INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

Gustavo Brito Gibrail

Utilização do LabView para desenvolvimento de um controle proporcional mais integral de rotação numa bancada de ensaios de um motor turbo jato

Trabalho de Graduação
2006

Mecânica

CDU 629.7.036

Gustavo Brito Gibrail

Utilização do Programa Labview para Desenvolvimento de um Controle Proporcional mais Integral de Rotação numa Bancada de Ensaios de um Motor Turbojato

Orientador
Prof. Dr. João Roberto Barbosa (ITA)

Co-orientador
Pesq. Tit. José Francisco de Castro Monteiro (IAE)

Co-orientadora
Prof.ª Cristiane Aparecida Martins Andraus (ITA)

Divisão de Engenharia Mecânica-Aeronáutica

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

CENTRO TÉCNICO AEROESPACIAL

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2006

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão Biblioteca Central do ITA/CTA

Gibrail, Gustavo Brito
Utilização do programa Labview para desenvolvimento de um controle proporcional mais integral de rotação numa bancada de ensaios de um motor turbojato / Gustavo Brito Gibrail
São José dos Campos, 2006.
67f.

Trabalho de Graduação – Divisão de Engenharia Mecânica-Aeronáutica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2006. Orientadores: Prof. Dr. João Roberto Barbosa, Pesq. Tit. José Francisco de Castro Monteiro, Prof. Cristiane Aparecida Martins Andraus.

1. Motores turbojato. 2. Banco de ensaios. 3. Ensaios de rotação. I. Centro Técnico Aeroespacial. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia Mecânica-Aeronáutica. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GIBRAIL, Gustavo Brito. **Utilização do programa Labview para desenvolvimento de um controle proporcional mais integral de rotação numa bancada de ensaios de um motor turbo-jato**. 2006. 67f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Gustavo Brito Gibrail
TÍTULO DO TRABALHO: Utilização do programa Labview para desenvolvimento de um controle proporcional mais integral de rotação numa bancada de ensaios de um motor turbojato
TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2006

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

_____

Gustavo Brito Gibrail
H-9 A Apto 103 – CTA – Vl. Acácias
12228-610 - São José dos Campos - SP

UTILIZAÇÃO DO LABVIEW PARA DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLE PROPORCIONAL MAIS INTEGRAL DE ROTAÇÃO NUMA BANCADA DE ENSAIOS DE UM MOTOR TURBO JATO

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação

Gustavo Brito Gibrail

Gustavo Brito Gibrail
Autor

Prof. Dr. João Roberto Barbosa (ITA)
Orientador

Pesq. Tit. José Francisco de Castro Monteiro (IAE)
Co-orientador

Profª. Cristiane Aparecida Martins Andraus (ITA)
Co-orientadora

Prof. Dr. Luís Gonzaga Trabasso
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica-Aeronáutica

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. João Barbosa pelo estímulo ao estudo na área de turbinas a gás.

Ao meu co-orientador José Francisco de Castro Monteiro pelo convívio diário durante a confecção do TG no IAE.

A Cristiane Andraus, co-orientadora, pelas aulas do programa LabView, que foi a base do meu TG.

A César Botura e a Heglas Moreira, ambos do IFI, pelas dicas referentes a algumas estruturas do referido programa e que foram fundamentais para a funcionalidade do algoritmo desenvolvido.

Aos professores que me propiciaram o conhecimento teórico que possibilitou o desenvolvimento da lógica de controle e a validação das simulações obtidas.

Resumo

Está atualmente em projeto na Sub-divisão de Propulsão do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE / ASA-P) um motor do tipo turbo-jato de pequena potência. Paralelamente a este projeto, será construído um banco de ensaios para avaliar o desempenho dos protótipos produzidos e sua conformidade com as características desejadas no projeto. È desejado que este banco disponha de dois sistemas: sistema de aquisição de dados e sistema de controle automatizado, que utilizarão o programa Labview e placas de aquisição de dados, produzidos pela empresa National Instruments. O presente trabalho de graduação foca o controle da rotação, atuando na quantidade de combustível injetada na câmara de combustão. Para executar tal tarefa foram desenvolvidos dois programas no ambiente LabView, ambos utilizando um algoritmo de controle proporcional mais integral (PI), que busca promover acelerações suaves, porém não muito lentas, para qualquer valor final de rotação desejado. Além disso, o controle deve respeitar os limites de aceleração impostos pelo comportamento transiente do motor, que pode se tornar perigoso dependendo da taxa de aceleração do mesmo, devido aos limites impostos pelo mapa de funcionamento do compressor. A diferença entre os dois programas está na forma com que conseguem a gradação na elevação da rotação, tendo em vista que um controle PI simples é indiferente ao valor final desejado quanto aos tempos característicos. O primeiro é baseado na colocação de referências intermediárias de rotação e o segundo utiliza um escalonamento dos parâmetros de controle PI, de acordo com as faixas de rotação em que se está no momento. Foi deduzido o equacionamento da malha de controle, utilizando uma modelagem da dinâmica do motor e as funções de transferência para o caso de um controle PI simples. Tal fato contribuiu para deduzir as expressões analíticas da evolução temporal da rotação, posteriormente comparadas com as curvas geradas pelos algoritmos criados nesta pesquisa. O trabalho contém um número significativo de simulações, que permitem a comparação com resultados teóricos esperados e a avaliação da qualidade dos mecanismos criados para se conseguir uma taxa satisfatória de elevação da rotação.

Abstract

A low-power-turbo-jet-engine project has been planned in the Propulsion Subdivision at the Institute of Aeronautics and Space (IAE/ASA-P). Another project, a test facility, will be developed to evaluate the performance of the prototypes produced and their adequacy with the characteristics desired in the study. This bank is demanded to provide two systems: a data acquisition system and an automated control system, able to use the LabView program and the boards data acquisition, both produced by National Instruments Company. This undergraduation research focuses on the rotation control, that acts in the amount of fuel injected into the combustion chamber. To execute such experience, two programs in LabView ambient were developed, both of them using the Proportional Integral Control (PI), that seeks to make smooth, but not so slow accelerations, to every final value rotation desired. Besides this, the control is supposed to follow the acceleration limits imposed by the engine´s transient behaviour, which may become harmfull, depending on its rate of acceleration, due to the limitations imposed by the compressor´s operating map. The difference between the two programs consists in the way they obtain the gradation level during the rotation rise, considering that PI control is indifferent to the final value in relation to the standard lengh of time. The first program consists in setting intermediate reference rotation and the second one uses the alternation of PI control parameters, according to the rotation level at a specific moment. The control loop equationing was solved, by using a modelling of the engine's function and the transfer functions in case of a simple PI control. This point contributed to deduce the analytical expressions related to the rotation´s time evolution, later compared to the curves generated by the algorithms developed in this study. This research presents a significative amount of simulations about the cases presented that enable the comparison with the theoretical results expected and the evaluation of the mechanisms created to obtain a satisfactory rise of the rotation rate.

Siglas

A – Magnitude da rotação referência de entrada ou amplitude do valor final desejado

B – Magnitude do torque de carga ou da perturbação ou distúrbio de entrada

b – coeficiente de atrito viscoso

CASE - estrutura que exprime condição no programa Labview

dt – amplitude do intervalo de tempo associado a cada processo numa mesma iteração

FOR LOOP – estrutura do Labview que promove uma quantidade determinada da seqüência de processos contida na estrutura

WHILE LOOP – estrutura do Labview que promove uma quantidade indeterminada da seqüência de processos contida na estrutura

Kp – constante de proporção do erro

Ki – constante incidente sobre a integral do erro

PI – processo de controle proporcional mais integral

Tat – Torque de atuação

Tc – torque de carga

ζ - coeficiente de amortecimento

ω_n - freqüência natural

ω_d - freqüência natural amortecida

Sumário

1 Introdução ... 1
2 Regime transiente na turbina a gás ... 4
2.1 Parâmetros adimensionais e mapa do compressor ... 4
2.2 Compatibilidade de fluxo e trabalho no transitório e na aceleração do motor ... 7
2.3 Razão dos algoritmos controle ... 11
3 Modelo dinâmico do motor ... 13
4 Sistema de controle proporcional + integral (PI) ... 14
4.1 Considerações sobre torque e potência ... 14
4.2 Diagrama de blocos da malha de controle ... 15
4.3 Funções de transferência e análise teórica das respostas ... 16
4.3.1 Resposta à entrada degrau ... 17
4.3.2 Resposta à entrada degrau para controle proporcional puro ... 19
4.3.3 Sistema de 2ª ordem super e sub amortecidos ... 21
4.3.4 Efeito da variação dos parâmetros de controle no tipo de resposta ... 21
4.3.5 Análise da resposta transitória para o caso sub amortecido ... 22
4.3.5.1 Efeito da variação dos parâmetros de controle no sobre-sinal, freqüência de oscilação, tempo de subida e tempo de estabilização ... 23
4.3.6 Limitação do controle PI simples ... 24
4.4 Simulações do algoritmo PI ... 26
4.4.1 Simulações para o caso de controle proporcional puro (Ki=0) ... 26
4.4.1.1 Influência do intervalo de tempo de cada passo de iteração (*dt*) ... 28
4.4.2 Simulações para o caso de controle proporcional + integral ... 29
4.4.2.1 Simulações para sistemas super, sub e criticamente amortecidos ... 29
4.4.2.2 Simulações entre diferentes parâmetros de resposta para sistemas sub amortecidos ... 31
4.4.2.3 Influência de *dt* ... 32
5 Descrição do programa de controle gradual ... 34
5.1 Parte 1 ... 34
5.2 Parte 2 ... 35
5.3 Parte 3 ... 35
5.3.1 Mecanismo de elevação gradual da rotação de referência ... 36
5.3.1.1 Algoritmo do controle gradual ... 38
5.3.2 Simulações ... 39
5.3.2.1 Influência do parâmetro diferença para nova referência transitória ... 40
5.3.2.2 Influência do parâmetro incremento na referência transitória ... 42
5.4 Parte 4 ... 44
6 Descrição do programa de controle por variação de parâmetros ... 46
7 Acessórios ... 54
7.1 Mecanismo de bloqueio do erro negativo ... 54
7.1.1 Simulações ... 54
7.2 Atuação das temperaturas de alerta ... 56
7.2.1 Simulações ... 57
8 Conclusão ... 58
8.1 Complemento sobre o sistema físico real / diferenças com os programas simulados ... 59
Referências ... 60

1 Introdução

Um banco de ensaios tem por finalidade medir diversos parâmetros de funcionamento de um motor para avaliação de desempenho e conformidade com as características desejadas pelo projeto.

O banco pode medir apenas parâmetros globais de desempenho como tração produzida, consumo específico, vibrações, ou pode medir parâmetros dos diversos componentes do motor.

Neste último caso são coletados dados de pressões e temperaturas em diversos pontos dos componentes. Também pode ser medido o escoamento entre as palhetas para confrontação com a previsão teórica de modelos CFD.

Um banco de ensaios é composto das seguintes partes:

1. Sistema de combustível;
2. Sistema de partida;
3. Sistema de lubrificação;
4. Sistema de Admissão de ar;
5. Sistema de Exaustão de gases;
6. Berço para sustentação do motor e medição de tração;
7. Instrumentação para medidas de temperaturas, pressões, tração, velocidade de rotação, fluxo de combustível, fluxo de ar, vibração;
8. Sistema de aquisição de dados e controle dos ensaios;
9. Sistema de controle do motor através da quantidade de combustível injetada.

A aquisição de dados compreende as seguintes etapas: transdução, condicionamento e transporte do sinal;

A transdução é o componente básico de todos os sistemas de medição, é o dispositivo que muda a energia de uma forma para outra, convertendo a grandeza a ser medida numa forma que possa ser transportada e processada. Em nosso caso, como na grande maioria, são gerados sinais elétricos de acordo com a magnitude da grandeza medida. Esse processo de conversão não é necessariamente linear.

O condicionamento de sinal tem o papel de associar uma amplitude do sinal elétrico a um determinado valor da grandeza medida. Além disso, fazem parte do condicionamento a amplificação e a filtragem do sinal. A primeira é necessária porque muitas vezes a transdução gera sinais de pequena amplitude, que não conseguem ser transportados com eficácia. A segunda porque os sistemas de medição estão sujeitos a interferências ou ruídos que se sobrepõem ao sinal base. Se essa interferência ocorre antes da amplificação a filtragem torna-se essencial.

O controle do motor envolve:

1. algoritmo de controle propriamente, que calcula o valor da potência de atuação associada a um fluxo de combustível;
2. condicionamento do sinal, que converte o valor acima num sinal de abertura da válvula de combustível;
3. sistema físico de abertura, que pode ser um servo mecanismo. Este lê a informação do sinal de abertura e o executa.

Este trabalho de graduação concentrou-se no item (9) das partes do banco de ensaio. Foram desenvolvidos dois programas para controlar a velocidade de rotação do motor paralelamente a uma simulação de aquisição de dados da própria rotação e de temperatura, esta sendo fundamental para a tomada de atitudes em caso de valores críticos.

Ambos tem a função de alterar a rotação do motor até o valor desejado, que é uma entrada dos programas e mantê-la neste valor enquanto nada diferente for comandado. Também devem atuar de forma a reduzir a rotação ou o fluxo de combustível caso o monitoramento da temperatura e da rotação exija.

A técnica utilizada baseou-se no clássico controle PID (proporcional + integral + derivativo), que atua respectivamente sobre o erro, a integral do erro ou erro acumulado e sobre a derivada do mesmo. A parte derivativa não chegou a ser utilizada devido ao amortecimento natural do sistema. Nos sistemas físicos com pouco amortecimento a inserção do controle derivativo cria um fator na dinâmica que equivale matematicamente a um termo de amortecimento viscoso (proporcional à velocidade).

A diferença entre os dois programas está no algoritmo utilizado para promover a elevação da rotação até o valor desejado, embora ambos utilizem um controle PI. Este tipo de controle, se utilizado sem os acessórios ***controle gradual*** e ***variação de parâmetros***, que serão explicados no

decorrer do relatório, ignora a amplitude do valor final no que diz respeito aos tempos característicos da resposta transitória. Num controle PI simples gasta-se o mesmo tempo para se elevar a grandeza sob controle a um valor desejado ou a ***n*** vezes este valor, causando dinâmicas excessivamente suaves ou bruscas.

Foi com o propósito de adequar à amplitude desejada os tempos característicos de evolução da rotação que desenvolveu-se os dois programas de controle de rotação em que consiste este trabalho de graduação.

O primeiro programa de controle de rotação, chamado ***Controle Gradual.vi***, utiliza valores intermediários ou transitórios que servem como referência para serem atingidos. Assim que se chega próximo a um destes, outro valor transitório maior é gerado. Buscou-se com isso produzir uma subida gradual ou suave da rotação.

O segundo programa, chamado ***Controle com Variação de Parâmetros.vi*** utiliza apenas o valor final desejado como referência. A busca pela suavidade se dá com o escalonamento dos parâmetros do controle proporcional (***Kp***) e do integral (***Ki***) conforme o valor da rotação e do erro em que se está no momento. No controle gradual trabalha-se somente com um par dos parâmetros mencionados.

Obs: A extensão ***vi*** refere-se aos programas executáveis em ***Labview***.

2 Regime transiente na turbina a gás

2.1 Parâmetros adimensionais e mapa do compressor

De acordo com Barbosa, (1), para a análise do funcionamento de um compressor é conveniente a utilização de variáveis adimensionais. A experiência mostra que o trabalho absorvido pelo compressor depende principalmente dos seguintes parâmetros: fluxo de massa ($\dot{m}$), rotação do compressor (N), dimensões do compressor (diâmetro (D), comprimento), densidade do ar (ρ), temperatura do fluido de trabalho, propriedades físicas do fluido de trabalho (calores específicos (c_P e c_V), coeficiente de condutividade térmica, viscosidade (μ)). Dessas variáveis apenas duas (fluxo de massa e rotação do compressor) são variáveis que podem ser controladas externamente, enquanto que as demais não podem ser alteradas uma vez se tendo o compressor e o fluido de trabalho estabelecido. Há, portanto, dez variáveis independentes e quatro variáveis fundamentais (massa, comprimento, tempo e temperatura).

Pelo teorema dos π's de Buckingham, pode-se conhecer o funcionamento do compressor através dos seguintes grupos adimensionais, sendo:

W_C : Trabalho específico do compressor

U : velocidade tangencial da pá

$$\pi_1 = \Psi = \frac{W_C}{U^2}$$ coeficiente de pressão

$$\pi_2 = \Phi = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot N \cdot D^3}$$ coeficiente de vazão

$$\pi_3 = R_e = \frac{\rho \cdot D \cdot U}{\mu}$$ número de Reynolds

$$\pi_4 = M_1 = \frac{N \cdot D}{\sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_{t1}}}$$ número de Mach

$$\pi_5 = \gamma = \frac{c_P}{c_V}$$ relação dos calores específicos

$$\pi_6 = P_r = \frac{\mu \cdot c_P}{k}$$ número de Prandtl

Os coeficientes de pressão e de vazão podem ser reescritos de maneira mais conveniente para quando forem utilizados no estudo de compressores.

Como num banco de ensaios a altitude é constante e levando-se em conta que o desempenho de um compressor é pouco influenciado pelo Número de Reynolds nas faixas de temperaturas e de pressões correspondentes a altitudes baixas e que a influência do Número de Prandtl também é pequena, pode-se escrever:

$$\frac{P_{t2}}{P_{t1}} = f\left(\frac{\dot{m}\sqrt{R \cdot T_{t1}}}{A \cdot P_{t1}}, \frac{N \cdot D}{\sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_{t1}}}, \gamma \right)$$

Para um mesmo fluido de trabalho, a relação dos calores específicos não varia muito nas faixas de variação das temperaturas e pressões usuais. Assim, a relação anterior pode ser simplificada para

$$\frac{P_{t2}}{P_{t1}} = f\left(\frac{\dot{m}\sqrt{T_{t1}}}{P_{t1}}, \frac{N}{\sqrt{T_{t1}}} \right)$$

Essa relação é descrita pelo mapa seguinte.

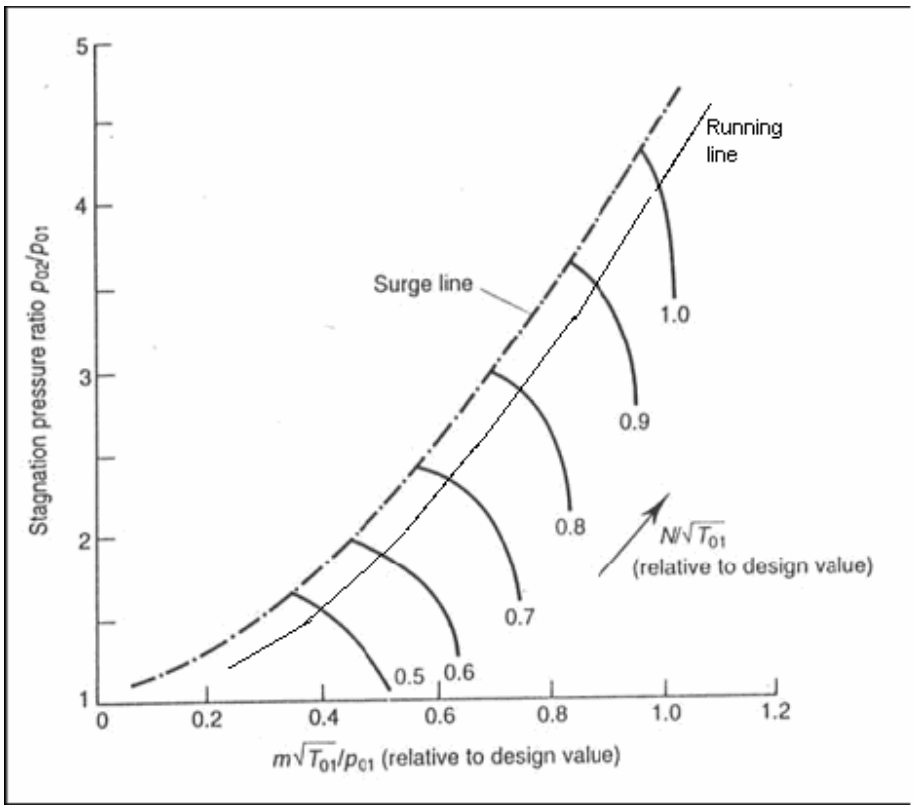

Figura 1: Mapa de um compressor (taxa de compressão)

Fonte: BARBOSA, 2005, p.36

O mapa acima aplica-se a regime estacionário. A linha contínua mais fina (running line) refere-se aos pontos de funcionamento estável do motor como um todo. Durante a aceleração a saída de um ponto de equilíbrio para outro no mesmo sentido da seta ocorre por cima da linha de funcionamento estável.

Já na desaceleração, deslocando-se contra o sentido da seta, a transição se dá por baixo dessa linha.

Isso torna crítico apenas o processo de aceleração, que pode encostar e ultrapassar a linha limite de bombeamento (surge line), que representa uma condição instável de funcionamento.

2.2 Compatibilidade de fluxo e trabalho no transitório e na aceleração do motor

Em certas aplicações, a resposta transiente segue uma necessidade de mudança que pode ser crítica.

Motores aeronáuticos são um exemplo óbvio de aplicação que pode ser crítica. A primeira exigência é uma rápida resposta de tração, para cobrir uma aterrisagem que deve ser abortada, sendo necessário arremeter.

No início pouca atenção era dada ao comportamento transiente e a taxa de resposta era estabelecida empiricamente durante testes de desenvolvimento. Isso exigia sucessivos testes de bancada e freqüentemente as máquinas eram danificadas.

Atualmente o transiente é previsto por um conhecimento do desempenho fora do ponto de projeto e pode ser calculado durante a fase de projeto usando características estimadas dos componentes.

De acordo com a aceleração de uma turbina a gás depende de muitos fatores entre os quais o momento polar de inércia do conjunto rotativo e a máxima temperatura que as palhetas da turbina podem agüentar durante curtos períodos.

Normalmente o fator limitante na aceleração é a proximidade da linha limite de bombeamento para o equilíbrio da linha de funcionamento estável do compressor, e isso é particularmente crítico no início da aceleração em baixa potência.

> De acordo com Saravanamuttoo, Rogers, Cohen, (2), o equilíbrio fora do ponto de projeto é baseado no atendimento das exigências de compatibilidade de fluxo e trabalho entre os componentes. Durante a operação transiente, uma turbina a gás pode ser considerada satisfazendo a compatibilidade de fluxo mas não de trabalho, e o excesso ou deficiência de potência aplicada ao rotor pode ser usado para calcular sua aceleração ou desaceleração.

A aceleração do rotor do compressor é dada pela diferença entre o torque gerado pela turbina e o torque drenado pelo compressor para elevar a pressão do fluxo de ar através dele, sendo ***J*** o momento polar de inércia do rotor do compressor.

$$J \cdot \dot{\omega} = G_t - G_c$$

Para se obterem os torques pode–se usar os métodos de desempenho fora do ponto de projeto.

Se considerarmos qualquer ponto na curva de funcionamento do compressor, que em geral não está num valor de equilíbrio, a compatibilidade de fluxo entre o compressor e a turbina pode ser satisfeita utilizando a identidade,

$$\frac{m\sqrt{T_{03}}}{p_{03}} = \frac{m\sqrt{T_{01}}}{p_{01}} \cdot \frac{p_{01}}{p_{02}} \cdot \frac{p_{02}}{p_{03}} \cdot \sqrt{\frac{T_{03}}{T_{01}}}$$

sendo:

T_{01} a temperatura de entrada no compressor;

T_{03} a temperatura de saída do compressor;

p_{01} a pressão de entrada no compressor;

p_{02} a pressão de saída do compressor;

p_{03} a pressão de entrada na turbina;

m o fluxo em massa de ar.

O fluxo adimensional $\frac{m \cdot \sqrt{T_{03}}}{p_{03}}$ pode ser assumido como independente da velocidade de rotação e dependente somente da razão de pressões. Rearranjando a equação da compatibilidade de fluxo, fica

$$\sqrt{\frac{T_{03}}{T_{01}}} = \frac{\frac{m\sqrt{T_{03}}}{p_{03}} \cdot \frac{p_{02}}{p_{01}} \cdot \frac{p_{03}}{p_{02}}}{\frac{m \cdot \sqrt{T_{01}}}{p_{01}}}$$

Se a percentagem de queda de pressão na combustão $\frac{p_{03}}{p_{02}}$ for constante, vê-se que o valor de $\frac{T_{03}}{T_{01}}$ satisfazendo a compatibilidade de fluxo pode ser obtido para qualquer ponto da curva de funcionamento do compressor sem fazer referência à compatibilidade de trabalho, Saravanamuttoo, Rogers, Cohen, (2).

O fluxo de combustível requerido para produzir essa razão de temperaturas pode ser calculado porque o fluxo de ar, a temperatura de saída do compressor e o aumento de temperatura pela combustão são conhecidos.

O fluxo de ar é obtido da próxima figura, pois a razão de compressão $\frac{p_{02}}{p_{01}}$ é um valor referenciado. A temperatura de saída do compressor é obtida a partir da razão de compressão e o aumento de temperatura na combustão é a diferença entre T_{03} , que é referência, e a saída do compressor T_{02} .

Se o processo é repetido para uma série de pontos numa linha de $\frac{T_{03}}{T_{01}}$ constante, pode ser desenhado o mapa do compressor.

O valor da razão de pressões na turbina geradora de gases é $\frac{p_{03}}{p_{04}}$, que depende do valor selecionado de $\frac{p_{02}}{p_{01}}$ no compressor e da queda de pressão na câmara de combustão, assumida constante em percentagem. Com a razão de pressões e a temperatura de entrada na turbina T_{03} conhecidas, calcula-se a temperatura de saída da mesma T_{04}. A potência desenvolvida por ela pode então ser calculada.

$$potência_turbina = \eta_m \cdot m \cdot c_{pg} \cdot \Delta T_{034} \quad \text{onde} \quad \Delta T_{034} = \frac{\Delta T_{034}}{T_{03}} \times \frac{T_{03}}{T_{01}} \times T_{01}$$

A potência do compressor é dada por $potência_comp = m \cdot c_{pa} \cdot \Delta T_{012}$

O torque líquido fica

$$\Delta G = \frac{\eta_m \cdot m \cdot c_{pg} \cdot \Delta T_{034} - m \cdot c_{pa} \cdot \Delta T_{012}}{2 \cdot \pi \cdot N}$$, Saravanamuttoo, Rogers, Cohen, (2).

onde:

c_{pa} é o calor específico do ar;

c_{pg} é o calor específico dos gases da combustão.

N é a rotação do motor.

Uma vez obtido o torque líquido, a aceleração angular é calculada, e assumindo-a constante num pequeno intervalo de tempo obtém-se a variação de velocidade. O processo pode

ser repetido muitas vezes para prover a linha transiente a partir de um ponto conveniente de equilíbrio.

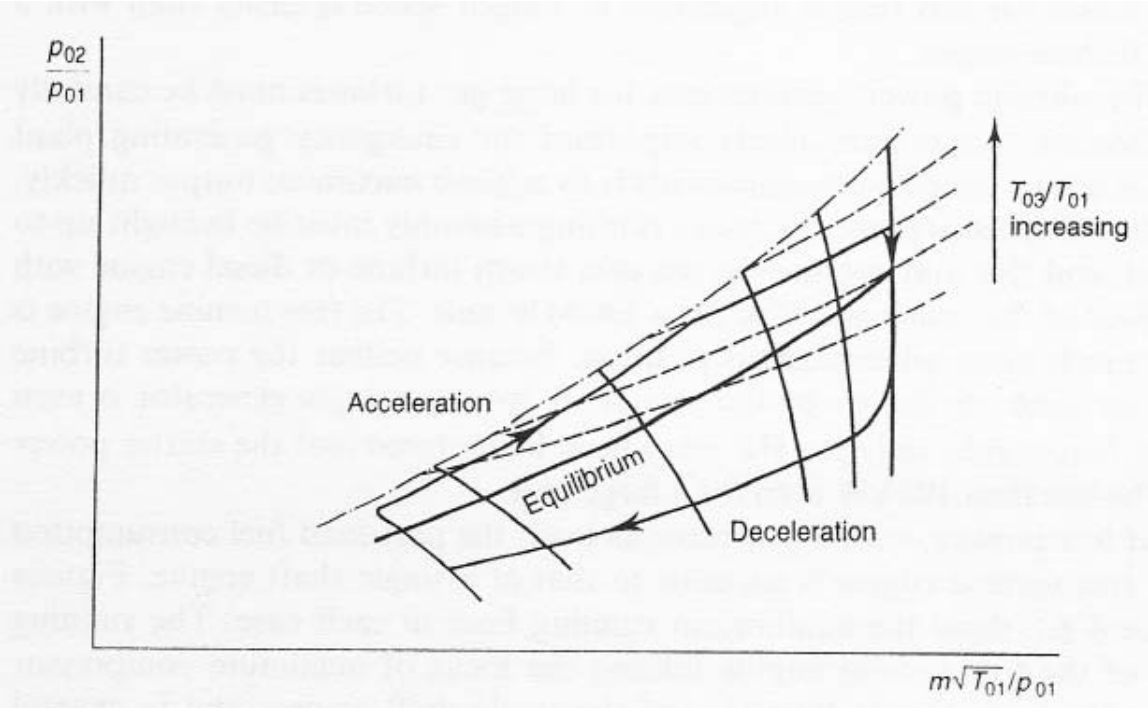

Figura 2: Trajetória transiente do compressor

Fonte: SARAVANAMUTTOO, ROGERS, COHEN, 2001, p.430

A figura acima mostra uma típica trajetória transitória de aceleração e desaceleração.

A aceleração se processa com o aumento de temperatura que se segue ao incremento no combustível, ocorrendo antes que o rotor tenha tempo de aumentar o fluxo de ar. Um incremento inicial muito severo de combustível causará bloqueio do bombeamento no compressor, que pode quebrar palhetas do mesmo, além do que diminui o fluxo de ar para a combustão, resultando em elevadas temperaturas que podem destruir a turbina.

Por outro lado, na desaceleração o retorno se dá por “baixo”, e a temperatura de entrada na turbina decresce, pois o fluxo de ar gerado pelo compressor demora algum tempo para diminuir enquanto o combustível queimado já diminuiu. Com isso o único aspecto crítico da desaceleração rápida é a presença de uma mistura pobre ar combustível, que pode levar ao apagamento da chama.

2.3 Razão dos algoritmos controle

Diante dessas considerações foi projetado um sistema de controle de fluxo de combustível que procura tornar gradual o incremento da combustão. Para o decremento, por ser menos crítico, não há um controle gradual. Existe o mecanismo de bloqueio do erro negativo, que será explicado mais a frente no item de mesmo nome. Tal mecanismo não tem essa finalidade em princípio, mas pode ser utilizado para isso.

O controle tem então a missão principal de evitar atingir a linha limite de bombeamento, preservando a turbina. Para isso deve promover uma elevação suave da rotação para toda a faixa de valores finais desejados.

Como tarefa colateral, sem entretanto deixar de ser fundamental, o controle deve monitorar parâmetros críticos como temperatura, sobre rotação e tomar atitude em caso de perigo à integridade das peças.

O diagrama de blocos seguinte, figura 3, traduz a malha de controle, que é baseada no erro, ou seja, a diferença entre a rotação desejada e a momentânea. O erro é então processado em princípio por um controle proporcional + integral (***PI***). No entanto, dependendo de condições de temperatura e do próprio erro, o processamento anterior deixa de atuar dando vez a respostas específicas para determinada condição.

A saída do bloco de controle, seja oriunda do processamento PI ou não, consiste num sinal de atuação que comanda o fluxo de combustível. A combustão dessa quantidade de combustível liberada gera a potência que movimenta o motor, causando sua aceleração.

A rotação é constantemente realimentada para se obter o erro momentâneo. Essa realimentação consiste fisicamente no sistema de medição da rotação e aquisição de dados.

Como tais sistemas estão sujeitos a ruído, a realimentação geralmente não contém o sinal de rotação limpo, mas sim tendo o ruído sobreposto. Como o ruído na maioria das vezes possui freqüência maior que o sinal a ser medido, a inserção de um filtro passa baixa após o sistema de medição deve conseguir bloquear o ruído.

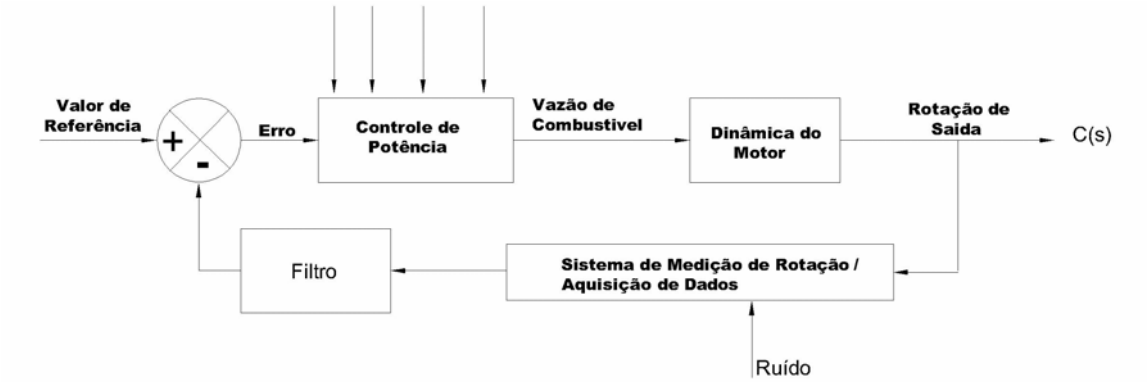

Figura 3: Diagrama de blocos do sistema de aquisição e controle

As setas verticais representam parâmetros acessórios cujos valores são inseridos pelo usuário dos programas desenvolvidos neste trabalho e que balizam a saída de atuação quando determinados valores limite de variáveis de funcionamento do motor são atingidas. Tais parâmetros são: temperaturas de alerta, máxima potência de atuação, máxima rotação admitida e limite para erro negativo.

Uma vez atingido algum deles, o valor de atuação processado pelo controle PI é bloqueado e em seu lugar é enviado um sinal de atuação correspondente ou associado a algum de tais valores.

Estes parâmetros serão explicados ao longo do relatório.

3 Modelo dinâmico do motor

A turbina está sendo modelada como uma inércia rotativa sujeita a um atrito viscoso (proporcional à velocidade angular) e a um torque de carga, simplificado como um valor constante.

Dessa forma seu comportamento dinâmico é governado pela equação diferencial:

$J\dot{\omega} + b\omega + T_C = T_{At}$ (1) sendo

ω a velocidade de rotação

J o momento de inércia de todo o conjunto rotativo (compressor + turbina) em relação ao eixo de rotação

b o coeficiente de atrito viscoso

Tc o torque de carga

Tat o torque de atuação, que será determinado pelo controle ***PI*** em função do erro.

Na realidade o atrito nos mancais é pequeno perto das potências envolvidas e não é representado pelo termo $b\omega$, mas sim pelo torque de carga. O termo $b\omega$ tenta modelar a resistência do compressor no movimento do conjunto do motor, representando o torque necessário para o compressor desempenhar seu trabalho de compressão de um determinado fluxo de ar. É uma simplificação considerar que o torque para girar o compressor é proporcional à sua rotação por um fator ***b***. Esse torque depende de fatores como a razão de compressão, o fluxo de ar e das condições do mesmo (temperatura, pressão e densidade) na entrada do bocal de admissão.

O termo T_{At} representa o torque produzido pela turbina de potência, que durante a fase transitória é consumido nas três parcelas da equação (1), isto é, parte dele é utilizada para acionar o compressor, uma fração pequena para vencer o atrito dos mancais e a parcela restante para acelerar o conjunto.

Quando o motor entra em regime e portanto $J\dot{\omega} = 0$, o torque de atuação é consumido integralmente para movimentar o compressor, além de vencer um pequeno atrito.

Deve-se notar que o torque de atuação não está associado a toda a potência produzida pela combustão, pois existe uma parte desta que sai no bocal de exaustão e é responsável pelo empuxo gerado.

4 Sistema de controle proporcional + integral (PI)

O controle como um todo, ou seja, com o algoritmo PI mais os acessórios e os mecanismos de elevação gradual da rotação, tem a função de levar a rotação do motor até o valor ajustado (valor de referência) e mantê-la nessa rotação.

Além disso, tal sistema deve monitorar variáveis como temperatura e sobre rotação, sinalizando condições prejudiciais ao funcionamento do motor e tomando atitude de limitação do fluxo de combustível.

Também deve limitar a taxa de aceleração através da máxima abertura de combustível caso o processamento matemático PI promova uma forte atuação, embora o controle PI busque por seus próprios parâmetros deixar o processo suave. Estes dois últimos parágrafos representam a parte acessória que será explicada no item 7.

O coração do processo de controle é o algoritmo proporcional + integral, que incide sobre o erro, ou seja, a diferença entre o valor desejado e a rotação instantânea.

No caso do ***programa de controle gradual***, o erro é a diferença entre o valor desejado momentâneo ou transitório e a rotação momentânea, como será visto na análise desse algoritmo.

A saída do processamento de controle será o sinal que comandará a válvula de combustível, sendo indiretamente o sinal de atuação em dimensão de potência.

4.1 Considerações sobre torque e potência

A equação (1) traduz um balanço de torques. Entretanto, a ação física de atuação é avaliada em potência, pois consiste na ***quantidade de combustível (energia) injetada por unidade de tempo***. Como $Potência = Torque \times rotação$, a saída do controle PI – torque de atuação - deve ser multiplicada pela rotação para produzir a potência de atuação associada à rotação instantânea. A saída final da malha de controle é então o resultado desse produto, potência de controle, que determinará o fluxo de combustível.

Com essa consideração tem-se um sistema não linear, traduzido pelo seguinte diagrama de blocos

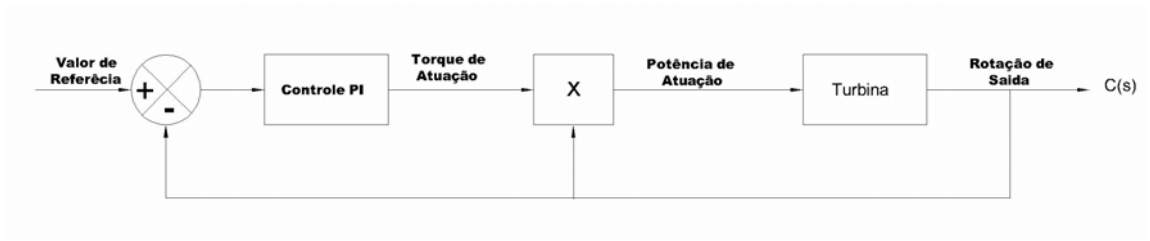

Figura 4: Diagrama de blocos do sistema não linear

No algoritmo desenvolvido, a dinâmica acaba sendo linear, como será explicado na **parte 2** do item "***descrição do programa de controle***"

A potência de saída determinada pelo algoritmo é aquela consumida para girar o conjunto compressor + turbina. A potência total queimada ainda possui a parcela do empuxo, que é expelida no bocal de exaustão e que representa aproximadamente ***um terço*** do total de energia queimada.

Além disso, deve ser conhecida a relação entre a potência queimada e o fluxo de combustível.

Esses dois aspectos exigem um outro algoritmo que converta a saída do programa, potência de atuação, num sinal de atuação que comande a liberação do combustível. Tal algoritmo não está contemplado neste programa, pois pertence ao sistema de atuação.

No final será comentado como ficaria o programa com o sistema completo, isto é, com os sistemas de aquisição de dados e atuação.

4.2 Diagrama de blocos da malha de controle

Aplicando a transformada de Laplace e escrevendo a equação (1) na forma de diagrama de blocos, pode-se escrever:

$$J \cdot s \cdot \omega(s) + b \cdot \omega(s) + T_C(s) = T_{At}(s) \qquad (2)$$

O erro é dado pela diferença entre a rotação desejada e a real.

Com isso o torque de saída é o processamento PI sobre o erro, correspondendo à função de transferência:

$$\frac{T_{At}(s)}{e(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} \quad (3) \qquad \text{onde}$$

Kp é a constante de erro proporcional, fator que multiplica o erro instantâneo;

Ki é a constante de erro integral, fator que multiplica a integral do erro desde a partida ou desde algum instante de início do controle;

Dessa maneira, o diagrama de blocos da dinâmica da turbina com o controle proporcional + integral (PI) fica em termos de torque

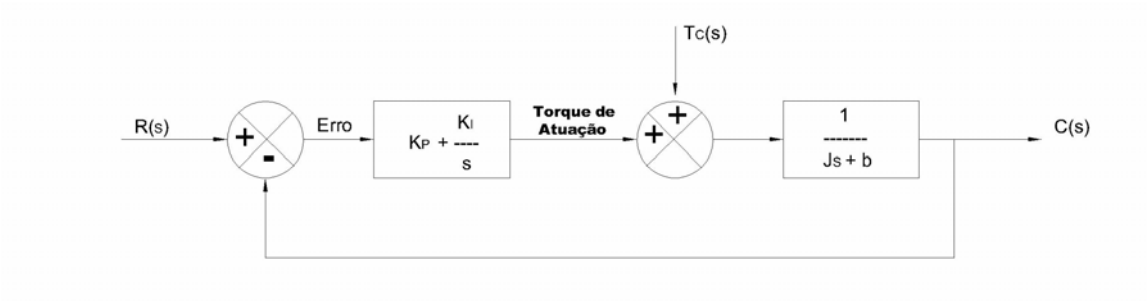

Figura 5: Diagrama de blocos da dinâmica rotacional da turbina

R(s) é a transformada de Laplace da função entrada de referência, que no caso é um valor constante ou constante por partes em se tratando do controle gradual;

C(s) é a transformada de Laplace da função saída, isto é, da função temporal da rotação.

4.3 Funções de transferência e análise teórica das respostas

Como trata-se de um modelo linear, pode-se aplicar o princípio da superposição, ou seja, compor os resultados nas situações com apenas torque de carga (distúrbio) e com apenas a entrada de referência (set point).

A função de transferência de malha fechada entre a entrada de referência e a rotação de saída fica:

$$\frac{\omega(s)}{R(s)} = \frac{K_P \cdot s + K_I}{J \cdot s^2 + (b + K_P)s + K_I} \qquad (4a)$$

A função de transferência de malha fechada entre o torque de carga (distúrbio) e a rotação de saída fica:

$$\frac{\omega(s)}{T_C(s)} = \frac{s}{J \cdot s^2 + (b + K_P)s + K_I} \qquad (5a)$$

Aplicando o critério de estabilidade de Routh, verifica-se que o sistema é estável para todos os valores não negativos de ***Kp*** e ***Ki***, tendo em vista que ***J*** e ***b*** são sempre positivos.

4.3.1 Resposta à entrada degrau

As relações (4a) e (5a) podem ser reescritas num formato padrão:

$$\frac{\omega(s)}{R(s)} = \frac{K_P}{K_I} \cdot \frac{\frac{K_I}{J} \cdot s}{s^2 + \left(\frac{b + K_P}{J}\right)s + \frac{K_I}{J}} + \frac{\frac{K_I}{J}}{s^2 + \left(\frac{b + K_P}{J}\right)s + \frac{K_I}{J}} \qquad \text{sendo:}$$

$$\frac{K_I}{J} = \omega_n^2 \quad \textbf{(A)} \qquad \text{e} \qquad \frac{b + K_P}{J} = 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \quad \textbf{(B)}$$

$$\frac{\omega(s)}{R(s)} = \frac{K_P}{K_I} \cdot \frac{\omega_n^2 \cdot s}{s^2 + (2 \cdot \zeta \cdot \omega_n)s + \omega_n^2} + \frac{\omega_n^2}{s^2 + (2 \cdot \zeta \cdot \omega_n)s + \omega_n^2} \qquad (4b)$$

$$\frac{\omega(s)}{T_C(s)} = \frac{1}{K_I} \cdot \frac{\omega_n^2 \cdot s}{s^2 + (2 \cdot \zeta \cdot \omega_n)s + \omega_n^2} \qquad (5b)$$

A resposta a uma entrada degrau de rotação (referência) de amplitude A $\left(\frac{A}{s}\right)$ fica:

$$\omega(s) = \frac{K_P}{K_I} \cdot \frac{A \cdot \omega_n^2}{s^2 + (2 \cdot \zeta \cdot \omega_n)s + \omega_n^2} + \frac{A \cdot \omega_n^2}{\left[s^2 + (2 \cdot \zeta \cdot \omega_n) \cdot s + \omega_n^2\right] \cdot s} \qquad (4c)$$

A resposta a uma entrada degrau de distúrbio (torque de carga) de amplitude B fica:

$$\omega(s) = \frac{1}{K_I} \cdot \frac{B \cdot \omega_n^2}{s^2 + (2 \cdot \zeta \cdot \omega_n)s + \omega_n^2} \qquad (5c)$$

No domínio do tempo, as relações (4c) e (5c) ficam :

$$\omega(t) = \frac{A \cdot K_P}{K_I} \cdot \frac{\omega_n \cdot \exp(-\zeta \cdot \omega_n \cdot t)}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cdot \mathrm{sen}(\omega_d \cdot t) + A \cdot \left[1 - \frac{\exp(-\zeta \cdot \omega_n \cdot t)}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cdot \mathrm{sen}(\omega_d \cdot t + \Phi)\right] \qquad (4d)$$

Tendo em vista que o torque de carga é uma perturbação negativa e que o diagrama de blocos representa como positiva, a resposta temporal ao distúrbio fica

$$\omega(t) = -\frac{B}{K_I} \cdot \frac{\omega_n \cdot \exp[-\zeta \cdot \omega_n \cdot t]}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cdot \mathrm{sen}(\omega_d \cdot t) \qquad (5d)$$

$$\omega_d = \omega_n \cdot \sqrt{1-\zeta^2} \qquad \Phi = tg^{-1}\left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right)$$

$$0 < \zeta < 1 \quad , \quad 0 < \Phi < \pi/2 \quad , \quad t \geq 0 \ .$$

Percebe-se que a resposta (5d) converge para ***zero***, ou seja, a entrada de torque de carga não contribui para um valor de rotação em regime permanente.

Já a resposta à entrada de rotação de referência (***A***) apresenta uma parcela que também converge para ***zero*** e outra que apresenta valor de estado estacionário ***A***. Dessa forma, o sistema de controle consegue um valor final sem erro residual, pois o valor final é igual à referência de entrada.

Isso ocorre devido à presença do controle integral. Façamos agora a análise da dinâmica sem esse componente, bastando para isso tornar ***Ki = 0***. Tem-se dessa forma um controle proporcional puro.

4.3.2 Resposta à entrada degrau para controle proporcional puro

Nessa condição a relação (4a) e (5a) ficariam:

$$\frac{\omega(s)}{R(s)} = \frac{K_P}{J \cdot s + (b + K_P)} \qquad (4e)$$

$$\frac{\omega(s)}{T_C(s)} = \frac{1}{J \cdot s + (b + K_P)} \qquad (5e)$$

Reescrevendo num formato padrão de primeira ordem:

$$\frac{\omega(s)}{R(s)} = \frac{\dfrac{K_P}{b + K_P}}{\dfrac{J}{b + K_P} \cdot s + 1} \qquad (4f)$$

$$\frac{\omega(s)}{T_C(s)} = \frac{\dfrac{1}{b + K_P}}{\dfrac{J}{b + K_P} \cdot s + 1} \qquad (5f)$$

A resposta do sistema a uma entrada de rotação de referência de amplitude ***A*** fica:

$$\omega(t) = \frac{A \cdot K_P}{b + K_P} \cdot \left[1 - \exp\left(- \frac{t}{\frac{J}{b + K_P}} \right) \right] \qquad t \geq 0 \qquad (4g)$$

A resposta a uma entrada de torque de carga de amplitude ***B*** fica:

$$\omega(t) = -\frac{B}{b + K_P} \cdot \left[1 - \exp\left(- \frac{t}{\frac{J}{b + K_P}} \right) \right] \qquad t \geq 0 \qquad (5g)$$

O valor de estado estacionário compondo as duas entradas fica:

$$\omega(t) = \frac{A \cdot K_P}{b + K_P} - \frac{B}{b + K_P} \qquad (4h)$$

existindo erro de estado estacionário, mesmo com a entrada de torque de carga nula.

Nota-se que à medida que ***Kp*** cresce, a resposta ao torque de carga tende a zero e a resposta total tende a ***A***, isto é, o erro de regime permanente tende a ***zero*** quando ***Kp*** tende a ***infinito***.

O inconveniente é uma resposta mais brusca, devido à diminuição da constante de tempo $T = \frac{J}{b + K_P}$.

4.3.3 Sistema de 2ª ordem super e sub amortecidos

Três casos podem ocorrer na resposta desse sistema dependendo do valor do coeficiente de amortecimento ζ .

- $\zeta < 1$ - sistema sub amortecido;
- $\zeta = 1$ - amortecimento crítico;
- $\zeta > 1$ - sistema super amortecido.

O 1º caso é caracterizado pela dinâmica de uma senóide amortecida e associado a esta, a existência do sobre-sinal, em diferentes magnitudes conforme o valor de ζ .

O 3º caso é caracterizado pela ausência de oscilação e sobre-sinal, assemelhando-se a um comportamento de 1ª ordem. Isso é explicado pelos dois pólos reais da função de transferência, que no domínio do tempo, correspondem à superposição de duas curvas de 1ª ordem.

O 2º caso é a fronteira entre o 1º e o 3º, sendo o limite a partir do qual a curva começa a ultrapassar o valor de estado estacionário, ocorrendo oscilação e sobre-sinal.

4.3.4 Efeito da variação dos parâmetros de controle no tipo de resposta

Fixando ***Ki***, o aumento de ***Kp*** provoca o aumento de ζ , de acordo com as relações **(A)** e **(B)**.

Fixando ***Kp***, o aumento de ***Ki*** provoca o aumento de ω_n de acordo com **(A)** e com isso a diminuição de ζ de acordo com **(B)**.

Dessa forma o aumento de ***Kp*** tende a tornar o sistema super amortecido, ao passo que o aumento de ***Ki*** tende a torná-lo sub amortecido.

4.3.5 Análise da resposta transitória para o caso sub amortecido

Foi visto que para quaisquer valores não negativos dos parâmetros de controle ***Kp*** e ***Ki***, o controle é estável. Sob o aspecto apenas da estabilidade, a escolha de tais parâmetros não envolve dificuldade, pois o sistema sempre caminhará para algum valor de regime. E se possuir algum valor não nulo de ***Ki***, atingirá exatamente o valor desejado de rotação. Isso significa em princípio que qualquer controle PI resolve o problema.

Ocorre, entretanto, que o comportamento até o regime permanente é que pode apresentar problemas quando se confronta o modelo teórico com o sistema físico real.

Por exemplo, num sistema de primeira ordem (***Ki=0***), uma constante de tempo ***T*** muito pequena faz com que o sistema chegue muito rápido ao regime permanente. Essa situação corresponde a uma aceleração muito intensa, que na prática o motor não consegue produzir.

Para que a constante de tempo seja pequena, deve-se aumentar o valor de ***Kp***, já que $T = \dfrac{J}{b + K_P}$.

Num sistema de segunda ordem, correspondente a $K_I \neq 0$, existem mais parâmetros de resposta transitória como:

1. sobre-sinal, valor de rotação que ultrapassa o valor desejado;
2. tempo de subida, tempo que o sistema leva para cruzar pela 1ª vez o valor desejado;
3. tempo de acomodação, tempo gasto para que o sistema oscile dentro de uma faixa pequena de valores de rotação, já considerado valor estacionário. Normalmente se usam os critérios de 2% e 5%. Neste último, por exemplo, o valor da rotação além do referido tempo não varia mais que 5% do valor final para mais ou para menos;
4. tempo de pico, momento quando é atingido o máximo sobre sinal.
5. freqüência de oscilação amortecida, que é um pouco inferior àquela em que o valor da rotação oscilaria se não houvesse amortecimento.

O sobre-sinal num sistema padrão é dado por Ogata, (3):

$$M_P = \exp\left(-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cdot \pi \right) \qquad (6).$$

O sistema em análise é composto pela superposição de três parcelas:

1. 1ª parcela de (4b), associada à entrada de referência e que tende a zero;
2. 2ª parcela de (4b), que é padrão de 2ª ordem a menos da constante A;
3. (5b), que corresponde à resposta ao torque de carga.

Se forem sub amortecidas, todas apresentarão sobre-sinal. Um aspecto deve ser observado.

O item 2 possui fase adiantada de Φ, o que faz com que o sobre-sinal seja atingido num tempo (***t***) menor, sujeito assim a um efeito menor de amortecimento associado ao termo $\exp[-\zeta \cdot \omega_n \cdot t]$.

Dessa maneira, o sobre-sinal preponderante é o do item 2, permitindo com alguma aproximação analisar a influência da variação das constantes ***Kp*** e ***Ki***, bem como dos parâmetros físicos ***J*** e ***b***, na dinâmica da resposta, utilizando a relação (6), como se a resposta possuísse apenas o item 2, correspondente a um sistema padrão de 2ª ordem.

A mesma aproximação aplica-se aos tempos de subida e pico. As freqüências natural e amortecida são as mesmas nos três itens. O tempo de estabilização também é bastante parecido, pois é governado essencialmente pelo termo $\exp[-\zeta \cdot \omega_n \cdot t]$, além do que a influência da fase Φ torna-se pequena, pois muitos ciclos da senóide amortecida já foram transcorridos, principalmente no critério de maior precisão como 2%.

4.3.5.1 Efeito da variação dos parâmetros de controle no sobre-sinal, freqüência de oscilação, tempo de subida e tempo de estabilização

De acordo com a relação (6), conclui-se que o sobre-sinal diminui com o aumento de ζ. Assim o aumento de ***Kp*** deve diminuir o sobre-sinal devido ao maior valor de ζ e o aumento de ***Ki*** deve aumentá-lo devido ao menor ζ, que causa pouco amortecimento.

Já a freqüência de oscilação amortecida dada por $\omega_d = \omega_n \cdot \sqrt{1-\zeta^2}$ (7), aumenta com o aumento de ω_n. Com isso, o aumento de ***Ki*** deve tornar o sistema mais oscilatório, ou seja, aumentando a freqüência de oscilação.

O tempo de subida t_r num sistema padrão de 2ª ordem é dado por

$$t_r = \frac{\pi - \beta}{\omega_d} \quad \text{sendo} \quad \beta = tg^{-1}\left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right)$$, Ogata, (3)

Substituindo (7) em (6) obtém-se para o tempo de subida $t_r = \dfrac{\pi - \beta}{\omega_n \cdot \sqrt{1-\zeta^2}}$.

O aumento de ***Ki*** promove assim a diminuição do tempo de subida devido ao aumento de ω_n. Por outro lado o aumento de ***Ki***, dado ***Kp*** constante, pelo fato de diminuir ζ e com isso aumentar β, tende a diminuir t_r, somando-se ao efeito anterior, com menor influência.

Para sistemas sub amortecidos, onde ζ é pequeno, ζ^2 é menor ainda, o que torna a influência deste último insignificante.

Já o aumento de ***Kp*** promove a diminuição de β devido ao aumento de ζ e com isso o aumento de t_r.

O tempo de estabilização pelo critério de 2% é dado por $t_s = \dfrac{4}{\zeta \cdot \omega_n}$, Ogata, (3).

Dessa maneira, o aumento de ***Kp*** causa a diminuição desse tempo, enquanto o aumento de ***Ki*** não influi pois aumenta ω_n na mesma proporção em que diminui ζ.

4.3.6 Limitação do controle PI simples

Analisando a relação (4d) verifica-se que o fator ***A*** pode ser colocado em evidência, sendo o restante da expressão a dinâmica correspondente a uma entrada degrau unitário. Como tal fator é constante, ele não influi no comportamento temporal, ou seja, o mesmo tempo ***t*** está associado a um valor de saída para entrada unitária ou a ***A*** vezes este valor.

Vejamos um exemplo com dois valores de referência de entrada para valores constantes de ***Kp*** e ***Ki***.

Kp = 1 ***Ki = 10***

A = 300

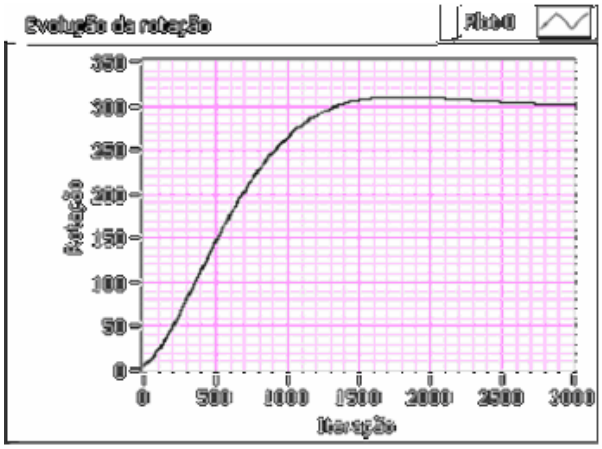

Figura 6A: indiferença ao tempo de evolução, pequena amplitude do valor final

A = 3000

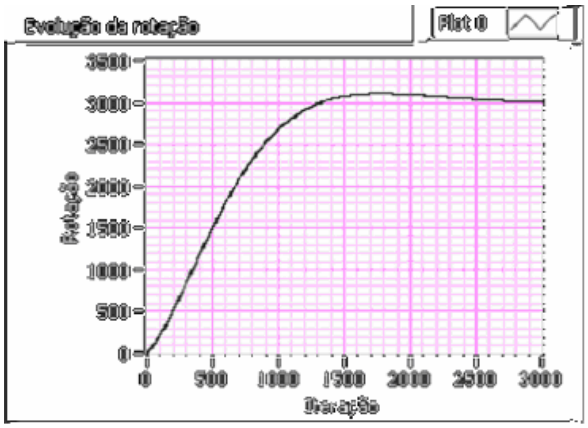

Figura 6B: indiferença ao tempo de evolução, grande amplitude do valor final

Conclui-se que o segundo sistema possui valores de aceleração ***10 vezes*** maiores que o primeiro, pois os mesmos tempos estão associados a rotações com esse grau de multiplicação. Na dinâmica da aceleração da turbina, isso pode ser prejudicial ou até mesmo inexeqüível, devido à intensa potência e portanto combustão necessária.

A alteração desse comportamento foi o principal objetivo deste trabalho e para isso é que foram desenvolvidos os dois algoritmos mencionados ***controle gradual*** e ***controle por variação de parâmetros***.

4.4 Simulações do algoritmo PI

Inicialmente serão executadas dinâmicas de um controle PI simples, sem os acessórios ***limitação de erro negativo***, ***limitação devido temperatura*** e ***sobre rotação*** , que serão detalhados no item 7, bem como sem os algoritmos de ***controle gradual*** e ***controle com variação de parâmetros***. Esta observação vale para os itens **4.4.1 e 4.4.2.**

Para anular o controle gradual basta igualar ***diferença para último transitório*** na estrutura ***CASE*** a um valor grande, maior que a própria rotação final desejada. Isso torna a primeira referência transitória já o próprio valor final desejado.

Para anular o efeito da temperatura basta ajustar as três temperaturas de alerta com valores elevados, de forma que não sejam alcançadas. Idem para a ***potência da máxima abertura de combustível***.

Para anular o efeito do erro negativo, que será explicado adiante, deve-se igualar ***limite para erro negativo*** a um valor bastante negativo, de forma que a rotação momentânea nunca supere a referência final ou transitória além do módulo desse valor.

Essas simulações são a primeira verificação da funcionalidade do programa.

Em cada figura representativa de uma simulação, os valores dos parâmetros importantes serão escritos, para que seja possível ter o registro dos mesmos e qualquer usuário possa executar o programa e obter as mesmas curvas.

4.4.1 Simulações para o caso de controle proporcional puro (Ki=0)

Observa-se a satisfação do valor estacionário teórico, substituindo os parâmetros seguintes na relação (4h).

J=0,5 b=0,5 dt=0,001 Tc=0

Kp=1 A=500 Rotação final = 333,33

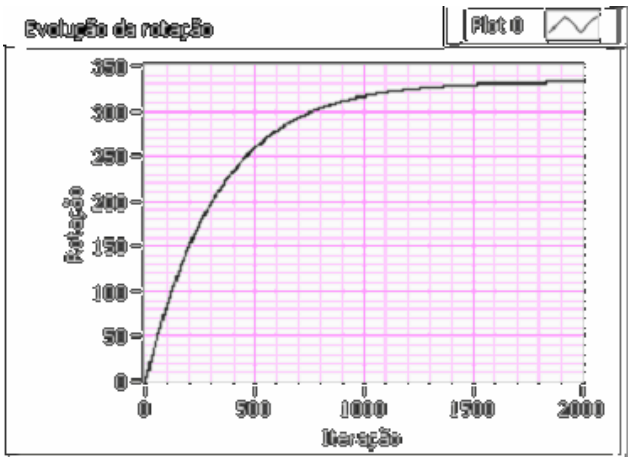

Figura 7A: maior constante de tempo, resposta mais lenta

<u>Nota</u> : salvo observação em contrário, todas as simulações daqui em diante apresentarão

J=1,7 b=5 Tc=50 dt=0,001

Kp=10 A=1000 Rotação final = 663,33

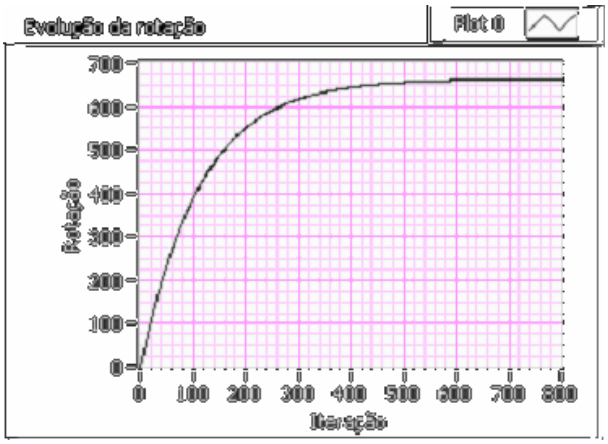

Figura 7B: menor constante de tempo, resposta mais rápida

Note a influência da constante de tempo, que é dada por $T = \dfrac{J}{b + K_P}$. Quanto maior ***Kp*** menor será ***T***, o que leva a uma resposta mais rápida.

Na curva anterior, o sistema estabiliza aproximadamente na iteração 600, enquanto na seguinte isso ocorre na iteração 100.

Observa-se também o erro de regime, que é menor na situação de ***Kp=100***, como é de se esperar de acordo com (4h).

Kp=100 ***A=1000*** ***Rotação final = 951,90***

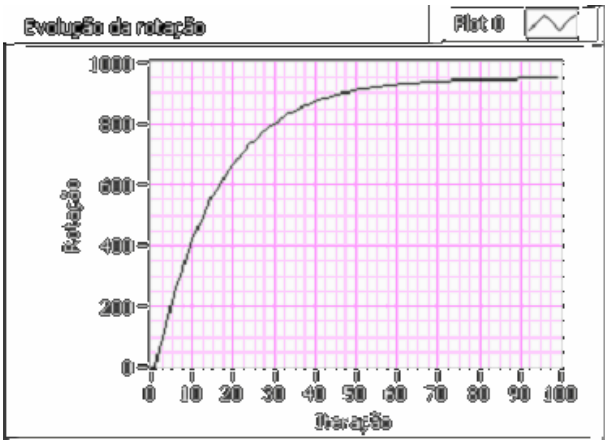

Figura 8: Maior Kp, menor erro de regime

4.4.1.1 Influência do intervalo de tempo de cada passo de iteração (*dt*)

Dos parâmetros acima, apenas ***dt*** foi alterado de ***0,001*** para ***0,01***. Isso acelerou a resposta, pois a aceleração foi multiplicada por um intervalo de tempo ***10*** vezes maior, causando maiores incrementos de velocidade a cada iteração.

Esta observação aplica-se qualitativamente (sem o valor exemplificado) a todas as simulações (não apenas às deste item 4.4.1), ou seja, quanto menor o valor de ***dt***, mais iterações são necessárias para estabilizar o processo, o que é coerente com o tempo físico, já que para um determinado valor deste último correspondem mais iterações num ***dt*** menor.

Além disso quanto menor o valor de ***dt*** mais exato é o sistema físico, já que o mundo real descrito pela equação (1) é contínuo enquanto que os algoritmos são discretos.

Já o valor de regime permanece o mesmo, pois este depende somente da igualdade entre torque de atuação e o torque de carga mais atrito; ***dt*** influencia apenas na aceleração.

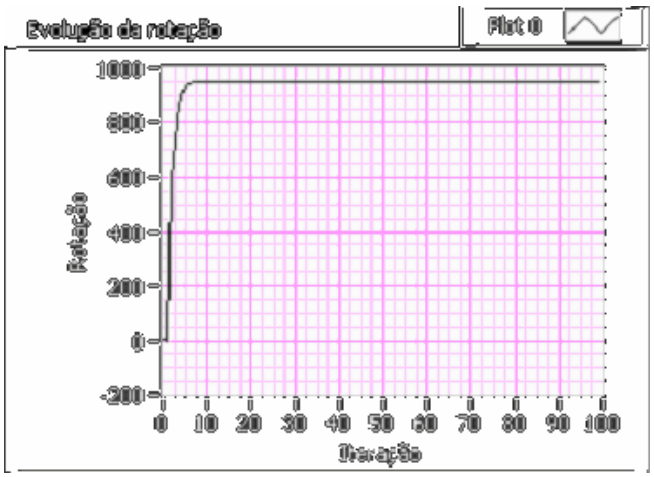

Figura 9: Maior dt, menos iterações

4.4.2 Simulações para o caso de controle proporcional + integral

4.4.2.1 Simulações para sistemas super, sub e criticamente amortecidos

Da mesma forma que para os casos de 1ª ordem (***Kp=0***), aqui inicialmente serão simuladas dinâmicas sem os acessórios.

Kp=10 ***Ki=1*** ***A=1000*** ***Rotação final = 1000***

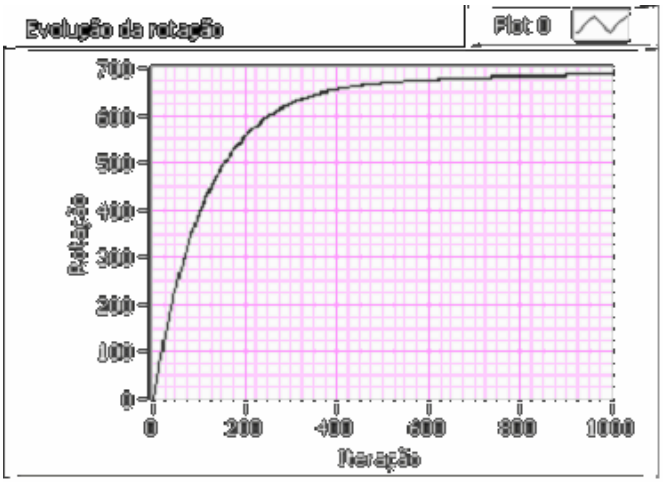

Figura 10: Sistema super amortecido

Kp=10 Ki=100 A=1000 Rotação final = 1000

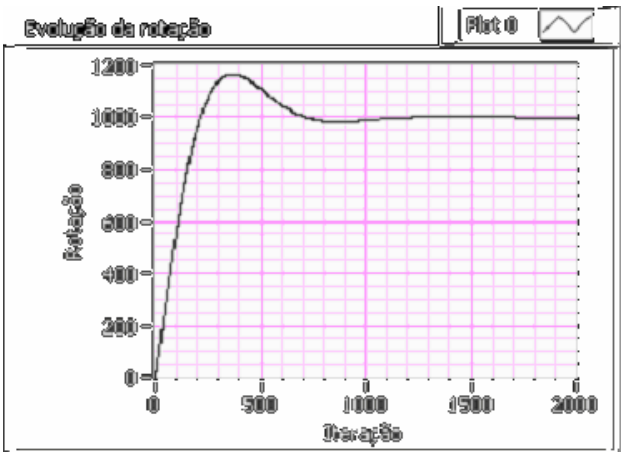

Figura 11: Sistema sub amortecido

Observa-se que para ***Ki=1***, a resposta é super amortecida, ao passo que para ***Ki=100***, é sub amortecida.

Tomemos o valor teórico de ***Ki*** associado ao amortecimento crítico, tendo sido fixado ***Kp=10*** juntamente com os demais parâmetros anteriores.

De acordo com a relação **(B)**, substituindo $\zeta = 1$, obtém-se

$$2 \cdot \omega_n = \frac{5+10}{1,7} \Rightarrow \omega_n = 4,412$$

Substituindo o valor encontrado em **(A)**, obtém-se ***Ki=33,088***. Simulando este valor para ***A = 1000***, obtém-se a curva abaixo. Na iteração ***800***, obteve-se ***Rotação=1005***, sendo a esperada até ***1000***, visto que o amortecimento crítico é o limite da existência do sobre sinal.

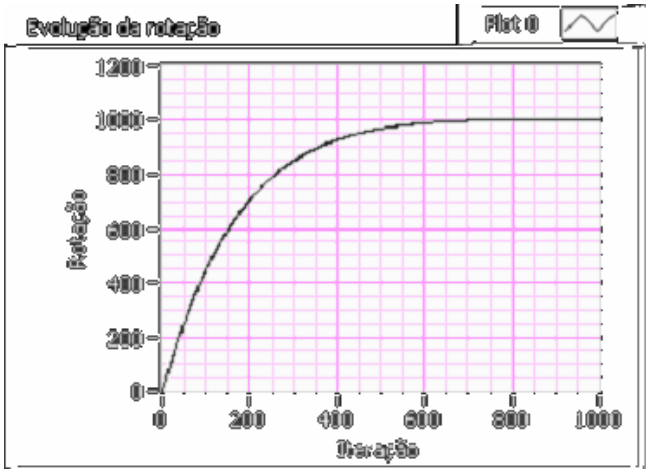

Figura 12: Sistema criticamente amortecido

4.4.2.2 Simulações entre diferentes parâmetros de resposta para sistemas sub amortecidos

Kp=10 Ki=100 A=1000

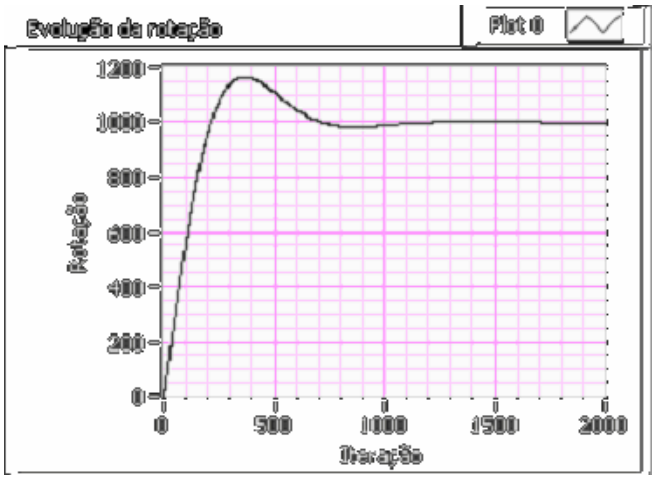

Figura 13: menor Kp, sistema menos amortecido

Kp=10 Ki=1000 A=1000

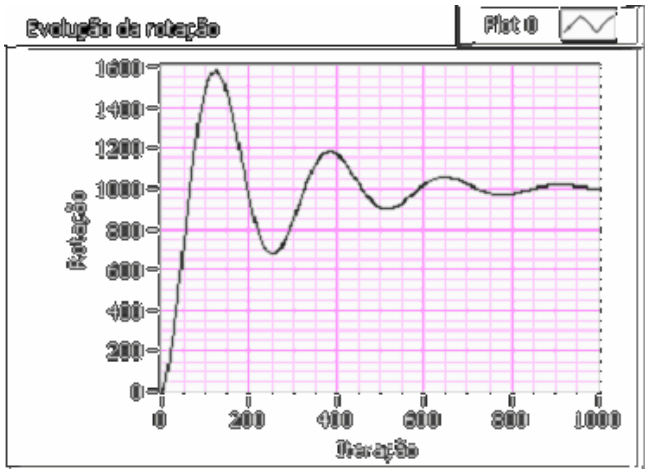

Figura 14: Elevado Ki, sistema pouco amortecido e muito oscilatório

Kp=20 Ki=100 A=1000

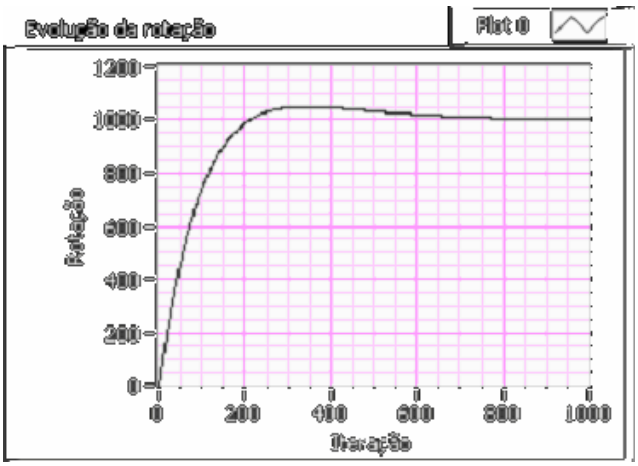

Figura 15: Maior Kp, sistema mais amortecido

Das 3 curvas anteriores conclui-se sobre os parâmetros de resposta 2ª ordem:

1. O sobre-sinal atinge aproximadamente valor ***600*** para ***Ki*** mais elevado e apenas ***160*** para ***Ki*** menor.
2. O sobre-sinal atinge aproximadamente valor ***50*** para ***Kp*** mais elevado e apenas ***160*** para ***Kp*** menor.
3. O tempo de subida, quando ***Ki*** aumenta, diminui de aproximadamente ***200*** para ***70***. Para a situação de ***Kp*** maior, esse tempo é praticamente o mesmo que para ***Kp*** menor, sendo que a previsão era para ser um pouco mais.
4. O aumento de ***Ki*** provoca o aumento da freqüência de oscilação amortecida.
5. A primeira curva possui tempo de estabilização um pouco maior que a terceira, devido ao menor valor de ***Kp***, enquanto ***Ki*** pouco influencia.

4.4.2.3 Influência de *dt*

O valor de ***dt*** é importante para o tempo de resposta, e com isso para os tempos de subida, pico e estabilização.

Na figura seguinte, o crescimento de ***dt*** de ***0,001*** para ***0,01*** reduziu o tempo de pico de ***350*** para ***35***.

Kp=10 Ki=100 A=1000 dt=0,01

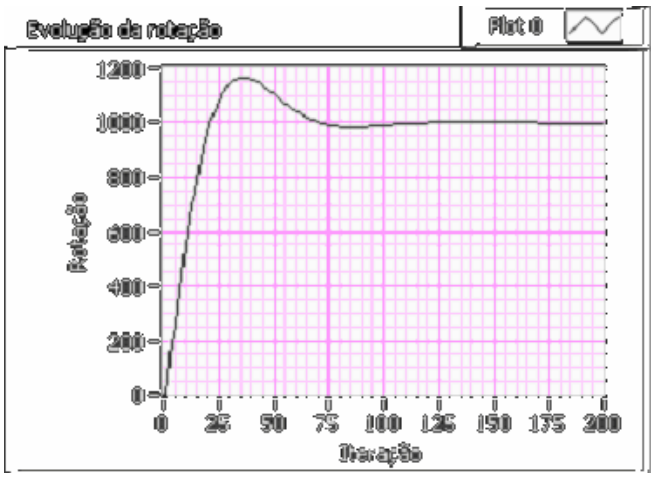

Figura 16: Maior ***dt***, menos iterações

A partir deste ponto serão descritos os programas temas deste trabalho, que utilizam o controle PI, porém modificado com as estratégias que tentam promover taxas de elevação da rotação sem muita variação com a amplitude do valor final desejado.

5 Descrição do programa de controle gradual

O programa foi dividido didaticamente em 4 partes. Para facilitar seu reconhecimento as mesmas foram identificadas com cores no diagrama de blocos do Labview, a saber:

1. modelagem da dinâmica do motor, descrita pela relação (1) - **azul**;
2. controle PI e controle como um todo - **verde**;
3. atualização das referências transitórias - **roxo**;
4. sistema de segurança contra temperaturas, potência e rotação elevadas - **beje**.

5.1 Parte 1

A figura abaixo retirou do programa o trecho que executa numericamente a equação (1). Após a última divisão tem-se a aceleração rotativa. Até este ponto, tomando os valores anteriores como exatos, não há qualquer aproximação. O processo deixa de ser exato a partir da multiplicação por ***dt***, que em teoria é infinitesimal.

O resultado deste produto é a variação da velocidade de rotação neste intervalo de tempo ***dt***, que somada à rotação anterior fornece a nova rotação.

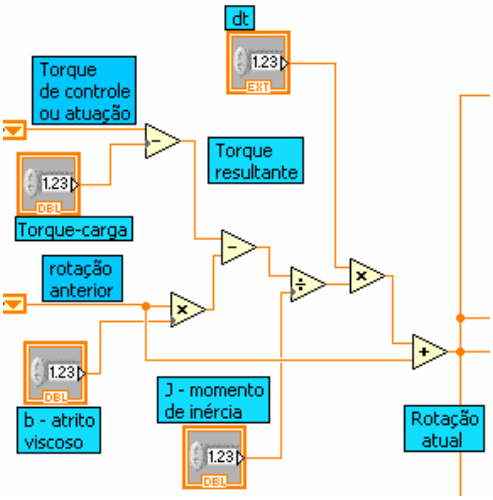

Figura 17: Modelagem da dinâmica do motor no Labview

5.2 Parte 2

É constituída basicamente pelo controle PI, tendo mais alguns acessórios como a ***limitação de erro negativo***, descrito no item de mesmo nome.

É importante ficar claro que a saída do controle PI é o torque que deve atuar numa determinada rotação. Como o controle físico é pela quantidade de combustível injetado, portanto tendo dimensão de potência, aquela saída deve ser multiplicada pela rotação, tornando o sistema não linear.

Como a dinâmica representada na figura anterior é de um balanço de torques, a potência de atuação deve ser re convertida em torque (***torque equivalente de atuação***), dividindo-a pela rotação. Isso faz com que a consideração da rotação seja indiferente para o resultado e o sistema volte a ser linear, já que o torque de atuação foi multiplicado e dividido pela mesma rotação. Mas essa divisão da potência de atuação pela rotação é apenas devida à modelagem do motor, não fazendo parte do controle e sim da ***parte 1***, tanto que está em azul.

No sistema físico real essa divisão no algoritmo deixa de existir, pois é o motor que a executa fisicamente, quando para uma potência de entrada ele gera o torque de atuação correspondente à rotação momentânea. Apenas a multiplicação faz parte do controle. Estas palavras ficam traduzidas na linguagem de blocos da seguinte forma:

5.3 Parte 3

A atualização das referências transitórias é o diferencial deste algoritmo em relação ao controle PI simples, pois permite a elevação gradual da rotação.

O programa desenvolvido permite a geração de valores de referência intermediários ou transitórios de rotação, para que o erro, diferença entre a referência transitória e a rotação momentânea, não adquira valores elevados, o que resultaria em ações de controle de grande magnitude, torques elevados, que não condizem com a realidade física do motor. A geração de tais torques corresponderia a potências associadas a uma intensa combustão, que comprometeria

as palhetas da turbina. e a transitórios bruscos que violariam os limites do transiente do compressor, explicados no início.

Como neste algoritmo o valor de referência transitório é determinado pelo controle, que vai atualizando o mesmo, o diagrama de blocos da figura 3 fica melhor representado com uma realimentação do bloco de controle para a entrada de referência. A palavra controle está representando todo o algoritmo e não apenas o processamento PI, que é uma parte do controle, e não tem a função de atualização da referência intermediária.

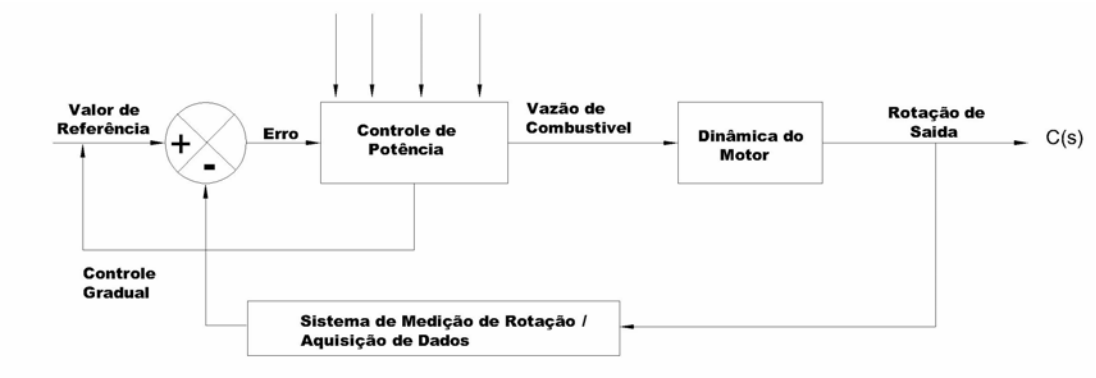

Figura 18: Diagrama de blocos do controle gradual

5.3.1 Mecanismo de elevação gradual da rotação de referência

A essência deste processo está na estrutura ***CASE*** seguinte, hachurada em cinza.

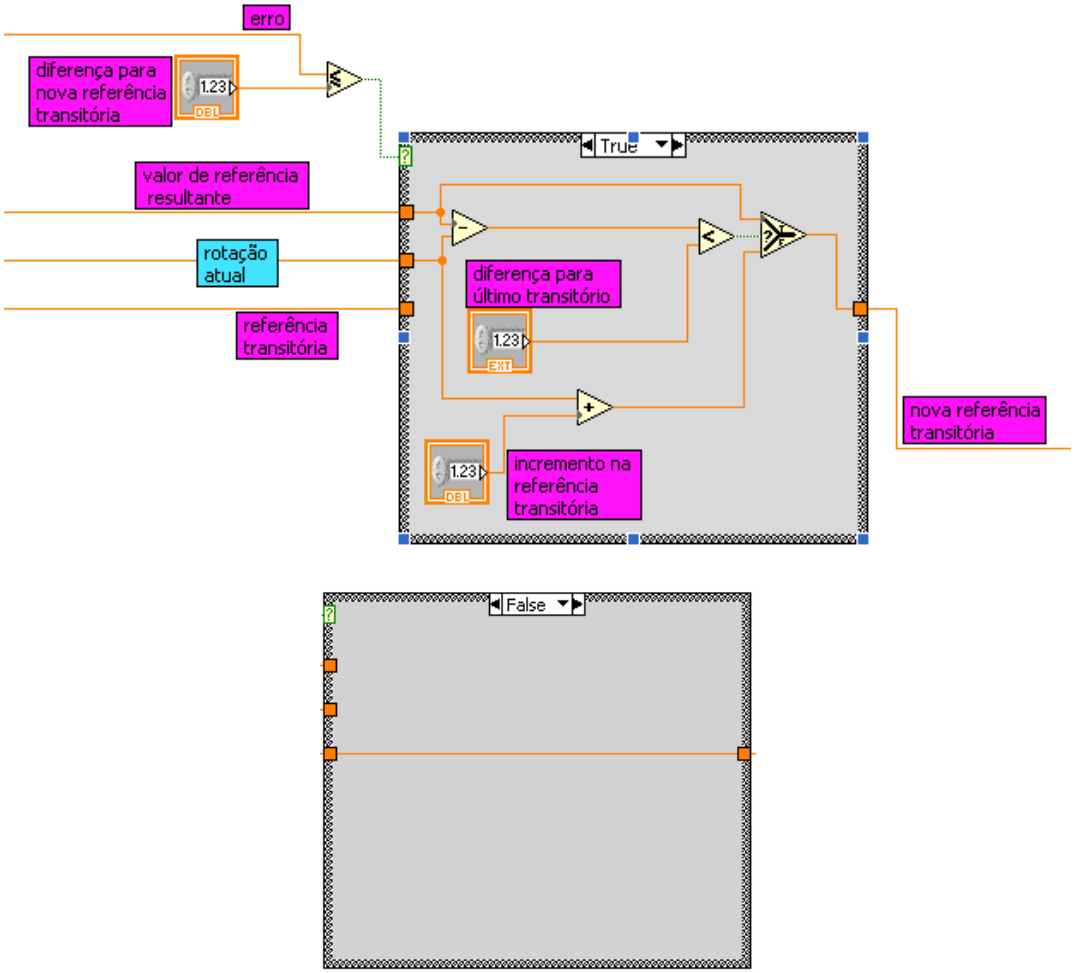

Figura 19: Algoritmo de atualização das referências transitórias

Esta é acionada quando o erro for menor ou igual que ***diferença para nova referência transitória***, caso TRUE. Essa condição foi criada para que, atingida uma proximidade suficiente do valor de rotação transitório atual, representada pelo parâmetro mencionado, houvesse a indicação de que já é o momento de ser atualizado o valor do mesmo, fazendo com que o sistema acione o ***CASE*** para incrementar o próximo valor.

A referência transitória não é um valor que deva ser necessariamente atingido antes da atualização, sendo principalmente uma base para a medida do erro sobre o qual será calculado o sinal de atuação que elevará a rotação.

5.3.1.1 Algoritmo do controle gradual

Dentro da estrutura CASE existem 2 controles:

- ***diferença para último transitório*** – se a diferença entre o valor de referência resultante e a rotação atual (no momento em que a condição TRUE é satisfeita) for menor que um determinado valor significa que já se está próximo do valor final, que não é mais necessário criar mais outro transitório antes do valor final.
- ***incremento na referência transitória*** – é o valor a ser adicionado à rotação atual para gerar o próximo transitório. Quanto menor o incremento mais suave é o processo.

Inicialmente é avaliada a diferença entre a rotação final desejada (***valor de referência resultante***) e a atual ou inicial. No caso de essa diferença não ser menor que um determinado valor (***diferença para último transitório***), isso significa que a rotação atual ainda está muito aquém da rotação final desejada, não sendo adequado colocar esta como referência diretamente, ou seja, ainda é necessária a existência de referências intermediárias para a geração de ações de controle suaves.

A chave seletora seleciona então a opção que incrementa um determinado valor à rotação atual (***incremento na referência transitória***), passando esse resultado a ser a nova referência intermediária.

A magnitude do incremento influi no número de passos de controle (quantidade de referências intermediárias geradas até a referência final) até ser atingida a faixa próxima à rotação desejada final, quando tem-se o último transitório que é o próprio ***valor de referência resultante***.

A proximidade suficiente para acionamento do CASE mencionada no início do item 5.3.1 não deve ser tão pequena, pois isso causaria muita lentidão, especialmente em sistemas super amortecidos, nos quais, à medida que se aproxima do valor de referência transitório, a taxa de crescimento fica muito baixa. Nos sistemas sub amortecidos, diferenças pequenas são facilmente obtidas, tendo em vista que com o sobre-sinal, as mesmas ficam até negativas. Com isso o valor do parâmetro ***diferença para nova referência transitória*** torna-se pouco influente na dinâmica do processo.

O parágrafo anterior está ilustrado nas duas próximas figuras, referentes ao caso super amortecido. Na 1ª figura a rotação passa muito tempo em cada passo de controle até iniciar uma nova dinâmica com outra referência transitória.

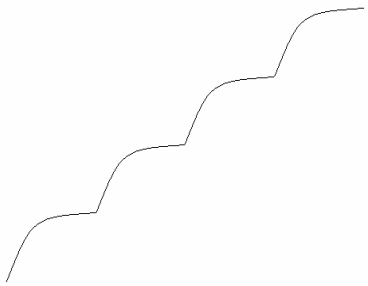

Figura 20A: Pequeno valor do parâmetro ***diferença para nova referência transitória***

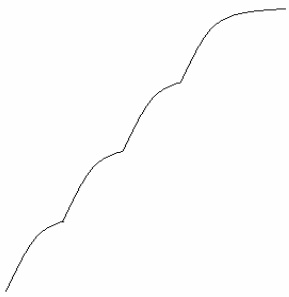

Figura 20B: Valor superior do parâmetro ***diferença para nova referência transitória***

5.3.2 Simulações

Obs: Em todas as dinâmicas deste item, os parâmetros acessórios (parte 4), relativos às condições de alerta e condições limites de potência e rotação foram ajustados de forma a não influenciarem nestas simulações, para que fossem avaliados apenas os parâmetros de interesse da parte 3, que controlam a elevação gradual da rotação.

Para isso, basta tomar as 3 temperaturas de alerta, a máxima potência de atuação e o limite de rotação com valores bastante elevados, de forma que não sejam alcançados. É uma observação

equivalente àquela que foi feita quando da simulação do controle PI puro, só que sem os mecanismos de controle gradual e variação de parâmetros.

Nas simulações deste item, quando aparecer a informação de apenas um parâmetro, é porque os demais permaneceram com o mesmo valor a fim de que fosse avaliada a influência de apenas um.

5.3.2.1 Influência do parâmetro diferença para nova referência transitória

<u>Caso super amortecido</u>

Kp=10 Ki=10 A=500
incremento na referência transitória = 100
diferença para último transitório = 100

diferença para nova referência transitória = 5

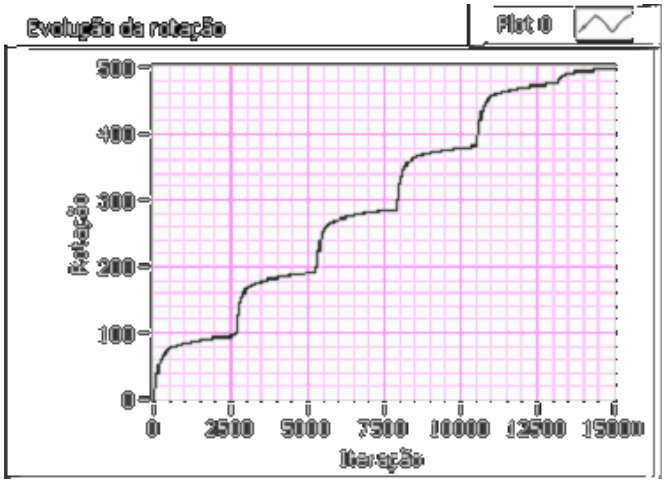

Figura 21A: Menor valor para o parâmetro ***diferença para nova referência transitória***

diferença para nova referência transitória = 30

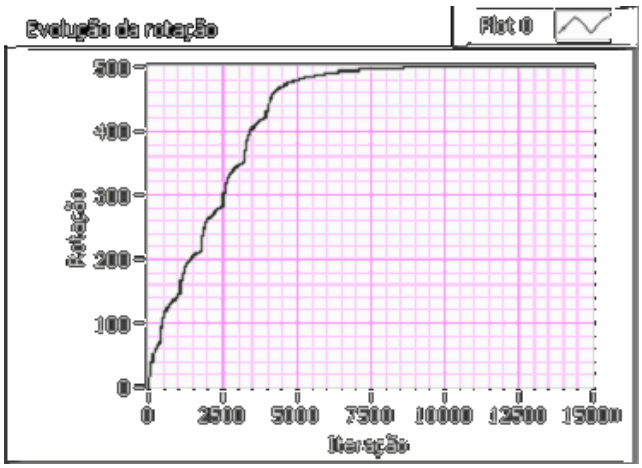

Figura 21B: Maior valor para o parâmetro ***diferença para nova referência transitória***

Observa-se uma elevação mais lenta da rotação quando a diferença mencionada é menor.

<u>Caso sub amortecido</u>

Kp=10 Ki=100 A=500

incremento na referência transitória = 100

diferença para último transitório = 100

diferença para nova referência transitória = 5

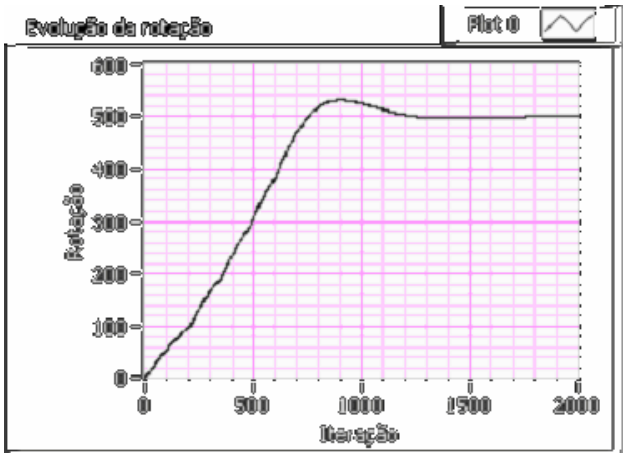

Figura 22A: Menor valor para o parâmetro ***diferença para nova referência transitória***

diferença para nova referência transitória = 30

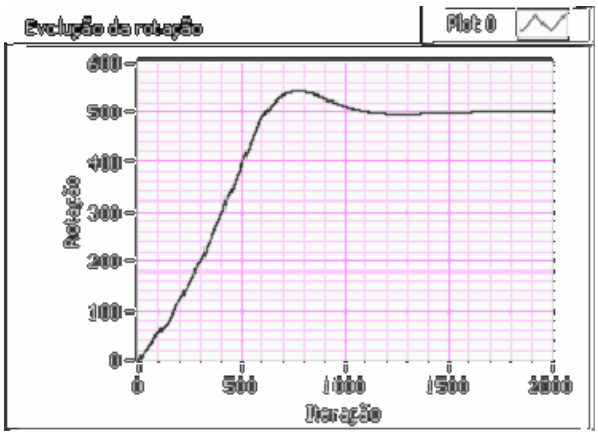

Figura 22B: Maior valor para o parâmetro ***diferença para nova referência transitória***

Observa-se pouca influência na velocidade de evolução da rotação, como é esperado para o caso sub amortecido.

5.3.2.2 Influência do parâmetro incremento na referência transitória

<u>Caso super amortecido</u>

Kp=10 Ki=10 A=500

diferença para nova referência transitória = 30

diferença para último transitório = 100

incremento na referência transitória = 50

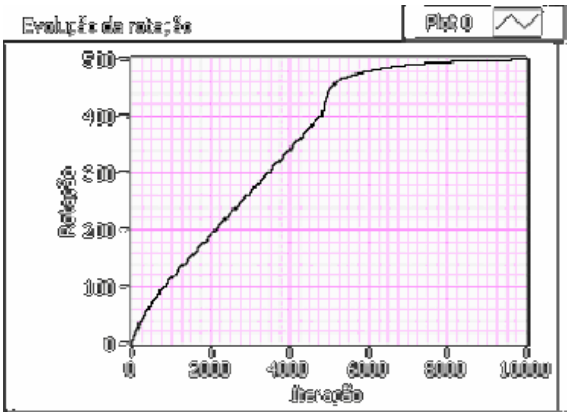

Figura 23A: Menor valor para o parâmetro ***incremento na referência transitória***

incremento na referência transitória = 100

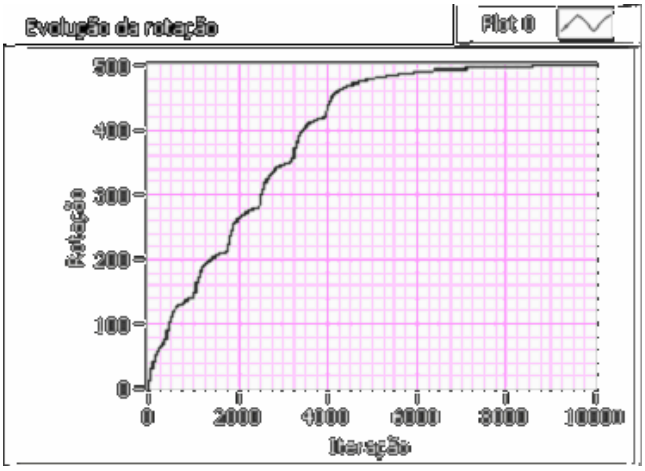

Figura 23B: Maior valor para o parâmetro ***incremento na referência transitória***

O sistema atinge mais rapidamente a faixa próxima ao valor de referência quando o incremento é maior.

<u>Caso sub amortecido</u>

Kp=10 Ki=100 A=500

diferença para nova referência transitória = 30

diferença para último transitório = 100

incremento na referência transitória = 50

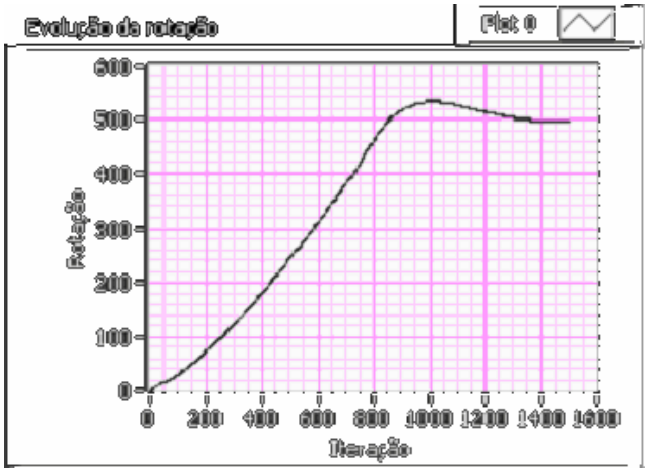

Figura 24A: Menor valor para o parâmetro ***incremento na referência transitória***

incremento na referência transitória = 100

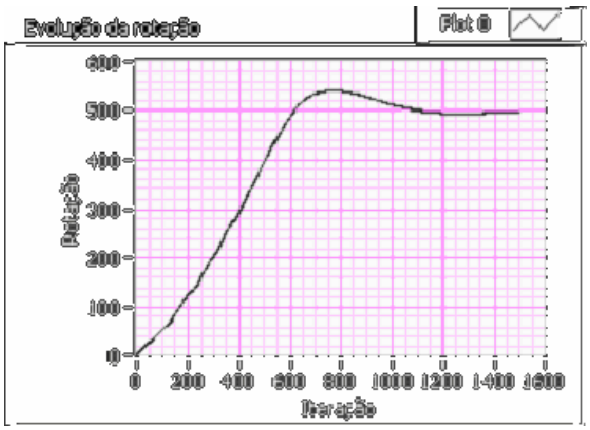

Figura 24B: Maior valor para o parâmetro ***incremento na referência transitória***

No caso sub amortecido, quando ***incremento = 100***, os tempos de subida e pico são inferiores à situação de menor incremento (***50***).

Em ambos os casos, um incremento superior resulta em atuação mais pronunciada, já que o erro médio ao longo da subida da rotação é maior, causando maior ação proporcional e integral. O erro médio maior deve-se ao fato de este ser obtido de uma diferença da rotação momentânea com referências transitórias maiores, especialmente quando há a mudança deste valor, em que o salto é grande.para grandes incrementos.

5.4 Parte 4

No programa, a geração da temperatura é realizada, indexando-a à própria iteração da estrutura FOR LOOP.

No caso real, haverá uma rotina de aquisição dos dados provenientes de termopares.

Existem 3 temperaturas de alerta:

1. A primeira ainda não representa um ponto crítico, bastando apenas reduzir o valor de referência final para se precaver de um risco maior de sobre temperatura. É uma atitude antecipatória. Não é uma limitação direta no sinal de saída.
2. A segunda temperatura já representa a iminência de uma condição de nocividade às propriedades dos materiais das partes quentes, devendo ser reduzida imediatamente o

combustível injetado até um valor de menor potência que permita quebrar o aumento e até iniciar um resfriamento.

3. A terceira temperatura representa perigo imediato à integridade das partes quentes, tornando uma redução da potência insuficiente para reverter o aquecimento e com isso fazendo necessário o corte do combustível.

Deve-se notar que as ações de limitação são reversíveis, cessando quando a temperatura sai do(s) nível(s) de alerta. Na realidade física, isso não ocorre com a 3ª temperatura. Sendo atingida, a chave seletora não deveria retornar à condição TRUE assim que a temperatura baixasse deste valor, ou seja, o sistema não volta a injetar combustível assim que a temperatura cai novamente. É uma atuação definitiva, que só seria anulada com a reiniciação do programa e nova partida do motor. Mas como não está sendo tratado o sistema físico real, com a aquisição de dados e atuação em um servo mecanismo que controla o fluxo de combustível, a situação é válida para testar o restante da lógica de controle.

Outro componente do sistema de segurança é a limitação no fluxo na injeção de combustível, representada pelo parâmetro ***potência da máxima abertura de combustível***, mesmo que as temperaturas estejam satisfatórias, caso o processamento do controle PI determine uma forte atuação. Isto existe para evitar problemas na injeção e na pulverização do combustível na câmara de combustão A rigor esse limite depende das condições de rotação e vazão de ar, mas está sendo inserido como um valor constante.

O terceiro dispositivo de segurança é contra sobre rotação, representado por ***máxima rotação permitida***. Este é um valor razoavelmente acima de um sobre sinal normal de sistemas sub amortecidos e está associado a um descontrole ou perda de funcionamento do processamento PI. Foi colocado dentro do mesmo LOOP para entendimento de sua lógica.

Na realidade deve ser um dispositivo atuando à parte do controle PI, pois caso falhe a comunicação de dados com o programa principal, existe um controle independente que pode atuar. A mesma consideração deve ser feita para a 3ª temperatura de alerta. Ambas são decisões extremas, que não podem falhar.

No item 7 serão explicados os algoritmos relativos a estes acessórios junto com as simulações relativas a cada um deles.

6 Descrição do programa de controle por variação de parâmetros

O relatório contém com muito mais detalhes a descrição do programa anterior. O ***controle por variação de parâmetros*** possui uma estrutura mais simples, embora seu funcionamento seja menos satisfatório. Além disso muitos dispositivos como alertas de temperatura, controle de erro negativo, máxima abertura de combustível, estão presentes em ambos algoritmos, sendo explicados apenas no primeiro. Também a modelagem dinâmica do motor e o algoritmo PI são os mesmos. Posto isso, a diferença estrutural principal em relação ao controle gradual está na ***parte 3*** deste último, que inexiste no ***controle por variação de parâmetros***.

Outra diferença em sua estrutura em relação à anterior reside essencialmente na utilização de uma outra rotina dentro da principal de nome ***Parâmetros de controle.vi*** , no ambiente Labview conhecida como ***sub vi***, que fornece como saída os valores dos parâmetros ***Kp*** e ***Ki*** a partir da entrada do valor do erro.

Esta rotina utiliza uma estrutura CASE não mais com apenas as opções de entrada ***falso / verdadeiro***, mas números inteiros de 1 a 14 associados a cada faixa de erro, que por sua vez está associada a um par de valores de ***Kp*** e ***Ki***.

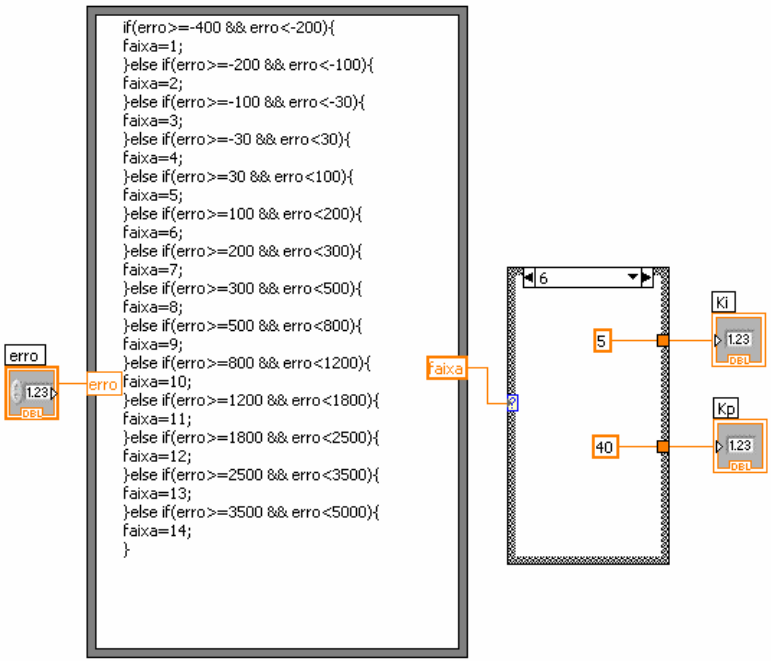

Figura 25: Escalonamento dos parâmetros do controle PI no Labview

O erro processado pela rotina principal é a entrada da sub rotina, que gera como saída os parâmetros mencionados.

A variação da variação dos parâmetros de controle é uma outra maneira de conseguir a elevação suave da rotação para diversas amplitudes do valor final desejado, tendo em vista a não utilização do controle gradual, caracterizado pelas referências transitórias.

Como foi visto na análise teórica, os tempos característicos (tempo de pico, tempo de subida, tempo de estabilização) independem da amplitude do valor desejado, supondo ***Kp*** e ***Ki*** constantes ao longo de toda a dinâmica de controle.

Da mesma maneira que a rotação gradual, a variação de parâmetros busca promover uma elevação suave para rotações mais elevadas.

No controle gradual, não se chegava a ter saídas de atuação elevadas, pois o erro era medido entre a rotação momentânea e as referências transitórias.

Sem o controle gradual, quando se buscam grandes valores finais, o erro inicial é elevado, principalmente com o motor partindo do repouso. Nesse início a ação de controle é toda proporcional, sendo esta atuação predominante durante boa parte da subida. A participação do controle integral aumenta à medida que o erro é integrado ao longo do tempo. No entanto quando a subida é muito brusca, o tempo até o alcance da faixa próxima ao valor desejado é pequeno, levando a um valor menor da integral do erro.

Na figura abaixo temos um ***Kp*** relativamente elevado, sendo observada uma rápida subida até valores próximos à faixa de referência. Entretanto para se atingir o valor desejado leva-se mais tempo, porque o erro integrado é menor em virtude da rápida subida da rotação.

Kp=10 Ki=10 A=3000

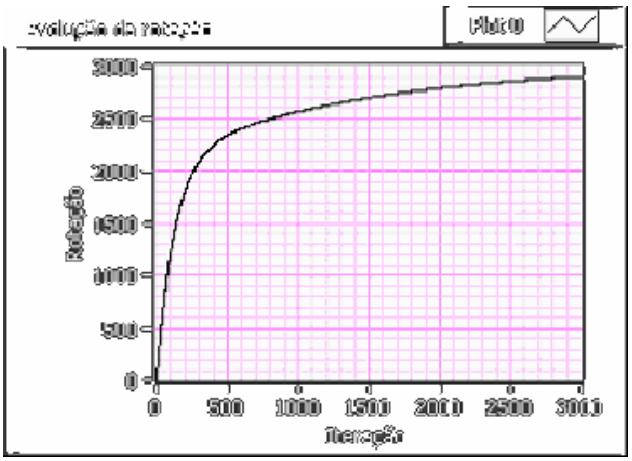

Figura 26: Preponderância do controle proporcional na elevação inicial da rotação

Assim a ação integral passa a ter uma importância maior numa região mais próxima ao valor desejado final, para anular o erro de regime do controle proporcional puro. Nessa faixa, a ação proporcional é fraca devido ao pequeno erro, causando maior demora no alcance do valor de referência.

Utilizando apenas a ação integral (***Kp = 0***) para ***A=3000***, verifica-se que a subida inicial é mais suave, embora ainda indesejável na prática, comprovando a grande contribuição da ação proporcional na subida inicial. Basta comparar os tempos para se atingir a ***rotação = 2000***. Já o tempo de subida (até a primeira passagem pelo valor de referência) é menor, pois como a subida inicial foi mais lenta, acumulou-se maior integral do erro, fazendo com que o sistema, quando se atinge a faixa próxima à referência, possua ação integral suficiente para atingir o valor desejado, mesmo com a fraca ação proporcional, além de causar sobre sinal.

Kp = 0 Ki=10 A=3000

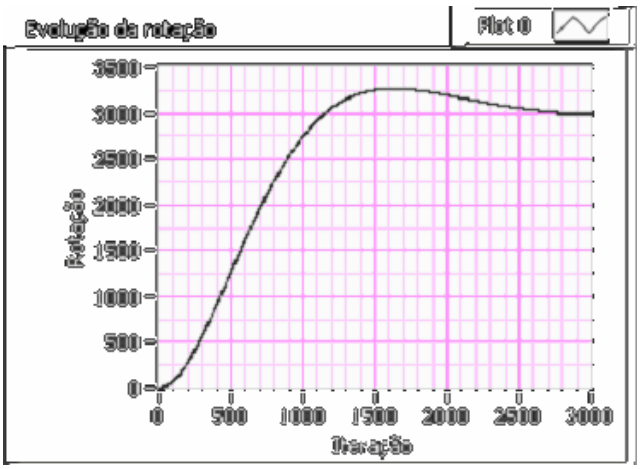

Figura 27: Menor ação proporcional, maior acúmulo de erro, que causa sobre sinal

Mesmo utilizando o controle integral apenas, ocorre o fenômeno da manutenção dos tempos característicos independentes da amplitude final. Na figura anterior, a subida realmente é mais suave quando comparada à situação com a presença de ***Kp=10***, mas é brusca se comparada à dinâmica seguinte, onde o valor desejado é ***10 vezes*** menor e os tempos são praticamente os mesmos.

Kp = 0 Ki=10 A=300

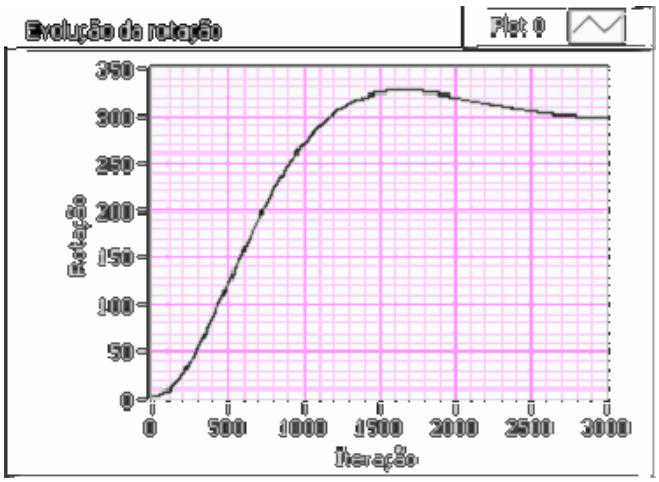

Figura 28: Manutenção dos tempos característicos independentes da amplitude final

Diante das explicações precedentes, faz-se necessário um escalonamento dos parâmetros de controle, para evitar que a mesma constante seja aplicada a erros grandes e pequenos produzindo torques de atuação excessivamente elevados ou atenuados.

Essa última situação ocorre quando para se evitar acelerações bruscas no início, para uma determinada referência final maior, utilizam-se parâmetros de pequena magnitude, que para referências menores tornam a resposta muito lenta.

Isso pode ser ilustrado pelas figuras anteriores. Supondo que para ***A=3000*** o comportamento de evolução da rotação seja o mais adequado, para o caso ***A=300*** seria um processo inconveniente devido à demora para se atingir a referência final. Da mesma forma, supondo para ***A=300*** um processo satisfatório, para ***A=3000*** seria excessivamente brusco.

Por isso deve-se buscar uma solução de compromisso entre acelerações suaves sem excessiva demora, para toda a faixa de trabalho do motor.

Analisando o fenômeno da subida inicial brusca, é proposta uma gradação decrescente de ***Kp***, isto é, pequenos valores para grandes erros e vice-versa.

Vejamos um exemplo que adota tal escalonamento para ***Kp***, deixando ***Ki*** constante para ser analisada apenas a influência da ação proporcional.

Os valores dos parâmetros são:

Ki=5 para toda a faixa

Kp possui a seguinte seqüência da faixa ***1*** a ***14*** respectivamente : ***30*** ; ***40*** ; ***60*** ; ***60*** ; ***60*** ***40*** ; ***30*** ; ***20*** ; ***15*** ; ***10*** ; ***7*** ; ***4*** ; ***2*** ; ***1***

A=3000

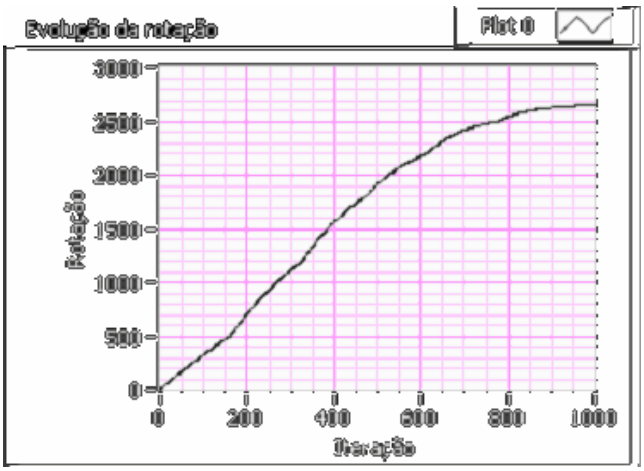

Figura 29A: Evolução da rotação com escalonamento dos valores de Kp – grande amplitude

A=1000

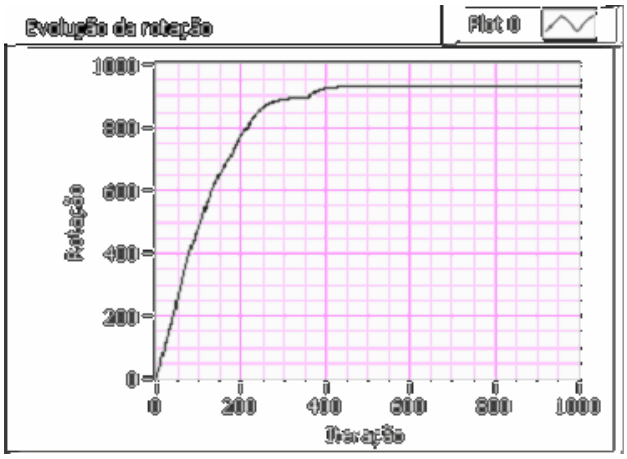

Figura 29B: Evolução da rotação com escalonamento dos valores de Kp – pequena amplitude

Analisando as curvas, a gradação foi razoavelmente eficaz em grande trecho da subida no intuito de suavizar o crescimento. Agora, para se alcançarem rotações mais elevadas, leva-se mais tempo. Além disso, os tempos para mesmas rotações nos dois casos são próximos.

Para ***A=3000***, leva-se em torno de ***200 iterações*** para se atingir ***rotação = 750***, enquanto que para ***A=1000***, gasta-se aproximadamente ***190 iterações*** para se atingir a mesma rotação.

Observa-se que após a subida inicial, o sistema passa a apresentar uma evolução muito lenta rumo ao valor final. Para melhorar este aspecto pode-se utilizar um valor maior de ***Ki***.

Utilizando **Ki=100**, a dinâmica passa a apresentar um razoável sobre sinal.

A=3000

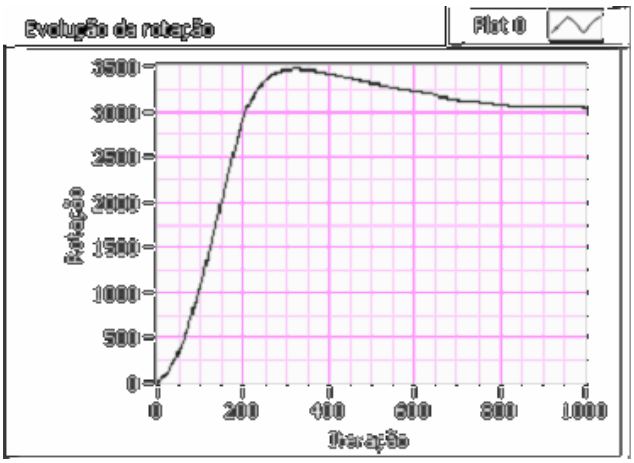

Figura 30A: Utilização de maior Ki para os mesmos valores de Kp

Utilizando **Ki=40**, a dinâmica passa a apresentar um pequeno sobre sinal.

A=3000

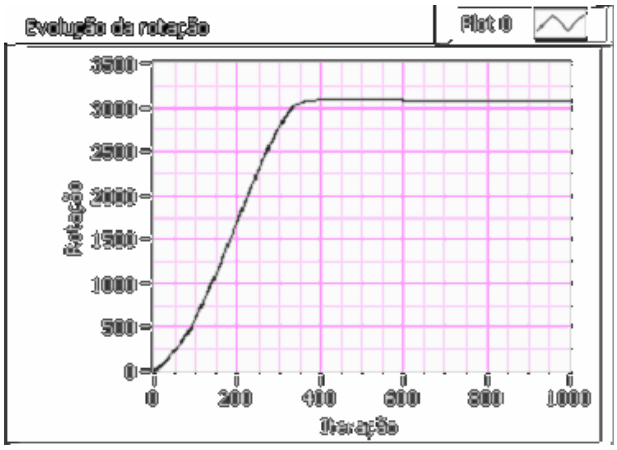

Figura 30B: Utilização de Ki intermediário para os mesmos valores de Kp

A desvantagem é a subida mais brusca em relação à situação com ***Ki=5***. Parte da suavização conseguida foi anulada. Por exemplo, comparemos as rotações associadas à ***iteração 200*** nas figuras 29A, 30A e 30B. Verifica-se que na situação de ***Ki*** mais elevado, o tempo é muito menor.

Após muitas tentativas não mostradas, encontrou-se muita dificuldade para conciliar

1) a mesma taxa de subida para diversas amplitudes finais com

2) um tempo satisfatório de alcance do valor final sem ficar sob uma evolução muito lenta na região próxima do mesmo, fenômeno que ocorreu quando o sistema é superamortecido, menor ***Ki***.

Isso é ilustrado analisando mais iterações da figura 29A, em que todos os parâmetros foram mantidos.

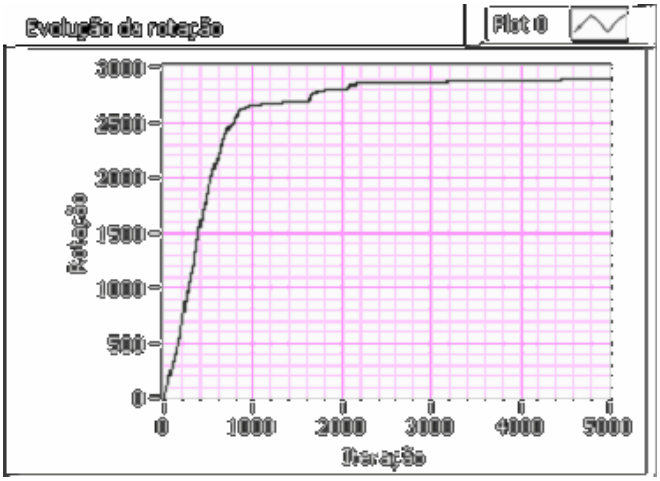

Figura 31: Continuação da dinâmica da figura 29A

7 Acessórios

7.1 Mecanismo de bloqueio do erro negativo

Sua finalidade é evitar que o processamento de uma atuação negativa, proveniente do controle PI, se concretize na saída, pois no sistema físico real isso corresponderia a uma ação de um torque de frenagem, que não faz parte do sistema. O mínimo torque é o ***nulo***, correspondente ao corte de combustível.

Como o modelo teórico de controle não enxerga tal fato, faz-se necessário uma chave seletora para a situação de um erro negativo de módulo acima de determinado valor.

Esse valor mínimo foi colocado porque um erro negativo de pequena magnitude é natural na situação de sobre-sinal. Nesse caso, a ação proporcional negativa é compensada com folga pela ação integral positiva acumulada até a superação do valor de referência.

Existem outras situações em que isso pode não ocorrer, associadas a quedas instantâneas do valor de referência, por exemplo quando da ocorrência de temperaturas críticas.

Nesse caso, a ação proporcional é muito negativa, além da ação integral negativa acumulada a partir da mudança da referência. A composição de ambas pode superar a saída positiva de até então, produzindo uma atuação teórica negativa.

O mecanismo também pode ser utilizado para promover uma desaceleração mais lenta, pois uma intensa diminuição no valor desejado não será processada inicialmente pelo controle PI, sendo realizada por uma potência maior, a ***potência para erro negativo***.

7.1.1 Simulações

As simulações desse item não possuem controle gradual, para que seja analisada somente a influência do erro negativo.

Para se gerar tal erro foi utilizado o fator temperatura, sendo atingida a 1ª temperatura de alerta.

Kp=10 Ki=100 A=2000

1ª temperatura de alerta =2500

fator de redução da rotação final = 0,7

limite para erro negativo = - 4000

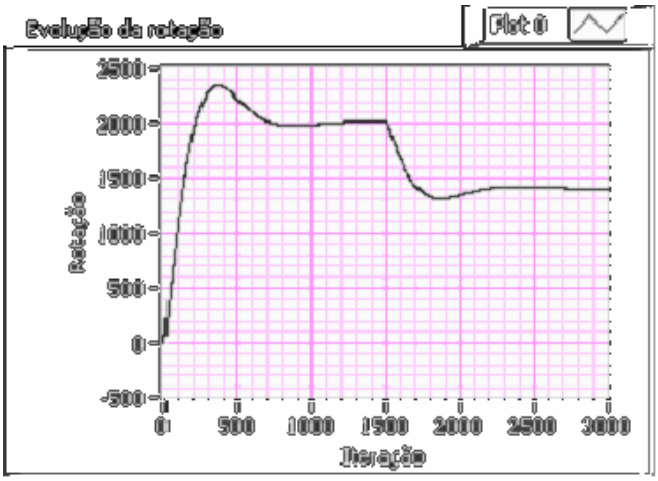

Figura 32A: Dinâmica sem a interferência do ***bloqueio de erro negativo***

Esta simulação adotou um valor para ***limite para erro negativo = - 4000***, de maneira que não foi gerada a situação de incidência nele.

A próxima simulação adota ***limite para erro negativo = -200 e a potência para erro negativo = 1*10^7*** e os demais parâmetros idênticos.

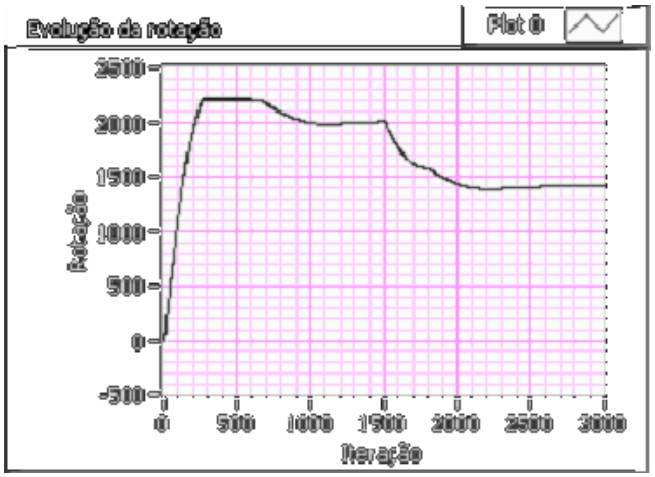

Figura 32B: Dinâmica com a atuação do ***bloqueio de erro negativo***

Observa-se que o sobre sinal fica cortado. Isso ocorre porque a potência de atuação fica limitada ao valor contido em ***potência limitada pelo erro negativo*** assim que ***rotação=2200*** é atingida, pois implica em ***erro = -200***.

Quando ***temperatura = 1500*** é atingida, a rotação de referência é reduzida para ***2000*0,7=1400***, o que torna o ***erro = -600*** > ***-200***. A mesma potência limitada atua. No primeiro caso, devido ao erro negativo, a queda é típica de um sistema de 2ª ordem mostrando um sobre sinal negativo e a uma taxa mais rápida. Já neste caso a potência imposta de $1 \cdot 10^7$ torna a queda mais lenta. O controle PI retoma o processo quando ***rotação = 1600***, pois ***erro = -200***.

Observa-se nos casos anteriores a descontinuidade da derivada nos instantes de mudança do valor de referência. Até esse instante a função temporal é contínua, veja por exemplo (4d) e (5d). Nesse instante a dinâmica do modelo passa a ser governada por outra função de maneira abrupta (função constante devido à potência constante). Quando a malha de controle é retomada, tem-se outra descontinuidade.

7.2 Atuação das temperaturas de alerta

Quando é alcançada a 1ª temperatura de alerta, existe um fator de redução da rotação de referência, já que a temperatura é crescente com a rotação do motor.

A 2ª temperatura de alerta limita a potência do motor a um valor mínimo, marcha lenta ou pouco superior, visto que a simples redução da rotação de referência pode não ser suficiente para baixar a temperatura a níveis seguros.

A 3ª temperatura de alerta representa um estado bastante crítico, no qual mesmo a rotação mínima levaria a uma velocidade de queda de temperatura insuficiente para garantir a integridade das partes quentes e rotativas do motor, exigindo-se sua parada completa através do corte do combustível.

Na curva seguinte está representada uma situação de ocorrência das 3 temperaturas de alerta. Para que o erro negativo não influenciasse, já que a intenção foi verificar a funcionalidade do atendimento aos três pontos de alerta, foi adotado ***limite para erro negativo = -4000***. Também se ateve para que o controle gradual não atuasse.

7.2.1 Simulações

Kp=10 ***Ki=100*** ***A=2000***

1ª temp. alerta =2500 ***2ª temp. alerta = 5000*** ***3ª temp. alerta = 7500***

Potência limitada pela temperatura = 900000

Limite para erro negativo = - 400

Fator de redução da rotação final = 0,7

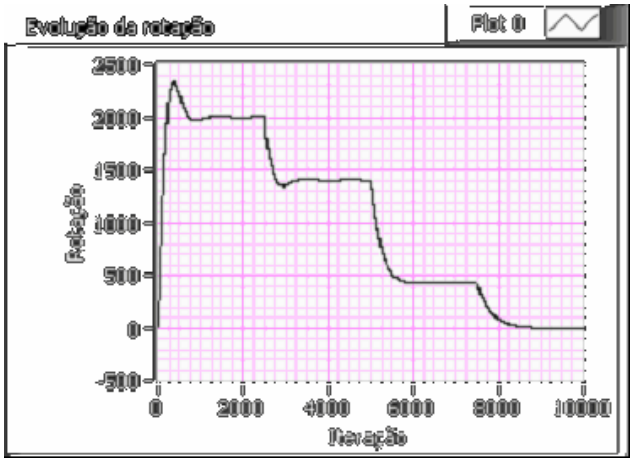

Figura 33: Atuação das temperaturas de alerta

A geração das temperaturas foi simulada utilizando a própria iteração do loop, isto é, a temperatura é o valor da iteração no momento. A intenção foi verificar o funcionamento do algoritmo.

Verifica-se que para ***T=2500***, a rotação inicia uma queda a partir do valor ***2000***, que é a temperatura de equilíbrio inicial, reduzindo-se do fator ***0,7***, indo assim para ***1400***. Observa-se um comportamento da dinâmica de 2ª ordem, porém com sobre-sinal negativo.

Ao ser atingida ***T=5000***, inicia-se uma queda na rotação até o novo equilíbrio de ***419,29***. Este valor corresponde à igualdade entre o torque de atuação associado à potência de ***900000*** e o torque de atrito correspondente à rotação de equilíbrio mais o torque de carga.

De fato, $T_{At} = \dfrac{900000}{419{,}29} = 2146{,}49$ e $T_{atrito+carga} = 5 \cdot 419{,}29 + 50 = 2146{,}45$.

Quando se atinge T=7500, a potência é reduzida a zero pelo corte de combustível, ou seja, $T_{At} = 0$. Com isso a rotação decai até a parada completa.

8 Conclusão

O controle por variação de parâmetros mostrou-se bem mais complicado de ser ajustado do que o controle gradual. Neste há uma maior regularidade na taxa de subida da rotação a despeito da variação da amplitude do valor final. Além disso, no primeiro é mais simples prever o comportamento quando se alteram os parâmetros.

Por exemplo, é esperado e realmente ocorre que o tempo de chegada ao valor final aumente com a diminuição do incremento no valor de referência transitório. Quando se atinge a faixa próxima ao valor transitório momentâneo, a ação de controle contém a atuação acumulada para tal valor. Quando o transitório é incrementado, é aproximadamente como se o sistema saísse de um equilíbrio no transitório anterior e iniciasse ali um acúmulo de sinal de atuação para se atingir o novo valor. Isso explica a maior regularidade da taxa de subida.

O controle por variação de parâmetros exige um maior malabarismo para conciliar as exigências de resposta. Até consegue-se um desempenho satisfatório para um valor fixo de amplitude final. Com isso uma alternativa seria criar vários grupos de parâmetros de controle para diversas faixas de valor final, utilizando uma estrutura CASE. Cada grupo continuaria apresentando os valores de ***Kp*** e ***Ki*** em função da faixa de erro.

Como não se conhece o modelo dinâmico exato do motor, a semelhança do que foi modelado no item modelo dinâmico do motor, faz-se necessário o ajuste sob as diversas amplitudes finais e faixas de erro para se tentar uma resposta satisfatória para todas as condições.

No controle gradual o trabalho é bem menos extenso, pois os mesmos parâmetros são utilizados em todas as faixas de erro, além do que não é necessário parâmetros distintos para amplitudes finais diferentes.

8.1 Complemento sobre o sistema físico real / diferenças com os programas simulados

O relatório versou sobre os algoritmos e a lógica de controle, além da modelagem teórica da dinâmica da turbina, as simulações baseadas na mesma e a confrontação com as características de resposta previstas pela teoria de controle.

No sistema físico real, a dinâmica da turbina representada pela equação diferencial (1) e visualizada no diagrama de blocos do Labview pelas funções em azul será substituída pela dinâmica real do motor, deixando de existir a parte dos programas representadas pela figura 17.

A operação de divisão entre ***potência final de atuação associada a abertura de combustível*** e ***torque equivalente de atuação*** será substituída pela comunicação com a placa ligada ao servo mecanismo que controla o fluxo de combustível, tendo em vista que o segundo bloco é resultado da própria dinâmica do motor. Também deve haver um algoritmo que associe a potência desejada com uma abertura correspondente de combustível e um sinal elétrico que promova a abertura desejada. Estes aspectos não foram abordados por não se conhecer e não se ter até o momento o sistema de combustível do banco de ensaios.

A aquisição real de dados substituirá a realimentação da rotação representada no programa por ***rotação anterior*** e a geração de temperatura indexada à quantidade de iterações. Rotação e temperatura deixam de ser fornecidas por um processamento matemático de um modelo teórico e passam a advir de sensores / transdutores em comunicação com placas de aquisição de dados.

O tamanho do intervalo de tempo do passo de controle (***dt***) deve estar de acordo com o tempo entre duas aquisições sucessivas de dados, que por sua vez deve ser igual ao tempo entre dois sinais sucessivos de atuação, tendo em vista que a aquisição do próximo conjunto de dados (temperaturas, rotação, pressões) está condicionada à liberação do sinal de atuação recém processado.

Por fim a estrutura FOR LOOP do algoritmo de controle será substituída por uma estrutura WHILE LOOP, que possui um número indefinido de iterações, parando até que uma condição booleana seja satisfeita, por exemplo o acionamento de um botão PARE. A primeira foi utilizada apenas para validar o algoritmo de controle.

Referências

1- BARBOSA, J. R. **Turbinas a gás**. São José dos Campos: ITA, 2006. 194p. (Apostila do curso de MEM-41)

2- SARAVANAMUTTOO, H. I. H.; ROGERS, G. F. C.; COHEN, H. **Gas turbine theory**. 5. ed. Harlow: Pearson Education, 2001. 491p.

3- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 4. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003. 788p.

4- NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **Introduction to Labview**, Austin, 2003. Disponível em: <http://search.ni.com/nisearch/nisearchservlet> Acesso em: 20 set. 2006.

5- NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **PID control toolset:** user manual. Software. Versão 7.1. Austin, 2003.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO	2. DATA	3. DOCUMENTO N°	4. N° DE PÁGINAS
TC	27 de outubro de 2006	CTA/ITA-IEM/TC-017/2006	67

5. TÍTULO E SUBTÍTULO:

Utilização do programa labview para desenvolvimento de um controle proporcional mais integral de rotação numa bancada de ensaios de um motor turbojato.

6. AUTOR(ES):

Gustavo Brito Gibrail

7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES):

Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia Mecânica-Aeronáutica – ITA/IEM

8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR:

1. Turbo-Jato; 2. Banco de ensaios; 3. Controle; 4. Labview; 5. Modelagem; 6. Funções de transferência; 7. Simulações.

9.PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO:

Motores turbojato; Banco de ensaios; Ensaios de rotação; Modelos matemáticos; Funções de transferência; Simulação computadorizada; Controle automático; Engenharia mecânica; Engenharia aeronáutica

10. APRESENTAÇÃO: **X Nacional** **Internacional**

Trabalho de Graduação, ITA, São José dos Campos, 2006. 67 páginas.

11. RESUMO:

Está atualmente em projeto na Sub-divisão de Propulsão do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE / ASA-P) um motor do tipo turbo-jato de pequena potência. Paralelamente a este projeto, será construído um banco de ensaios para avaliar o desempenho dos protótipos produzidos e sua conformidade com as características desejadas no projeto. É desejado que este banco disponha de dois sistemas: sistema de aquisição de dados e sistema de controle automatizado, que utilizarão o programa Labview e placas de aquisição de dados, produzidos pela empresa National Instruments. O presente trabalho de graduação foca o controle da rotação, atuando na quantidade de combustível injetada na câmara de combustão. Para executar tal tarefa foram desenvolvidos dois programas no ambiente LabView, ambos utilizando um algoritmo de controle proporcional mais integral (PI), que busca promover acelerações suaves, porém não muito lentas, para qualquer valor final de rotação desejado. Além disso, o controle deve respeitar os limites de aceleração impostos pelo comportamento transiente do motor, que pode se tornar perigoso dependendo da taxa de aceleração do mesmo, devido aos limites impostos pelo mapa de funcionamento do compressor. A diferença entre os dois programas está na forma com que conseguem a gradação na elevação da rotação, tendo em vista que um controle PI simples é indiferente ao valor final desejado quanto aos tempos característicos. O primeiro é baseado na colocação de referências intermediárias de rotação e o segundo utiliza um escalonamento dos parâmetros de controle PI, de acordo com as faixas de rotação em que se está no momento. Foi deduzido o equacionamento da malha de controle, utilizando uma modelagem da dinâmica do motor e as funções de transferência para o caso de um controle PI simples. Tal fato contribuiu para deduzir as expressões analíticas da evolução temporal da rotação, posteriormente comparadas com as curvas geradas pelos algoritmos criados nesta pesquisa. O trabalho contém um número significativo de simulações, que permitem a comparação com resultados teóricos esperados e a avaliação da qualidade dos mecanismos criados para se conseguir uma taxa satisfatória de elevação da rotação.

12. GRAU DE SIGILO:

(X) OSTENSIVO **( ) RESERVADO** **( ) CONFIDENCIAL** **( ) SECRETO**