = -0,29289N + 1,56907Z - 0,00089ZN + 0,0006N^2 - 1118,73603 \quad (5.10)$$

A Equação 5.10 ($r^2 = 0,997$) apresentou uma tendência na distribuição dos resíduos do torque estimado, conforme está mostrado na Figura 5.8.

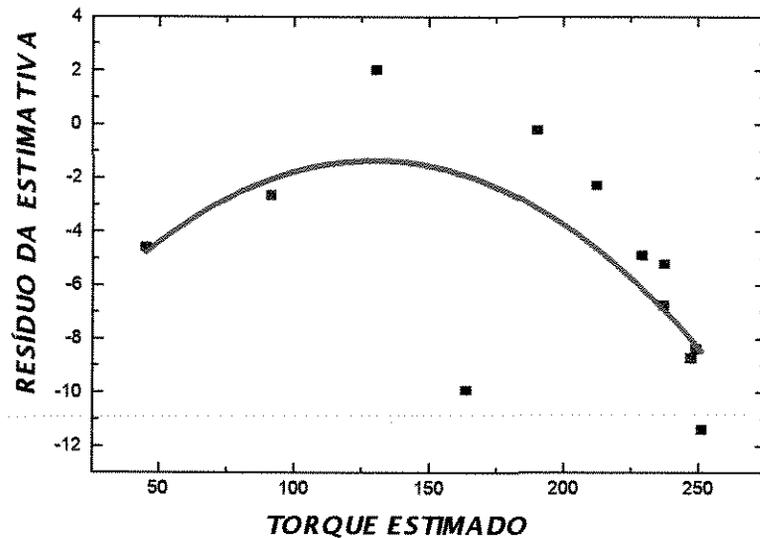


FIG. 5.8 - Distribuição dos resíduos do torque estimado através da Equação 5.10

A fim de corrigir esta tendência foi introduzido, na Equação 5.10, um termo de erro apresentado na Equação 5.11.

$$E = -9,4541754 + 0,124039194\tau_e - 0,00047849722\tau_e^2 \quad (5.11)$$

A Equação 5.10 corrigida toma a forma da Equação 5.12.

$$\begin{aligned} \tau_e^c = & (-0,29289N + 1,56907Z - 0,00089ZN + 0,0006N^2 - 1118,73603) + \\ & + (-9,4541754 + 0,124039194\tau_e - 0,00047849722\tau_e^2) \end{aligned} \quad (5.12)$$

As Equações 5.10 e 5.12 podem ser comparadas com a curva otimizada através da Figura 5.9.

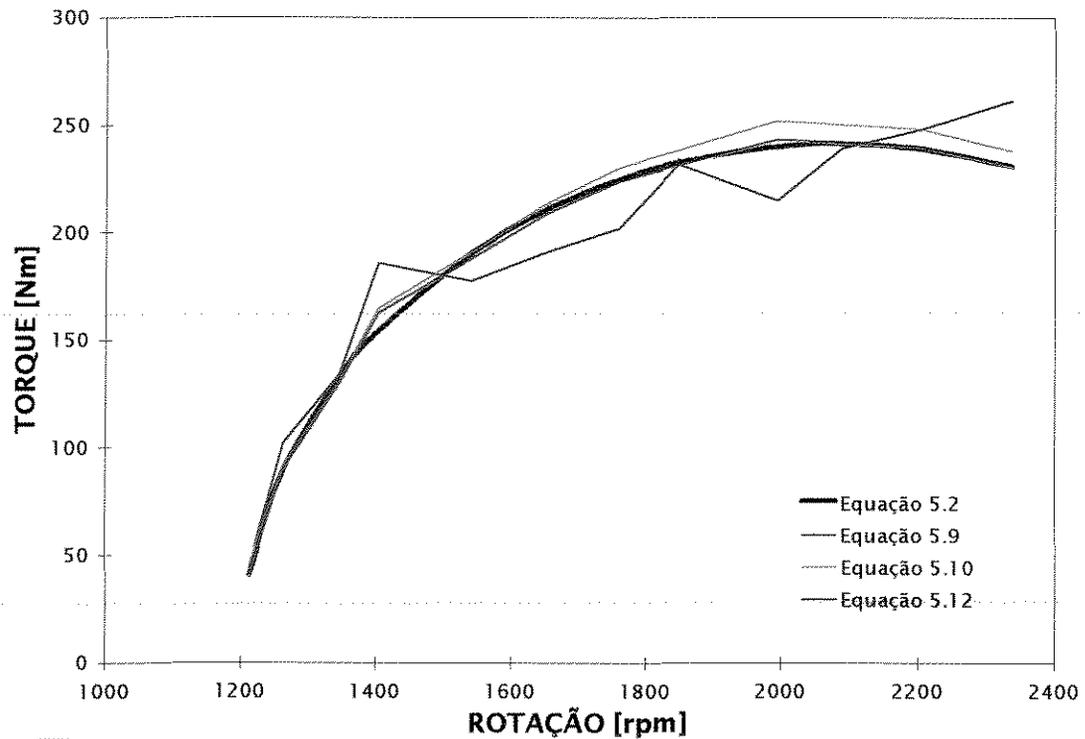


FIG. 5.9 - Curvas de torque otimizado e de torque estimado

Aplicando-se a Equação 5.12 nos pontos otimizados de operação, definidos pela intersecção das curvas governadas com a curva otimizada, e fazendo a rotação variar no intervalo de ± 50 [rpm] com relação a estes pontos, obtém-se os resultados apresentado na Figura 5.10.

Nota-se pela Figura 5.10 que o torque calculado pela Equação 5.12 não segue as curvas governadas e, portanto, não pode ser utilizada para o controlador.

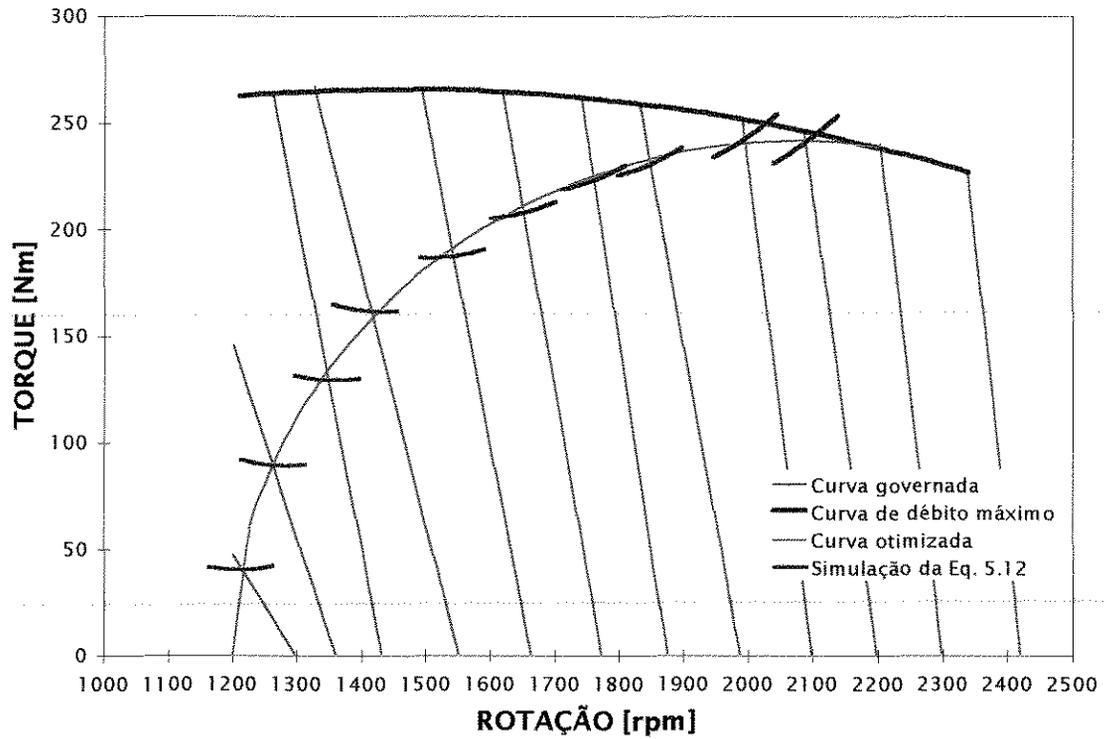


FIG. 5.10 - Resultado da simulação empregando-se a Equação 5.12

Assim sendo, o procedimento utilizado para a determinação indireta do torque foi o descrito no sub-item 4.1.1.2, designado como método da interpolação. A Figura 5.11 mostra as curvas governadas interpoladas entre $Z = 1800$ [rpm] e $Z = 1900$ [rpm] a intervalos de $Z = 20$ [rpm].

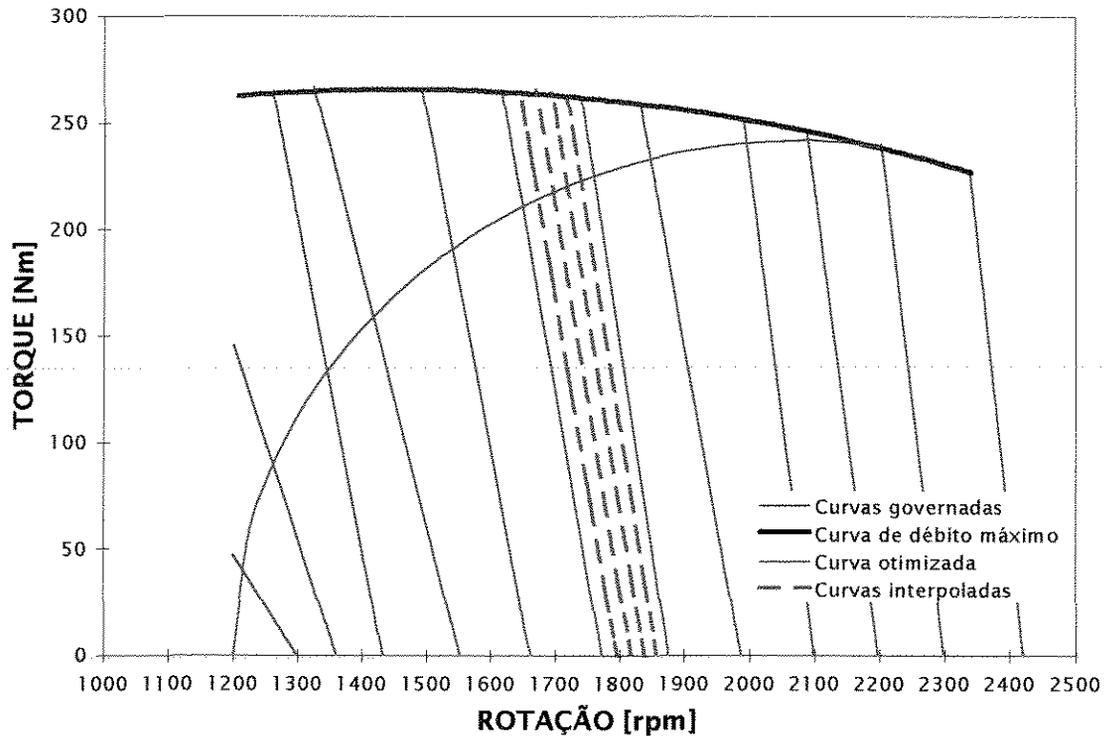


FIG. 5.11 - Curvas governadas interpoladas

Aplicando-se este método nos pontos otimizados de operação, definidos pela intersecção das curvas governadas com a curva otimizada, e fazendo a rotação variar na faixa de ± 10 [rpm] com relação a estes pontos, obtém-se os resultados apresentado na Figura 5.12.

Com isto, pôde-se calcular o torque em função de N e Z com a precisão necessária para o controlador.

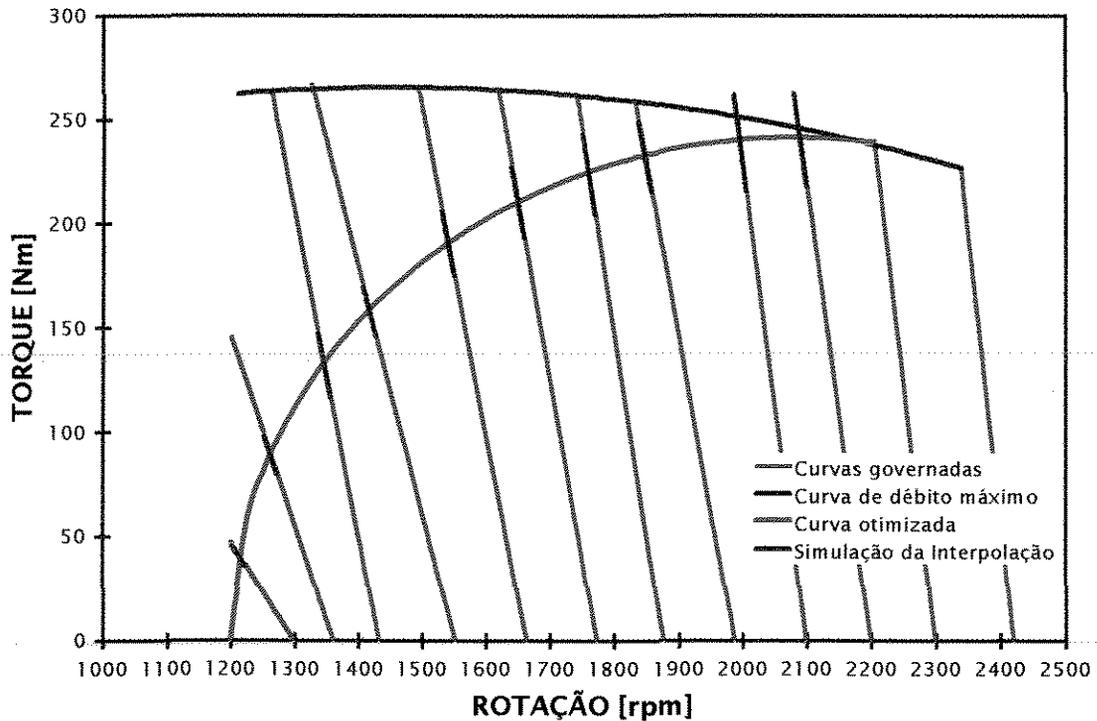


FIG. 5.12 - Simulação do método de interpolação para o cálculo de τ

O comportamento típico do motor, quando solicitado por um transiente de torque de grande amplitude, está mostrado na Figura 5.13. Neste caso, o ponto de operação do motor não segue a curva governada.

No entanto, quando o motor é solicitado por um transiente de torque de pequena amplitude, definido como sendo aquele que faz a rotação variar em até ± 12 [rpm], como o mostrado na Figura 5.21, segue aproximadamente a inclinação da curva governada, como pode ser observado na Figura 5.14.

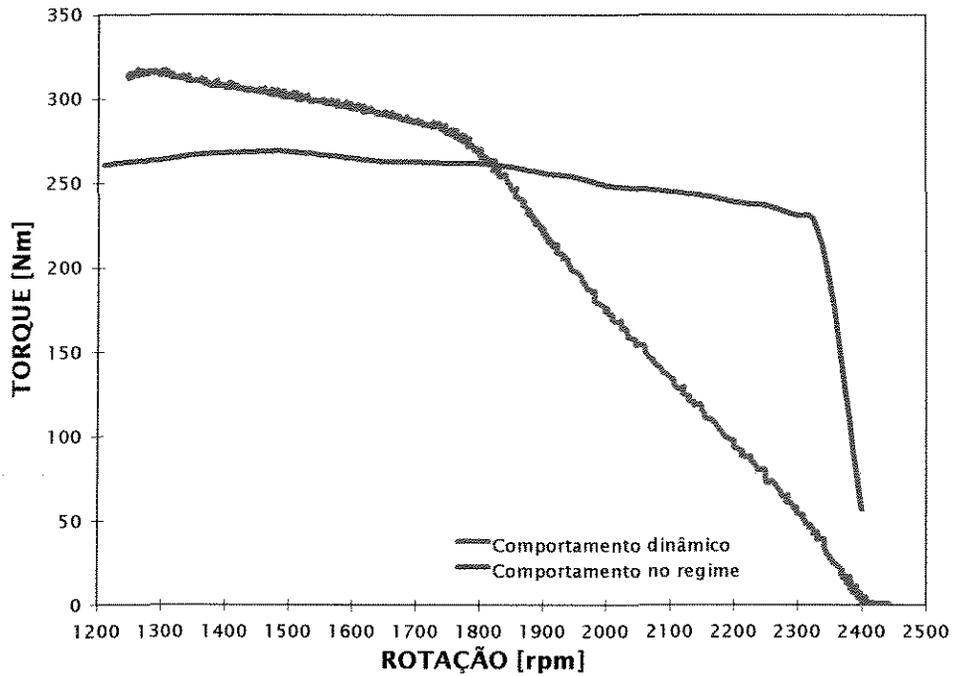


FIG. 5.13 - Comportamento típico do motor quando solicitado por um transiente de torque de grande amplitude

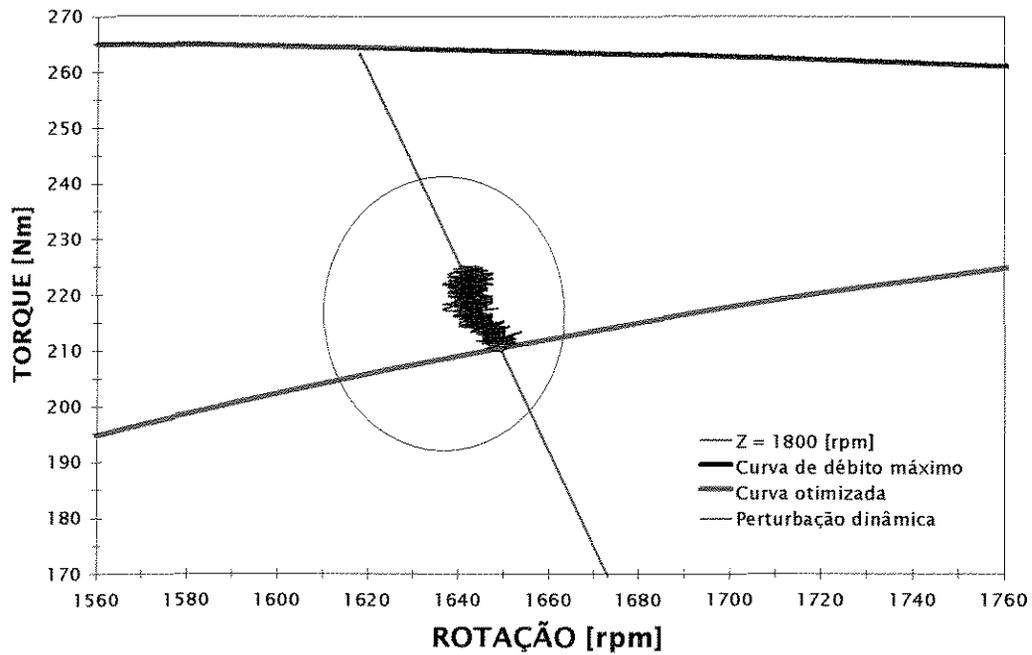


FIG. 5.14 - Solicitação dinâmica de um degrau de torque de pequena amplitude

5.2 - Comportamento no transiente

5.2.1 - Dados originais

A Figura 5.15 apresenta os dados do sinal de entrada (torque) e de saída (rotação), obtido pelos testes dinâmicos descritos em 4.1.2.1, para a rotação máxima livre de $Z = 1800$ [rpm]. Os dados, obtidos para as demais rotações máxima livre apresentaram comportamento semelhante.

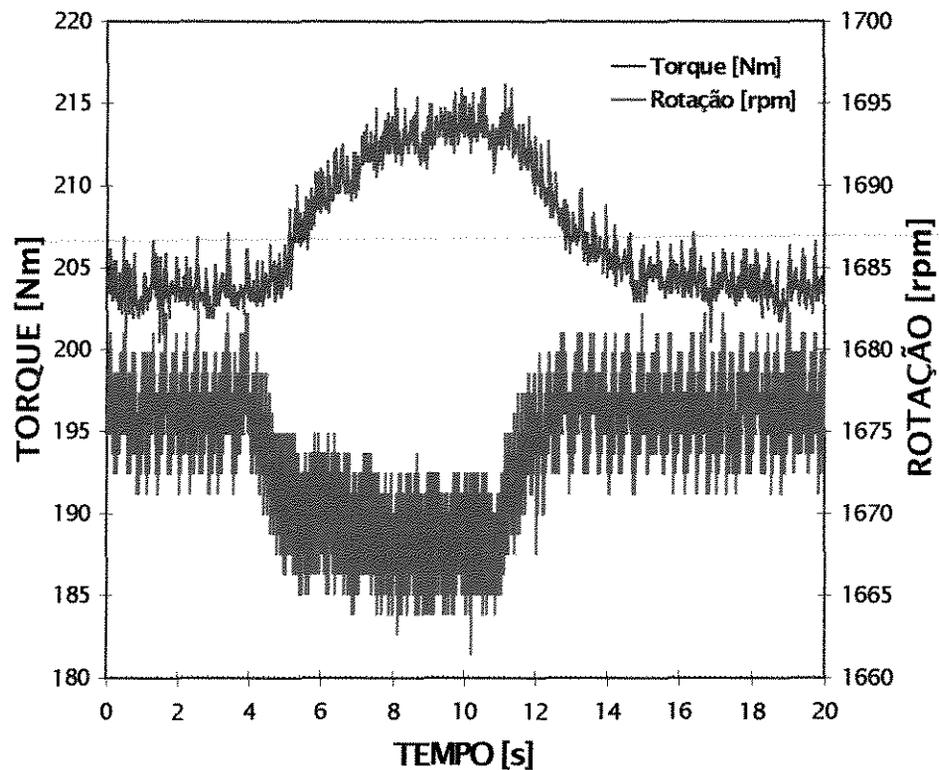


FIG. 5.15 - Resposta dinâmica do motor, como entrada uma solicitação de torque e como variável de saída a variação de rotação do motor, para $Z = 1800$ [rpm]

5.2.2 - Dados condicionados para escolha do modelo matemático

Os dados apresentados graficamente na Figura 5.16 foram condicionados, conforme apresentado em 4.1.2.1, para serem utilizados na procura do modelo matemático, que descreva o comportamento dinâmico do motor, com Z selecionado em 1800 [rpm]. Os demais níveis de Z apresentaram comportamento semelhante.

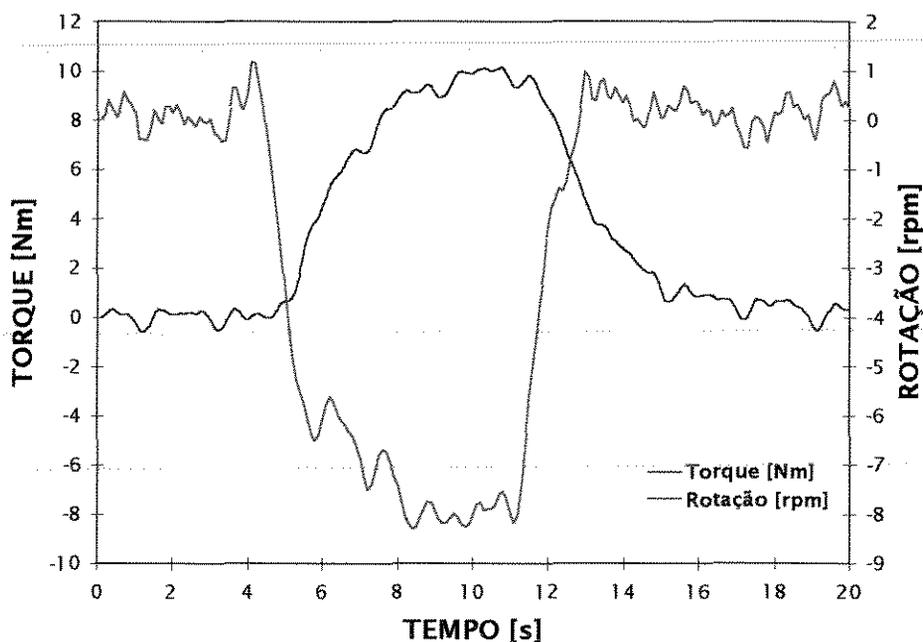


FIG. 5.16 - Dados condicionados para $Z = 1800$ [rpm]

5.2.3 - Modelos matemáticos

Os modelos matemáticos, estudados para Z selecionado em 1800 [rpm], foram obtidos conforme descrito em 4.1.2.2 e estão, com seus respectivos coeficientes e índice do Erro da Predição Final de Akaike (FPE), apresentados nos Apêndices 10.3 a 10.5.

A escolha da melhor estrutura dos modelos estudados obedeceu os critérios apresentados em 4.1.2.2 e as escolhidas foram respectivamente as denominadas de ARX-08 ($na=2$, $nb=4$ e $nk=2$) para o modelo tipo ARX, OE-09 ($nb=2$, $nf=3$ e $nk=3$) para o modelo do tipo OE e, finalmente, ARMAX-60 ($na=4$, $nb=2$, $nc=1$ e $nk=2$) para o modelo ARMAX.

O diagrama de pólos e zeros, a função de correlação e a função de correlação cruzada, dos modelos escolhidos, para $Z = 1800$ [rpm], estão apresentados nas Figuras 5.17 a 5.19. Os demais níveis de Z apresentaram comportamento semelhante.

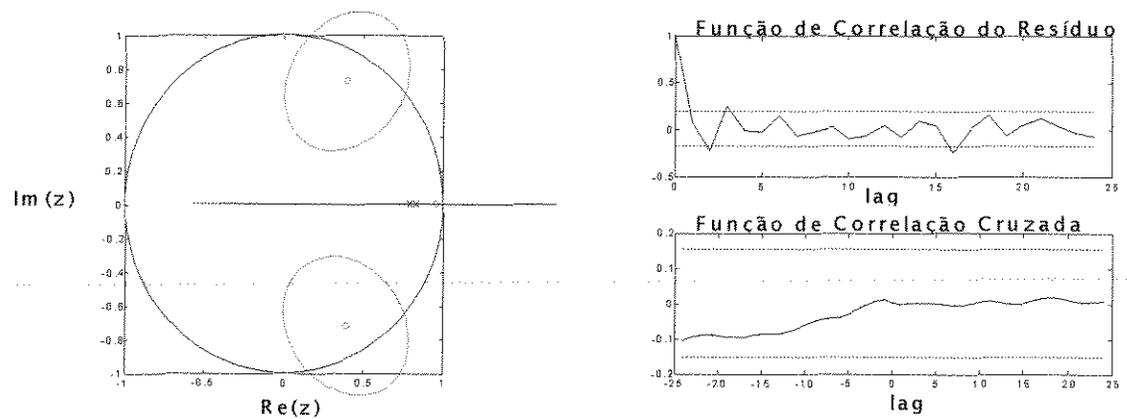


FIG. 5.17 - Diagrama de pólos e zeros, função de correlação do resíduo e função de correlação cruzada do modelo ARX-08

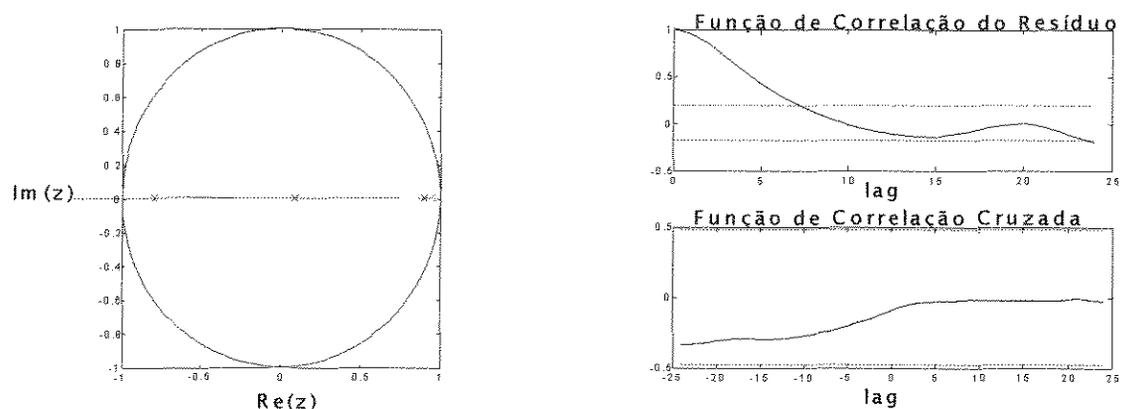


FIG. 5.18 - Diagrama de pólos e zeros, função de correlação do resíduo e função de correlação cruzada do modelo OE-09

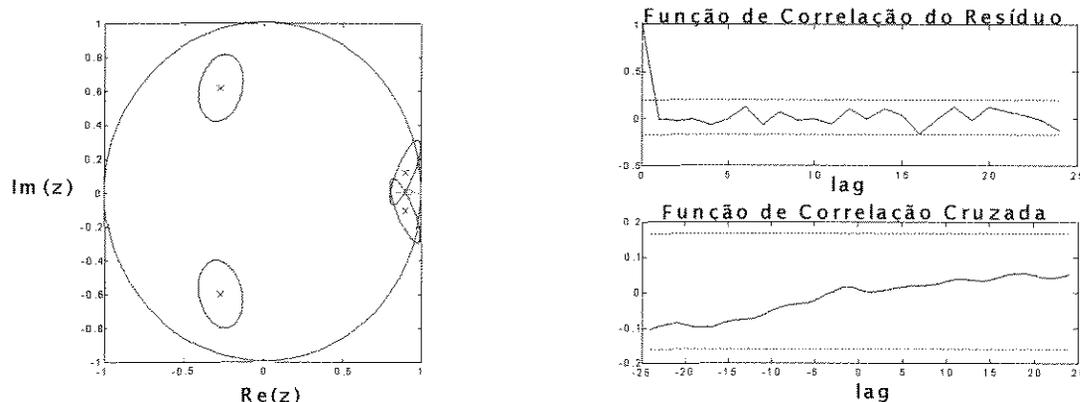


FIG. 5.19 - Diagrama de pólos e zeros, função de correlação do resíduo e função de correlação cruzada do modelo ARMAX-60

Nota-se nas Figuras 5.17 a 5.19 que: os pólos dos modelos apresentados posicionam-se dentro do círculo unitário, indicando a estabilidade destes modelos; a função de correlação do resíduo mantém-se dentro de um intervalo de confiança de 99 [%], apontando a aleatoriedade do resíduo; e a função de correlação cruzada também mantém-se dentro deste intervalo de confiança, denotando a independência entre o resíduo da estimativa e o distúrbio.

A saída de rotação real e calculada através dos modelos escolhidos, correspondente a uma perturbação de torque do tipo degrau, para $Z = 1800$ [rpm], estão apresentadas comparativamente na Figura 5.20.

Os três modelos escolhidos foram testados nos demais níveis de Z , mantendo-se os respectivos conjuntos de coeficientes θ ($\{\theta\}$). Notou-se que nenhum dos modelos, assim definidos, foi capaz de descrever suficientemente bem o sistema físico. Optou-se então, em se manter os modelos, com suas estruturas já estabelecidas, e calcular um novo $\{\theta\}$ para cada nível de Z . Com este procedimento também não se obteve resultados satisfatórios, mostrando claramente que o comportamento dinâmico do motor se altera, ao longo da curva otimizada, em função do nível de potência sendo desenvolvido.

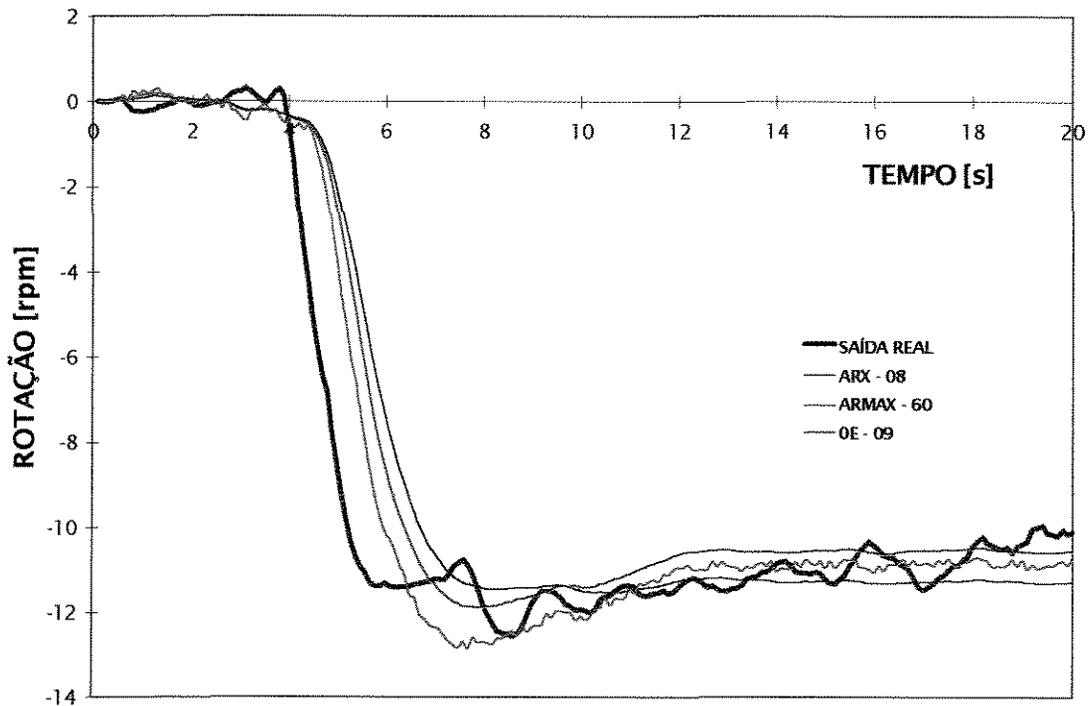


FIG. 5.20 - Saída de rotação real e calculadas através dos modelos ARX, OE e ARMAX, para o nível de $Z = 1800$ [rpm]

Com isto, foi necessário repetir a metodologia para a obtenção das estruturas dos modelos para cada nível de Z . Com este procedimento pôde-se encontrar estruturas, para os modelos propostos, que descrevessem suficientemente bem o comportamento dinâmico do motor para a finalidade de controle. Contudo, o modelo que apresentou melhor desempenho, para todos os níveis definidos de Z , foi o do tipo ARMAX.

A Tabela 5.1 mostra as estruturas, os coeficientes e os índices FPEs do estimador do modelo ARMAX correspondentes a cada nível de Z .

Para o nível de $Z = 1800$ [rpm] a Equação 3.58, utilizada para o estimador do modelo ARMAX, torna-se;

$$\begin{aligned}
 y(t) + y(t-1) - 1,2562y(t-2) + 0,2846y(t-3) - 0,3511y(t-4) + 0,3678y(t-5) = \\
 = -0,4137u(t-4) + 0,3848u(t-5) + e(t) + e(t-1) + 0,6446e(t-2) \quad (5.11)
 \end{aligned}$$

TABELA 5.1 - Modelos do tipo ARMAX obtidos para cada nível de Z

Z	Estr.	FPE	Coef.	1	2	3	4	5
2300	4121	0,01253	a	1,0000	-2,9036	3,6231	-2,4295	0,7147
			b	0	-0,0402			
			c	1,0000	-0,7529	0,5288		
2200	2212	0,06384	a	1,0000	-1,7073	0,7397		
			b	0	0	-0,3555	0,3064	
			c	1,0000	-0,1182			
2100	2312	0,00936	a	1,0000	-1,7294	0,7694		
			b	0	0	-0,1747	-0,1235	0,2698
			c	1,0000	0,4066			
2000	2312	0,00807	a	1,0000	-1,7691	0,7946		
			b	0	0	-0,3170	0,2660	0,0334
			c	1,0000	0,4229			
1900	4241	0,01174	a	1,0000	-2,8443	3,3782	-2,0848	0,5668
			b	0	-0,1579	0,1489		
			c	1,0000	-0,5659	-0,0716	0,0847	0,0601
1800	4212	0,04211	a	1,0000	-1,2562	0,2846	-0,3511	0,3678
			b	0	0	-0,4137	0,3848	
			c	1,0000	0,6446			
1700	4311	0,01332	a	1,0000	-1,7366	0,8261	-0,1632	0,0864
			b	0	0,0725	-0,3670	0,2860	
			c	1,0000	0,4906			
1600	2312	0,02054	a	1,0000	-1,7468	0,7644		
			b	0	0	-0,3232	0,3658	-0,0524
			c	1,0000	-0,0153			
1500	2311	0,01279	a	1,0000	-1,7016	0,7532		
			b	0	-0,1610	-0,2298	0,3562	
			c	1,0000	0,6910			
1400	2421	0,01944	a	1,0000	-1,7585	0,7697		
			b	0	-0,4388	0,6107	-0,1619	-0,0168
			c	1,0000	-0,0390	0,0078		
1300	4121	0,09128	a	1,0000	-1,5132	0,7936	-0,8925	0,6176
			b	0	-0,0087			
			c	1,0000	-0,6144	0,1635		

5.2.4 - Preditor

Estabelecido o modelo ARMAX e suas respectivas estruturas para cada nível de Z estudado, pôde-se obter o preditor da saída de rotação utilizando-se um modelo determinístico, conforme a Equação 3.81.

Os coeficientes polinomiais dos preditores, de uma etapa à frente, estão apresentados na Tabela 5.2, para cada nível de Z estabelecido.

A saída de rotação real e predita, correspondente a uma perturbação de torque do tipo degrau, está mostrada graficamente na

Figura 5.21 para o nível de $Z = 1800$ [rpm]. As saídas para os demais níveis de Z estão apresentadas nas Figuras 5.22 a 5.26.

TABELA 5.2 - Coeficientes polinomiais dos preditores

Z	Coef.	1	2	3	4	5
2300	a	1,0000	-0,7529	0,5288		
	b#1	0	2,1507	-3,0943	2,4295	-0,7147
	b#2	0	-0,0402			
2200	a	1,0000	-0,1182			
	b#1	0	1,5892	-0,7397		
	b#2	0	0	-0,3555	0,3064	
2100	a	1,0000	0,4066			
	b#1	0	2,1360	-0,7694		
	b#2	0	0	-0,1747	-0,1265	0,52698
2000	a	1,0000	0,4229			
	b#1	0	2,1920	-0,7946		
	b#2	0	0	-0,3170	0,2660	0,0334
1900	a	1,0000	-0,5659	-0,0716	0,0847	0,0601
	b#1	0	2,2784	-3,4498	2,1694	-0,5068
	b#2	0	-0,1579	0,1489		
1800	a	1,0000	0,6446			
	b#1	0	1,9008	-0,2846	0,3511	-0,3678
	b#2	0	0	-0,4137	0,3848	
1700	a	1,0000	0,4906			
	b#1	0	2,2272	-0,8261	0,1632	-0,0864
	b#2	0	0,0725	-0,3670	0,2860	
1600	a	1,0000	-0,0153			
	b#1	0	1,7314	-0,7644		
	b#2	0	0	-0,3232	0,3658	-0,0524
1500	a	1,0000	0,6910			
	b#1	0	2,3925	-0,7532		
	b#2	0	-0,1610	-0,2298	0,3562	
1400	a	1,0000	-0,0390	0,0078		
	b#1	0	1,7195	-0,7620		
	b#2	0	-0,4388	0,6107	-0,1619	-0,0168
1300	a	1,0000	-0,6144	0,1635		
	b#1	0	0,8988	-0,6301	0,8925	-0,6176
	b#2	0	-0,0087			

O preditor para $Z = 1800$ [rpm], conforme a Figura 3.14 e apresentado na forma explícita da Equação 3.81, fica sendo;

$$\begin{aligned}
 &1,9008y(t-1) - 0,2846y(t-2) + 0,3511y(t-3) - 0,3678y(t-4) - \\
 &- 0,4137u(t-2) + 0,3848u(t-3) = \hat{y}(t) + 0,6446\hat{y}(t-1)
 \end{aligned} \quad (5.12)$$

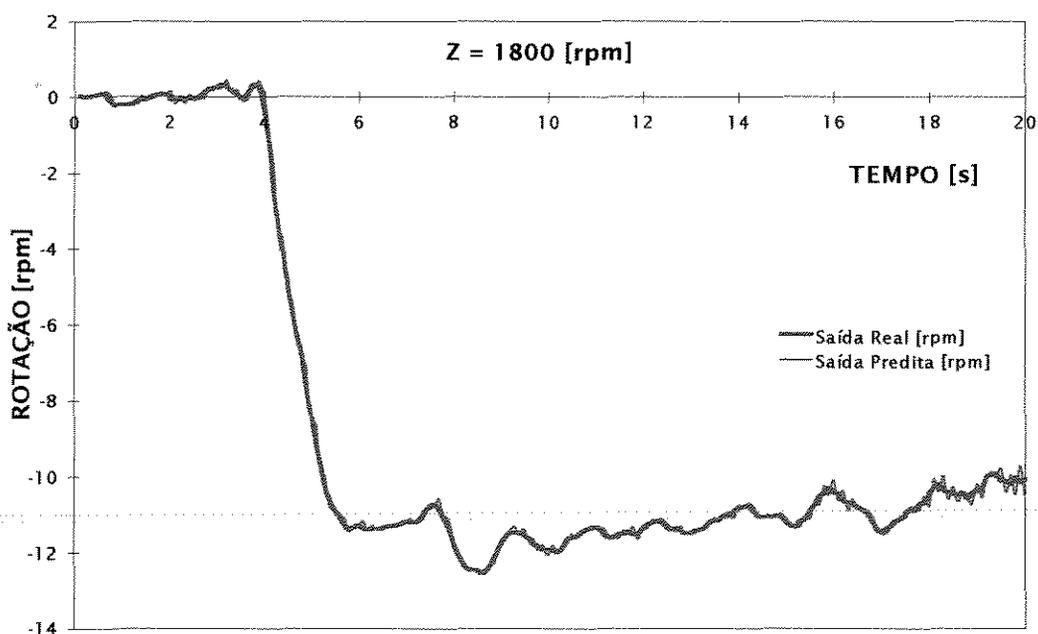


FIG. 5.21 - Saída de rotação real e predita, correspondente a uma perturbação de torque do tipo degrau, para o nível de $Z = 1800$ [rpm]

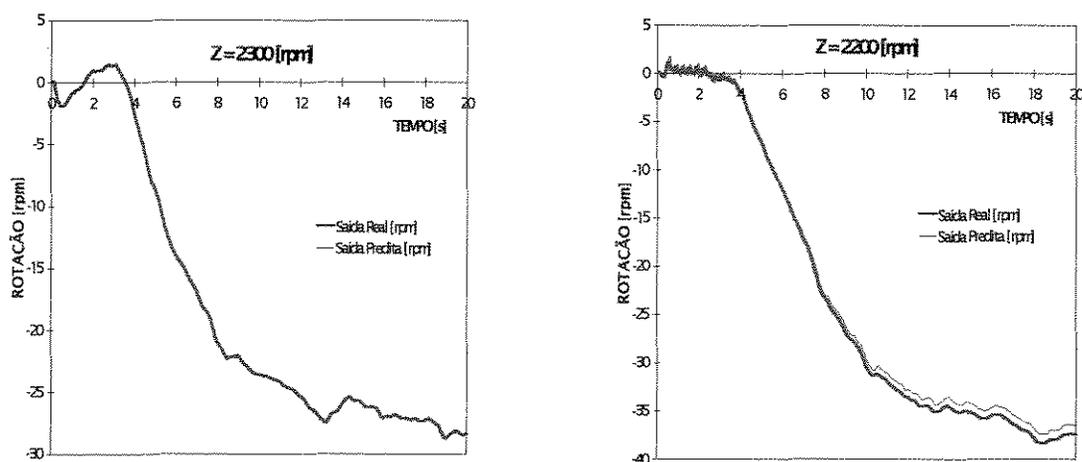


FIG. 5.22 - Saída de rotação real e predita, correspondente a uma perturbação de torque do tipo degrau, para os níveis de $Z = 2300$ [rpm] e $Z = 2200$ [rpm]

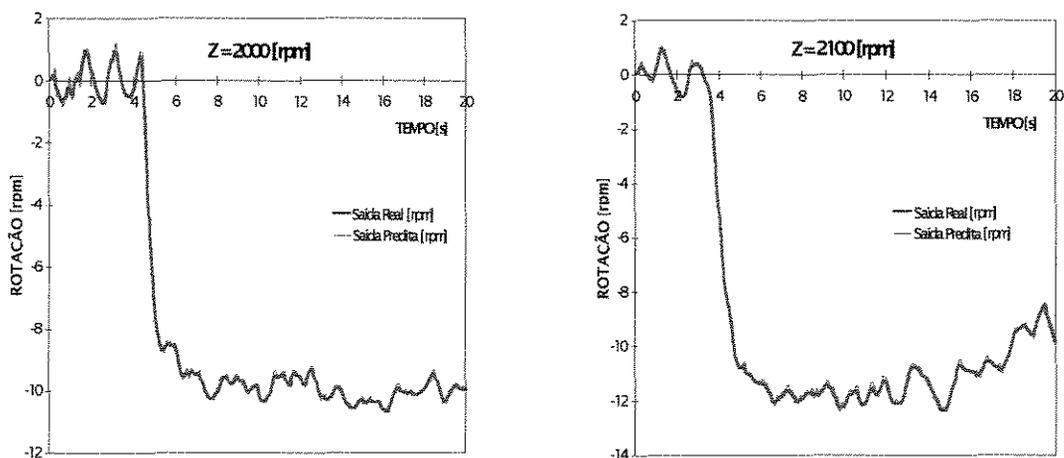


FIG. 5.23 - Saída de rotação real e predita, correspondente a uma perturbação de torque do tipo degrau, para os níveis de $Z = 2100$ [rpm] e $Z = 2000$ [rpm]

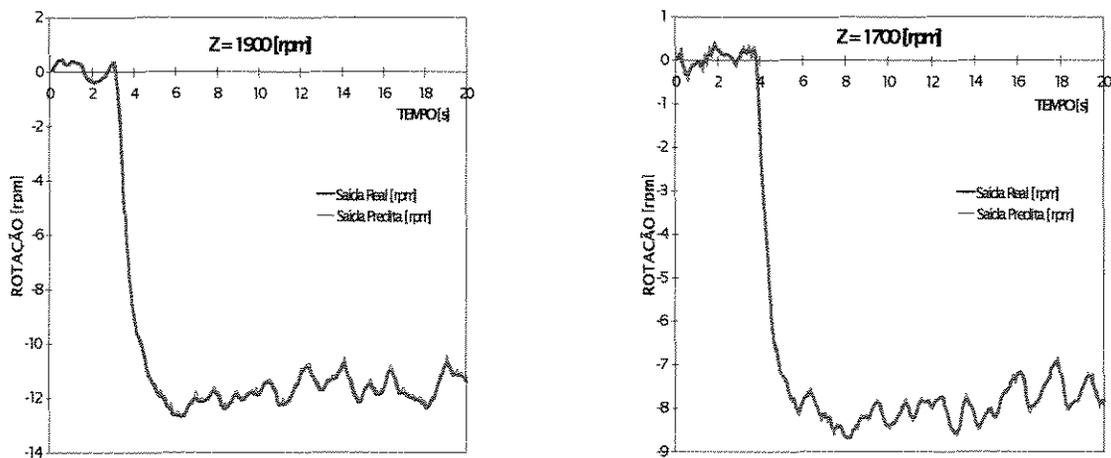


FIG. 5.24 - Saída de rotação real e predita, correspondente a uma perturbação de torque do tipo degrau, para os níveis de $Z = 1900$ [rpm] e $Z = 1700$ [rpm]

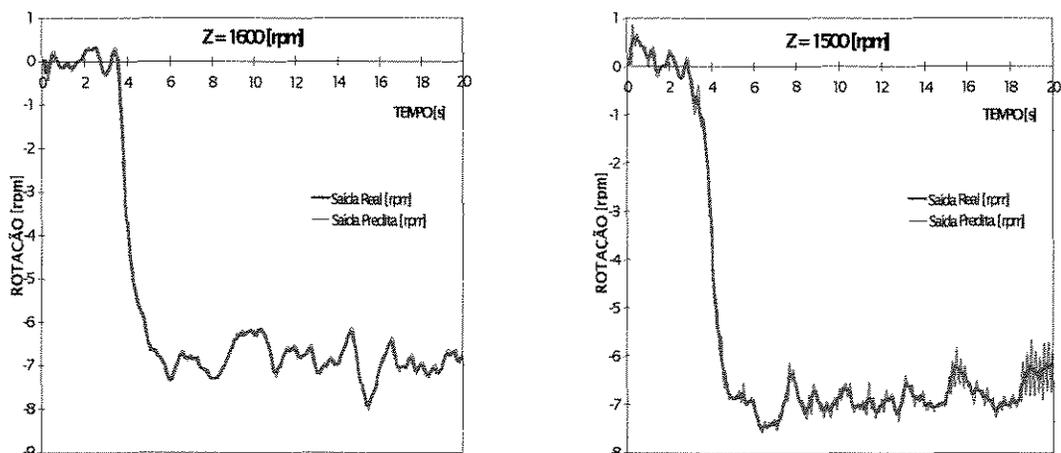


FIG. 5.25 - Saída de rotação real e predita, correspondente a uma perturbação de torque do tipo degrau, para os níveis de $Z = 1600$ [rpm] e $Z = 1500$ [rpm]

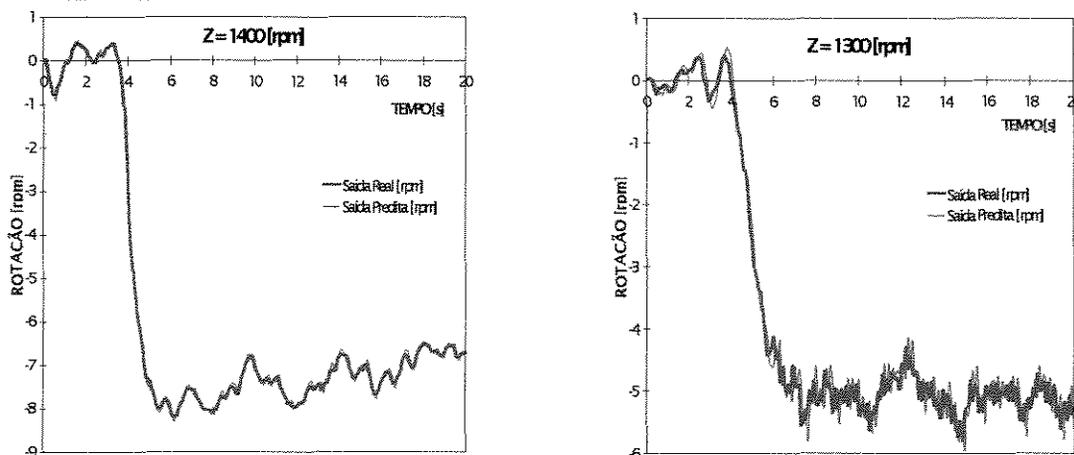


FIG. 5.26 - Saída de rotação real e predita, correspondente a uma perturbação de torque do tipo degrau, para os níveis de $Z = 1400$ [rpm] e $Z = 1300$ [rpm]

5.3 - Controlador do motor

O controlador do motor foi concebido de acordo com o diagrama de blocos apresentado na Figura 1.2.

Nota-se naquele diagrama que o controle da relação de transmissão é feito teóricamente a fim de se manter constante o nível de potência desenvolvido pelo motor, conforme discussão no sub-item 4.2.2.

5.3.1 - Lógica de controle

A lógica de controle empregada para o motor, mostrada na Figura 5.27, baseia-se na hipótese inicial de que o motor esteja operando num ponto pertencente à curva otimizada.

Para que seja obtida a seqüência de dados a ser utilizada pelo preditor, deve-se inicialmente fazer duas medições consecutivas do par de dados referente à rotação real (N_r) e da posição da alavanca de acionamento da bomba injetora (Z_r).

A partir de um par de dados (N_r, Z_r) calcula-se o torque estimado (τ_e), conforme o procedimento descrito no sub-item 4.1.1.2.

A fim de se verificar a necessidade de atuação do controlador, calcula-se a rotação otimizada (N_o) em função dos valores de N e Z , conforme o procedimento descrito no sub-item 4.2.2.

Caso a diferença entre a rotação otimizada e a real seja superior a 5 [rpm], procede-se ao cálculo da rotação predita a partir dos valores de torque e de rotação anteriormente armazenados e do respectivo conjunto de coeficientes (θ_p), conforme o procedimento descrito no sub-item 4.2.2.

A rotação predita (N_p) é aquela para a qual deveria se deslocar o ponto de operação do motor, caso não houvesse atuação do controlador.

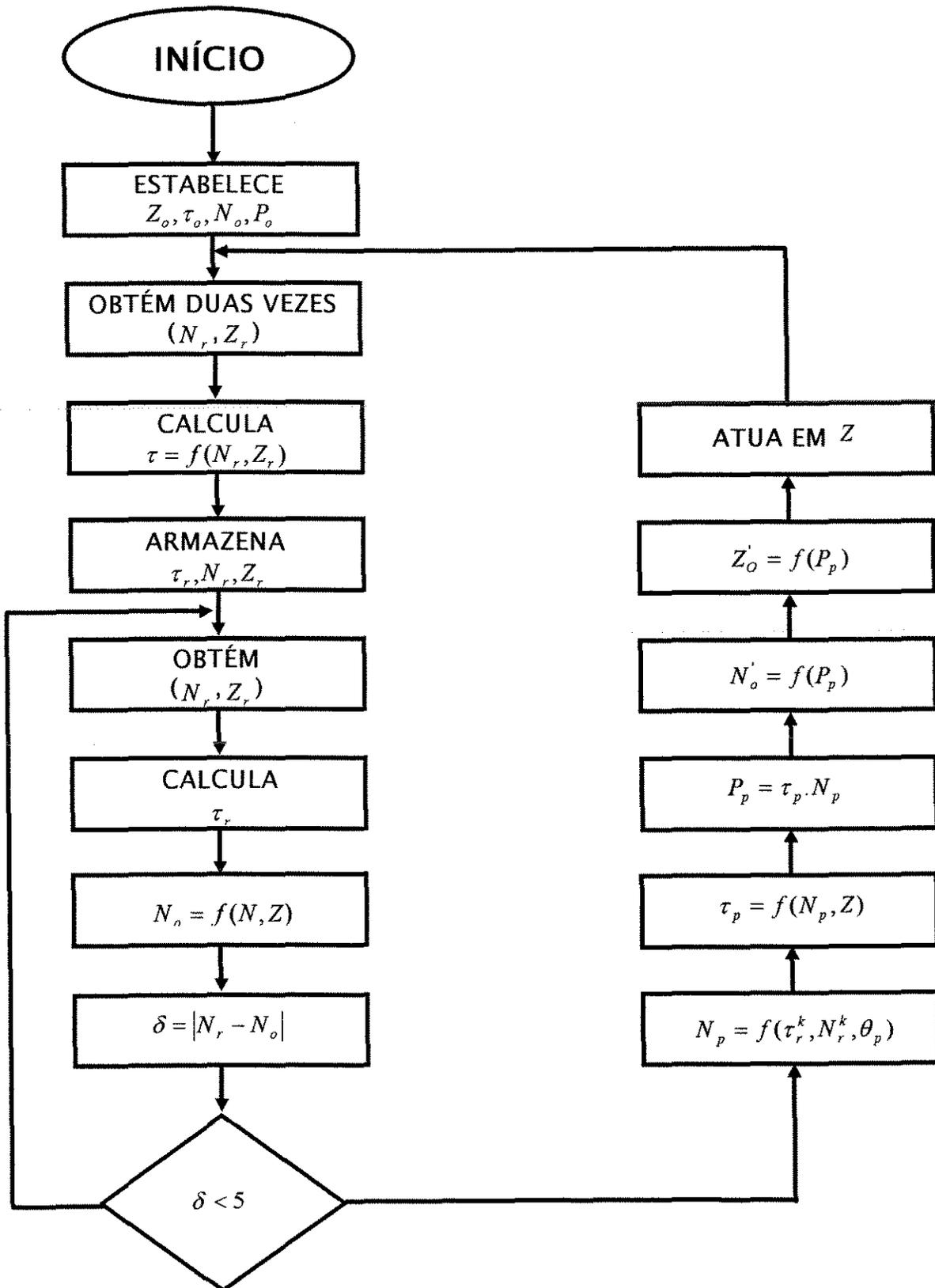


FIG. 5.27 - Fluxograma da lógica de controle

A atuação do controlador se faz à potência constante, levando-se em consideração o nível da potência predita (P_p), conforme discutido no sub-item 4.2.2, definindo-se desta maneira, uma nova posição otimizada da alavanca de acionamento da bomba injetora (Z_o), conforme procedimento apresentado no sub-item 4.2.2.

Após a atuação do controlador, inicia-se uma nova seqüência de aquisição de dados até que ocorra um novo ciclo de atuação.

Esta lógica de controle está apresentada no fluxograma da Figura 5.27.

5.3.2 - Simulação do controle

A lógica de controle apresentada no sub-item 5.3.1 foi implementada em um programa com a finalidade de simular a atuação do controlador.

Foram escolhidos os níveis de $Z = 1600$ [rpm], $Z = 1800$ [rpm] e $Z = 2000$ [rpm] para simular um carregamento crescente e um decrescente. Ambos os carregamentos foram iniciados a partir de um ponto otimizado, definido como sendo a intersecção das curvas governadas e da curva otimizada de operação.

O carregamento consistiu em variar a rotação, de forma crescente ou decrescente, de 2 em 2 [rpm], até ultrapassar o limite de 5 [rpm], no qual o controlador deveria atuar.

O resultado da simulação está apresentado na Figura 5.28, onde nota-se claramente que, após atingido o limite de $N = 5$ [rpm] pré-estabelecido, a atuação do controlador leva o ponto de operação do motor novamente até a curva otimizada.

Isto dá-se através da atuação em Z (programada para ser realizada de 5 em 5 [rpm]), seguindo uma curva de potência constante e admitindo-se a correspondente alteração na relação de transmissão.

A Figura 5.29 detalha a atuação do controlador para o nível inicialmente selecionado de $Z = 1800$ [rpm]. Para uma solicitação de carga crescente, nota-se que o ponto de operação desloca-se sobre a curva governada até ultrapassar o limite de $+5$ [rpm] em relação à rotação otimizada. Neste instante ocorre a atuação em Z , fazendo com que o ponto de operação se desloque, à potência constante, até atingir um novo ponto de operação sobre a curva otimizada ($Z = 1830$ [rpm]). Para uma solicitação de carga decrescente, em um processo análogo, obtém-se o ponto otimizado correspondente a $Z = 1770$ [rpm].

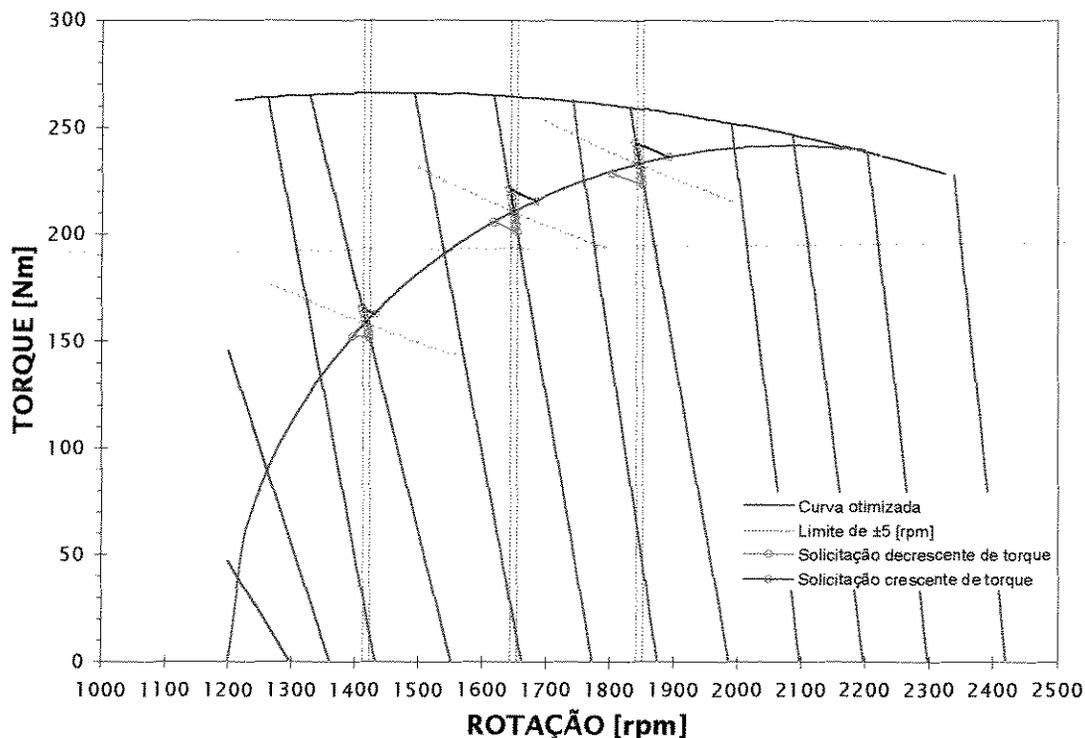


FIG. 5.28 - Atuação do controlador para os níveis de $Z = 1600$ [rpm], $Z = 1800$ [rpm] e $Z = 2000$ [rpm]

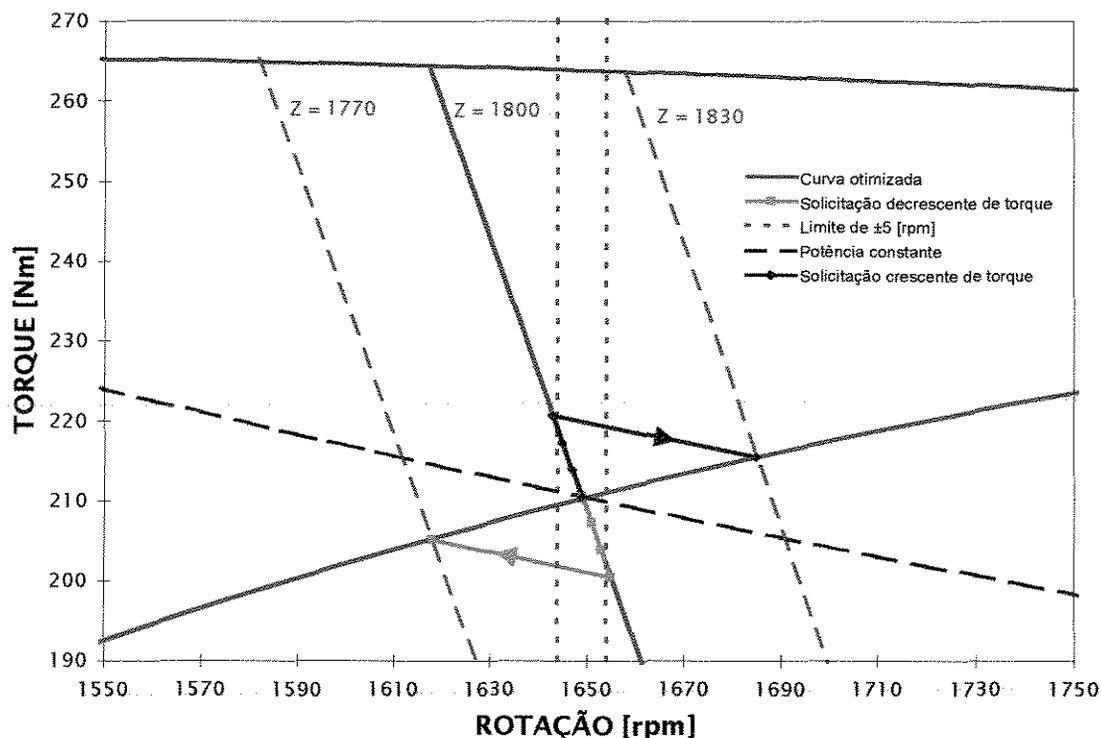


FIG. 5.29 - Detalhe da atuação do controlador para $Z = 1800$ [rpm]

A Figura 5.30 mostra de forma seqüencial a atuação do controlador, para uma solicitação de carga crescente. Nota-se que até o momento da atuação do controlador a rotação diminui, evidenciando-se um aumento do torque, enquanto a posição da alavanca de acionamento da bomba injetora não se altera. A partir do instante que a queda de rotação ultrapassa o valor pré-estabelecido de -5 [rpm] o controlador atua em Z fazendo com que o motor passe a operar em um novo ponto otimizado.

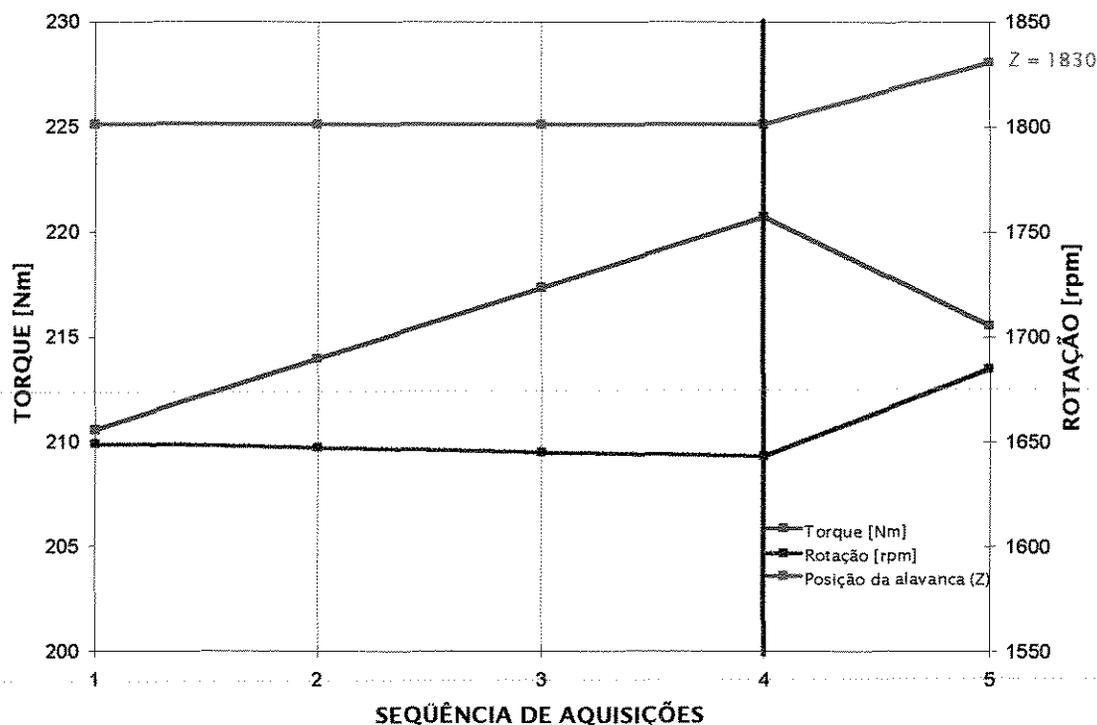


FIG. 5.30 - Comportamento da atuação do controlador para um carregamento crescente, iniciando-se com $Z = 1800$ [rpm]

A Figura 5.31 mostra de forma seqüencial a atuação do controlador, para uma solicitação de carga decrescente. Nota-se que até o momento da atuação do controlador a rotação aumenta, evidenciando-se uma diminuição do torque, enquanto a posição da alavanca de acionamento da bomba injetora não se altera. A partir do instante que a queda de rotação ultrapassa o valor pré-estabelecido de +5 [rpm] o controlador atua em Z fazendo com que o motor passe a operar em um novo ponto otimizado.

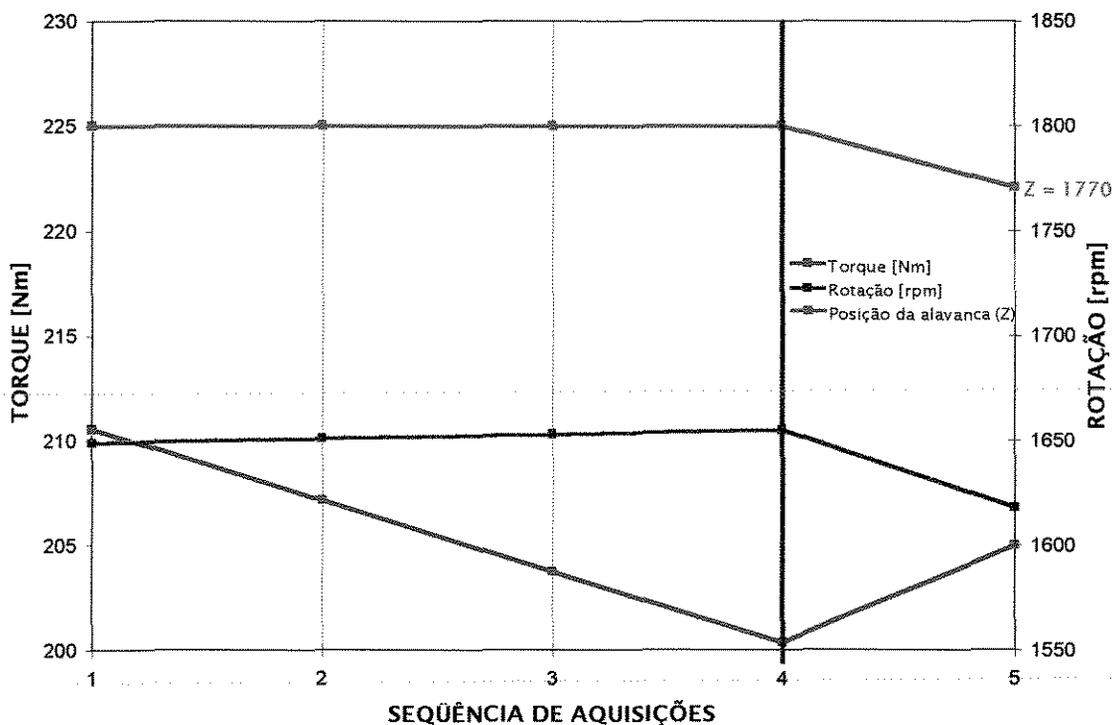


FIG. 5.31 - Comportamento da atuação do controlador para um carregamento decrescente, iniciando-se com $Z = 1800$ [rpm]

Este mesmo comportamento ocorre para os demais níveis de Z , sendo que próximo às condições de potência máxima e de torque nulo, deve-se, na implementação do controlador, levar em consideração as condições de contorno mencionadas no sub-item 5.1.3.

6 - CONCLUSÕES

A análise dos resultados alcançados neste trabalho permite que sejam obtidas as conclusões a seguir relacionadas.

A curva de débito máximo e as curvas governadas, que descrevem o comportamento do motor utilizado quando em funcionamento em regime, podem ser representadas matematicamente.

Uma curva otimizada de operação para o motor considerado, cuja finalidade é a de ser utilizada na implementação de um controlador do motor que obedeça ao critério de economia de energia, pode ser definida como um segmento de uma elipse que passa pelos pontos: de 1200 [rpm] e torque nulo; de consumo específico mínimo e de potência nominal.

A determinação indireta do torque em função da posição da alavanca de acionamento da bomba injetora e da rotação, através de uma equação obtida por uma regressão linear múltipla, aplicada aos dados experimentais de toda a faixa de operação do motor, não possui precisão adequada para o estabelecimento do controlador.

A determinação indireta do torque em função da posição da alavanca de acionamento da bomba injetora e da rotação, através de uma equação obtida por uma regressão linear múltipla, aplicada aos dados

experimentais próximos à curva otimizada, também não apresenta precisão adequada para o estabelecimento do controlador.

O método proposto para a determinação indireta do torque, apresentado no sub-item 4.1.1.2, fornece a precisão necessária para a implementação do controlador do motor, conforme constatado através da Figura 5.12.

A determinação indireta do torque, baseada experimentalmente em dados obtidos com o motor funcionando em regime, não pode ser utilizada quando a solicitação de carga for transiente e de grande amplitude.

A determinação indireta do torque, baseada experimentalmente em dados obtidos com o motor funcionando em regime, pode ser utilizada quando a solicitação de carga for transiente e de pequena amplitude e, portanto, pode ser utilizada para a implementação do controlador.

O sistema de aquisição dos dados experimentais, utilizados na definição dos modelos matemáticos, foi adequado para a obtenção dos mesmos tanto nos testes da aplicação de um transiente de torque do tipo degrau, quanto na aplicação de um transiente do tipo pulso.

O procedimento experimental utilizado para a realização dos testes dinâmicos foi adequado, fornecendo elementos para a definição dos modelos representativos do comportamento do motor, quando solicitado por uma perturbação transiente.

Um pré-tratamento dos dados experimentais, obtidos através dos testes dinâmicos, é necessário para a determinação dos modelos. O procedimento adotado para este pré-tratamento mostrou-se adequado.

Um modelo matemático geral, que se utiliza de um único conjunto de coeficientes $\{\theta\}$ e que descreve o comportamento do motor quando solicitado por uma perturbação transiente, próximo a um ponto de operação sobre a curva otimizada, não pode ser obtido através dos modelos estudados.

O resultado acima também ocorre, quando se mantém as estruturas selecionadas dos modelos, e desenvolve-se novos conjuntos de coeficientes $\{\theta\}$, para cada nível de Z .

Isto deve-se ao fato do comportamento dinâmico do motor alterar-se de acordo com o nível de torque e rotação (potência) em que opera.

Dos modelos estudados o denominado ARMAX foi o que melhor estimou a rotação em função de uma solicitação transiente de torque.

Utilizando-se os conjuntos de coeficientes $\{\theta\}$, correspondente a cada nível de Z , para o modelo ARMAX, obtém-se o preditor da rotação, quando o motor é solicitado por um transiente de torque de pequena amplitude, com precisão adequada para a implementação do controlador.

A atuação do controle, simulada no sub-item 5.3.2 e apresentada nas Figuras 5.28, 5.29, 5.30 e 5.31, permite concluir que o controlador atua de forma satisfatória na faixa compreendida entre ± 5 [rpm] do ponto pertencente à curva otimizada proposta.

Próximo ao regime de potência máxima, a atuação do controlador fica limitada pela curva de débito máximo.

Em regime de baixa potência, em níveis de baixo torque, a atuação do controlador fica limitada pela rotação de 1200 [rpm].

Os resultados obtidos por meio da simulação da lógica, idealizada e apresentada na Figura 5.27, permite concluir que o controlador proposto para o motor pode ser utilizado, em conjunto com um controle da transmissão, na implementação do sistema apresentado na Figura 1.2.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - BENTO, C. R. **Sistemas de controle: teoria e projetos**. São Paulo: Livros Érica Editora Ltda, 1989. 191 p.
- 2 - BRILLOUIN, L. **Science and information theory**. Academic Press, 1962.
- 3 - CAPPELLI, N. L., SVERZUT, C. B. Métodos indiretos de determinação de desempenho de motores diesel - uma revisão comentada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22, 1993, Ilhéus, BA. **Anais ... Ilhéus, BA: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1993. p. 2047 - 2061.**
- 4 - CAPPELLI, N. L. **Sistema de informação ao operador do trator agrícola (SITA)**. Campinas, SP: UNICAMP, 1990. 225 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1990.
- 5 - CHANCELLOR, W. J. Substituting information for energy in agriculture. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, MI, v. 24, n. 4, p. 802 - 807, 813, 1981.
- 6 - CHANCELLOR, W. J., SMITH, N. E. Tractor engine torque transducer using throttle position and RPM. **ASAE Paper 85-1557**. ASAE, St. Joseph, MI, 1985.
- 7 - COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1977. 264 p.
- 8 - COUGHANOWR, D. R., KOPPEL, L. B. **Process systems analysis and control**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1965. 491 p.
- 9 - DRAPER, N. R., SMITH, H. **Applied regression analysis**. 2 ed. New York: J. Wiley, c. 1981. 709p.

- 10 - FRANKLIN, G. F., POWELL, J. D. **Digital control of dynamic systems.** Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1980. 335 p.
- 11 - FRANKLIN, G. F., POWELL, J. D., EMANI-NAEINI, A. **Feedback control of dynamic systems.** Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1986. 622 p.
- 12 - FRANKLIN, G. F., POWELL, J. D., WORKMAN, M. L. **Digital control of dynamic systems.** 2 ed. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1990. 841 p.
- 13 - GRACE, A., LAUB, A. J., LITTLE, J. N., et al. **Control system toolbox user's guide.** Massachusetts: The Math Works, Inc., 1992. 262 p.
- 14 - GUI, X. Q., GOERING, C. E., BUCK, N. L. Simulation of a fuel-efficient augmented engine. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, MI, v. 32, n. 6, p. 1875 - 81, 1989.
- 15 - HALE, F. J. **Introduction to control system analysis and design.** Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1973. 338 p.
- 16 - HARRIS, H. D., PEARCE, F. A universal mathematical model of diesel engine performance. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 47, n. 3, p. 165 - 76, 1990.
- 17 - JAHNS, G. A method of describing diesel engine performance maps. **ASAE**, St. Joseph, MI, Paper NCR 83 - 103, 1983.
- 18 - KIRSTE, V. T., GRUNBECK, W., FELLER, M. Kennfeldmonitor für dieselmotoren. **Grundlage der Landtechnik**, Duesseldorf, v. 35, n. 10, p. 426 - 30, 1985.
- 19 - KOERTNER, R., BASHFORD, L. L., LANE, D. E. Tractor instrumentation for measuring fuel and energy requirements. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, MI, Paper 75 - 1547, 1975.
- 20 - KUO, B. C. **Digital control systems.** 2 ed. Orlando, Florida, USA: Saunders College Publishing, 1992. 751 p.
- 21 - LITTLE, J. N., SHURE, L. **Signal processing toolbox user's guide.** Massachusetts: The Math Works, Inc., 1992. 169 p.
- 22 - LJUNG, L. **System identification: theory for the user.** Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1987. 519 p.

- 23 - LJUNG, L. **System identification toolbox user's guide**. Massachusetts: The Math Works, Inc., 1992. 307 p.
- 24 - McKIERNAN, M., LALK, T. R., STOUT, B. A., et al. Estimating diesel engine performance by indirect methods. **SAE, Technical Paper series 871606**, 1987.
- 25 - OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. Trad. André Fabio Kohn - José Carlos Teixeira de Barros Moraes. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1985. 929 p. Tradução de: Modern control engineering.
- 26 - OGATA, K. **Discrete-time control systems**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall International, Inc., 1987. 994 p.
- 27 - OGATA, K. **Modern control engineering**. 2 ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall Internacional, Inc., 1990. 963 p.
- 28 - PANG, S. N., ZOERB, G. C., WANG, G. Tractor monitor based on indirect fuel measurement. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, MI, v. 28, n. 4, p. 994 - 98, 1985.
- 29 - PASCAL, J. A., BROWN, K., T. **Tractor power estimation**. Bush Estate, Penicuik, Midlothian: Scottish Institute of Agricultural Engineering, Departmental Note N. SSN/168, EH26 OPH, 1974.
- 30 - PUCKETT, H. B., ANDREW, F. W. From pressure switches to computers. **ASAE Paper 76-3007**. ASAE, St. Joseph, MI, 1976.
- 31 - PHILLIPS, C. L., HARBOR, R. D. **Feedback control systems**. 2 ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall International, Inc., 1991. 664 p.
- 32 - SCHROCK, M., MATTESON, D., BLUMANHOURST, M., et al. A device for aiding gear selection in agricultural tractors. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, MI, v. 29. n. 5, p. 1232 - 36, 1986.
- 33 - SOUZA, E. G., MILANEZ, L. F. Indirect evaluation of the torque of diesel engines. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, MI, v. 31, n. 5, p. 1350 - 54, 1988.
- 34 - SOUZA, E. G., SANTA CATARINA, A. Curva ótima de operação de motores diesel. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 23, 1994, Campinas, SP. **Anais ...** Campinas, SP: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1994. 18 p.

- 35 - STEINKAMPH, H. **Possibilities of saving energy during tractor use.** Braunsehweig-Völkenrode: Federal Agricultural Research Center of Braunsehweig, Institute of Farm Mechanization Management, 1980. 10 p.
- 36 - SUMMER, H. R., HELLWIG, R. E., MONROE, G. E. Measuring implement power requirements from tractor fuel consumption. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, MI, v. 9, n. 1, p. 85 - 9, 1986.
- 37 - TRIBUS, M., McIRVINE, E. C. Energy and information. **Scientific American**, v. 224, n. 3, September, p. 179 - 188, 1971.
- 38 - WANG, G. **A microprocessor-based analysis of tractor performance.** Saskatoon, Canada, 1988. Tese (Ph.D) - University of Saskatchewan, 1988.
- 39 - WANG, G., ZOERB, G. C. Determination of optimum working points for diesel engines. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, MI, v. 32, n. 5, p. 1519 - 22, 1989.
- 40 - ZANDER, J. Studies of combine harvester operation. **Inst. Agr. Eng. Journal**, v. 25, n. 1, p. 30 - 35, Spring, 1990.

8 - SUMMARY

Since its conception the agricultural tractor has been the principal power unit for agricultural purposes. Its basic concept has many things to be studied.

The next step towards agricultural tractor evolution will be to improve its global performance. To improve global performance, one has to deal with critical parts about energy conversion such as: engine, transmission, soil-tire interface, and hydraulic mechanism control system.

A model of diesel engine applied to an agricultural tractor was used to study an engine control system to improve the agricultural tractor global performance, using an energy economy criteria.

A tractor diesel engine performance was studied to substantiate a logic to implement an engine control system.

The proposed logic is able to utilize together an agricultural tractor transmission and engine control system.

Economy of energy criteria was adopted to define an optimized operation curve that permits the engine to work in a wide range from lower torque and speed levels to a maximum power level.

It was proposed a method to indirectly estimate torque based on the engine working at a steady state point. This method showed adequate precision to be used in an engine controller.

In this work there were studied mathematic equations to estimate the engine dynamic response to a transient of torque solicitation. Based in this estimate one can obtain a step ahead predictor for the speed output. The estimate and the predictor showed an adequate precision to be used in the engine controller.

Through simulations it was verified that the logic and the equations used in this work presented a good performance.

9 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No transcorrer deste estudo pôde-se coleccionar as sugestões seguintes, para serem realizadas em trabalhos futuros.

Idealizar um controlador para transmissões continuamente variável, para ser utilizado em conjunto com o controlador motivo deste trabalho.

Implementar em um trator agrícola o sistema de controle apresentado na Figura 1.2.

Estudar e otimizar os tempos envolvidos nas respostas do controlador do motor e da transmissão.

Idealizar um critério de operação do controlador do motor para ser utilizado em conjunto com transmissões mecanicamente escalonadas que permitam mudanças automáticas na relação de transmissão.

Idealizar um controlador para transmissões mecanicamente escalonadas que permitam mudanças automáticas na relação de transmissão.

Implementar este controlador em conjunto com o do motor, segundo o sistema apresentado na Figura 1.2.

Estudar e desenvolver o controle de velocidade de deslocamento do trator agrícola, conforme idealizado no diagrama de blocos apresentado na Figura 1.3

Implementar o controle de velocidade de deslocamento idealizado, utilizando-se de um dos controles de motor e transmissão acima mencionados.

Estudar e desenvolver um sistema global de controle para o trator agrícola que leve em consideração o controle do motor, da transmissão, da velocidade de deslocamento, do deslizamento e do sistema de levante hidráulico.

10 - APÊNDICES

10.1 - Dados observados para a curva de plena carga

A curva de plena carga foi obtida segundo a NBR 5484/84. Os dados obtidos são observados nas condições ambientais do momento do ensaio e estão mostrados na Tabela 10.1.

A variação da densidade do óleo diesel utilizado em função da temperatura é expressa por $D[g/l] = -0,689 \cdot T[^\circ C] + 852$.

TABELA 10.1 - Dados observados para a curva de plena carga

ROTAÇÃO DO MOTOR [MIN-1]	TORQUE DO MOTOR [Nm]	POTÊNCIA DO MOTOR [kW]	CONSUMO HORÁRIO [l/h]	CONSUMO ESPECÍFICO [g/kWh]
2224	237	55,20	15,99	242,31
2200	238	54,83	15,79	238,60
2150	242	54,49	15,64	239,96
2100	244	53,66	15,25	237,53
2050	246	52,81	15,05	238,16
2000	248	51,94	14,48	232,91
1950	253	51,66	14,34	231,88
1905	255	50,87	14,20	232,99
1850	259	50,18	14,20	236,21
1800	261	49,20	13,70	232,53
1747	261	47,75	13,27	231,93
1698	262	46,59	12,93	231,57
1647	262	45,19	12,66	233,85
1601	264	44,26	12,35	232,77
1550	266	43,18	12,05	232,77
1500	268	42,10	11,78	233,52
1450	268	40,69	11,55	236,61
1400	267	39,14	11,23	239,17
1351	266	37,63	10,75	238,10
1300	263	35,80	10,34	240,85
1250	262	34,30	9,96	242,19
1209	260	32,92	9,64	244,07

10.2 - Dados observados para as curvas governadas

Os dados observados para as curvas governadas foram obtidos, segundo a NBR 5484/84, com a alavanca de acionamento da bomba injetora selecionada para se obter as rotações máximas livre (Z) de 2420 [rpm], 2300 [rpm] até 1300 [rpm] com incrementos de Z=100 [rpm].

As Tabelas 10.2 a 10.13 apresentam os dados obtidos para as curvas governadas.

TABELA 10.2 - Dados obtidos para a curva governada de Z=2420 [rpm]

ROTAÇÃO DO MOTOR [MIN-1]	TORQUE DO MOTOR [Nm]	POTÊNCIA DO MOTOR [kW]	CONSUMO HORÁRIO [l/h]	CONSUMO ESPECÍFICO [g/kWh]
2400	56	14,07	7,66	455,55
2375	127	31,59	11,31	299,70
2350	193	47,50	14,82	261,16
2325	228	55,51	16,90	254,79
2300	230	55,40	17,31	261,44
2275	233	55,51	17,27	260,34
2250	236	55,61	17,91	269,39

TABELA 10.3 - Dados obtidos para a curva governada de Z=2300 [rpm]

ROTAÇÃO DO MOTOR [MIN-1]	TORQUE DO MOTOR [Nm]	POTÊNCIA DO MOTOR [kW]	CONSUMO HORÁRIO [l/h]	CONSUMO ESPECÍFICO [g/kWh]
2300	0	0,00	4,63	----
2275	52	12,39	6,73	452,97
2250	117	27,57	9,84	297,46
2226	186	43,36	13,37	257,22
2197	229	52,69	15,80	250,21
2175	240	54,66	16,36	249,67

TABELA 10.4 - Dados obtidos para a curva governada de $Z=2200$ [rpm]

ROTAÇÃO DO MOTOR [MIN-1]	TORQUE DO MOTOR [Nm]	POTÊNCIA DO MOTOR [kW]	CONSUMO HORÁRIO [l/h]	CONSUMO ESPECÍFICO [g/kWh]
2200	0	0,00	4,06	----
2176	44	10,03	5,87	487,64
2150	102	22,97	8,37	303,95
2125	159	35,38	11,08	261,10
2100	220	48,38	14,22	245,22
2075	245	53,24	15,52	243,10

TABELA 10.5 - Dados obtidos para a curva governada de $Z=2100$ [rpm]

ROTAÇÃO DO MOTOR [MIN-1]	TORQUE DO MOTOR [Nm]	POTÊNCIA DO MOTOR [kW]	CONSUMO HORÁRIO [l/h]	CONSUMO ESPECÍFICO [g/kWh]
2100	0	0,00	3,74	----
2077	44	9,57	5,41	471,18
2051	108	23,20	8,00	287,39
2026	170	36,07	10,75	248,52
2001	225	47,15	13,52	239,08
1975	243	50,26	14,38	238,64
1965	250	51,44	14,81	240,13

TABELA 10.6 - Dados obtidos para a curva governada de $Z=2000$ [rpm]

ROTAÇÃO DO MOTOR [MIN-1]	TORQUE DO MOTOR [Nm]	POTÊNCIA DO MOTOR [kW]	CONSUMO HORÁRIO [l/h]	CONSUMO ESPECÍFICO [g/kWh]
2000	0	0,00	3,39	----
1975	23	4,76	4,21	737,32
1950	59	12,05	5,61	387,85
1923	108	21,75	7,49	286,90
1900	145	28,85	8,89	256,71
1875	189	37,11	10,78	242,17
1848	228	44,12	12,57	237,34
1825	252	48,16	13,81	239,09
1800	261	49,20	13,70	232,18

10.7 - Dados obtidos para a curva governada de $Z=1900$ [rpm]

ROTAÇÃO DO MOTOR [MIN-1]	TORQUE DO MOTOR [Nm]	POTÊNCIA DO MOTOR [kW]	CONSUMO HORÁRIO [l/h]	CONSUMO ESPECÍFICO [g/kWh]
1900	0	0,00	3,09	---
1875	19	3,73	3,50	780,85
1850	51	9,88	4,72	397,38
1825	96	18,35	6,31	286,58
1801	144	27,16	8,16	250,32
1775	197	36,62	10,24	232,83
1750	243	44,53	12,31	230,34
1728	259	46,87	13,16	233,96

TABELA 10.8 - Dados obtidos para a curva governada de $Z=1800$ [rpm]

ROTAÇÃO DO MOTOR [MIN-1]	TORQUE DO MOTOR [Nm]	POTÊNCIA DO MOTOR [kW]	CONSUMO HORÁRIO [l/h]	CONSUMO ESPECÍFICO [g/kWh]
1800	0	0,00	2,71	---
1776	17	3,16	3,16	830,94
1750	41	7,51	4,00	443,15
1726	79	14,28	5,24	305,38
1700	122	21,72	6,74	258,53
1675	165	28,94	8,22	236,63
1650	210	36,68	9,93	225,44
1626	250	42,57	11,64	227,65
1602	260	43,62	12,13	231,68

TABELA 10.9 - Dados obtidos para a curva governada de $Z=1700$ [rpm]

ROTAÇÃO DO MOTOR [MIN-1]	TORQUE DO MOTOR [Nm]	POTÊNCIA DO MOTOR [kW]	CONSUMO HORÁRIO [l/h]	CONSUMO ESPECÍFICO [g/kWh]
1700	0	0,00	2,40	---
1674	13	2,28	2,78	1016,14
1650	28	4,84	3,16	542,80
1625	55	9,36	3,99	354,69
1600	90	15,08	5,13	282,82
1576	131	21,62	6,45	248,28
1551	173	28,10	7,91	234,45
1527	216	34,54	9,44	227,64
1500	254	39,90	11,09	231,43
1474	265	40,90	11,57	235,56

TABELA 10.10 - Dados obtidos para a curva governada de $Z=1600$ [rpm]

ROTAÇÃO DO MOTOR [MIN-1]	TORQUE DO MOTOR [Nm]	POTÊNCIA DO MOTOR [kW]	CONSUMO HORÁRIO [l/h]	CONSUMO ESPECÍFICO [g/kWh]
1600	0	0,00	2,16	---
1575	10	1,65	2,46	1241,18
1550	23	3,73	2,76	615,55
1525	38	6,07	3,16	433,51
1500	58	9,11	3,69	336,57
1475	87	13,44	4,53	280,46
1450	115	17,46	5,37	255,88
1425	150	22,38	6,42	238,68
1399	175	25,64	7,12	231,18
1375	209	30,09	8,22	227,16
1348	243	34,30	9,46	229,57
1319	262	36,19	10,37	238,53

TABELA 10.11 - Dados obtidos para a curva governada de $Z=1500$ [rpm]

ROTAÇÃO DO MOTOR [MIN-1]	TORQUE DO MOTOR [Nm]	POTÊNCIA DO MOTOR [kW]	CONSUMO HORÁRIO [l/h]	CONSUMO ESPECÍFICO [g/kWh]
1500	0	0,00	1,95	---
1475	11	1,70	2,24	1093,86
1447	21	3,18	2,46	641,59
1425	33	4,92	2,75	464,32
1400	47	6,89	3,09	372,95
1375	86	12,38	4,16	279,18
1350	130	18,38	5,48	247,94
1325	166	23,03	6,50	234,58
1300	204	27,77	7,67	229,54
1275	238	31,78	8,90	232,85
1252	257	33,70	9,80	241,97
1250	262	34,30	10,08	244,52

TABELA 10.12 - Dados obtidos para a curva governada de $Z=1400$ [rpm]

ROTAÇÃO DO MOTOR [MIN-1]	TORQUE DO MOTOR [Nm]	POTÊNCIA DO MOTOR [kW]	CONSUMO HORÁRIO [l/h]	CONSUMO ESPECÍFICO [g/kWh]
1400	0	0,00	1,76	----
1374	11	1,58	2,03	1067,10
1350	20	2,83	2,24	657,06
1325	33	4,58	2,51	454,93
1300	47	6,40	2,79	362,67
1275	64	8,55	3,21	312,39
1250	95	12,44	4,00	267,43
1227	125	16,06	4,80	248,31
1201	152	19,12	5,50	238,97

TABELA 10.13 - Dados obtidos para a curva governada de $Z=1300$ [rpm]

ROTAÇÃO DO MOTOR [MIN-1]	TORQUE DO MOTOR [Nm]	POTÊNCIA DO MOTOR [kW]	CONSUMO HORÁRIO [l/h]	CONSUMO ESPECÍFICO [g/kWh]
1300	0	0,00	1,58	----
1277	10	1,34	1,81	1127,04
1250	22	2,88	2,04	589,52
1223	36	4,61	2,30	414,59
1201	46	5,79	2,53	362,82

10.3 - Coeficientes das estruturas do modelo ARX, para $Z=1800$ [rpm]

As Tabela 10.14 e 10.15 mostram o índice FPE e os coeficientes a_n e b_n obtidos para as 25 estruturas estáveis estudadas.

TABELA 10.14 - Índice FPE e coeficientes a_n , com seus respectivos desvios padrões estimados, para o modelo ARX

ESTR.	FPE	a1	a2	a3	a4	a5
ARX-01	0,05188	1,0000 0	-1,6931 ($\pm 0,0595$)	0,7335 ($\pm 0,0668$)		
ARX-02	0,053	1,0000 0	-1,6186 ($\pm 0,0566$)	0,6411 ($\pm 0,0607$)		
ARX-03	0,05419	1,0000 0	-1,5972 ($\pm 0,0576$)	0,6085 ($\pm 0,0603$)		
ARX-04	0,05223	1,0000 0	-1,6789 ($\pm 0,0622$)	0,7189 ($\pm 0,0695$)		
ARX-05	0,05333	1,0000 0	-1,6234 ($\pm 0,0580$)	0,6456 ($\pm 0,0618$)		
ARX-06	0,05496	1,0000 0	-1,5942 ($\pm 0,0581$)	0,6060 ($\pm 0,0607$)		
ARX-07	0,05191	1,0000 0	-1,6897 ($\pm 0,0620$)	0,7405 ($\pm 0,0700$)		
ARX-08	0,05281	1,0000 0	-1,6253 ($\pm 0,0575$)	0,6599 ($\pm 0,0617$)		
ARX-09	0,05151	1,0000 0	-1,7557 ($\pm 0,0685$)	0,9218 ($\pm 0,1231$)	-0,1375 ($\pm 0,0756$)	
ARX-10	0,05312	1,0000 0	-1,6731 ($\pm 0,0717$)	0,7906 ($\pm 0,1354$)	-0,1054 ($\pm 0,0854$)	
ARX-11	0,05202	1,0000 0	-1,7607 ($\pm 0,0789$)	0,9317 ($\pm 0,1449$)	-0,1426 ($\pm 0,0854$)	
ARX-12	0,0534	1,0000 0	-1,6796 ($\pm 0,0718$)	0,8052 ($\pm 0,1359$)	-0,1144 ($\pm 0,0869$)	
ARX-13	0,05072	1,0000 0	-1,8292 ($\pm 0,0816$)	1,1015 ($\pm 0,1563$)	-0,2335 ($\pm 0,0908$)	
ARX-14	0,05313	1,0000 0	-1,6639 ($\pm 0,0720$)	0,7686 ($\pm 0,1367$)	-0,0787 ($\pm 0,0883$)	
ARX-15	0,04807	1,0000 0	-1,7949 ($\pm 0,0669$)	1,2227 ($\pm 0,1329$)	-0,7904 ($\pm 0,1344$)	0,3734 ($\pm 0,0726$)
ARX-16	0,04812	1,0000 0	-1,7930 ($\pm 0,0669$)	1,2209 ($\pm 0,1330$)	-0,7873 ($\pm 0,1350$)	0,3675 ($\pm 0,0731$)
ARX-17	0,04683	1,0000 0	-1,8124 ($\pm 0,0661$)	1,1978 ($\pm 0,1308$)	-0,6818 ($\pm 0,1381$)	0,3341 ($\pm 0,0728$)
ARX-18	0,04564	1,0000 0	-1,7338 ($\pm 0,0669$)	1,0854 ($\pm 0,1344$)	-0,7227 ($\pm 0,1321$)	0,4171 ($\pm 0,0722$)
ARX-19	0,04314	1,0000 0	-1,7376 ($\pm 0,0641$)	1,2175 ($\pm 0,1256$)	-0,9692 ($\pm 0,1328$)	0,5417 ($\pm 0,0775$)
ARX-20	0,0461	1,0000 0	-1,7325 ($\pm 0,0742$)	1,0840 ($\pm 0,1387$)	-0,7242 ($\pm 0,1376$)	0,4186 ($\pm 0,0810$)
ARX-21	0,04357	1,0000 0	-1,7358 ($\pm 0,0651$)	1,2092 ($\pm 0,1357$)	-0,9593 ($\pm 0,1463$)	0,5393 ($\pm 0,0790$)
ARX-22	0,04372	1,0000 0	-1,7401 ($\pm 0,0645$)	1,2213 ($\pm 0,1267$)	-0,9786 ($\pm 0,1341$)	0,5502 ($\pm 0,0791$)
ARX-23	0,0428	1,0000 0	-1,8249 ($\pm 0,0746$)	1,3625 ($\pm 0,1489$)	-0,9672 ($\pm 0,1443$)	0,4968 ($\pm 0,0800$)
ARX-24	0,04415	1,0000 0	-1,7436 ($\pm 0,0664$)	1,2361 ($\pm 0,1434$)	-0,9990 ($\pm 0,1630$)	0,5576 ($\pm 0,0860$)
ARX-25	0,04316	1,0000 0	-1,7577 ($\pm 0,0643$)	1,2281 ($\pm 0,1256$)	-0,9419 ($\pm 0,1336$)	0,5102 ($\pm 0,0801$)

TABELA 10.15 - Coeficientes b_n , com seus respectivos desvios padrões estimados, para o modelo ARX

ESTR.	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7
ARX-01	0	-0,4443 (±0,1103)	0,4176 (±0,1024)				
ARX-02	0	0	-0,3353 (±0,0991)	0,3231 (±0,0936)			
ARX-03	0	0	0	-0,2292 (±0,0988)	0,2258 (±0,0940)		
ARX-04	0	-0,3617 (±0,1633)	0,2364 (±0,2761)	0,0991 (±0,1370)			
ARX-05	0	0	-0,3302 (±0,1454)	0,3189 (±0,2604)	-0,0007 (±0,1363)		
ARX-06	0	0	0	-0,1906 (±0,1429)	0,1374 (±0,2587)	0,0496 (±0,1371)	
ARX-07	0	-0,5545 (±0,2041)	0,7621 (±0,4265)	-0,5182 (±0,4003)	0,2766 (±0,1683)		
ARX-08	0	0	-0,5756 (±0,1822)	1,0067 (±0,4039)	-0,8260 (±0,3958)	0,3741 (±0,1686)	
ARX-09	0	-0,3944 (±0,1135)	0,3771 (±0,1046)				
ARX-10	0	0	-0,2613 (±,1155)	0,2572 (±0,1074)			
ARX-11	0	-0,4099 (±0,1647)	0,4127 (±0,2938)	-0,0199 (±0,1536)			
ARX-12	0	0	-0,2221 (±0,1664)	0,1843 (±0,2786)	0,0344 (±0,1383)		
ARX-13	0	-0,7617 (±0,2163)	1,3906 (±0,4855)	-1,1054 (±0,4551)	0,4520 (±0,1790)		
ARX-14	0	0	-0,4815 (±0,2103)	0,8577 (±0,4364)	-0,7332 (±0,4085)	0,3428 (±0,1719)	
ARX-15	0	-0,0053 (±0,0093)					
ARX-16	0	0	-0,0030 (±0,0086)				
ARX-17	0	-0,2989 (±0,1095)	0,2733 (±0,1016)				
ARX-18	0	0	-0,3926 (±0,1095)	0,3609 (±0,1011)			
ARX-19	0	0	0	-0,5237 (±0,1049)	0,4883 (±0,0977)		
ARX-20	0	0,0070 (±0,1734)	-0,4046 (±0,3167)	0,3661 (±0,1622)			
ARX-21	0	0	-0,0246 (±0,1523)	-0,4838 (±0,2688)	0,4721 (±0,1398)		
ARX-22	0	0	0	0,1506	0,6036 (±0,2514)	-0,0614 (±0,1247)	
ARX-23	0	-0,4759 (±0,2029)	0,9674 (±0,4490)	-1,2369 (±0,4165)	0,6985 (±0,1684)		
ARX-24	0	0	0,0456 (±0,2073)	-0,6740 (±0,4610)	0,6803 (±0,4299)	-0,0866 (±0,1694)	
ARX-25	0	0	0	-0,3371 (±0,1913)	-0,0241 (±0,3958)	0,6588 (±0,3707)	-0,3236 (±0,1566)

10.4 - Coeficientes das estruturas do modelo OE, para Z=1800 [rpm]

As Tabela 10.16 e 10.17 mostram o índice FPE e os coeficientes b_n e f_n obtidos para as 32 estruturas estáveis estudadas.

TABELA 10.16 - Índices Lf, FPE e coeficientes b_n , com seus respectivos desvios padrões estimados, para o modelo OE

ESTR.	FPE	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7
OE-01	1,305	0	-1,9394 (±0,1557)	1,8618 (±0,1452)				
OE-02	1,488	0	0	-2,0233 (±0,1728)	1,9435 (±0,1616)			
OE-03	1,701	0	0	0	-2,1447 (±0,1958)	2,0607 (±0,1837)		
OE-04	1,394	0	-0,8931 (±0,1709)	0,8540 (±0,1643)				
OE-05	1,468	0	0	-3,2414 (±0,5342)	3,1164 (±0,5110)			
OE-06	1,669	0	0	0	0,5170	3,5068 (±0,4933)		
OE-07	1,327	0	-1,9112 (±0,2668)	1,8299 (±0,2561)				
OE-08	1,747	0	0	-0,9632 (±0,0666)	0,8937 (±0,0649)			
OE-09	1,718	0	0	0	-2,9482 (±0,4314)	2,8464 (±0,4198)		
OE-10	1,369	0	-1,3603 (±0,2065)	1,2956 (±0,1970)				
OE-11	1,791	0	0	0	0,5295	2,4139 (±0,5080)		
OE-12	1,313	0	-2,5220 (±0,4729)	3,1169 (±1,0008)	-0,6667 (±0,5365)			
OE-13	1,497	0	0	-2,7026 (±0,5062)	3,3975 (±0,1749)	-0,7685 (±0,5794)		
OE-14	1,703	0	0	0	-3,0023 (±0,5434)	3,9185 (±1,1604)	-0,9913 (±0,6300)	
OE-15	1,371	0	-1,3589 (±0,3270)	1,7522 (±0,9159)	-0,4323 (±0,6287)			
OE-16	1,607	0	0	-1,3797 (±0,3407)	2,0424 (±1,1526)	-0,6899 (±0,8513)		
OE-17	1,692	0	0	0	-4,0165 (±0,7740)	4,4108 (±1,7181)	-0,5273 (±1,0570)	
OE-18	1,37	0	-1,8871 (±0,5188)	2,4269 (±1,3591)	-0,5938 (±0,8958)			
OE-19	1,811	0	0	0	-2,9963 (±0,7983)	0,7384 (±6,1133)	2,0631 (±5,7993)	
OE-20	1,326	0	-3,3475 (±0,7168)	3,3104 (±2,2083)	-0,0942 (±1,7200)			
OE-21	1,502	0	0	-3,2601 (±0,7165)	4,2531 (±1,8897)	-1,0898 (±1,2718)		
OE-22	1,257	0	-4,1421 (±0,6694)	8,5190 (±1,8494)	-7,0099 (±1,9112)	2,5367 (±0,7386)		
OE-23	1,448	0	0	-4,2447 (±0,7274)	8,6715 (±2,0045)	-7,1753 (±2,0835)	2,6457 (±0,8144)	
OE-24	1,671	0	0	0	-4,4549 (±0,7814)	8,7831 (±2,1511)	-6,8120 (±2,2343)	2,3842 (±0,8758)
OE-25	1,362	0	-2,6286 (±0,6680)	6,0301 (±1,7451)	-5,4157 (±1,7930)	1,9638 (±0,7068)		
OE-26	1,463	0	0	-4,3670 (±0,7959)	8,0215 (±2,5888)	-5,9415 (±3,0088)	2,1715 (±1,1208)	

continuação Tab. 10.16

ESTR.	FPE	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7
OE-27	1,686	0	0	0	-4,6971 (±0,8975)	8,9222 (±2,2512)	-6,7904 (±2,4367)	2,4469 (±0,9429)
OE-28	1,263	0	-4,2207 (±0,7152)	8,5430 (±1,6764)	-7,5869 (±1,6555)	3,1369 (±0,6555)		
OE-29	1,471	0	0	-4,4928 (±0,8402)	8,7273 (±2,0468)	-7,2288 (±2,1296)	2,8661 (±0,8673)	
OE-30	1,701	0	0	0	-4,6755 (±0,9046)	8,7110 (±2,3386)	-6,7178 (±2,5249)	2,5536 (±1,0023)
OE-31	1,325	0	-3,8114 (±0,7323)	5,1016 (±2,2716)	-2,7318 (±2,6405)	1,2874 (±1,3737)		
OE-32	1,473	0	0	-4,8373 (±0,8424)	9,7515 (±1,9565)	-8,9489 (±2,0809)	3,8790 (±0,9656)	

TABELA 10.17 - Coeficientes f_n , com seus respectivos desvios padrões estimados, para o modelo OE

ESTR.	f1	f2	f3	f4	f5
OE-01	1,0000 0	-0,8822 (±0,0163)			
OE-02	1,0000 0	-0,8769 (±0,0175)			
OE-03	1,0000 0	-0,8686 (±0,0192)			
OE-04	1,0000 0	-1,4792 (±0,1091)	0,5377 (±0,1011)		
OE-05	1,0000 0	-0,1398 (±0,2817)	-0,6686 (±0,2560)		
OE-06	1,0000 0	-0,0926 (±0,2300)	-0,6871 (±0,2069)		
OE-07	1,0000 0	-0,5181 (±0,1723)	-0,7835 (±0,2599)	0,4242 (±0,1341)	
OE-08	1,0000 0	-0,8501 (±0,0245)	-0,8970 (±0,0378)	0,8418 (±0,0240)	
OE-09	1,0000 0	-0,1913 (±0,1746)	-0,7065 (±0,1521)	0,0626 (±0,1664)	
OE-10	1,0000 0	-1,3619 (±0,2506)	1,0682 (±0,4908)	-1,1633 (±0,4429)	0,5531 (±0,1762)
OE-11	1,0000 0	-0,0781 (±0,2630)	-0,7985 (±0,2790)	-0,4917 (±0,3019)	0,5369 (±0,1973)
OE-12	1,0000 0	-0,8912 (±0,0184)			
OE-13	1,0000 0	-0,8866 (±0,0201)			
OE-14	1,0000 0	-0,8826 (±0,0221)			
OE-15	1,0000 0	-1,4437 (±0,2474)	0,5018 (±0,2205)		
OE-16	1,0000 0	-1,5515 (±0,3783)	0,5923 (±0,3393)		
OE-17	1,0000 0	-0,1386 (±0,2960)	-0,6540 (±0,2543)		
OE-18	1,0000 0	-0,6693 (±0,2894)	-0,7722 (±0,32810)	0,5221 (±0,1880)	
OE-19	1,0000 0	0,5841 (±2,0373)	-0,7827 (±0,3396)	-0,5089 (±1,4045)	
OE-20	1,0000 0	0,0100 (±0,4445)	-0,6180 (±0,2589)	-0,4919 (±0,3362)	0,2975 (±0,2138)

continuação Tab. 10.17

ESTR.	f1	f2	f3	f4	f5
OE-21	1,0000 0	-0,22625 (±0,3079)	-0,6991 (±0,2678)	-0,4025 (±0,3083)	0,5086 (±0,1752)
OE-22	1,0000 0	-0,8567 (±0,0240)			
OE-23	1,0000 0	-0,8445 (±0,0277)			
OE-24	1,0000 0	-0,8457 (±0,0294)			
OE-25	1,0000 0	-1,3365 (±0,2380)	0,4115 (±0,2152)		
OE-26	1,0000 0	-0,5930 (±0,3891)	-0,2305 (±0,3600)		
OE-27	1,0000 0	-0,6999 (±0,3889)	-0,1180 (±0,3386)		
OE-28	1,0000 0	-1,0357 (±0,2499)	0,7187 (±0,3628)	-0,4919 (±0,2206)	
OE-29	1,0000 0	-0,7218 (±0,3350)	0,1156 (±0,4169)	-0,1994 (±0,2960)	
OE-30	1,0000 0	-0,7282 (±0,3955)	0,0784 (±0,4380)	-0,1518 (±0,3427)	
OE-31	1,0000 0	-0,1265 (±0,3543)	-0,4139 (±0,3390)	-0,3758 (±0,2810)	0,1474 (±0,2755)
OE-32	1,0000 0	-0,8034 (±0,2764)	0,2490 (±0,3423)	0,1134 (±0,3550)	-0,3210 (±0,2579)

10.5 - Coeficientes das estruturas do modelo ARMAX, para $Z=1800$ [rpm]

As Tabelas 10.18, 10.19 e 10.20 mostram o índice FPE e os coeficientes a_n , b_n e c_n obtidos para as 94 estruturas estáveis estudadas.

TABELA 10.18 - Índice FPE e coeficientes a_n , com seus respectivos desvios padrões estimados, para o modelo ARMAX

ESTR.	FPE	a1	a2	a3	a4	a5
ARMAX-01	0,04196	1,0000 0	-0,9822 (±0,0264)			
ARMAX-02	0,04473	1,0000 0	-1,9509 (±0,0830)	0,9556 (±0,0859)		
ARMAX-03	0,04479	1,0000 0	-1,9365 (±0,0960)	0,9403 (±0,0991)		
ARMAX-04	0,04511	1,0000 0	-1,9033 (±0,1105)	0,9075 (±0,1141)		
ARMAX-05	0,04488	1,0000 0	-1,2719 (±0,0888)	0,2878 (±0,0990)		
ARMAX-06	0,0414	1,0000 0	-1,9331 (±0,0482)	0,09657 (±0,0470)		
ARMAX-07	0,04254	1,0000 0	-1,9509 (±0,0470)	0,09768 (±0,0470)		
ARMAX-08	0,04162	1,0000 0	-1,9222 (±0,0532)	0,9553 (±0,0525)		
ARMAX-09	0,04266	1,0000 0	-1,9332 (±0,0584)	0,9619 (±0,0590)		
ARMAX-10	0,0427	1,0000 0	-1,9447 (±0,0622)	0,9670 (±0,0633)		
ARMAX-11	0,04131	1,0000 0	-1,9279 (±0,0579)	0,9596 (±0,0574)		
ARMAX-12	0,04229	1,0000 0	-1,5885 (±0,1450)	0,6163 (±0,7474)		
ARMAX-13	0,04077	1,0000 0	-1,2360 (±0,1460)	0,2595 (±0,1502)		
ARMAX-14	0,04394	1,0000 0	-1,2566 (±0,0890)	0,02719 (±0,0981)		
ARMAX-15	0,04162	1,0000 0	-1,9164 (±0,0564)	0,9499 (±0,0553)		
ARMAX-16	0,04205	1,0000 0	-1,9154 (±0,0570)	0,9494 (±0,0559)		
ARMAX-17	0,04256	1,0000 0	-1,9415 (±0,0572)	0,9692 (±0,0577)		
ARMAX-18	0,04304	1,0000 0	-1,9520 (±0,0573)	0,9740 (±0,0575)		
ARMAX-19	0,04181	1,0000 0	-1,8972 (±0,0777)	0,9296 (±0,0775)		
ARMAX-20	0,04065	1,0000 0	-1,2676 (±0,1294)	0,3107 (±0,1327)		
ARMAX-21	0,04405	1,0000 0	-1,2609 (±0,0887)	0,2811 (±0,0973)		
ARMAX-22	0,04076	1,0000 0	-1,9305 (±0,0509)	0,9659 (±0,0496)		
ARMAX-23	0,04117	1,0000 0	-1,9308 (±0,0513)	0,9664 (±0,0499)		
ARMAX-24	0,04313	1,0000 0	-1,9435 (±0,0579)	0,9704 (±0,0575)		
ARMAX-25	0,04417	1,0000 0	-1,9170 (±0,0789)	0,9393 (±0,0795)		
ARMAX-26	0,04148	1,0000 0	-1,8570 (±0,0907)	0,8970 (±0,0915)		

continuação Tab. 10.18

ESTR.	FPE	a1	a2	a3	a4	a5
ARMAX-27	0,04115	1,0000 0	-1,0540 (±0,1814)	0,0933 (±0,1854)		
ARMAX-28	0,04251	1,0000 0	-1,3370 (±0,1568)	0,3589 (±0,1566)		
ARMAX-29	0,04508	1,0000 0	-1,8478 (±0,1956)	0,8059 (±0,3017)	0,0463 (±0,1173)	
ARMAX-30	0,0434	1,0000 0	-1,2274 (±0,1174)	-0,4735 (±0,1787)	0,7086 (±0,1068)	
ARMAX-31	0,04347	1,0000 0	-1,1937 (±0,1452)	-0,4998 (±0,2044)	0,6988 (±0,1245)	
ARMAX-32	0,04339	1,0000 0	-1,2163 (±0,945)	0,1051 (±0,1571)	0,1428 (±0,0964)	
ARMAX-33	0,04158	1,0000 0	-1,8873 (±0,1111)	0,8886 (±0,1968)	0,0330 (±0,0965)	
ARMAX-34	0,04272	1,0000 0	-1,8232 (±0,1337)	0,7389 (±0,2347)	0,1143 (±0,1123)	
ARMAX-35	0,0452	1,0000 0	-1,2766 (±0,1046)	-0,3289 (±0,2054)	0,0456 (±0,1116)	
ARMAX-36	0,04306	1,0000 0	-2,0020 (±0,3987)	1,1023 (±0,7857)	-0,0732 (±0,3987)	
ARMAX-37	0,04085	1,0000 0	-1,5211 (±0,1371)	0,1591 (±0,2577)	0,4020 (±0,1341)	
ARMAX-38	0,04129	1,0000 0	-1,487 (±0,1383)	0,1059 (±0,2555)	0,4168 (±0,1375)	
ARMAX-39	0,04121	1,0000 0	-1,5268 (±0,1410)	0,2053 (±0,2613)	0,3554 (±0,0432)	
ARMAX-40	0,04379	1,0000 0	-1,2047 (±0,1031)	0,0788 (±0,1784)	0,1606 (±0,1100)	
ARMAX-41	0,042	1,0000 0	-1,8620 (±0,1472)	0,8419 (±0,2593)	0,0557 (±0,1245)	
ARMAX-42	0,04256	1,0000 0	-1,8749 (±0,1266)	0,8238 (±0,2256)	0,0788 (±0,1090)	
ARMAX-43	0,04061	1,0000 0	-1,2161 (±0,1126)	-0,4212 (±0,2009)	0,6878 (±0,1071)	
ARMAX-44	0,04298	1,0000 0	-1,9424 (±0,4199)	0,9676 (±0,8213)	0,0019 (±0,4137)	
ARMAX-45	0,04343	1,0000 0	-2,0481 (±0,4641)	1,1609 (±0,9090)	-0,0933 (±0,4567)	
ARMAX-46	0,04107	1,0000 0	-1,4234 (±0,1350)	0,0333 (±0,2350)	0,4413 (±0,1281)	
ARMAX-47	0,04101	1,0000 0	-1,4473 (±0,1342)	0,0651 (±0,2421)	0,4258 (±0,1337)	
ARMAX-48	0,04147	1,0000 0	-1,2202 (±0,1081)	-0,4297 (±0,1836)	0,6907 (±0,1070)	
ARMAX-49	0,04417	1,0000 0	-1,2185 (±0,0989)	0,1399 (±0,1689)	0,1134 (±0,1067)	
ARMAX-50	0,04115	1,0000 0	-1,9542 (±0,1250)	1,0087 (±0,2295)	-0,0208 (±0,1142)	
ARMAX-51	0,0432	1,0000 0	-1,8637 (±0,0354)	0,8047 (±0,2376)	0,0865 (±0,1133)	
ARMAX-52	0,0444	1,0000 0	-1,8591 (±0,1907)	0,7958 (±0,2969)	0,0850 (±0,1224)	
ARMAX-53	0,04352	1,0000 0	-2,0471 (±0,5716)	1,1683 (±1,1159)	-0,0976 (±0,5603)	
ARMAX-54	0,04156	1,0000 0	-1,0342 (±0,1810)	-0,0722 (±0,2458)	0,1524 (±0,1757)	
ARMAX-55	0,04304	1,0000 0	-1,1564 (±0,1490)	-0,2624 (±0,1848)	0,1629 (±0,1848)	0,02696 (±0,0901)
ARMAX-56	0,04311	1,0000 0	-1,1116 (±0,1564)	-0,3000 (±0,1730)	0,1406 (±0,1861)	0,2813 (±0,0886)
ARMAX-57	0,04346	1,0000 0	-1,2811 (±0,2721)	-0,0853 (±0,3241)	0,2130 (±0,2916)	0,1656 (±0,2536)
ARMAX-58	0,04355	1,0000 0	-1,2292 (±0,2548)	-0,1357 (±0,3052)	0,1975 (±0,2591)	0,1757 (±0,2301)

continuação Tab. 10.18

ESTR.	FPE	a1	a2	a3	a4	a5
ARMAX-59	0,04199	1,0000	-1,3112	0,3351	-0,2516	0,2739
		0	(±0,0942)	(±0,1665)	(±0,1540)	(±0,0843)
ARMAX-60	0,04211	1,0000	-1,2562	0,2846	-0,3511	0,3678
		0	(±0,1002)	(±0,1807)	(±0,1518)	(±0,0860)
ARMAX-61	0,04016	1,0000	-1,2993	0,4722	-0,5984	0,4776
		0	(±0,0931)	(±0,1663)	(±0,1498)	(±0,0883)
ARMAX-62	0,04141	1,0000	-1,9064	0,9437	-0,0313	0,0270
		0	(±0,1111)	(±0,2296)	(±0,2164)	(±0,0917)
ARMAX-63	0,04193	1,0000	-1,7251	0,8025	-0,2616	0,2231
		0	(±0,1581)	(±0,2496)	(±0,1991)	(±0,0977)
ARMAX-64	0,04042	1,0000	-1,4218	0,5909	-0,5603	0,4427
		0	(±0,1676)	(±0,2149)	(±0,1740)	(±0,1032)
ARMAX-65	0,04101	1,0000	-1,3940	0,0273	0,2785	0,1312
		0	(±0,1341)	(±0,2560)	(±0,1888)	(±0,0862)
ARMAX-66	0,04154	1,0000	-1,1670	-0,2677	0,1910	0,2867
		0	(±0,1276)	(±0,2028)	(±0,1750)	(±0,0900)
ARMAX-67	0,04083	1,0000	-1,3718	0,3691	-0,376	0,4304
		0	(±0,1710)	(±0,3056)	(±0,2325)	(±0,0988)
ARMAX-68	0,04134	1,0000	-1,9178	0,5498	0,7706	-0,3788
		0	(±0,1804)	(±0,2907)	(±0,2562)	(±0,1606)
ARMAX-69	0,04167	1,0000	-1,4137	0,0336	0,3692	0,0514
		0	(±0,2447)	(±0,3069)	(±0,2732)	(±0,2306)
ARMAX-70	0,0419	1,0000	-1,3836	0,1627	0,0309	0,2342
		0	(±0,2299)	(±0,3051)	(±0,3134)	(±0,2368)
ARMAX-71	0,04198	1,0000	-1,2659	0,2576	-0,2599	0,3279
		0	(±0,0975)	(±0,1730)	(±0,1553)	(±0,0890)
ARMAX-72	0,04038	1,0000	-1,2715	0,3970	-0,5364	0,4728
		0	(±0,0957)	(±0,1763)	(±0,1557)	(±0,0877)
ARMAX-73	0,04118	1,0000	-1,2973	0,5252	-0,7413	0,5665
		0	(±0,0911)	(±0,1611)	(±0,1497)	(±0,0915)
ARMAX-74	0,04224	1,0000	-1,5394	0,5535	-0,2369	0,2787
		0	(±0,2012)	(±0,2730)	(±0,1908)	(±0,1165)
ARMAX-75	0,04165	1,0000	-1,7707	0,8851	-0,3103	0,2356
		0	(±0,1241)	(±0,2401)	(±0,2400)	(±0,1106)
ARMAX-76	0,04172	1,0000	-1,3015	0,5406	-0,7697	0,5864
		0	(±0,1489)	(±0,1914)	(±0,1546)	(±0,0956)
ARMAX-77	0,04069	1,0000	-1,1216	-0,3319	0,2588	0,2585
		0	(±0,1262)	(±0,1801)	(±0,1527)	(±0,0881)
ARMAX-78	0,04062	1,0000	-1,0498	-0,3709	0,1170	0,3702
		0	(±0,1282)	(±0,1748)	(±0,1629)	(±0,0938)
ARMAX-79	0,04155	1,0000	-1,2494	0,3588	-0,5252	0,4700
		0	(±0,1984)	(±0,3317)	(±0,2362)	(±0,0981)
ARMAX-80	0,04115	1,0000	-1,2310	-0,2061	0,3193	0,1766
		0	(±0,2595)	(±0,3076)	(±0,2427)	(±0,2251)
ARMAX-81	0,04098	1,0000	-1,1661	-0,1878	0,1788	0,2382
		0	(±0,2175)	(±0,2601)	(±0,2368)	(±0,2083)
ARMAX-82	0,04178	1,0000	-1,2652	0,3588	-0,6524	0,6204
		0	(±0,1835)	(±0,3188)	(±0,3095)	(±0,1820)
ARMAX-83	0,0404	1,0000	-1,3207	0,4592	-0,5114	0,4460
		0	(±0,1010)	(±0,1849)	(±0,1655)	(±0,0914)
ARMAX-84	0,04091	1,0000	-1,2642	0,3879	-0,5205	0,4605
		0	(±0,0972)	(±0,1787)	(±0,1591)	(±0,0906)
ARMAX-85	0,04149	1,0000	-1,3650	0,5684	-0,6463	0,4897
		0	(±0,1009)	(±0,1792)	(±0,1565)	(±0,0907)
ARMAX-86	0,04059	1,0000	-1,5105	0,6544	-0,4497	0,3719
		0	(±0,1930)	(±0,2528)	(±0,1965)	(±0,1195)
ARMAX-87	0,04121	1,0000	-1,2795	0,3950	-0,5041	0,4520
		0	(±0,1900)	(±0,2389)	(±0,1680)	(±0,1018)
ARMAX-88	0,04189	1,0000	-1,4255	0,6246	-0,6487	0,4907
		0	(±0,1657)	(±0,2130)	(±0,1752)	(±0,1050)
ARMAX-89	0,04093	1,0000	-1,3599	0,2517	-0,1741	0,3490
		0	(±0,2310)	(±0,4084)	(±0,2687)	(±0,1176)
ARMAX-90	0,04155	1,0000	-1,1569	0,0447	-0,2596	0,4401
		0	(±0,2072)	(±0,3572)	(±0,2463)	(±0,1000)

continuação Tab. 10.18

ESTR.	FPE	a1	a2	a3	a4	a5
ARMAX-91	0,04205	1,0000 0	-1,4995 (±0,1983)	0,7672 (±0,3362)	-0,6784 (±0,2326)	0,4526 (±0,1078)
ARMAX-92	0,04075	1,0000 0	-1,6945 (±0,2350)	1,1950 (±0,4440)	-1,0673 (±0,3983)	0,6352 (±0,2021)
ARMAX-93	0,04125	1,0000 0	-0,9891 (±0,0624)	0,0602 (±0,0672)	-0,9286 (±0,0989)	0,9381 (±0,0641)
ARMAX-94	0,04243	1,0000 0	-1,5196 (±0,2094)	0,7988 (±0,4008)	-0,7401 (±0,3889)	0,5056 (±0,1976)

TABELA 10.19 - Coeficientes b_n , com seus respectivos desvios padrões estimados, para o modelo ARMAX

ESTR.	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7
ARMAX-01	0	0,0584 (±0,1242)	-0,2857 (±0,1718)	-0,1411 (±0,1683)	0,3615 (±0,1119)		
ARMAX-02	0	-0,0026 (±0,0039)					
ARMAX-03	0	0	-0,0017 (±0,0041)				
ARMAX-04	0	-0,0017 (±0,0050)					
ARMAX-05	0	-0,4063 (±0,1486)	0,4018 (±0,1380)				
ARMAX-06	0	-0,3303 (±0,0902)	0,3073 (±0,0850)				
ARMAX-07	0	0	-0,2730 (±0,0790)	0,2550 (±0,0747)			
ARMAX-08	0	-0,3368 (±0,0918)	0,3136 (±0,0865)				
ARMAX-09	0	0	-0,2949 (±0,0814)	0,2748 (±0,0769)			
ARMAX-10	0	0	0	-0,2385 (±0,00758)	0,2235 (±0,0718)		
ARMAX-11	0	-0,3057 (±0,0932)	0,2835 (±0,0879)				
ARMAX-12	0	0	-0,3395 (±0,1116)	0,3230 (±0,1063)			
ARMAX-13	0	0	0	-0,4779 (±0,1032)	0,4691 (±0,0985)		
ARMAX-14	0	-0,4284 (±0,1627)	0,4570 (±0,2493)	-0,0327 (±0,1366)			
ARMAX-15	0	-0,3436 (±0,1349)	0,3197 (±0,2437)	0,0004 (±0,1284)			
ARMAX-16	0	-0,3367 (±0,1442)	0,3000 (±0,2726)	0,0129 (±0,1460)			
ARMAX-17	0	0	-0,2169 (±0,1294)	0,1326 (±0,2371)	0,0652 (±0,1222)		
ARMAX-18	0	0	0	-0,3552 (±0,1297)	0,4668 (±0,2388)	-0,1268 (±0,1222)	
ARMAX-19	0	-0,2509 (±0,1509)	0,1746 (±0,2851)	0,0538 (±0,1515)			
ARMAX-20	0	0	-0,2285 (±0,1087)	-0,2071 (±0,1849)	0,4116 (±0,1086)		
ARMAX-21	0	-0,4059 (±0,1637)	0,5072 (±0,2479)	-0,2928 (±0,2282)	0,1842 (±0,1348)		
ARMAX-22	0	-0,4254 (±0,1423)	0,6891 (±0,3100)	-0,5167 (±0,3047)	0,2282 (±0,1318)		

continuação Tab. 10.19

ESTR.	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7
ARMAX-23	0	-0,4219 (±0,1487)	0,6807 (±0,3246)	-0,5119 (±0,3075)	0,2281 (±0,1320)		
ARMAX-24	0	0	-0,1918 (±0,1544)	0,0555 (±0,3572)	0,1576 (±0,3517)	-0,0399 (±0,1447)	
ARMAX-25	0	0	0	-0,3682 (±0,1521)	0,4644 (±0,3458)	-0,0862 (±0,3381)	-0,0250 (±0,1406)
ARMAX-26	0	-0,3132 (±0,1468)	0,4592 (±0,2992)	-0,4319 (±0,2788)	0,2587 (±0,1315)		
ARMAX-27	0	0	-0,1871 (±0,1226)	-0,1638 (±0,1861)	0,1376 (±0,1866)	0,1955 (±0,1220)	
ARMAX-28	0	0	0	-0,4281 (±0,1198)	0,2603 (±0,2353)	0,4204 (±0,2301)	-0,2614 (±0,1134)
ARMAX-29	0	-0,0018 (±0,0052)					
ARMAX-30	0	-0,0043 (±0,0064)					
ARMAX-31	0	0	-0,0020 (±0,0077)				
ARMAX-32	0	-0,4827 (±0,1509)	0,4656 (±0,1389)				
ARMAX-33	0	-0,3443 (±0,0977)	0,3202 (±0,0917)				
ARMAX-34	0	0	-0,3012 (±0,0971)	0,2804 (±0,0913)			
ARMAX-35	0	-0,4035 (±0,1104)	0,3754 (±0,1043)				
ARMAX-36	0	0	-0,2725 (±0,1117)	0,2539 (±0,1037)			
ARMAX-37	0	-0,3726 (±0,1164)	0,3445 (±0,1097)				
ARMAX-38	0	0	-0,3352 (±0,1064)	0,3091 (±0,1001)			
ARMAX-39	0	0	0	-0,3330 (±0,0975)	0,3103 (±0,0921)		
ARMAX-40	0	-0,4608 (±0,1566)	0,3777 (±0,2408)	0,0638 (±0,1482)			
ARMAX-41	0	-0,3242 (±0,1438)	0,2681 (±0,2886)	0,0311 (±0,1650)			
ARMAX-42	0	0	-0,1923 (±0,1352)	0,0867 (±0,2502)	0,0864 (±0,1128)		
ARMAX-43	0	-0,3626 (±0,1119)	0,1735 (±0,1675)	0,1537 (±0,1175)			
ARMAX-44	0	0	-0,2184 (±0,1300)	0,1483 (±0,2502)	0,0513 (±0,1478)		
ARMAX-45	0	0	0	-0,3557 (±0,1300)	0,4979 (±0,2304)	-0,1556 (±0,1314)	
ARMAX-46	0	-0,2429 (±0,1278)	-0,0179 (±0,2078)	0,2248 (±0,1253)			
ARMAX-47	0	0	-0,2055 (±0,1218)	-0,0309 (±0,2053)	0,2068 (±0,1160)		
ARMAX-48	0	0	0	-0,3424 (±0,1089)	0,2528 (±0,1690)	0,0619 (±0,1019)	
ARMAX-49	0	-0,4314 (±0,1620)	0,4345 (±0,2454)	-0,1738 (±0,2416)	0,1520 (±0,1355)		
ARMAX-50	0	-0,4394 (±0,1532)	0,7401 (±0,3513)	-0,5563 (±0,3237)	0,2319 (±0,1322)		
ARMAX-51	0	0	-0,1764 (±0,1523)	0,0186 (±0,3415)	0,1788 (±0,3373)	-0,0399 (±0,14439)	
ARMAX-52	0	0	0	-0,3111 (±0,1508)	0,2891 (±0,3211)	0,1105 (±0,3130)	-0,1033 (±0,1381)
ARMAX-53	0	0	-0,1747 (±0,1579)	0,0457 (±0,3747)	0,1613 (±0,3668)	-0,0486 (±0,1525)	
ARMAX-54	0	0	-0,2391 (±0,1323)	-0,1198 (±0,1837)	0,1899 (±0,1824)	0,1448 (±0,1238)	

continuação Tab. 10.19

ESTR.	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7
ARMAX-55	0	-0,0079 (±0,0095)					
ARMAX-56	0	0	-0,0050 (±0,0106)				
ARMAX-57	0	-0,0069 (±0,0104)					
ARMAX-58	0	0	-0,0033 (±0,0114)				
ARMAX-59	0	-0,4208 (±0,1510)	0,3905 (±0,1399)				
ARMAX-60	0	0	-0,4137 (±0,1495)	0,3848 (±0,1380)			
ARMAX-61	0	0	0	-0,5867 (±0,1378)	0,5537 (±0,1285)		
ARMAX-62	0	-0,3277 (±0,0983)	0,3046 (±0,0926)				
ARMAX-63	0	0	-0,3488 (±0,1238)	0,3218 (±0,1159)			
ARMAX-64	0	0	0	-0,5562 (±0,1351)	0,5226 (±0,1270)		
ARMAX-65	0	-0,4042 (±0,1204)	0,3740 (±0,1136)				
ARMAX-66	0	0	-0,3629 (±0,1304)	0,3332 (±0,1226)			
ARMAX-67	0	0	0	-0,5193 (±0,1335)	0,4849 (±0,1258)		
ARMAX-68	0	-0,2533 (±0,0913)	0,2366 (±0,0849)				
ARMAX-69	0	0	-0,3538 (±0,1307)	0,3261 (±0,1214)			
ARMAX-70	0	0	0	-0,4278 (±0,1272)	0,3979 (±0,1189)		
ARMAX-71	0	-0,2814 (±0,1716)	-0,0232 (±0,2819)	0,2641 (±0,1579)			
ARMAX-72	0	0	-0,1646 (±0,1668)	-0,3527 (±0,2684)	0,4767 (±0,1473)		
ARMAX-73	0	0	0	-0,5785 (±0,1701)	0,5058 (±0,2710)	0,0380 (±0,1397)	
ARMAX-74	0	-0,1679 (±0,1709)	-0,1760 (±0,3370)	0,3044 (±0,2016)			
ARMAX-75	0	0	-0,0937 (±0,1461)	-0,2179 (±0,2864)	0,2842 (±0,1563)		
ARMAX-76	0	0	0	-0,5553 (±0,1717)	0,4416 (±0,2736)	0,0772 (±0,1422)	
ARMAX-77	0	-0,2984 (±0,1246)	-0,0201 (±0,1768)	0,2736 (±0,1294)			
ARMAX-78	0	0	-0,3309 (±0,1313)	-0,0089 (±0,1706)	0,2936 (±0,11980)		
ARMAX-79	0	0	0	-0,5212 (±0,1679)	0,3703 (±0,2705)	0,1164 (±0,1468)	
ARMAX-80	0	-0,2721 (±0,1333)	-0,0209 (±0,1917)	0,2525 (±0,1415)			
ARMAX-81	0	0	-0,3231 (±0,1392)	-0,0180 (±0,1787)	0,2980 (±0,1220)		
ARMAX-82	0	0	0	-0,4925 (±0,1766)	0,2983 (±0,2857)	0,1526 (±0,1509)	
ARMAX-83	0	-0,2354 (±0,1702)	0,1928 (±0,3011)	-0,4867 (±0,2875)	0,4798 (±0,1494)		
ARMAX-84	0	0	-0,1864 (±0,1673)	-0,2471 (±0,2908)	0,2830 (±0,2789)	0,1092 (±0,1380)	
ARMAX-85	0	0	0	-0,4957 (±0,1736)	0,2019 (±0,3059)	0,5134 (±0,2846)	-0,2496 (±0,1436)
ARMAX-86	0	-0,2701 (±0,1703)	0,3302 (±0,3410)	-0,5614 (±0,3046)	0,4558 (±0,1551)		

continuação Tab. 10.19

ESTR.	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7
ARMAX-87	0	0	-0,1798 (±0,1682)	-0,2485 (±0,2925)	0,2742 (±0,2812)	0,1127 (±0,1436)	
ARMAX-88	0	0	0	-0,4896 (±0,1786)	0,2390 (±0,3150)	0,4870 (±0,2928)	-0,2630 (±0,1461)
ARMAX-89	0	-0,2204 (±0,1635)	0,1399 (±0,3121)	-0,3044 (±0,2869)	0,3383 (±0,1603)		
ARMAX-90	0	0	-0,2274 (±0,1586)	-0,1506 (±0,2441)	0,2005 (±0,2369)	0,1315 (±0,1346)	
ARMAX-91	0	0	0	-0,4676 (±0,1812)	0,2086 (±0,3281)	0,4792 (±0,3103)	-0,2469 (±0,1517)
ARMAX-92	0	-0,4682 (±0,1942)	0,8354 (±0,4096)	-0,9992 (±0,3807)	0,5839 (±0,1749)		
ARMAX-93	0	0	-0,1418 (±0,10809)	-0,3069 (±0,2764)	0,1603 (±0,2695)	0,2324 (±0,1526)	
ARMAX-94	0	0	0	-0,4737 (±0,1850)	0,2225 (±0,3393)	0,4489 (±0,3213)	-0,2276 (±0,1552)

TABELA 10.20 - Coeficientes c_n , com seus respectivos desvios padrões estimados, para o modelo ARMAX

ESTR.	c1	c2	c3	c4	c5
ARMAX-01	1,0000 0	0,9681 (±0,0720)	0,1930 (±0,1122)	0,3958 (±0,1107)	0,4448 (±0,0700)
ARMAX-02	1,0000 0	-0,0497 (±0,1122)	-0,6477 (±0,1024)		
ARMAX-03	1,0000 0	-0,0313 (±0,1260)	-0,6356 (±0,1139)		
ARMAX-04	1,0000 0	0,0110 (±0,1309)	-0,5968 (±0,1258)	0,0164 (±0,0792)	
ARMAX-05	1,0000 0	0,7394 (±0,0583)			
ARMAX-06	1,0000 0	-0,0400 (±0,0786)	-0,6366 (±0,0725)		
ARMAX-07	1,0000 0	-0,0684 (±0,0731)	-0,6507 (±0,0712)		
ARMAX-08	1,0000 0	-0,0077 (±0,0946)	-0,6223 (±0,0766)	0,0072 (±0,0732)	
ARMAX-09	1,0000 0	-0,1041 (±0,0903)	-0,5985 (±0,0814)	0,1026 (±0,0764)	
ARMAX-10	1,0000 0	-0,0722 (±0,0939)	-0,6440 (±0,0830)	0,0675 (±0,0772)	
ARMAX-11	1,0000 0	0,0399 (±0,0978)	-0,7080 (±0,0983)	-0,0199 (±0,0734)	0,1124 (±0,0757)
ARMAX-12	1,0000 0	0,3988 (±0,1478)	-0,3825 (±0,1568)	0,1935 (±0,0891)	0,3395 (±0,0704)
ARMAX-13	1,0000 0	0,7027 (±0,1441)	-0,0973 (±0,1518)	0,3209 (±0,0905)	0,3966 (±0,0712)
ARMAX-14	1,0000 0	0,7738 (±0,0549)			
ARMAX-15	1,0000 0	0,0035 (±0,0870)	-0,6179 (±0,0829)		
ARMAX-16	1,0000 0	-0,0017 (±0,0969)	-0,6147 (±0,0848)	0,0091 (±0,0834)	
ARMAX-17	1,0000 0	-0,0974 (±0,0910)	-0,6218 (±0,0801)	0,0956 (±0,0772)	
ARMAX-18	1,0000 0	-0,0941 (±0,0908)	-0,6654 (±0,0809)	0,0792 (±0,0775)	

continuação Tab. 10.20

ESTR.	c1	c2	c3	c4	c5
ARMAX-19	1,0000 0	0,0668 (±0,1066)	-0,6486 (±0,1099)	0,0335 (±0,0879)	0,1338 (±0,0805)
ARMAX-20	1,0000 0	0,6690 (±0,1245)	-0,0864 (±0,1261)	0,4019 (±0,0883)	0,4621 (±0,0693)
ARMAX-21	1,0000 0	0,7771 (±0,0537)			
ARMAX-22	1,0000 0	0,0047 (±0,0827)	-0,6528 (±0,0774)		
ARMAX-23	1,0000 0	0,0004 (±0,0942)	-0,6505 (±0,0789)	0,0075 (±0,0823)	
ARMAX-24	1,0000 0	-0,1026 (±0,0907)	-0,6281 (±0,0875)	0,0956 (±0,0777)	
ARMAX-25	1,0000 0	-0,0826 (±0,1041)	-0,6004 (±0,0975)	0,1211 (±0,0834)	
ARMAX-26	1,0000 0	0,1307 (±0,1103)	-0,6386 (±0,1113)	0,0685 (±0,0878)	0,2047 (±0,0846)
ARMAX-27	1,0000 0	0,8547 (±0,1728)	0,1022 (±0,1695)	0,3654 (±0,1017)	0,3929 (±0,0734)
ARMAX-28	1,0000 0	0,5306 (±0,1489)	-0,1415 (±0,1345)	0,3656 (±0,0835)	0,3762 (±0,0770)
ARMAX-29	1,0000 0	0,0606 (±0,1844)	-0,5921 (±0,1273)		
ARMAX-30	1,0000 0	0,8075 (±0,1222)	-0,7033 (±0,1670)	-0,6425 (±0,0987)	
ARMAX-31	1,0000 0	0,8548 (±0,1530)	-0,6423 (±0,2145)	-0,6239 (±0,1183)	
ARMAX-32	1,0000 0	0,8107 (±0,0633)			
ARMAX-33	1,0000 0	0,0180 (±0,1039)	-0,6179 (±0,0790)		
ARMAX-34	1,0000 0	0,0091 (±0,1135)	-0,6285 (±0,0804)		
ARMAX-35	1,0000 0	0,7413 (±0,1051)	-0,7354 (±0,0897)	-0,6169 (±0,0911)	
ARMAX-36	1,0000 0	-0,1864 (±0,3944)	-0,5820 (±0,0909)	0,1646 (±0,2681)	
ARMAX-37	1,0000 0	0,4789 (±0,1546)	-0,7584 (±0,1167)	-0,3401 (±0,1273)	0,1532 (±0,0812)
ARMAX-38	1,0000 0	0,4499 (±0,1430)	-0,7370 (±0,1222)	-0,2331 (±0,1307)	0,2526 (±0,0768)
ARMAX-39	1,0000 0	0,4146 (±0,1458)	-0,7517 (±0,1249)	-0,1718 (±0,1387)	0,2673 (±0,0789)
ARMAX-40	1,0000 0	0,8136 (±0,0665)			
ARMAX-41	1,0000 0	0,0384 (±0,1256)	-0,6144 (±0,0865)		
ARMAX-42	1,0000 0	-0,0236 (±0,1064)	-0,6631 (±0,0735)		
ARMAX-43	1,0000 0	0,8037 (±0,1124)	-0,6862 (±0,1092)	-0,6222 (±0,0841)	
ARMAX-44	1,0000 0	-0,1081 (±0,4203)	-0,6209 (±0,0880)	0,0897 (±0,2770)	
ARMAX-45	1,0000 0	-0,1940 (±0,4600)	-0,6621 (±0,0826)	0,1477 (±0,3093)	
ARMAX-46	1,0000 0	0,5744 (±0,1478)	-0,6337 (±0,1433)	-0,2316 (±0,1306)	0,2385 (±0,0806)
ARMAX-47	1,0000 0	0,4901 (±0,1396)	-0,7059 (±0,1280)	-0,1968 (±0,1321)	0,2679 (±0,0787)
ARMAX-48	1,0000 0	0,7052 (±0,1231)	-0,7834 (±0,1353)	-0,4208 (±0,1309)	0,2092 (±0,0819)
ARMAX-49	1,0000 0	0,8072 (±0,0628)			
ARMAX-50	1,0000 0	-0,0198 (±0,1025)	-0,6677 (±0,0738)		

continuação Tab. 10.20

ESTR.	c1	c2	c3	c4	c5
ARMAX-51	1,0000 0	-0,0096 (±0,1143)	-0,6600 (±0,0837)		
ARMAX-52	1,0000 0	-0,0003 (±0,1794)	-0,6406 (±0,1239)		
ARMAX-53	1,0000 0	-0,2051 (±0,5654)	-0,6387 (±0,0903)	0,1469 (±0,3718)	
ARMAX-54	1,0000 0	0,8718 (±0,1738)	-0,0020 (±0,2293)	0,2650 (±0,1656)	0,3794 (±0,0759)
ARMAX-55	1,0000 0	0,8235 (±0,1454)	-0,4322 (±0,2207)	-0,4972 (±0,1254)	
ARMAX-56	1,0000 0	0,8769 (±0,1549)	-0,3712 (±0,2499)	-0,4849 (±0,1362)	
ARMAX-57	1,0000 0	0,7043 (±0,2703)	-0,4999 (±0,2970)	-0,3625 (±0,2467)	0,1045 (±0,2151)
ARMAX-58	1,0000 0	0,7677 (±0,2546)	-0,4678 (±0,2953)	-0,3524 (±0,2554)	0,1088 (±0,2075)
ARMAX-59	1,0000 0	0,7030 (±0,0831)			
ARMAX-60	1,0000 0	0,6446 (±0,0917)			
ARMAX-61	1,0000 0	0,6099 (±0,0899)			
ARMAX-62	1,0000 0	0,0110 (±0,1056)	-0,6281 (±0,0892)		
ARMAX-63	1,0000 0	0,1265 (±0,1510)	-0,4359 (±0,1361)		
ARMAX-64	1,0000 0	0,4698 (±0,1782)	-0,1356 (±0,1659)		
ARMAX-65	1,0000 0	0,5868 (±0,1381)	-0,6515 (±0,0980)	-0,4799 (±0,1151)	
ARMAX-66	1,0000 0	0,7459 (±0,1211)	-0,5132 (±0,1497)	-0,5199 (±0,1080)	
ARMAX-67	1,0000 0	0,5325 (±0,1781)	-0,2976 (±0,1750)	-0,1782 (±0,1510)	
ARMAX-68	1,0000 0	0,1017 (±0,1915)	-1,1210 (±0,1727)	-0,0981 (±0,1559)	0,4077 (±0,1506)
ARMAX-69	1,0000 0	0,5190 (±0,2408)	-0,6623 (±0,2529)	-0,2502 (±0,2046)	0,2233 (±0,1936)
ARMAX-70	1,0000 0	0,5304 (±0,2307)	-0,5340 (±0,2475)	-0,2354 (±0,2108)	0,1183 (±0,1922)
ARMAX-71	1,0000 0	0,6978 (±0,0834)			
ARMAX-72	1,0000 0	0,6258 (±0,0901)			
ARMAX-73	1,0000 0	0,5880 (±0,0865)			
ARMAX-74	1,0000 0	0,3606 (±0,2004)	-0,2747 (±0,1840)		
ARMAX-75	1,0000 0	0,0807 (±0,1095)	-0,5137 (±0,1022)		
ARMAX-76	1,0000 0	0,5874 (±0,1588)	0,0175 (±0,1472)		
ARMAX-77	1,0000 0	0,8465 (±0,1267)	-0,4408 (±0,1679)	-0,5113 (±0,1008)	
ARMAX-78	1,0000 0	0,8622 (±0,1246)	-0,3859 (±0,1777)	-0,4886 (±0,1074)	
ARMAX-79	1,0000 0	0,6622 (±0,2095)	-0,0185 (±0,2106)	-0,0560 (±0,1639)	
ARMAX-80	1,0000 0	0,7371 (±0,2724)	-0,5333 (±0,2786)	-0,4370 (±0,2126)	0,0768 (±0,2065)
ARMAX-81	1,0000 0	0,7565 (±0,2173)	-0,4007 (±0,2491)	-0,2465 (±0,2038)	0,1769 (±0,1749)

continuação Tab. 10.20

ESTR.	c1	c2	c3	c4	c5
ARMAX-82	1,0000 0	0,6256 (±0,2023)	-0,0665 (±0,2079)	-0,2541 (±0,1970)	-0,1628 (±0,1586)
ARMAX-83	1,0000 0	0,6153 (±0,0938)			
ARMAX-84	1,0000 0	0,6258 (±0,0905)			
ARMAX-85	1,0000 0	0,5371 (±0,0992)			
ARMAX-86	1,0000 0	0,4134 (±0,1936)	-0,2020 (±0,1820)		
ARMAX-87	1,0000 0	0,6083 (±0,2007)	-0,0199 (±0,1831)		
ARMAX-88	1,0000 0	0,4719 (±0,1764)	-0,0630 (±0,1638)		
ARMAX-89	1,0000 0	0,5594 (±0,2304)	-0,3464 (±0,1798)	-0,2192 (±0,1701)	
ARMAX-90	1,0000 0	0,7292 (±0,2134)	-0,1491 (±0,2070)	-0,2027 (±0,1643)	
ARMAX-91	1,0000 0	0,3880 (±0,2084)	-0,0692 (±0,1855)	0,0693 (±0,1604)	
ARMAX-92	1,0000 0	0,2320 (±0,2443)	0,0099 (±0,2282)	-0,0548 (±0,1933)	-0,3199 (±0,1718)
ARMAX-93	1,0000 0	0,9183 (±0,0864)	0,2455 (±0,1350)	-0,6244 (±0,1360)	-0,5271 (±0,0839)
ARMAX-94	1,0000 0	0,3632 (±0,2221)	-0,0810 (±0,2088)	0,0130 (±0,1713)	-0,0621 (±0,1638)