

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

EVERSON LUIZ CORADIN GULIN

**SISTEMA DE CONTROLE PARA BANCADA DE TESTE DE
SISTEMAS DE DIREÇÃO AUTOMOTIVO**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA
2015

EVERSON LUIZ CORADIN GULIN

**SISTEMA DE CONTROLE PARA BANCADA DE TESTE DE
SISTEMAS DE DIREÇÃO AUTOMOTIVO**

Monografia de Especialização, apresentado ao Curso de Especialização em Automação Industrial, do Departamento Acadêmico de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Msc. Anderson Levati Amoroso

CURITIBA

2015

RESUMO

GULIN, Everson Luiz Coradin. **Sistema de controle para bancada de teste de sistemas de direção automotivo.** 2015. Monografia (Especialização em Automação Industrial) – Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Este trabalho tem por objetivo realizar o estudo de caso em um equipamento de testes de sistemas de direção automotivo com relação ao sistema de controle utilizado no equipamento. Com este trabalho esperasse obter pontos de melhoria no ajuste do controlador e assim conseguir um ganho quanto ao tempo de preparação dos testes e o uso racional dos recursos e ainda aumentar a confiabilidades dos resultados obtidos nos testes. Dentro deste trabalho são apresentadas as principais características do equipamento de teste e também um breve detalhamento dos servossistemas que compõem a bancada. É realizado também um detalhamento sobre controladores PID. Ao final, testes práticos são realizados no equipamento com o intuito de validar os conceitos adquiridos neste estudo.

Palavras-chaves: Sistemas de controle. Controle de Posição. Servomecanismo.

ABSTRACT

GULIN, Everson Luiz Coradin. **Control system applied on automotive steering systems test bench.** 2015. Monografia (Especialização em Automação Industrial) – Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

This study aim is to realize a study on test bench used for evaluate automotive steering system regarding to control system applied in this equipment. By this study the target is to get consistent knowledge about to operation of this test bench in order to identify improvements points on PID tuning controller for provide a upgrading regarding to test bench setup time, as well as the rational use of resources and further to increase the tests results reliability. In this work are showed the main characteristics of test equipment and also a brief breakdown concerning to all servo systems installed in test bench. An analysis about PID controllers systems is performed in this job. At the end, results about tests realized on the test bench are showed, in order to validate the knowledge learned in this study.

Key words: Control system. Position Control. Servosystem.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Controlador de velocidade por esferas.....	6
Figura 2 – Bancada de teste de durabilidade.....	8
Figura 3 – Curva de carga em sistema corretamente sintonizado.....	10
Figura 4 – Curva de carga em sistema não sintonizado adequadamente.....	10
Figura 5 – Processo de projeto de controlador proposto por Dorf e Bishop.....	11
Figura 6 - Cronograma de atividades.....	13
Figura 7 – Sistema de controle em malha fechada.....	15
Figura 8 – Entradas do sistema de malha fechada.....	16
Figura 9 – Sistema multivariáveis bancada de teste de sistemas de direção.....	18
Figura 10 – Controlador com antidisparo.....	21
Figura 11 – Curva de resposta ao degrau para método da curva de reação.....	23
Figura 12 – Decaimento a 25%.....	24
Figura 13 – Período crítico.....	25
Figura 14 – Comparativo controlador digital.....	26
Figura 15 – Exemplo de um sistema de direção.....	29
Figura 16 – Montagem do sistema de direção na bancada de teste.....	30
Figura 17 – Ciclo de controle do equipamento.....	31
Figura 18 – <i>Setpoint</i> de ângulo para teste de direção automotiva.....	32
Figura 19 – <i>Setpoint</i> de força.....	33
Figura 20 – Casamento das curvas de <i>setpoint</i>	34
Figura 21 – Disposição dos sensores.....	35
Figura 22 – Estrutura do programa de teste.....	37
Figura 23 – Repetição de ciclos.....	38
Figura 24 – Execução do ciclo de varredura.....	38
Figura 25 – Ajuste do ciclo de varredura.....	39
Figura 26 – Controlador PID.....	40
Figura 27 – Esquema atuador hidráulico linear de dupla ação.....	41
Figura 28 – Esquema motor hidráulico.....	42
Figura 29 – Esquema servoválvula.....	43
Figura 30 – Comparativo tempo de ciclo.....	44
Figura 31 – Perturbação gerada por folga mecânica no sistema.....	45
Figura 32 – Perturbação ocorrida devido <i>cross-coupling</i>	45
Figura 33 – Tempo de resposta.....	47
Figura 34 – Comparativo taxa de amostragens.....	50
Figura 35 – Ganho crítico atuador esquerdo.....	51
Figura 36 – Ganho crítico atuador direito.....	51
Figura 37 – Comparativo de sintonia de controladores.....	53
Figura 38 – Configuração de parâmetros adicionais no controlador.....	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	PROBLEMA	7
1.2	OBJETIVOS	8
1.2.1	Objetivo Geral	9
1.2.2	Objetivos Específicos	9
1.3	JUSTIFICATIVA	9
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	11
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	12
1.6	CRONOGRAMA DE ATIVIDADES	13
2	CONTROLE AUTOMÁTICO	14
2.1	CLASSE DE CONTROLE	14
2.2	SISTEMA DE MALHA FECHADA	15
2.3	MODELOS MATEMÁTICOS	17
2.4	SISTEMA MULTIVARIÁVEIS	18
2.5	CONTROLADOR PID	19
2.5.1	Ação Proporcional – P	19
2.5.2	Ação Proporcional Integral – PI	20
2.5.3	Ação Proporcional Derivativa– PD	20
2.5.4	Ação de controle PID	20
2.5.5	Correção do efeito de Disparo - Windup	21
2.6	SINTONIA DE CONTROLADORES	22
2.6.1	Método por decaimento do sinal a 25%	23
2.6.2	Método da sensibilidade Crítica	24
2.7	CONTROLADORES DIGITAIS	25
2.8	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	27
3	CARACTERIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE TESTE	28
3.1	TESTE EM SISTEMA DE DIREÇÃO AUTOMOTIVO	28
3.2	BANCADA DE TESTE DE SISTEMA DE DIREÇÃO	31
3.2.1	Setpoint	31
3.2.2	Controle	34
3.2.3	Execução	43
3.3	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	46
4	RESULTADOS PRÁTICOS	47
4.1	LARGURA DE BANDA DA PLANTA	47
4.2	TAXA DE AMOSTRAGEM	48
4.3	SINTONIA POR GANHO CRÍTICO	50
4.3.1	Determinação do Ganho Proporcional Crítico (K_{cr})	50
4.3.2	Determinação do período crítico (P_{cr})	52
4.3.3	Determinação dos parâmetros do controlador	52
4.4	PARÂMETROS ANTI DISPARO	54
4.5	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	55
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Desde os tempos mais remotos até muito antes da revolução industrial, Dorf e Bishop (2013, p. 4) destacaram que o homem já buscava desenvolver e utilizar formas de controle de processo que o auxiliassem na execução das atividades do cotidiano. Seguindo neste raciocínio, Capelli (2008, p. 12) adverte sobre desperdício de mão de obra em utilizar pessoas para a realização de tarefas repetitivas e que não necessitem da capacidade humana de raciocínio e poder da tomada de decisão.

Conforme Ogata (2010, p. 1), James Watt foi quem primeiramente apresentou um trabalho revolucionário no campo de controle automático de processo. Em 1769 James Watt desenvolveu um sistema de esferas para controlar a velocidade de um motor a vapor. A Figura 1 mostra o regulador desenvolvido por Watt.

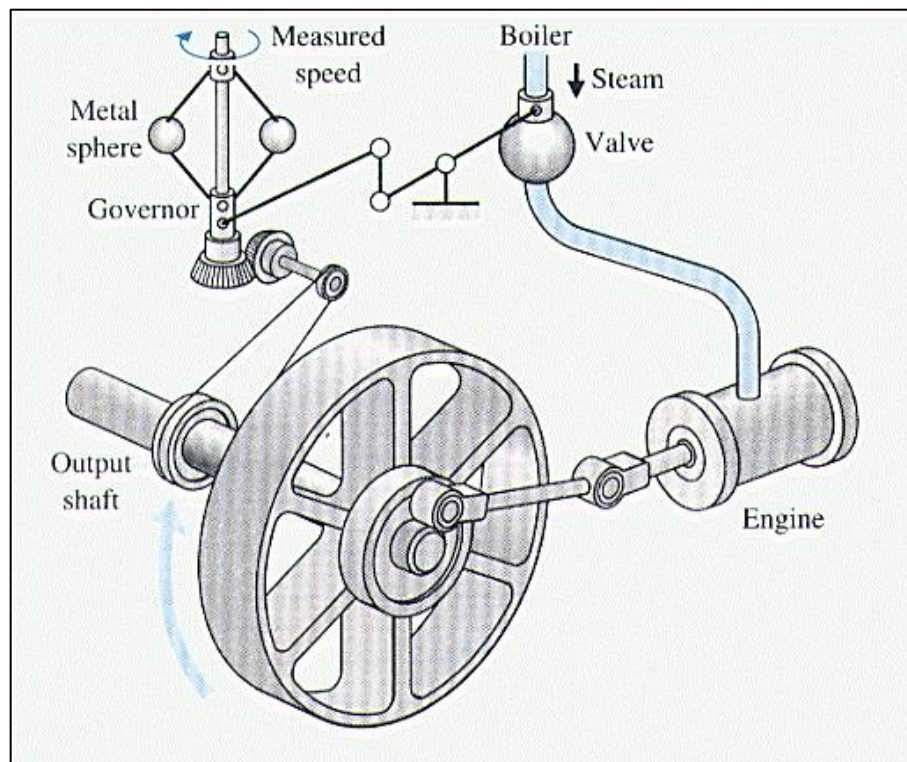


Figura 1 – Controlador de velocidade por esferas.

Fonte: <http://fis.cie.uma.es/old/docencia/2002-03/A109/tema2/tema211.html>.

Ainda, de acordo com Dorf e Bishop (2013, p. 5), controle de processos, também conhecidos como automação, é uma maneira utilizada para aumentar a produtividade de um processo. Não só isso, atualmente é evidente que linhas de

produção e processo automatizados apresentam um melhor padrão de qualidade e serialização do produto final.

Com relação à evolução dos sistemas de controle, Dorf e Bishop (2013, p. 4) comentam que já em 1868 J. C Maxwell desenvolveu técnicas de controle a partir de equações diferenciais.

Na Segunda Guerra Mundial houve um grande salto nas técnicas e na evolução dos controladores automáticos de processos para fins militares.

Dentre os possíveis métodos de controle de processos, Aström e Hägglund (2006, p. 1) destacam que os sistemas de controle PID estão aplicados em mais de 95% das malhas de controle. Isso pode ser verificado nas indústrias, o grande número de controladores instalados e que trazem o controlador PID ou suas variações instalados nos controladores dos sistemas produtivos.

Contudo, a instalação de um controlador em uma planta requer a sintonia do mesmo para o perfeito funcionamento da malha de controle e apesar dos controladores PID serem amplamente utilizados, O'Dwyer (2009, p. 1) destaca que a grande maioria dos controladores instalados ou estão operando em modo manual ou estão mal sintonizados.

O presente trabalho tem como foco avaliar as condições atuais de um equipamento automático de teste em sistema de direção, assim como o controlador PID instalado.

1.1 PROBLEMA

Para realizar a validação de um sistema de direção, um dos testes requeridos é a realização do teste de durabilidade. Para isso, o teste de durabilidade é realizado em uma bancada de ensaio, também definida como “robô de teste” em reportagem realizada pela Gazeta do Povo (2013). Essa bancada de teste é um equipamento composto por dois atuadores hidráulicos de deslocamento linear e mais um motor hidráulico que realiza o movimento rotacional sobre a direção. A figura 2 mostra a bancada de ensaio de durabilidade.



Figura 2 – Bancada de teste de durabilidade.

Fonte: <http://www.gazetadopovo.com.br/economia/conteudo.phtml?id=1359451>.

Para que o teste de validação ocorra de forma correta faz-se necessário um bom conhecimento do equipamento de forma a garantir a correta programação das rotinas de teste e ainda ter certeza que o teste seja executado de forma correta e dentro do prazo definido.

1.2 OBJETIVOS

Um conhecimento adequado referente a um determinado equipamento proporciona ao usuário extrair ao máximo os recursos oferecidos pelo mesmo. Desta forma o presente estudo tem por objetivo verificar as principais características de operação da bancada de teste de sistemas de direção, assim como estudar as características do controlador PID instalado ao equipamento.

1.2.1 Objetivo Geral

O cunho principal deste trabalho é realizar um estudo sobre o funcionamento da bancada de teste de durabilidade em sistema de direção, possibilitando assim uma perfeita execução do teste de validação e ainda indicar possíveis pontos de melhoria.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Apresentar as características dos servomecanismos envolvidos no sistema de teste;
2. Apresentar as características do programa de controle utilizado pelo equipamento de teste;
3. Apresentar as características sobre controladores PID;
4. Adquirir dados experimentais de forma a validar os conceitos abordados no estudo;
5. Ajustar os parâmetros do PID.

1.3 JUSTIFICATIVA

A validação de produtos a serem lançados no mercado é uma importante etapa dentro da cadeia produtiva da indústria, pois é nesta fase de teste de validação onde são e devem ser detectados e corrigidos possíveis falhas de projeto e problemas de qualidade. Desta forma, realizar testes de forma correta é indispensável para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos.

O uso incorreto do equipamento, devido à falta de conhecimento dos recursos, gera durante a execução do teste:

- Atrasos na execução dos procedimentos;
- Desgaste prematuro dos equipamentos de teste;
- Erros de execução do teste;
- Demora na execução do teste devido as paradas consecutivas do equipamento por alarmes;
- Aplicação incorreta da carga de teste;

- Má sintonia do controlador PID;

De maneira geral, a falta de conhecimento sobre o equipamento e o desconhecimento sobre métodos eficazes de sintonia de PID ocasiona o desperdício de recursos, como por exemplo, horas de mão de obra para preparação do equipamento e ainda, por algumas vezes os resultados obtidos nos testes de durabilidade são questionados devido a incorreta aplicação das cargas durante o ensaio.

A figura 3 mostra o exemplo de um teste realizado com um sistema bem sintonizado, já a figura 4 mostra as grandes variações de cargas em um teste realizado em que o controlador não foi adequadamente ajustado.

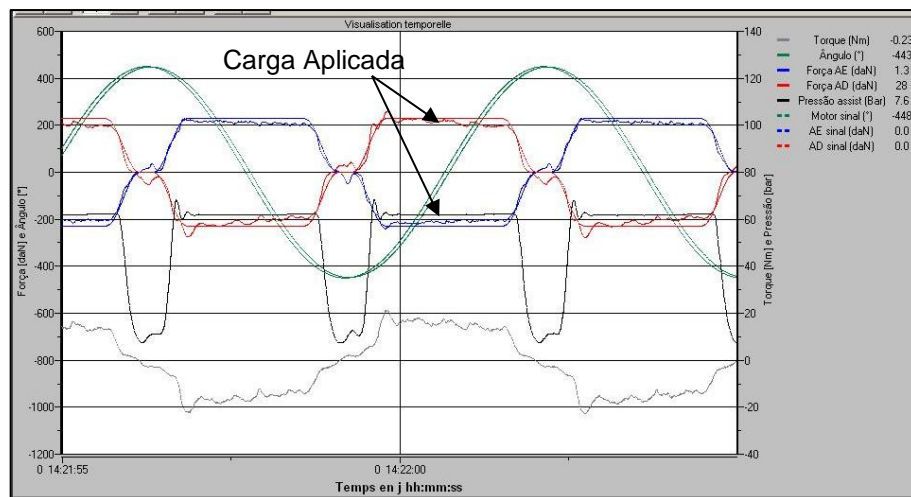


Figura 3 – Curva de carga em sistema corretamente sintonizado.
Fonte: Autoria própria.

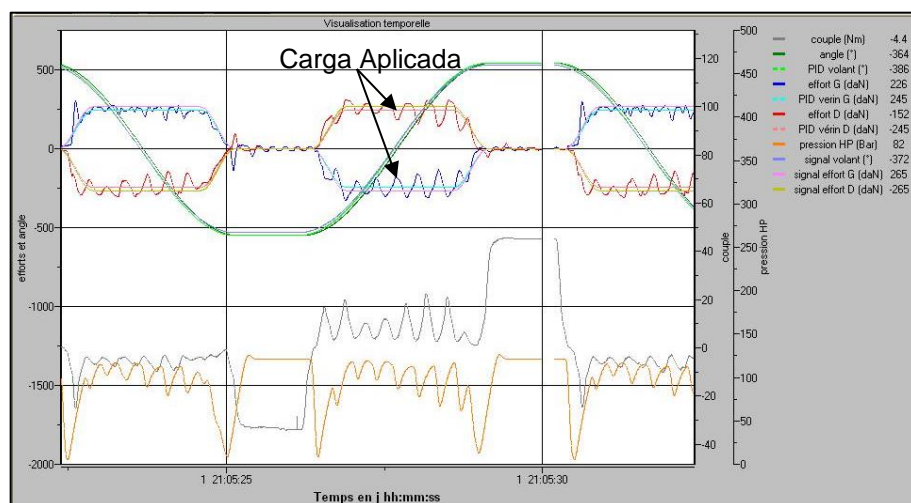


Figura 4 – Curva de carga em sistema não sintonizado adequadamente.
Fonte: Autoria própria.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para o projeto de um sistema de controle Dorf e Bishop (2013, p. 13) descrevem:

O processo de projeto consiste em sete blocos principais, que são organizados em três grupos:

1. Estabelecimento dos objetivos e variáveis a serem controladas e definição das especificações (métricas) que serão usadas para medir o desempenho;
2. Definição do sistema e modelagem;
3. Projeto do sistema de controle e simulação e análise do sistema integrado.

A figura 5 mostra o diagrama do fluxo de processos para o projeto de um sistema de controle conforme proposto pelos mesmos autores.

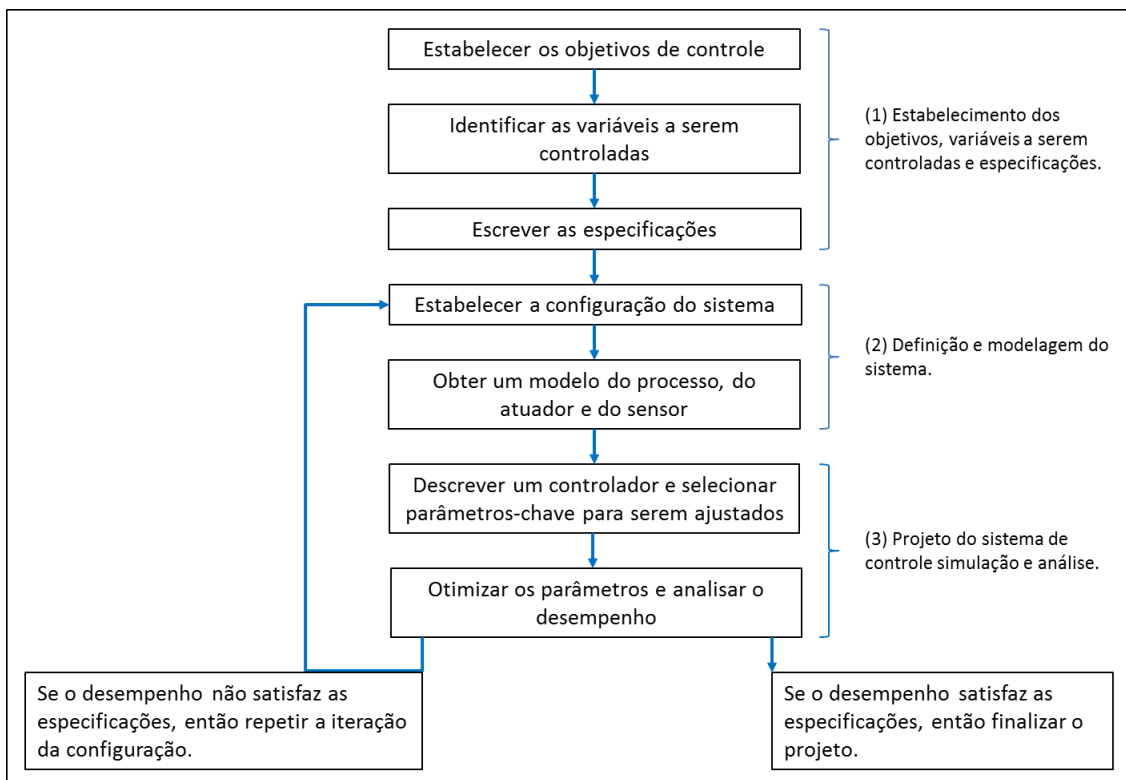


Figura 5 – Processo de projeto de controlador proposto por Dorf e Bishop.

Fonte: Dorf e Bishop (2013, p 14).

Apesar deste trabalho não ter como objetivo o desenvolvimento de um sistema de controle, mas sim o entendimento de um sistema de teste dotado de um sistema de controle, o método de trabalho apresentado pelos autores Dorf e Bishop será tomado como uma orientação para o plano de atividades deste estudo de caso. As etapas a serem realizadas serão:

1. Estabelecer os objetivos de controle:
 - a. Descrever a aplicação do sistema de teste;
 - b. Descrever o tipo de amostra avaliada no equipamento;
2. Identificar as variáveis a serem controladas:
 - a. Descrever os *setpoints* da bancada;
 - b. Apresentar características das malhas do sistema;
3. Escrever as especificações:
 - a. Identificar pontos relevantes ao funcionamento do equipamento, como por exemplo, o tempo de resposta do sistema;
 - b. Relação de dependência entre as malhas;
4. Ajustar os parâmetros e analisar o desempenho:
 - a. Realizar testes práticos com base nos conhecimentos adquiridos e comparar resultados medidos.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto por seis capítulos os quais apresentam:

- Capítulo 1: introdução. Este capítulo propõe um breve retrospecto referente ao tema do trabalho e define os objetivos gerais e específicos que serão abordados ao longo do estudo.
- Capítulo 2: controle automático. Aborda características e conceitos referentes a tipos de controle e características de controladores PID utilizados para o controle de processos e sistemas.
- Capítulo 3: caracterização do equipamento de teste. Aborda o conceito da execução do teste em sistema de direção e também uma breve descrição da amostra a ser testada. Neste capítulo são apresentadas também as características do equipamento de teste.
- Capítulo 4: apresentação e análise dos resultados. A partir dos conceitos e dados expostos nos capítulos anteriores serão geradas métricas para as quais os resultados obtidos serão avaliados nesta parte do trabalho.

- Capítulo 5: considerações finais. Uma vez concluída as etapas anteriores serão identificados os pontos de sucesso do estudo assim como sugestões de trabalhos futuros a serem realizados.
- Capítulo 6: referências. Conjunto de referências bibliográficas utilizadas como material de pesquisa.

1.6 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

De forma a organizar as atividades a serem seguidas para execução e conclusão deste estudo de caso, a figura 6 apresenta o cronograma de atividades deste trabalho.

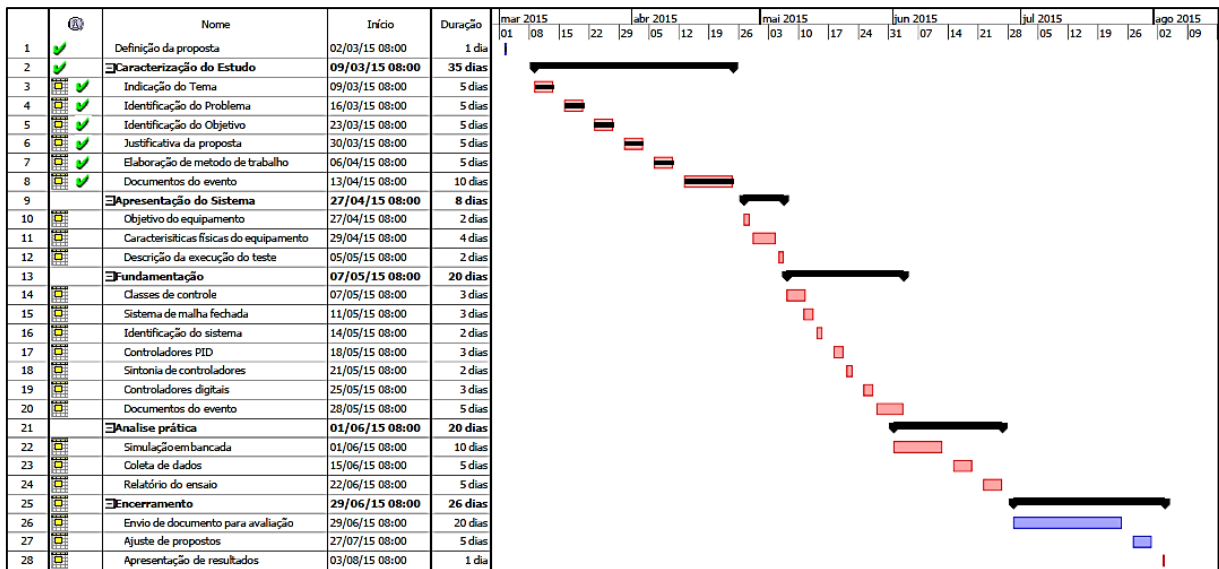


Figura 6 - Cronograma de atividades.

Fonte: Autoria própria.

2 CONTROLE AUTOMÁTICO

Neste capítulo será realizada uma revisão dos principais conceitos sobre Sistemas de Controle Automático. Ao final deste capítulo é feita uma relação entre os conceitos abordados e a realidade de controle existente no equipamento de teste.

2.1 CLASSE DE CONTROLE

Com relação ao estudo de engenharia de controle, Castrucci, Bittar e Sales (2011, p. 1) comentam sobre as duas grandes vertentes de sistemas de controle que são ligadas a natureza das variáveis a serem controladas. Estas são:

- Dinâmica tradicional;
- Dinâmica de eventos discretos;

Dinâmica tradicional ou controle de variáveis contínuas, conforme Amoroso (2014) é a classe de controle que atua sobre processos e fenômenos descritos por equações diferenciais tendo a variável tempo(s) como a variável independente.

Ainda dentro dos sistemas de controle de variáveis contínuas há duas linhas de estudo quanto ao tipo de processo a ser controlado. Sendo elas:

- Controle de movimento;
- Controle de processo.

Controle de movimento ou controle de servomecanismos, conforme Amoroso (2014), é o tipo de controle empregado para mover e controlar massas de forma a ajustá-las aos valores de referência com exatidão. Como por exemplo, o ajuste de posição dos *flaps* de um avião durante o voo, o controle de movimento dos braços de robô etc.

Quanto a controle de processo, esse é o tipo de controle destinado para operação de processos contínuos, como por exemplo, o controle de temperatura em tubulações de indústrias petroquímicas. Castrucci, Bittar e Sales (2011, p. 1) comentam que este tipo de processo se caracteriza por ter respostas relativamente lentas e normalmente neste tipo de controle busca-se a estabilização do sistema como forma de assegurar a segurança da operação.

Voltando as classes de controle, controle de variáveis discretas ou dinâmica de eventos discretos, conforme comentam Castrucci, Bittar e Sales (2011, p.1), é a

classe de controle onde as saídas do sistema são alteradas diretamente a partir da leitura das entradas de forma binária, ou seja, obedecendo de forma direta a regra de causa e efeito, ou seja, como resultado desta ação de controle a saída será ligada ou desligada.

Exemplos deste tipo de sistemas são malhas de partida de motores, proteção de processos e chaves elétricas.

2.2 SISTEMA DE MALHA FECHADA

De acordo com Ogata (2010, p.6), sistemas de controle em malha fechada também são descritos como sistemas de controle com realimentação, onde basicamente o valor de saída do processo, a variável controlada, é medida e comparada com o sinal de entrada, *setpoint*. A diferença entre estas duas variáveis é utilizada pelo controlador para ajustar a variável controlada.

A figura 7 mostra um sistema de malha fechada assim como as variáveis envolvidas no processo.

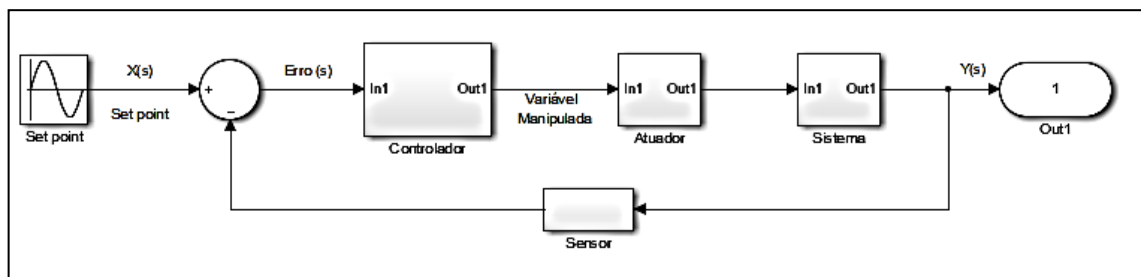


Figura 7 – Sistema de controle em malha fechada.

Fonte: Autoria própria.

De acordo com Dorf e Bishop (2013, p. 181) os sistemas de controle em malha fechada apresentam um custo e complexidade superiores aos sistemas de malha aberta, porém os referidos autores ainda mencionam as vantagens deste tipo de sistema como sendo:

- Maior fidelidade da variável do processo ao *setpoint*;
- Maior rejeição a distúrbios;
- Melhor atenuação a ruídos quanto à medição da saída;
- Redução do erro durante a operação do sistema em regime.

Apesar das vantagens do sistema em malha fechada sobre o sistema de malha aberta, Ogata (2010, p.7), menciona que esta primeira configuração de processo é mais indicada em sistemas em que não haja o conhecimento antecipado das variáveis de entrada e ainda a planta seja sujeita a distúrbios no processo.

O sistema de controle apresentado na figura 7 tem o erro definido pela expressão (1):

$$E(s) = X(s) - H(s) \cdot Y(s) \quad (1)$$

Onde:

$H(s)$ é a função de transferência do sensor.

No entanto ao erro ainda são atribuídas mais duas entradas do sistema, entradas essas que são geradas por perturbações no processo e ruído ou erro de medição.

A figura 8 mostra o sistema de malha fechada com as três entradas do sistema, sendo essas:

- $X(s)$: *setpoint*;
- $D(s)$: distúrbio;
- $D_m(s)$: distúrbio de medição

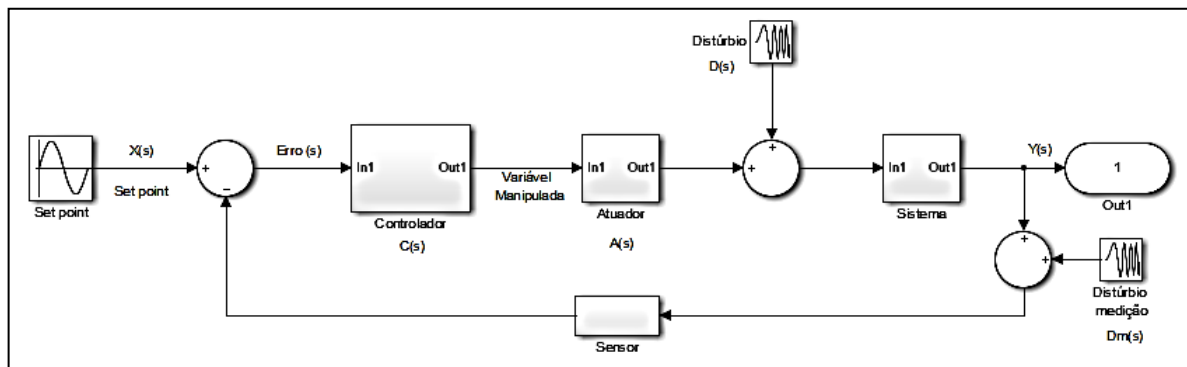


Figura 8 – Entradas do sistema de malha fechada.

Fonte: Autoria própria.

Desta forma, a partir da identificação do sistema conhecendo o comportamento do controlador, do atuador, do sensor e do processo é possível ter a resposta do sistema quando sinais de referência e perturbação são aplicados à planta.

2.3 MODELOS MATEMÁTICOS

De acordo com Castrucci, Bittar e Sales (2011, p. 6), identificar um sistema quer dizer estabelecer modelos matemáticos que expressem o comportamento da planta com a melhor fidelidade possível.

Castrucci, Bittar e Sales (2011, p. 6) descrevem sobre as possíveis abordagens a serem utilizadas para identificação de sistemas. Um dos métodos apontados pelos autores é o modelo por método estruturalista, no qual o modelo matemático que exprime o comportamento do sistema é conduzido de forma a primeiramente obter equações que demonstrem o comportamento de cada elemento do sistema e ao final monta-se a equação geral do sistema que exprime a planta.

Já o modelo por método globalista, ou também conhecido como identificação de sistemas é a técnica para definir o comportamento de uma determinada planta a partir do registro das variáveis de entrada e saída que são relevantes ao controle automático do processo, conforme descrito por Castrucci, Bittar e Sales (2011, p. 7). A essas informações de entradas e saídas, técnicas computacionais e gráficas são empregadas na análise destes sinais previamente coletados, para assim descrever as equações que explicam o funcionamento do sistema.

Conforme descrito por Ogata (2010 p 11), há sistemas onde é necessário mais de um modelo matemático para descrever o comportamento de uma planta. Tal fato se deve a explicação feita por Dorf e Bishop (2013, p. 40), onde eles comentam que grande parte dos sistemas físicos são lineares para determinadas faixas de operação.

Para que um sistema seja considerado como linear, duas propriedades devem ser atendidas, sendo elas:

1. Propriedade da aditividade: Para que a propriedade da aditividade seja atendida as expressões (2), (3) e (4) devem ser verdadeiras para o sistema:

$$\text{se: } \textit{entrada} X_1 \rightarrow \textit{saída} Y_1 \quad (2)$$

$$\text{e: } \textit{entrada} X_2 \rightarrow \textit{saída} Y_2 \quad (3)$$

$$\text{Então: } \textit{entrada} X_1 + X_2 \rightarrow \textit{saída} Y_1 + Y_2 \quad (4)$$

2. Propriedades da homogeneidade: Para a propriedade da homogeneidade ser atendida as relações (5) e (6) devem ser satisfeitas:

$$\text{se: } \textit{entrada} X_{(t)} \rightarrow \textit{saída} Y_{(t)} \quad (5)$$

$$\text{então: } \textit{entrada} X_{(t)} \times \beta \rightarrow \textit{saída} Y_{(t)} \times \beta \quad (6)$$

A exemplo de um sistema linear pode-se citar o coeficiente de elasticidade de uma mola, onde este apresenta uma relação linear entre força e deslocamento, desde que o valor de deslocamento esteja dentro de uma faixa definida de valores que não entrapasse o limite elástico da mola.

2.4 SISTEMA MULTIVARIÁVEIS

Como já apresentado, controlar um sistema significa aproximar a saída do sistema a uma entrada de referência, sendo esta o *setpoint*.

Ogata (2010, p25) cita que aproximadamente a partir de 1960 a teoria de controle moderno passou a ser mais amplamente estudada e desenvolvida devido à crescente necessidade de realizar o controle sobre sistemas de múltiplas entradas e múltiplas saídas, em oposição à teoria de controle convencional que trata somente de sistemas lineares, invariantes no tempo e de somente uma única entrada e uma única saída.

A Figura 9 ilustra o sistema de controle da bancada de testes de sistema de direção em sua concepção de multivariável.

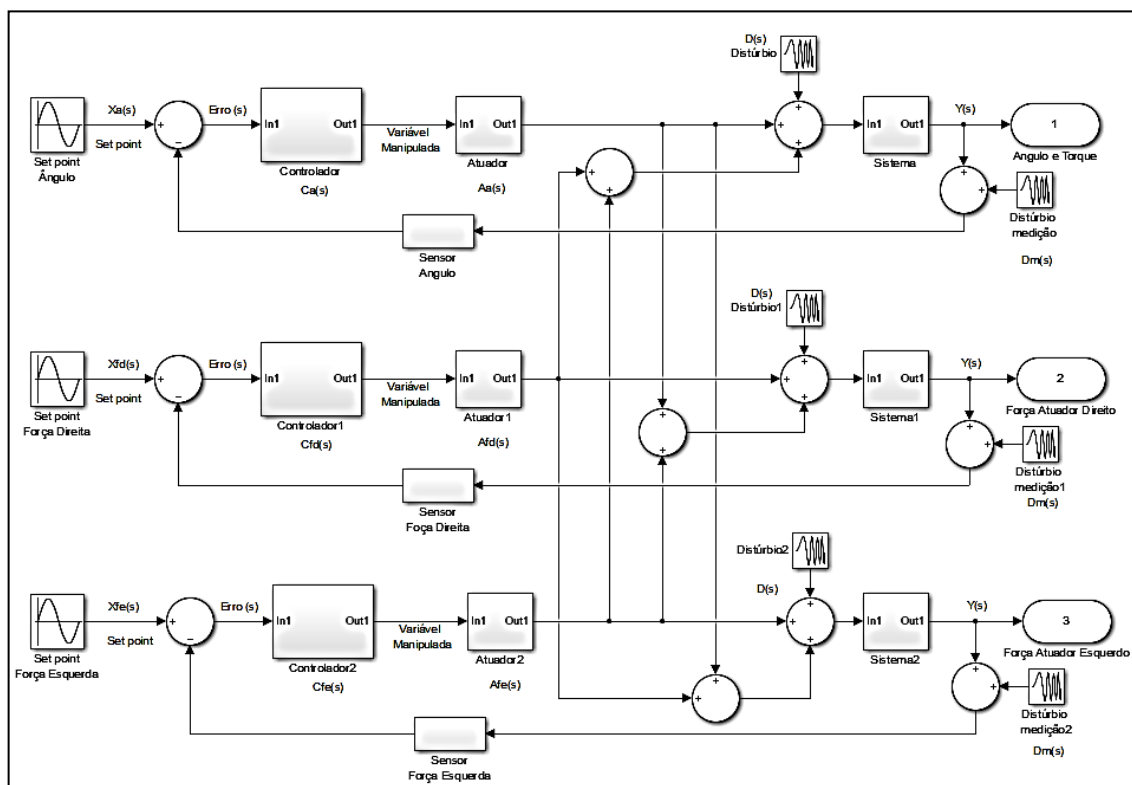


Figura 9 – Sistema multivariáveis bancada de teste de sistemas de direção.

Fonte: Autoria própria.

2.5 CONTROLADOR PID

Em Ogata (2010, p. 521), o autor chama a atenção para o fato de que a grande maioria dos controladores industriais em utilização hoje são controladores do tipo PID e suas variações.

Tal fato se deve a característica deste tipo de controlador adaptar-se à grande maioria dos sistemas de controle. Ogata (2010 p. 521) cita também que em plantas ou sistemas onde o modelo matemático é desconhecido este controlador se faz extremamente eficiente devido à possibilidade de sintonizá-lo.

Quanto à estrutura matemática deste tipo de controlador, a expressão (7) é uma das definições que podem ser utilizadas para expressar controladores PID.

$$\text{Dominio do tempo: } u_{(t)} = Kc \times \left(e_{(t)} + \frac{1}{Ti} \int_0^t e_t dt + Td \times \frac{de_t}{dt} \right) \quad (7)$$

Onde:

Kc: representa o ganho proporcional;

Ti: representa o tempo integral;

Td: representa o tempo derivativo;

A partir da equação acima, é possível verificar a parcela de contribuição de cada elemento do controlador com relação ao sinal de saída.

2.5.1 Ação Proporcional

Conforme apresentado por Ogata (2010, p. 21), a relação entre o sinal de erro e a saída para ação proporcional é apresentação da equação (8):

$$u(t) = Kc \times (e(t)) \quad (8)$$

Ou seja, a ação proporcional pode ser descrita como um ganho ajustável sobre o sinal de erro.

Franklin, Powell e Emani-Naeini (2013, p. 161) alertam que para grandes valores de Kc de forma a reduzir o erro em regime permanente do sistema, a contra partida será um coeficiente de amortecimento muito pequeno, o que resulta em um sistema oscilatório e com frequência natural específica.

2.5.2 Ação Proporcional Integral

Ogata (2010, p. 21) demonstra também a relação entre o sinal de erro e a saída para ação proporcional e integral como apresentado na equação (9):

$$u(t) = Kc \times \left(e(t) + \frac{1}{Ti} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (9)$$

A adição da ação integral ao controlador faz com que o sistema aumente o seu tipo, em outras palavras, acrescenta um novo polo na origem da função de transferência de malha aberta, conforme explica Franklin, Powell e Emani-Naeini (2013, p. 161).

A ação integral atua sobre o sistema enquanto o sinal de erro está presente, sendo assim tem-se a ação proporcional atuando de forma instantânea sempre que há uma variação do sinal, enquanto a ação integradora atua de forma lenta até eliminar o erro de regime permanente.

2.5.3 Ação Proporcional Derivativa

Ogata (2010, p. 21) ainda descreve a relação entre o sinal de erro e a saída para ação proporcional e derivativa como demonstra a equação (10):

$$u(t) = Kc \times \left(e(t) + Td \times \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (10)$$

Como pode ser verificado na equação acima, a ação derivativa no sistema faz com que a ação do sistema seja proporcional à taxa de variação do erro, ou seja, neste caso o controlador passa a ter a ação antecipativa ao erro.

O sistema derivativo é extremamente sensível a ruídos de medição. Esta ação de controle é mais comumente empregada em controle de posição e em controle de temperatura devido ao fato da variável manipulada variar bruscamente entre seus limites.

2.5.4 Ação de controle PID

Um controlador PID é a junção das três ações descritas anteriormente. De acordo com Ogata (2010, p. 21), o controlador PID traz as vantagens e características das três ações de controle, tais como:

- Ausência de erro estacionário devido à ação integral;
- Ganho de estabilidade do sistema pelo fator derivativo;
- Robustez a ruídos e perturbações;
- Possibilidade de ganhos K_c maiores o que reflete em uma maior velocidade de resposta do sistema;

2.5.5 Correção do efeito de disparo – *anti-windup*

Em um controlador PID, a ação integral tem o objetivo de eliminar o erro estacionário. Porém, Castrucci, Bittar e Sales(2011, p. 242) advertem que na prática todos os atuadores apresentam limites físicos e quando o sinal da ação de controle faz com que o atuador atinja este limite ocorre a saturação da variável manipulada do processo. Este efeito indesejado faz com que não somente o atuador permaneça saturado, mas permaneça por muito tempo com um valor alto e conseqüentemente afete o desempenho do sistema.

Como forma de evitar esta situação de controle, Castrucci, Bittar e Sales (2011, p. 242) expõem uma solução como apresentada na figura 10.

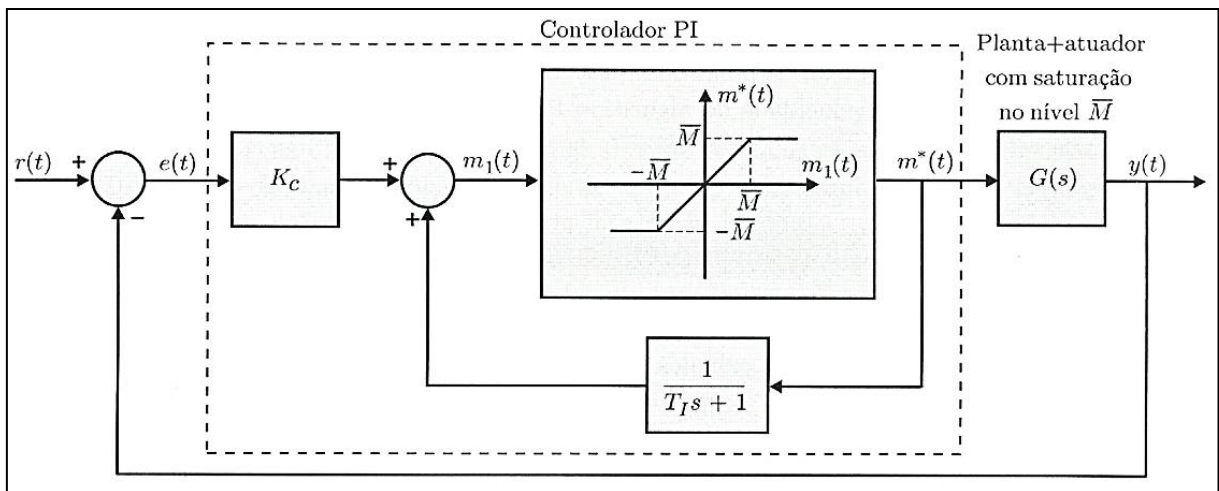


Figura 10 – Controlador com antidisparo.

Fonte: CASTRUCCI, Plínio de L.; BITTAR, Anselmo ; SALES, Roberto M. (2011, p. 242).

Este esquema mostra a utilização de uma realimentação interna ao controlador. Basicamente a etapa integral passa por um bloco de saturação o qual compara o nível do sinal da ação de controle ao nível de saturação. Uma vez que o nível do sinal exceda os valores de saturação, a integral do erro deixa de ser

considerada passando o sinal de saída ser composto unicamente pelo ganho proporcional K_c .

2.6 SINTONIA DE CONTROLADORES

A sintonia de controladores PID consiste em se determinar os ganhos das variáveis K_c , T_i e T_d como explica Dorf e Bishop (2013, p. 368). Os autores comentam que de maneira prática a sintonia destes controladores é feita de forma arbitrária, ou seja, os parâmetros são atribuídos por tentativa e erro, onde os ganhos são definidos baseando-se na observação de resposta do sistema ou na experiência do operador.

No entanto, Ogata (2010, p. 521) comenta que atualmente há controladores com a capacidade de autossintonia por meio de algoritmos internos ao controlador. Porém, deixando de lado estes avanços da tecnologia, o autor ainda fala sobre duas possibilidades de ajuste de PID sendo a primeira a partir do modelo matemático, ou seja, primeiramente dever ser conhecido o modelo matemático da planta para assim aplicar as técnicas analíticas para conhecimentos dos ganhos K_c , T_i e T_d . Já o segundo modelo indicado por Ogata, trata-se do modelo experimental desenvolvido por John. G. Ziegler e Nathaniel B Nichols no ano de 1942.

Conforme explica Franklin, Powell e Emani-Naeini (2013, p. 166) a técnica desenvolvida tem como base a observação da curva de reação do processo a partir de uma entrada em degrau. Os autores também comentam sobre os dois métodos experimentais propostos por Ziegler e Nichols que são:

- Método da curva de reação;
- Método da sensibilidade crítica.

No entanto Castrucci, Bittar e Sales (2011, p. 260) alertam sobre a usabilidade dos métodos experimentais de Ziegler e Nichols para controle de processo e controle de posição, sendo estes procedimentos mais indicados para controle de processo.

2.6.1 Método da curva de reação

De acordo com Ogata (2010, p. 523), para este método é obtida a resposta da planta a uma entrada em degrau. No entanto, a planta não deve possuir componente integral para que seja possível observar a curva de resposta com o perfil de “S”, como pode ser verificado na figura 11.

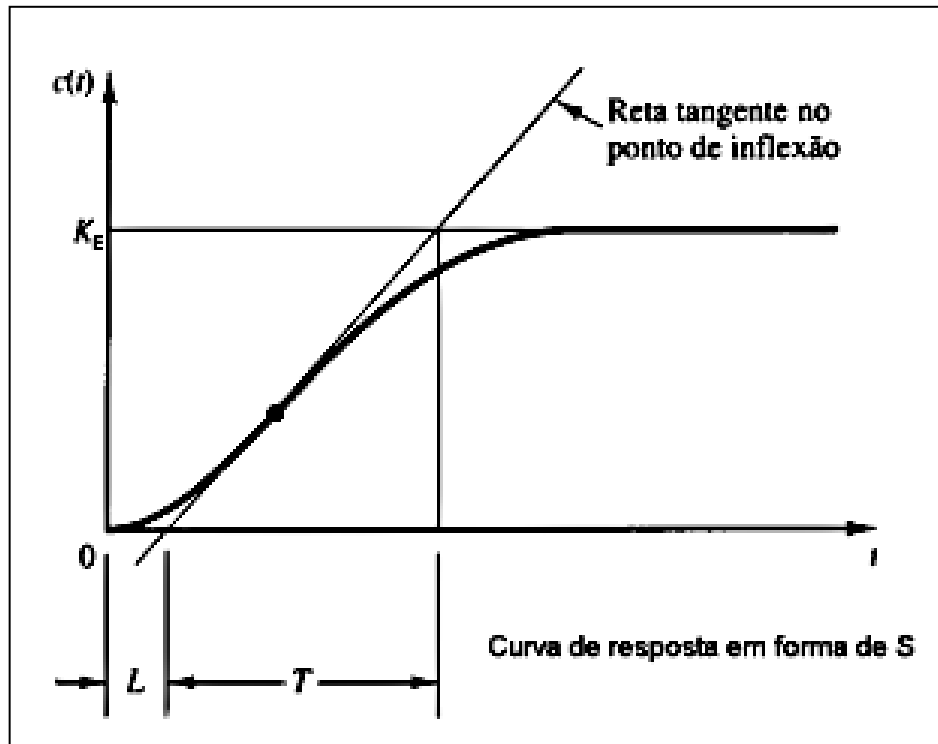


Figura 11 – Curva de resposta ao degrau para método da curva de reação.

Fonte: OGATA, Katsuhiko. (2010, p. 523).

Conforme observado na figura 11, a curva de resposta a entrada degrau apresenta um tempo morto “L” e uma constante de tempo “T” que serão levados em consideração para cálculo dos ganhos K_c , T_i e T_d conforme tabela de fórmulas propostas por Ziegler e Nichols e aparecem na tabela 1.

Controlador	K_c	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9 \times \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \times \frac{T}{L}$	$2 \times L$	$0,5 \times L$

Tabela 1 – Regra de sintonia Ziegler Nichols para método da curva de reação.
Fonte: OGATA, Katsuhiko. (2010, p. 523).

Como resultado da aplicação deste método experimental de sintonia a resposta da planta será um sinal que apresenta um decaimento a 25% na amplitude de pico do sinal oscilatório após um período de oscilação, conforme pode ser visto na figura 12.

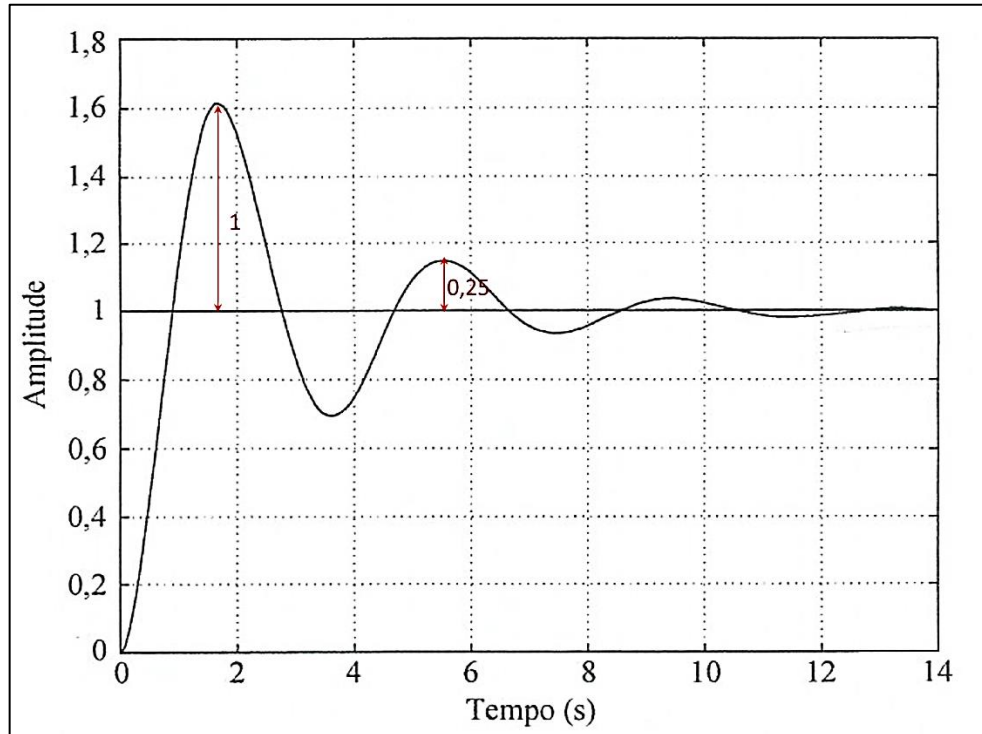


Figura 12 – Decaimento a 25%.

Fonte: Autoria própria.

2.6.2 Método da sensibilidade crítica

Para o método da sensibilidade crítica, Ogata (2010, p. 523) cita alguns passos a serem realizados, sendo eles:

1. Definir valores de $T_i = \infty$ e $T_d = 0$;
2. Com somente o uso da ação proporcional, incrementar o valor de K_c até que o sistema mantenha uma oscilação constante;
3. Tomar nota do valor de K_c que tornou o sistema oscilante é o K_{cr} , ganho crítico para sistema.
4. Anotar P_{cr} que corresponde ao período das oscilações;

A figura 13 apresenta o P_{cr} a ser considerado para o uso do segundo método proposto por Ziegler e Nichols.

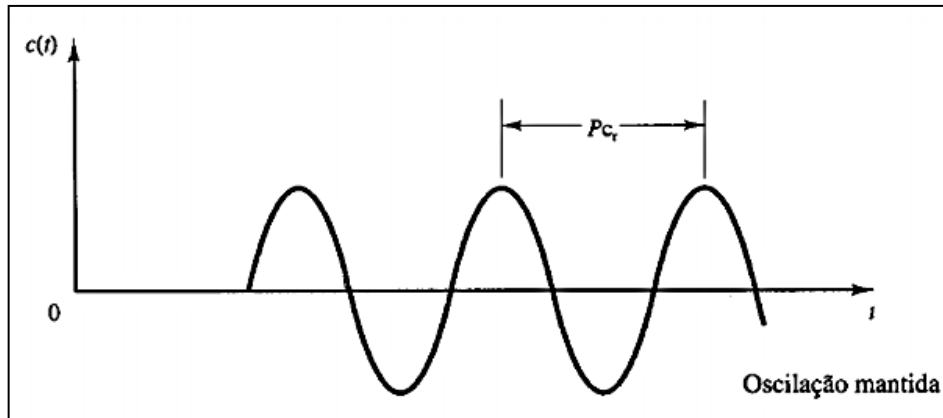


Figura 13 – Período crítico.

Fonte: OGATA, Katsuhiko. (2010, p. 524).

De posse dos valores de K_{cr} e P_{cr} os valores de ajuste de K_c , T_i e T_d podem ser calculados conforme tabela de fórmulas propostas por Ziegler e Nichols que aparecem na tabela 2.

Controlador	K_c	T_i	T_d
P	$0,5 \times K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45 \times K_{cr}$	$\frac{1}{1,2} \times P_{cr}$	0
PID	$0,6 \times K_{cr}$	$0,5 \times P_{cr}$	$0,125 \times P_{cr}$

Tabela 2 – Regra de sintonia por sensibilidade crítica.

Fonte: OGATA, Katsuhiko. (2010, p. 524).

2.7 CONTROLADORES DIGITAIS

Devido aos constantes avanços da tecnologia, cada vez mais recursos eletrônicos e computacionais têm sido empregados nas mais diversas áreas. Na área de controle não é diferente, onde cada vez mais pode-se encontrar desde pequenos controladores digitais até grandes redes de computadores orientados a controle de plantas em substituição aos circuitos analógicos.

Franklin, Powell e Emani-Naeini (2013, p. 170) citam os ganhos em se utilizar controladores digitais, pois estes abrem um enorme leque de opções e possibilidades uma vez que as fórmulas de controle são na realidade códigos de programação a serem executados pelos *hardwares*. Os autores citam também o ganho quanto à praticidade para instalação deste tipo de sistema em oposição ao controle analógico.

Franklin, Powell e Emani-Naeini (2013, p 170) comentam também sobre a principal diferença entre um controlador digital e um controlador analógico. O digital se difere pelo fato que os sinais de controle devem ser amostrados e quantizados, ou seja, em intervalos definidos de tempo o sinal da planta deve ser amostrado e convertido por um conversor analógico digital (conversor A/D), em seguida o sinal deve ser processado e ao final novamente convertido em sinal analógico por um conversor digital analógico (conversor D/A) para assim realizar o controle da planta. A figura 14 traz a representação de com controlador analógico e seu equivalente digital. Nota-se que a ação de controle passa a estar em um bloco entre os conversores A/D e D/A.

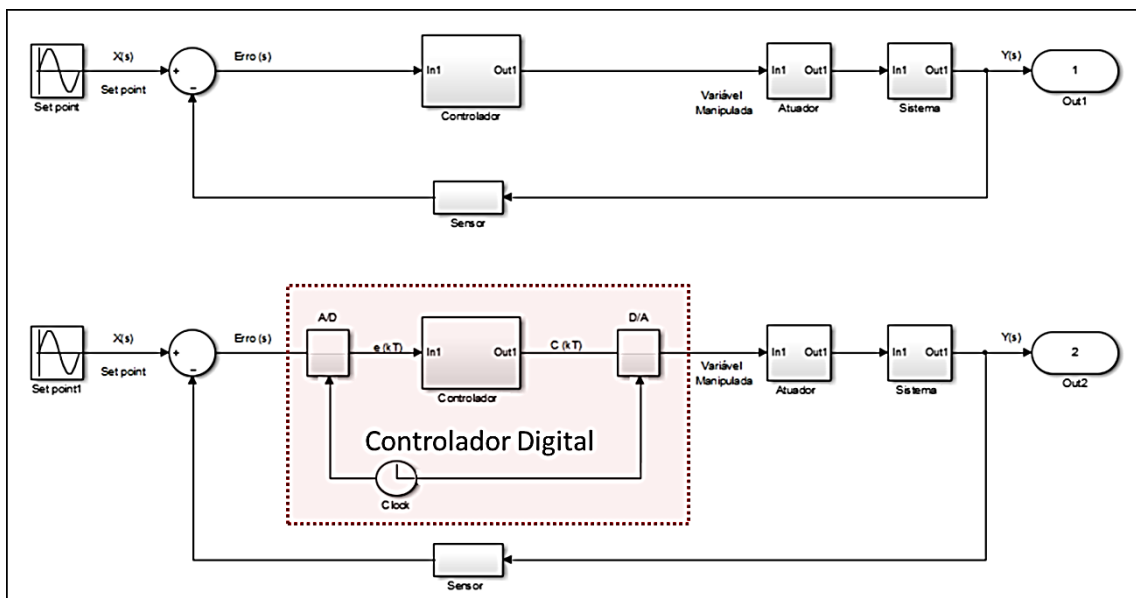


Figura 14 – Comparativo controlador digital.

Fonte: Autoria própria.

Controladores digitais tem seu funcionamento a partir de sinais analógicos discretizados e quantificados. Com isso Franklin, Powell e Emani-Naeini (2013, p. 486) alertam que as taxas de amostragem dos controladores digitais afetam diretamente a resposta do sistema e para que um sistema de controle digital alcance um desempenho igual ou melhor que um controlador analógico é necessário que a velocidade de amostragem do sinal de erro assim como o sinal de saída do controlador seja o suficiente para atender a largura de banda da planta, sendo que neste caso a largura de banda deve ser entendida como todo o sistema de controle em malha fechada.

De maneira prática, Franklin, Powell e Emani-Naeini (2013, p.487) descrevem que sistemas de controle digitais com taxa de amostragem vinte vezes maior que a largura de banda da planta já apresentam resultados de controle semelhantes a sistema de controle analógicos. Já sistemas de controle onde a taxa de amostragem utilizada seja superior a vinte e cinco vezes a largura de banda do sistema tende a ter um desempenho superior a sistemas analógicos.

2.8 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Ao longo deste capítulo foi possível enumerar uma lista de aspectos principais a serem observados para o projeto e sintonia de controladores.

Ainda, a partir do conhecimento prévio sobre o equipamento de teste, que é melhor apresentado no próximo capítulo é possível estabelecer uma relação com a teoria de forma a buscar melhorias no funcionamento do equipamento de teste.

3 CARACTERIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE TESTE

Aplicando o método de trabalho exposto no primeiro capítulo, faz-se necessário apresentar dados e características sobre o equipamento em estudo. Neste capítulo são apresentadas informações relevantes sobre a bancada de teste de sistemas de direção.

Com relação às características do sistema em estudo neste trabalho e a partir das informações expostas no capítulo anterior é possível definir a bancada de teste de sistema de direção como uma planta com as seguintes características:

- O sistema opera diante do controle de dinâmica tradicional;
- O controle utilizado refere-se ao controle de posição;
- As malhas operam com realimentação;
- A operação do sistema ocorre dentro de uma faixa de sistema linear;
- O sistema de teste é do tipo multivariáveis;

3.1 TESTE EM SISTEMA DE DIREÇÃO AUTOMOTIVO

O sistema de direção automotivo é um conjunto de elementos mecânicos que possibilita ao condutor do veículo exercer a ação de dirigibilidade sobre o meio de transporte.

Com relação ao princípio básico de funcionamento do sistema de direção, este pode ser:

- Sistema de direção pinhão e cremalheira;
- Sistema de direção com caixa de esferas recirculantes;
- Sistema de direção com eixo sem fim;
- Sistema de direção *by wire*;

Independente a sua tecnologia, faz-se obrigatório durante a fase de projeto e desenvolvimento de componentes automotivos a realização de testes funcionais de forma a assegurar e comprovar a qualidade técnica do produto, conforme referenciado pela norma ISO/TS 16949. No entanto, antes da realização de testes finais em veículos, diversos testes são realizados em laboratório durante o desenvolvimento do produto, ou seja, em laboratório são recriadas e simuladas condições reais de utilização do item em validação.

No caso dos testes em sistemas de direção, a execução do teste ocorre em um equipamento que simula o uso real do mecanismo de direção como em um veículo. Por exemplo, ao realizar a manobra de estacionamento no veículo, manobra essa também conhecida como baliza, normalmente se faz necessário esterçar o volante em sentido horário ou anti-horário, em um ângulo de aproximadamente 1000° para cada sentido. Ao realizar esse deslocamento da roda, o atrito dos pneus sobre o piso gera uma carga de oposição a este movimento, carga esta que deve ser vencida para estacionar o carro. A figura 15 mostra um exemplo de montagem de um sistema de direção e as forças atuantes no sistema. Observa-se também na figura que o princípio de funcionamento do sistema de direção é composto por pinhão e cremalheira, onde nesta configuração o movimento rotacional gerado no volante pelo condutor é transmitido pelo pinhão à cremalheira, sendo que nesta o movimento rotacional é convertido em linear, possibilitando assim a movimentação do terminal e conseqüentemente das rodas do veículo.

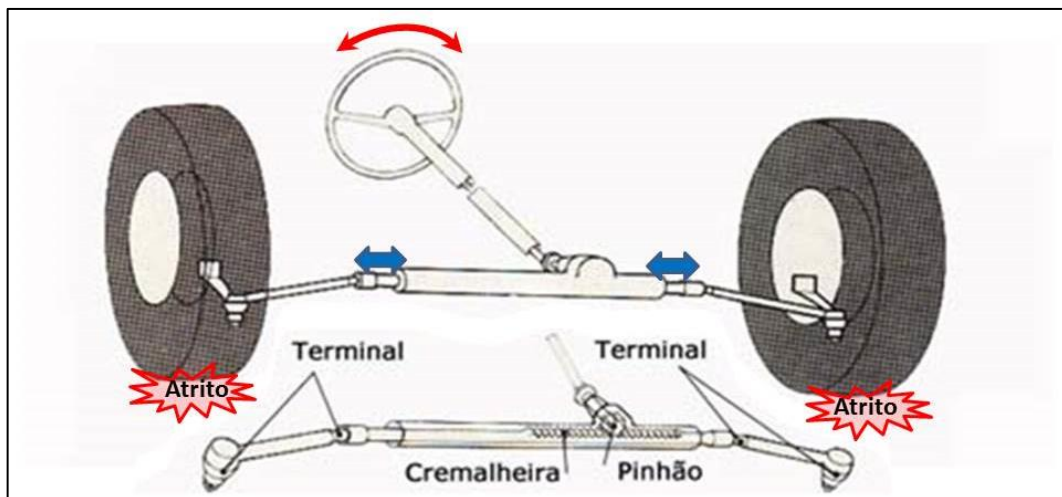


Figura 15 – Exemplo de um sistema de direção.

Fonte: <http://www.oficinaecia.com.br/bibliadocarro/biblia.asp?status=visualizar&cod=144>.

Em suma, o teste de durabilidade em sistemas de direção consiste em realizar algumas centenas de repetições simulando os movimentos de giro do volante e ao mesmo tempo tendo a aplicação de carga como a realizada pelos pneus sobre o mecanismo de direção avaliado. Assim, é possível trazer para um ambiente de laboratório a avaliação em bancada do comportamento das amostras e conseqüentemente realizar a análise referente ao desgaste das mesmas.

Para a realização dos testes de durabilidade em sistemas de direção, não somente a simulação dos movimentos e cargas são aplicados no mecanismo a ser

testado, mas também a fixação da peça a ser avaliada é replicada no banco de ensaios como se o sistema de direção estivesse montado no veículo. Desta forma a montagem da amostra na bancada de teste para execução do ensaio ocorre conforme as seguintes etapas:

1. Primeiramente, o corpo do sistema de direção é fixado em um dispositivo sobre o banco de ensaio;
2. Os terminais da peça são fixados nos braços articulados da bancada de teste. Estes braços são os elementos de ligação entre os servoatuadores, também denominados de atuadores lineares, à amostra em teste;
3. Um motor hidráulico é conectado ao eixo de entrada da amostra a ser avaliada de forma a gerar o movimento sobre o conjunto.

A figura 16 mostra a montagem do sistema de direção na bancada de teste de durabilidade. Pela figura é possível observar os atuadores lineares que na realização do teste geram a força de restrição “FR”, força essa de oposição ao movimento, enquanto o motor “M” gera uma amplitude de movimento “ α ” sobre o mecanismo testado.

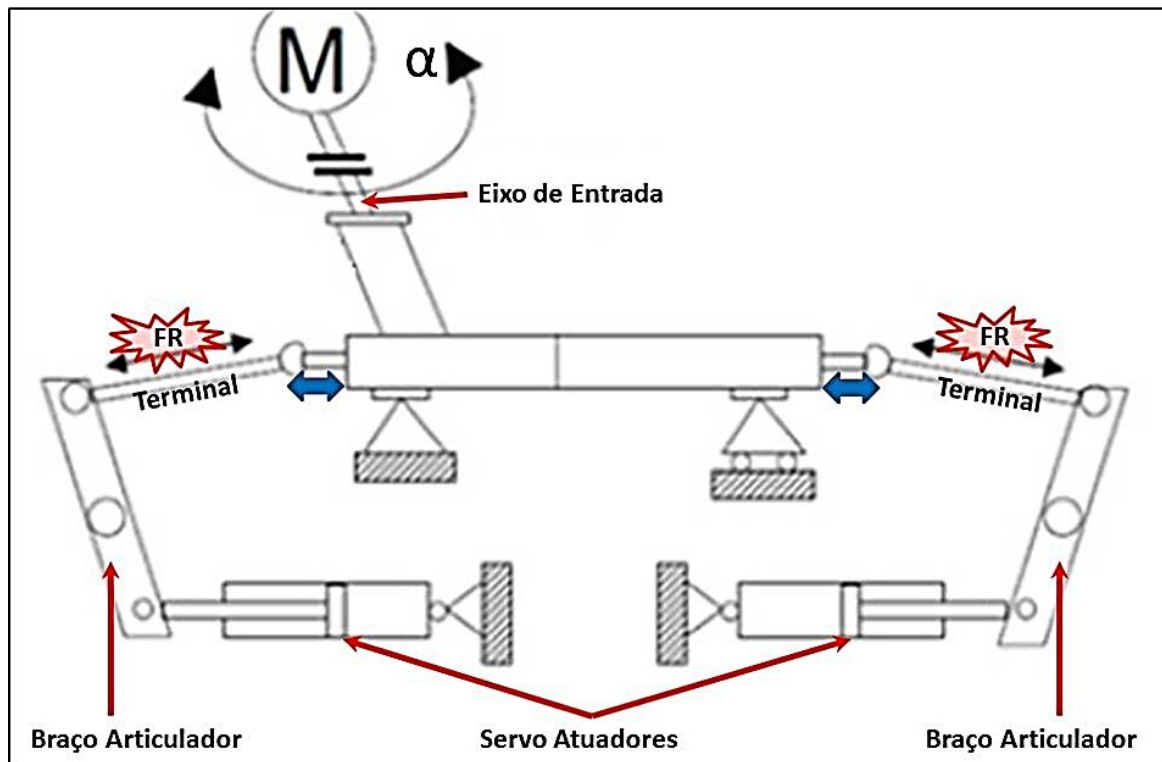


Figura 16 – Montagem do sistema de direção na bancada de teste.

Fonte: Autoria própria.

3.2 BANCADA DE TESTE DE SISTEMA DE DIREÇÃO

A bancada de teste, que é o foco de estudo neste trabalho, é um equipamento constituído basicamente a partir de servossistemas hidráulicos, sensores e sistema de controle, dos quais resultam em um ciclo de controle em malha fechada para operação do equipamento. A figura 17 mostra o esquema geral do ciclo de controle do equipamento durante a execução de teste.

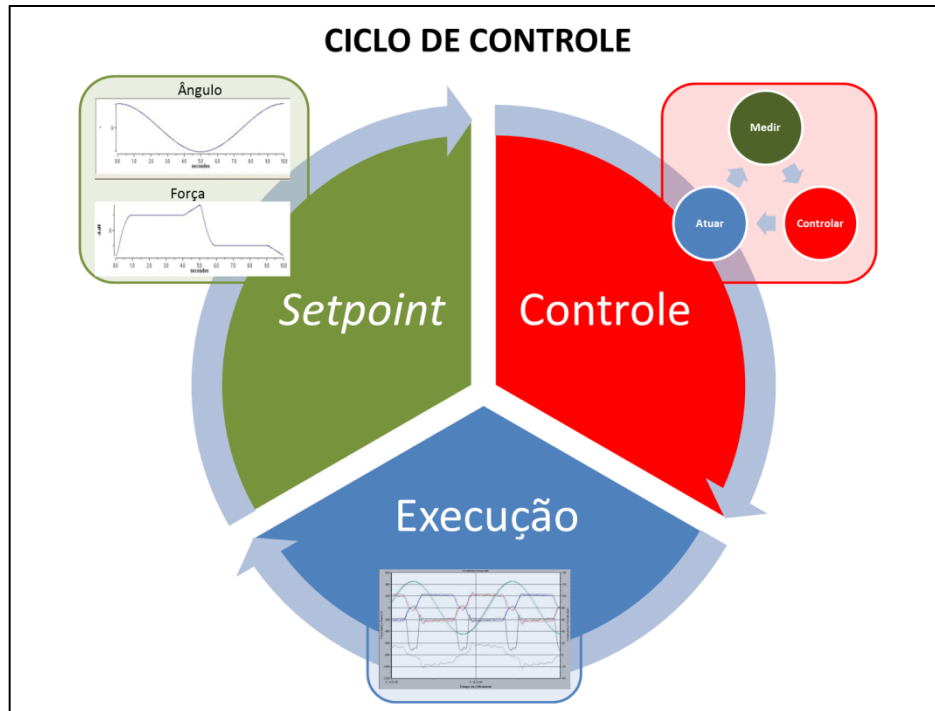


Figura 17 – Ciclo de controle do equipamento.

Fonte: Autoria própria.

De forma a buscar um bom entendimento sobre as características do equipamento de teste, o funcionamento da bancada será explicado dentro dos tópicos indicados pelo ciclo de controle.

3.2.1 Setpoint

Conforme indicado por Ogata (2013, p. 2), dentro de uma malha de controle há variáveis básicas para que o sistema seja operado, sendo elas:

1. Variável controlada, sendo essa o resultado final da ação de controle do sistema;

2. Variável manipulada, sendo essa a variável a ser modificada de modo que a variável controlada se aproxime do valor desejado, valor este conhecido como *setpoint*.

Para a bancada de teste de sistemas de direção há três variáveis de controle:

1. Ângulo de entrada;
2. Força do atuador do lado direito;
3. Força do atuador do lado esquerdo;

No entanto a principal variável destas, para execução dos testes, é o ângulo de entrada, pois esta será a variável que irá ditar a velocidade de execução dos ciclos de teste.

De maneira prática, um ciclo de teste consiste em mover a direção de uma extremidade à outra de todo o seu curso útil e retornar à posição inicial. Ou seja, para deslocar todo o curso possível de um mecanismo de direção é necessário girar o volante por aproximadamente 1000° no sentido horário e posteriormente girá-lo novamente mais 1000° no sentido anti-horário para retornar a posição inicial. Todo esse movimento de ida e volta deve ocorrer dentro de um determinado intervalo de tempo. Como exemplo, a figura 18 mostra uma curva de *setpoint* de ângulo, onde os valores angulares iniciam em 531° seguindo até -531° e retornando posteriormente ao valor inicial de 531° . Ainda, é possível observar que todo esse movimento de giro do volante é realizado em um período de 8 segundos. No entanto, é observado também que durante os instantes de 3 e 7 segundos os valores de *setpoint* ficam mantidos os mesmos pelo período de 1 segundo.

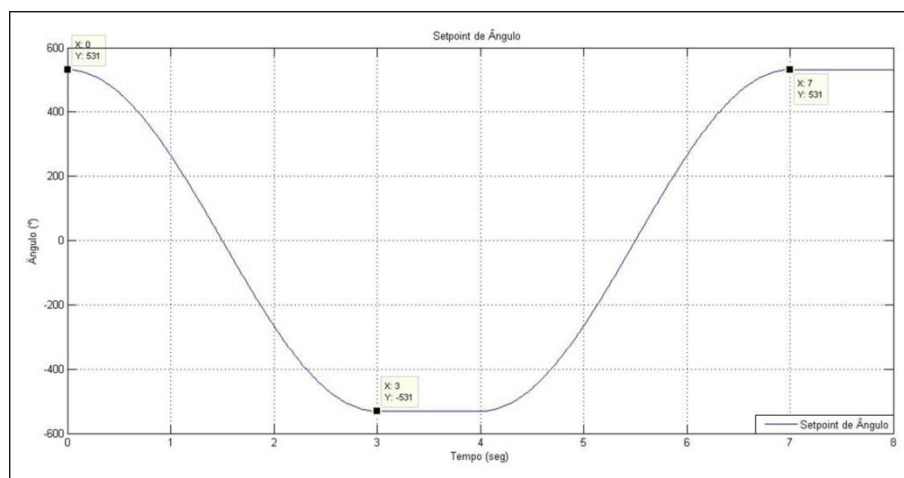


Figura 18 – Setpoint de ângulo para teste de direção automotiva.

Fonte: Autoria própria.

Como observado na figura 18, o valor de *setpoint* para a variável de controle ângulo sofre variação ao longo do tempo. O mesmo fato ocorre com as outras duas variáveis de controle de força do atuador direito e esquerdo, como pode ser observado na figura 19, assim nota-se que em ao longo do tempo o valor de *setpoint* da carga varia.

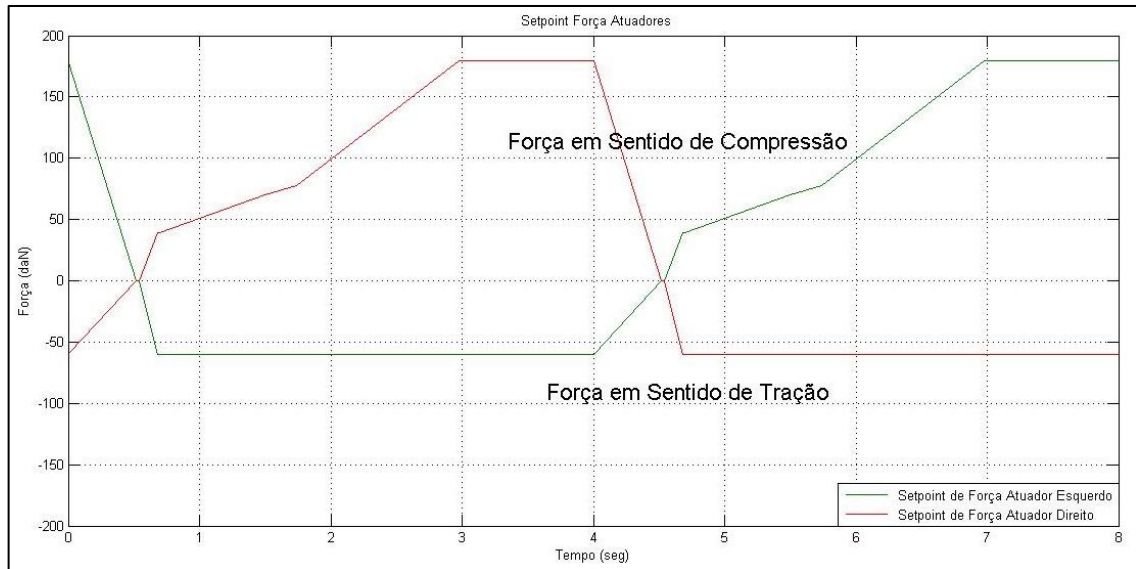


Figura 19 – Setpoint de força.

Fonte: Autoria própria.

Observando o tempo de ciclo na figura 18 e na figura 19, fica claro que o tempo de execução de ambas as curvas de *setpoint* é o mesmo, isso porque a curva de *setpoint* para o ângulo é a referência em relação à velocidade de execução do teste, e todas as demais etapas de execução do ensaio devem seguir esse tempo de ciclo, pré definido pelo *setpoint* de ângulo. Outro fator que obriga as cargas terem o mesmo tempo de ciclo da curva de ângulo é o fato da necessidade de haver um casamento entre o deslocamento linear da cremalheira e a aplicação das forças sobre a mesma.

A figura 20 mostra o casamento das curvas de ângulo e força dos dois atuadores. Observa-se que em determinados momentos os valores de carga têm o valor de *setpoint* levado a valores positivos, negativos e a zero. Isso é devido ao fato da cremalheira no sistema de direção estar em constante movimento linear da direita para esquerda e vice-versa, com isso os atuadores devem compor suas forças de tração e compressão, sobre o sistema de direção, de forma a gerar uma única força resultante de oposição ao movimento a ser vencida pelo sistema durante a execução do teste. Nesta figura 20 os tempos de ciclo das curvas de referência de

força seguem os mesmos tempos de ciclo de ângulo que neste caso é de oito segundos.

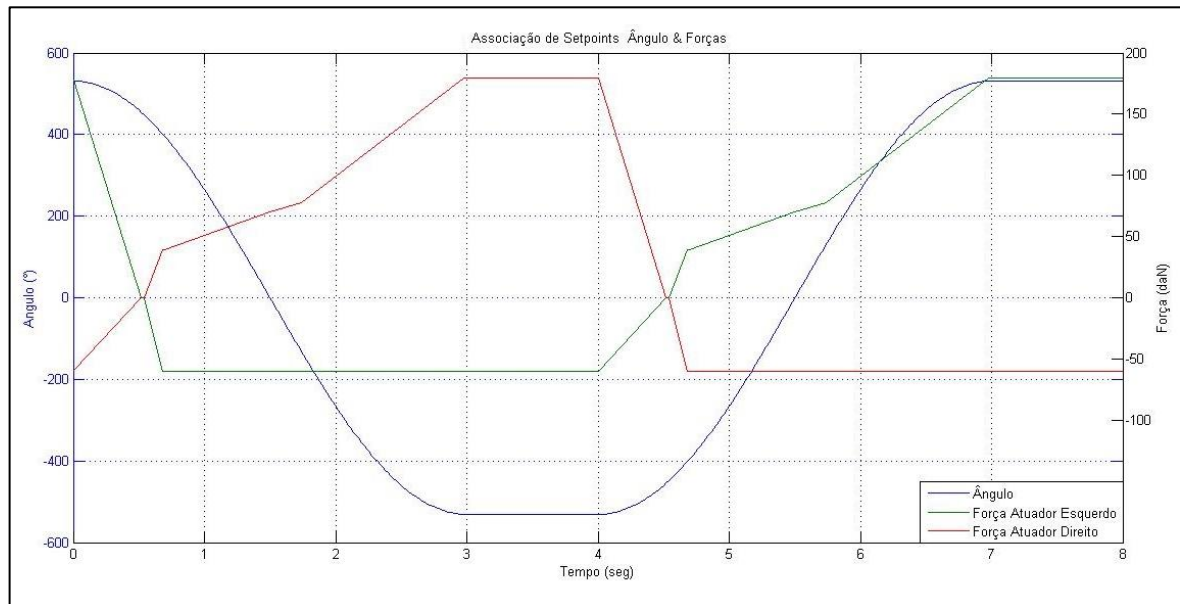


Figura 20 – Casamento das curvas de *setpoint*.

Fonte: Autoria própria.

As curvas de ângulo e força têm suas formas criadas no próprio *software* de controle tomando como base as especificações requeridas pelas normas de teste, principalmente quanto à amplitude do sinal e também o tempo de execução do ciclo.

3.2.2 Controle

Como apontado por Castrucci, Bittar e Sales (2011, p.1) controlar uma planta significa garantir que as variáveis do processo seguirão os valores definidos por um *setpoint*. Para que isso ocorra, a ação de controle deve possuir as etapas de medição, processamento e atuação.

Na bancada de testes, as ações de controle são realizadas por meio de um *software* destinado a essa aplicação de banco de ensaios de testes automotivos.

Agora serão apresentadas as principais características da bancada de teste de sistemas de direção com relação à etapa de controle.

Para ser possível controlar um processo é imprescindível realizar medições sobre a variável controlada, como comentado por Castrucci, Bittar e Sales. Para isso sensores são empregados ao processo.

No entanto, para haver a correta leitura da informação pelo controlador, o simples fato de medir uma grandeza física requer a execução de alguns passos, sendo eles:

1. Medir;
2. Condicionar;
3. Transmitir.

A ação de medir uma grandeza é realizada por um sensor, o qual converte a informação lida para outra forma de informação que possa ser interpretada por um observador. Dentro da aplicação que está sendo estudada, os sensores existentes convertem as leituras de torque, ângulo e força em sinais elétricos.

A figura 21 mostra a disposição dos sensores montados na bancada de teste, observa-se que os sensores de força estão ligados aos atuadores lineares enquanto o sensor de ângulo e torque está conectado ao eixo de entrada do sistema.

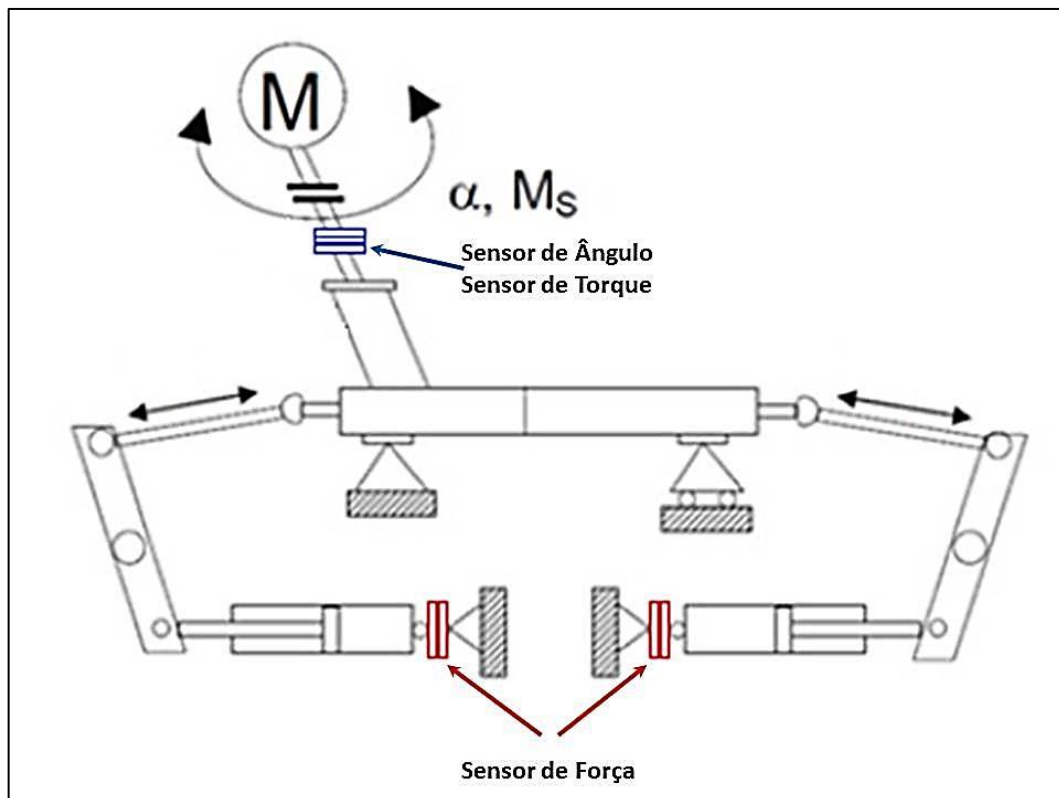


Figura 21 – Disposição dos sensores.

Fonte: Autoria própria.

Quanto ao princípio físico de medição dos sensores utilizados no equipamento de teste, todos os sensores realizam suas medições por meio de

variações de resistência de elementos ativos. No entanto, para o sensor de ângulo, a leitura ocorre devido à variação de resistência de um potenciômetro. Já para os sensores de torque e força, estes em sua construção são constituídos de *strain gages* montados na disposição de ponte completa de *Wheatstone*.

Com relação à etapa de condicionamento do sinal enviado pelo sensor, esta se faz necessária devido ao valor do sinal elétrico transmitido pelos sensores ser de apenas alguns milivolts. Desta forma, a função do condicionador do sinal é filtrar e amplificar o sinal lido do sensor e disponibilizá-lo para transmissão em um padrão que possa ser interpretado pelo controlador.

Para a aplicação em estudo, o condicionador instalado na bancada de teste realiza a leitura do sinal em mV fornecida pelo sensor e amplifica o sinal elétrico para uma faixa de tensão de -10 V a + 10 V, ou seja, o sinal que será transmitido ao controlador continua sendo um sinal contínuo.

Já quanto à execução do controle propriamente dito, a bancada de testes de sistemas de direção dispõe de *software* de controle chamado “Marathon”, sendo este fabricado por um desenvolvedor francês de sistemas de teste chamado “Sysma” (2015).

Este *software* é executado a partir de um computador dotado de placas de aquisição e comando, as quais realizam a comunicação com os sistemas de medição de atuação.

Para cada modelo de sistema de direção a ser testado, há um específico programa de teste que é executado para realização do ensaio.

A criação e configuração destas rotinas de testes seguem basicamente as etapas do ciclo de controle que foi ilustrado anteriormente na figura 17, sendo elas:

1. Medir;
2. Definição de *setpoint* ou referência;
3. Atuação.

A figura 22 apresenta a estruturação destas três etapas dentro da rotina de teste, assim como a indicação das duas classes de controle presentes nesta mesma rotina de ensaio em sistemas de direção. O controle contínuo é aplicado para o controle das malhas de ângulo e força dos atuadores, já o controle discreto é aplicado no controle de sistemas periféricos e alarmes de segurança durante a execução dos testes.

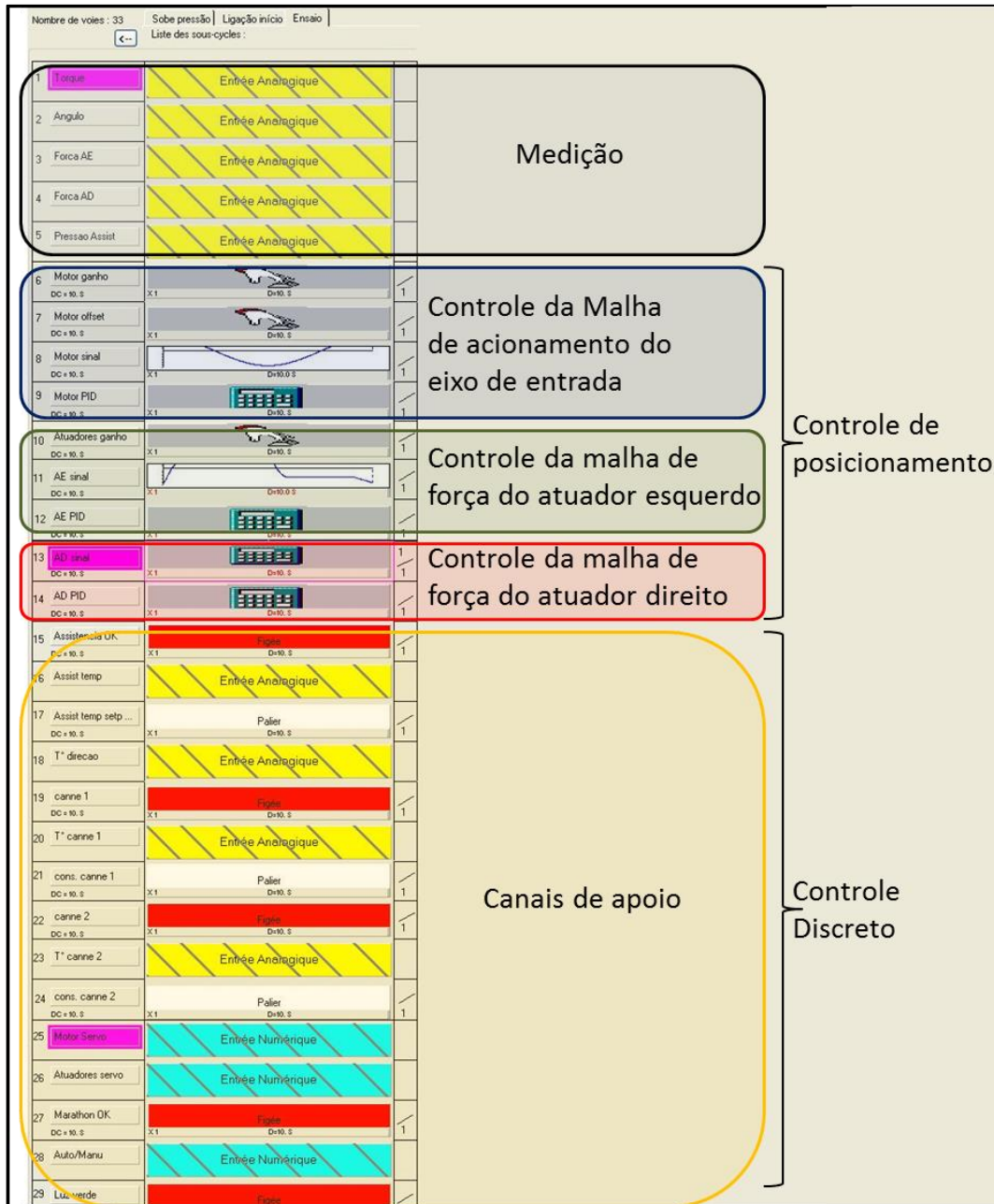


Figura 22 – Estrutura do programa de teste.

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que na figura 22 são apresentados três canais de ação PID, sendo eles:

1. Motor PID: controle da malha de acionamento do eixo de entrada;
2. AE PID: controle da malha de força do atuador esquerdo;
3. ED PID: controle da malha de força do atuador direito.

Durante a execução do teste há três malhas de controle que são executadas simultaneamente.

Uma vez definida essa sequência de etapas que compõem um ciclo de teste é possível estabelecer o número de repetições que serão executadas. A figura 23 apresenta esta configuração de números de repetições dos ciclos.

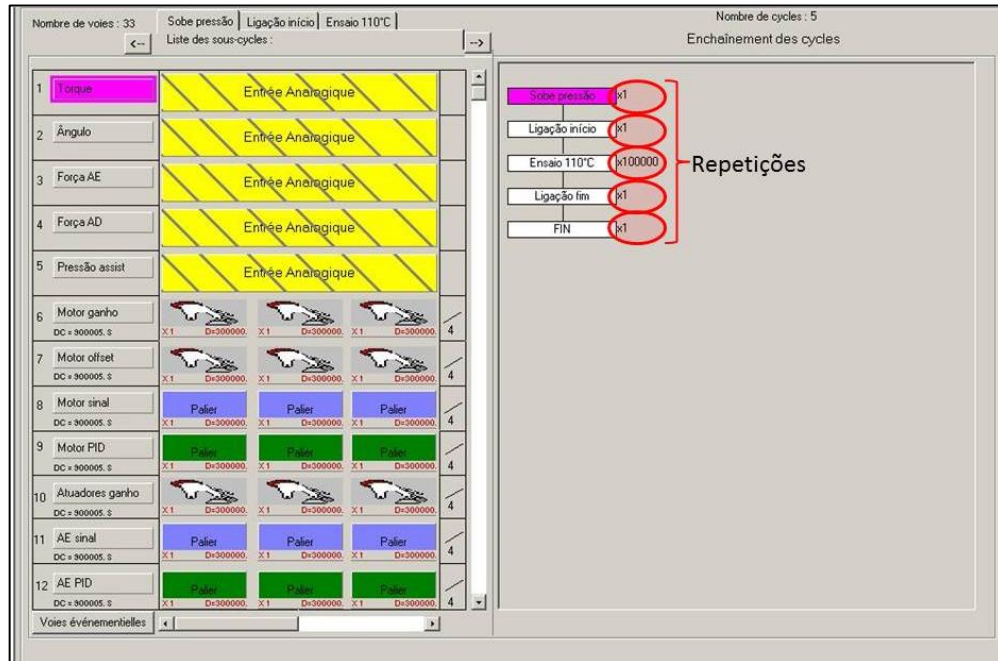


Figura 23 – Repetição de ciclos.

Fonte: Autoria própria.

Quanto à cumprimento dos ciclos de teste, o *software* de controle obedece à lógica de ciclo de varredura de execução semelhante ao ciclo de execução de controladores lógicos programáveis, ou seja, a sequência de etapas dos ciclos varredura são realizadas com um determinismo. A figura 24 mostra o esquema de execução do ciclo de varredura executado pelo *software* de controle da bancada de teste de sistema de direção.

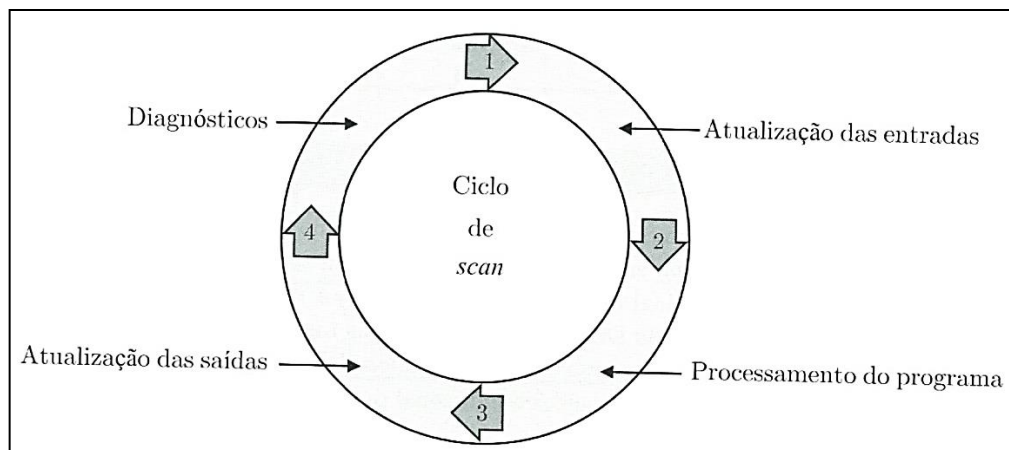


Figura 24 – Execução do ciclo de varredura.

Fonte: CASTRUCCI, Plínio de L.; BITTAR, Anselmo ; SALES, Roberto M.

Quanto a taxa de amostragem do sistema, esta pode ser ajustada no *software* de controle, ou seja, é possível configurar com qual taxa de execução o amostragem do sistema será realizada. A figura 25 demonstra o campo onde é possível ajustar a frequência de execução dos ciclos de amostragem do sistema.

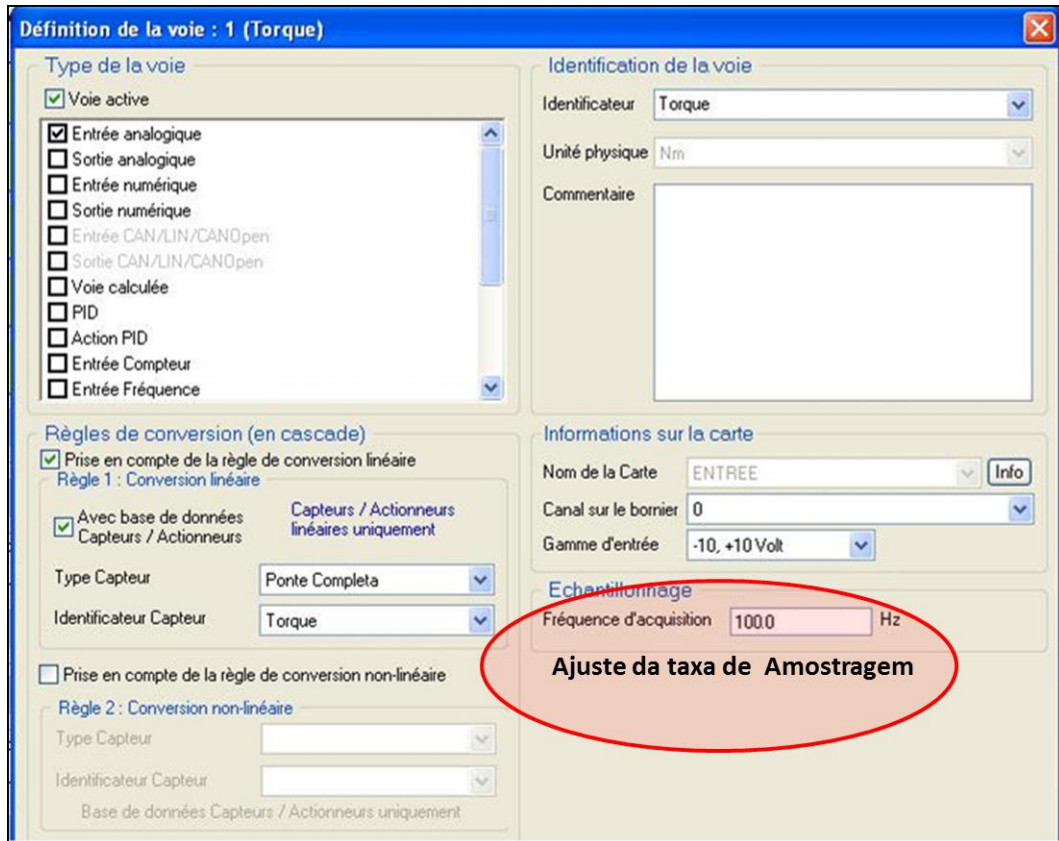


Figura 25 – Ajuste do ciclo de varredura.

Fonte: Autoria própria.

Quanto ao controlador PID disponível no sistema para controle das malhas, o mesmo apresenta a equação (11).

$$\text{Sinal de comando} = (G_p \times \text{erro}) + \left(\frac{\text{erro} \times t}{T_i} \right) + \left(\frac{T_d \times \text{erro}}{t} \right) \quad 11$$

Onde:

G_p = ganho proporcional;

Erro = diferença entre sinal de referência e sinal lido;

T_i = tempo da ação integral, em segundos;

T_d = tempo da ação derivativa, em segundos;

t = tempo de execução, em segundos.

Demais opções de ajustes podem ser configuradas no controlador PID, como por exemplo, *anti-windup*, ação direta ou inversa. A figura 26 apresenta a tela de configuração do controlador PID.

Figura 26 – Controlador PID.

Fonte: Autoria própria.

Apesar do *software* de controle apresentar um controlador PID nativo ao sistema, é possível configurar um novo controlador digital no programa de teste a partir da definição de um canal de cálculo.

Ainda na rotina de teste, há canais de apoio que são utilizados para realização de funções de ligar e desligar subsistemas, enviar informações de *setpoints* para controladores externos e ainda leitura de sinais digitais para auxiliar o inter-travamento da bancada de teste com seus periféricos, como por exemplo, centrais hidráulicas.

De forma a fechar o ciclo de controle, uma vez realizada a medição do sinal a ser controlado e executado o algoritmo de controle, a ação final será a atuação sobre o controle de posição.

Para isso, os sinais das variáveis manipuladas agem sobre servoatuadores hidráulicos de forma a terem o acionamento esperado e levar as variáveis controladas aos valores de referência durante o teste.

Os sinais de controle transmitidos aos servoatuadores são sinais de controle operados em 4 a 20 mA, sendo que estes tem maior imunidade a interferências externas.

Os conjuntos de servoatuadores que compõem a bancada de teste de sistemas de direção são dois atuadores hidráulicos lineares e um motor hidráulico e estes são pilotados cada um por uma servoválvulas.

As principais características dos sistemas de atuação do equipamento de teste são apresentadas a seguir.

Conforme apresentado por Silva (1989, p.399), atuador hidráulico linear é um elemento que tem a sua função a partir da variação de volume de fluido em sua ou suas câmaras e também pela variação de pressão no sistema. O que difere quanto ao número de câmaras é o fato do cilindro ser ou não para aplicações simétricas, como é o caso da bancada de teste de sistemas de direção, pois para execução dos testes o comportamento do sistema deve ser o mesmo tanto para movimentos de tração quanto de compressão e por isso o atuador hidráulico utilizado é o cilindro hidráulico de haste passante ou também denominado de dupla ação. A figura 27 apresenta o esquema de um atuador hidráulico linear de dupla ação.

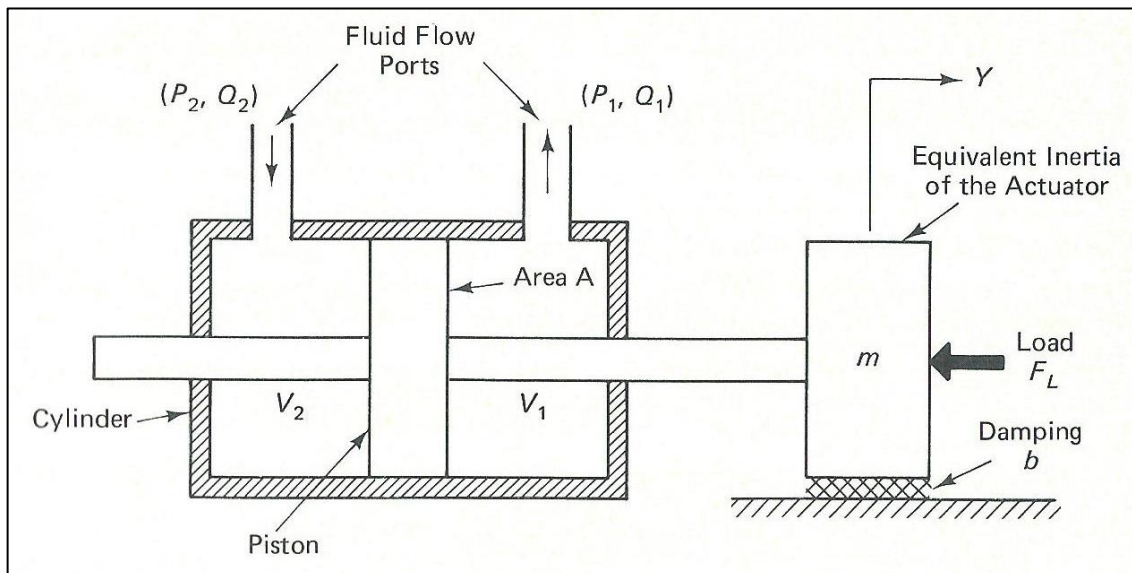


Figura 27 – Esquema atuador hidráulico linear de dupla ação.

Fonte: DE SILVA, Clarence W. (1989, p. 399).

O motor hidráulico, também descrito como atuador hidráulico rotacional, por Silva (1989, p.398) é um elemento que, a partir do movimento linear de seus pistões sobre uma pista disposta sobre uma determinada inclinação, realiza o giro do rotor produzindo assim o movimento angular e torque sobre o sistema. De maneira geral, um motor hidráulico é um elemento composto por pequenos atuadores hidráulico lineares, obedecendo assim também os princípios de variação de pressão e volume de um fluido nas câmaras. A figura 28 apresenta o esquema interno de um motor hidráulico.

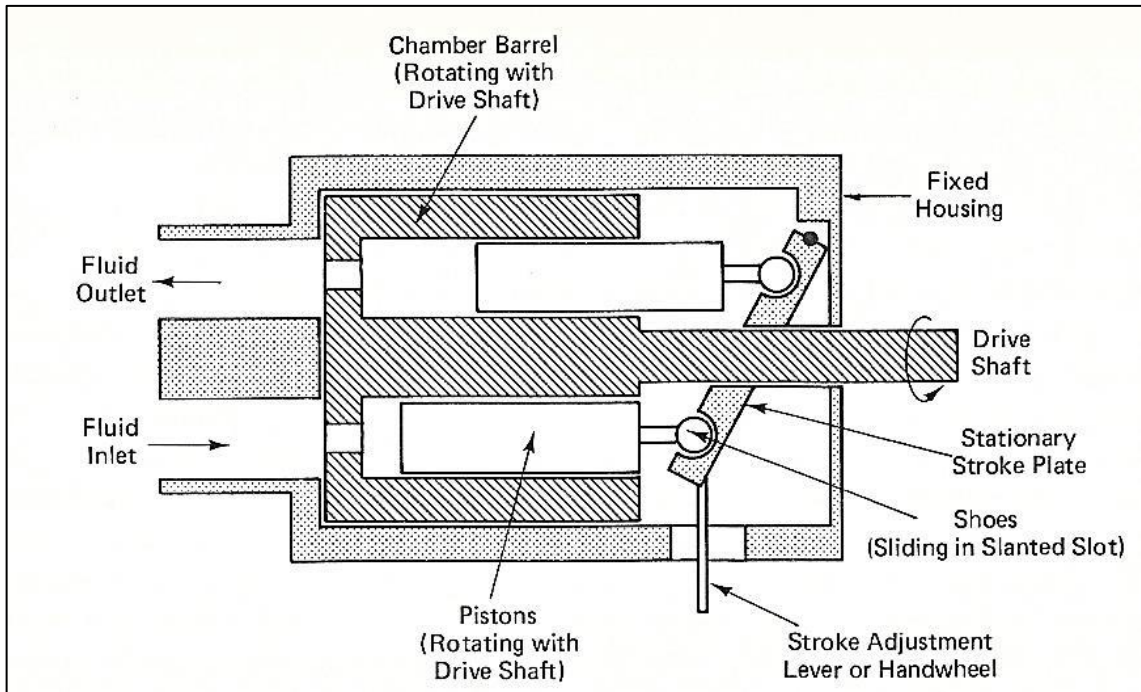


Figura 28 – Esquema motor hidráulico.

Fonte: DE SILVA, Clarence W. (1989, p. 388).

Para utilização de sistemas hidráulicos, as servoválvulas são componentes indispensáveis para realização da automação do sistema. Isso porque, conforme Silva (1989, p.394), as servoválvulas realizam basicamente três tarefas no sistema, sendo elas:

1. Controlar o sentido do fluxo do fluido;
2. Controlar a taxa de vazão do fluido;
3. Controlar a pressão do fluido.

O autor ainda comenta que as servoválvulas são classificadas quanto ao número de passagem de fluido, sendo que para a aplicação utilizada na bancada de teste de sistema de direção, as servoválvulas utilizadas para controle dos três atuadores são servoválvulas de quatro vias que apresentam a seguinte distribuição das passagens de fluido:

- Entrada de pressão;
- Retorno ao tanque;
- Ligação à câmara P1 dos atuadores;
- Ligação à câmara P2 dos atuadores.

O funcionamento da servoválvula se dá por meio da ação de um sistema interno denominado de “motor de torque”. Este é o dispositivo que converte o sinal elétrico recebido pela servoválvula em posição física do carretel, o qual irá direcionar

a passagem do fluido para uma determinada via. A figura 29 apresenta o esquema simplificado de uma servoválvula quatro vias.

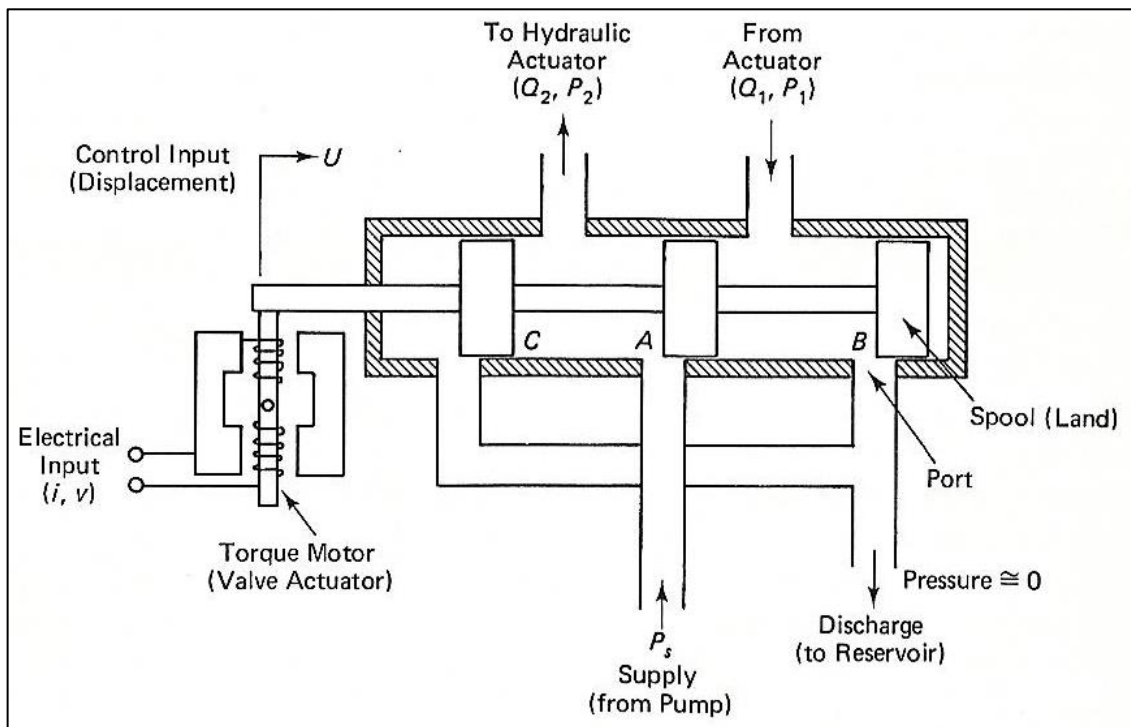


Figura 29 – Esquema servoválvula.

Fonte: DE SILVA, Clarence W. (1989, p. 394).

3.2.3 Execução

Dentro do ciclo de controle, apresentado na figura 17, uma vez realizada a etapa de *setpoint* e controle, o fechamento do ciclo se dá com a execução das ações de controle. Porém, nesta fase, há alguns pontos relevantes que influenciam toda a malha de controle de posição, sendo eles:

1. Tempo de execução do ciclo de teste;
2. Distúrbio por folgas mecânicas;
3. Distúrbio por acoplamento.

Uma breve explicação sobre estes pontos é realizada a seguir.

Com relação ao tempo de ciclo para execução dos testes, já no processo de ajuste da bancada de teste é observado que este item interfere na resposta de controle sobre a variável controlada. Como exemplo, pode ser verificado na figura 30 o comparativo entre testes com tempos de ciclos diferentes. Observa-se que no teste com tempo de ciclo de apenas 4 segundos há perturbações na malha de

controle de carga, enquanto no teste com tempo de ciclo de 10 segundos a ação de controle ocorre de forma mais adequada.

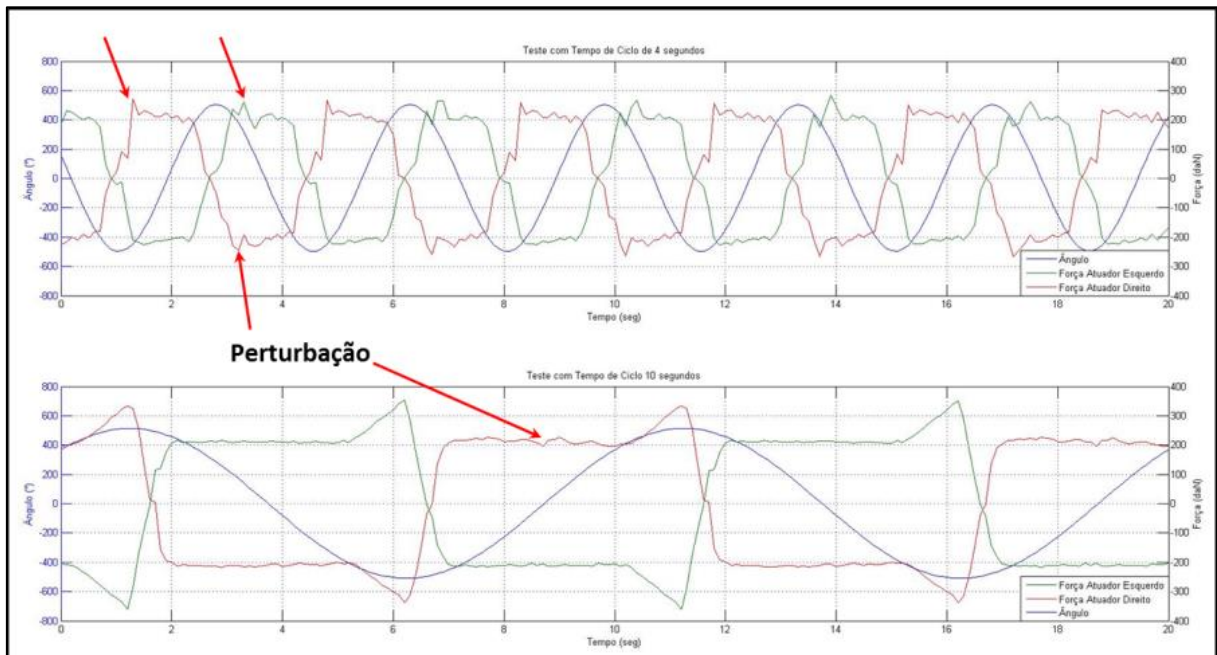


Figura 30 – Comparativo tempo de ciclo.

Fonte: Autoria própria.

Desta maneira, notasse que à realização dos testes, quanto menor o tempo de execução de um ciclo de teste, maior deve ser a velocidade de resposta do controlador de forma a garantir a ação de controle de forma adequada, no entanto uma investigação mais detalhada sobre o fenômeno deve ser realizada.

Já com relação ao distúrbio por falhas mecânicas, é observado que falhas na montagem do sistema de direção sobre a bancada de teste que acabam resultando em folgas mecânicas e há ainda folgas provenientes da própria bancada de teste devido ao desgaste de seus componentes. Essas folgas geram erros na execução de teste ocasionando grandes perturbações sobre a variável controlada.

Castrucci, Bittar e Sales (2011, p. 339) descrevem este tipo de situação em sistemas de controle de posição por *backlash*. A figura 31 mostra um exemplo de falha gerada por folgas mecânicas no sistema.

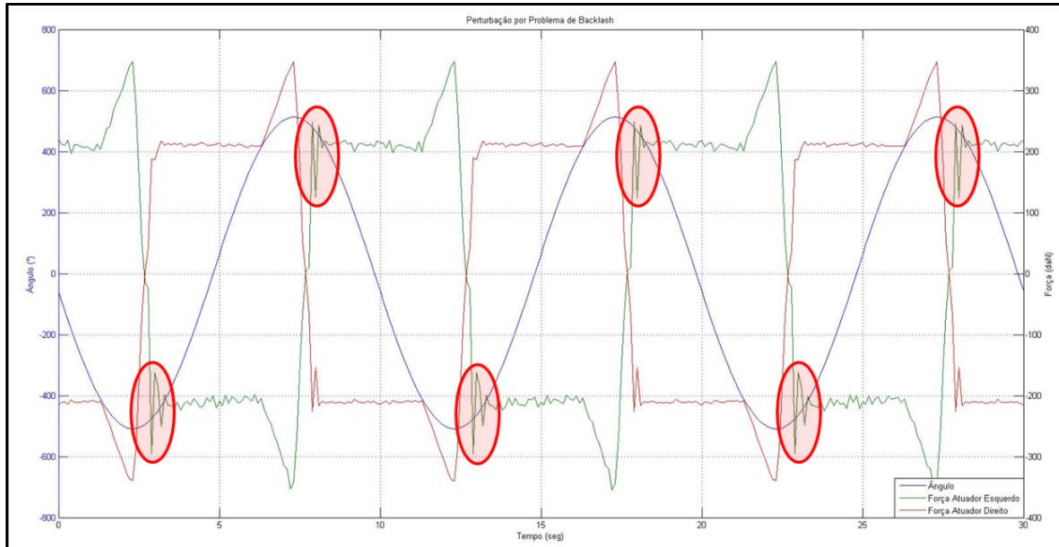


Figura 31 – Perturbação gerada por folga mecânica no sistema.

Fonte: Autoria própria.

Por fim, com relação aos distúrbios por acoplamento, uma vez que o sistema de teste é completamente engastado e durante a execução do teste há a ação de três atuadores sobre a amostra testada, um atuador fica sujeito a ação dos demais e vice-versa.

Conforme apresentado por Yoran Korem (1980, p. 1) este tipo de distúrbio é conhecido *cross-coupling*, onde no estudo apresentado, o autor relata sobre a influência do acoplamento entre eixos e o correto posicionamento em um sistema de coordenadas em equipamentos de manufatura.

A figura 24 demonstra este tipo de situação onde a ação de um atuador reflete sobre a resposta de outra malha de controle.

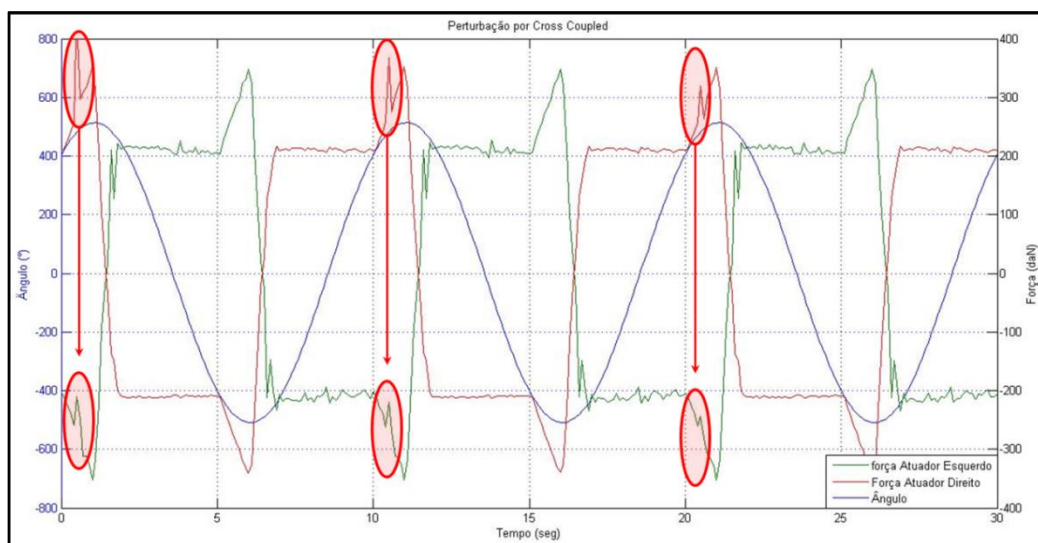


Figura 32 – Perturbação ocorrida devido *cross-coupling*.

Fonte: Autoria própria.

3.3 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Por meio de uma análise mais detalhada do equipamento de teste, assim como do *software* de controle foi possível identificar pontos importantes aos quais podem ser realizadas pesquisas para embasamento teórico e assim possibilitar um melhor uso da ferramenta de teste.

4 RESULTADOS PRÁTICOS

Diante das informações apresentadas nos capítulos anteriores, foram realizados experimentos para avaliar a condição atual de funcionamento do sistema, assim como promover melhorias no mesmo.

4.1 TEMPO DE RESPOSTA

A partir de medições realizadas na bancada de teste de sistemas de direção, onde foram coletados os sinais de controle e medição de força dos atuadores esquerdo e direito foi possível medir o tempo de resposta do sistema, como pode ser observado na figura 33. Na figura indicada, os dois gráficos superiores mostram os conjuntos de sinais de controle e medição da resposta dos atuadores, que neste caso é o sinal de força para os atuadores hidráulicos esquerdo e direito. Já os quatro gráficos na parte inferior da figura mostram, de forma ampliada, a defasagem entre o sinal de controle e a resposta do sistema.

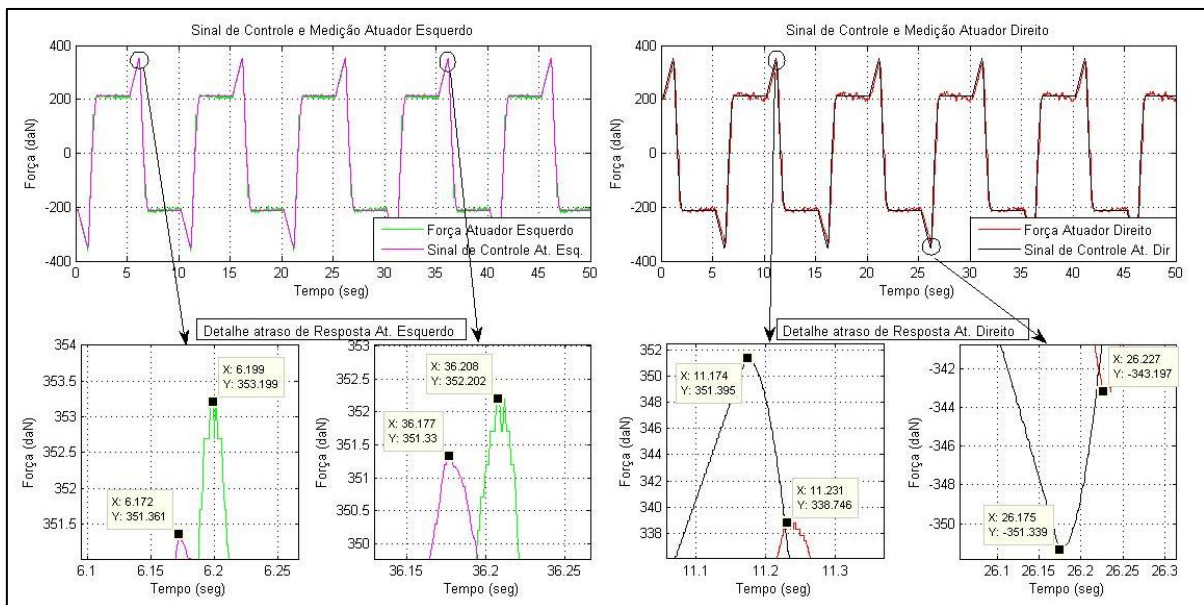


Figura 33 – Tempo de resposta.

Fonte: Autoria própria.

A partir da informação extraída nos gráficos da figura 33, pode-se obter o tempo de resposta para as duas malhas de controle:

- Malha de controle atuador esquerdo.
 1. Medição 1 = *tempo sinal força – tempo controle*
 $= 6,199 - 6,172$
 $= 0,027 \text{ s}$
 2. Medição 2 = *tempo sinal força – tempo controle*
 $= 36,208 - 36,177$
 $= 0,031 \text{ s}$

A partir da média aritmética dos resultados obtidos, é possível afirmar que o tempo de resposta da malha de controle do atuador de força esquerdo é aproximadamente 0,029 segundos.

- Malha de controle atuador direito.
 1. Medição 1 = *tempo sinal força – tempo controle*
 $= 11,231 - 11,174$
 $= 0,057 \text{ s}$
 2. Medição 2 = *tempo sinal força – tempo controle*
 $= 26,227 - 26,175$
 $= 0,052 \text{ s}$

A partir da média aritmética dos resultados obtidos é possível afirmar que o tempo de resposta da malha de controle do atuador de força direito é aproximadamente 0,055 segundos.

Os valores adquiridos a partir da medição do tempo de resposta do sistema servem para determinar a mínima frequência de aquisição e controle a ser configurada no sistema.

4.2 TAXA DE AMOSTRAGEM

Para que controladores digitais apresentem o mesmo nível de desempenho que controladores analógicos a taxa de amostragem do sistema deve ser pelo menos vinte vezes a largura de banda do sistema. Com isso, a partir dos valores de tempo de resposta obtidos por medições na bancada de teste, é possível determinar quais devem ser as menores taxas de amostragem a serem configuradas no banco de ensaios de modo a ter um bom funcionamento do equipamento.

As taxas de amostragem são calculadas conforme seguem:

- Malha de controle atuador esquerdo.

$$\text{Taxa de amostragem} = 20 \times \text{Largura de banda}$$

$$\text{Taxa de amostragem} = 20 \times (1/\text{tempo de resposta})$$

$$\text{Taxa de amostragem} = 20 \times (1/0,029)$$

$$\text{Taxa de amostragem} = 20 \times (34,5)$$

$$\text{Taxa de amostragem} = 690 \text{ Hz}$$

A partir dos resultados obtidos é possível afirmar que para o sistema apresentar um bom desempenho a taxa de amostra deve ser superior a 690 Hz para malha de controle do atuador esquerdo.

- Malha de controle atuador direito.

$$\text{Taxa de amostragem} = 20 \times \text{Largura de banda}$$

$$\text{Taxa de amostragem} = 20 \times (1/\text{tempo de resposta})$$

$$\text{Taxa de amostragem} = 20 \times (1/0,055)$$

$$\text{Taxa de amostragem} = 20 \times (18,2)$$

$$\text{Taxa de amostragem} = 364 \text{ Hz}$$

A partir dos resultados obtidos é possível afirmar que para o sistema apresentar um bom desempenho a taxa de amostra deve ser superior a 364 Hz para malha de controle do atuador direito.

De forma a demonstrar a influência da taxa de amostragem na operação do sistema foi realizada a coleta de dados referentes aos sinais de controle dos atuadores esquerdo e direito da bancada de ensaio.

A figura 34 demonstra dois gráficos onde são comparadas duas respostas. No gráfico superior são apresentados dados referentes à operação do sistema com taxa de amostragem de 100 Hz e o gráfico inferior, a amostragem do controlador é realizada a uma taxa de 1000 Hz. Nesta figura é possível observar que com o controlador digital operando a uma baixa frequência de amostragem o sistema tornasse oscilatório em determinados instantes, ou seja, a 100 Hz o sistema apresenta oscilações de alta frequência. Já o sistema de controle digital operando a taxa de amostragem superior a vinte vezes a largura de banda do sistema, neste caso 1000 Hz, o sinal de controle não apresenta pontos oscilatórios.

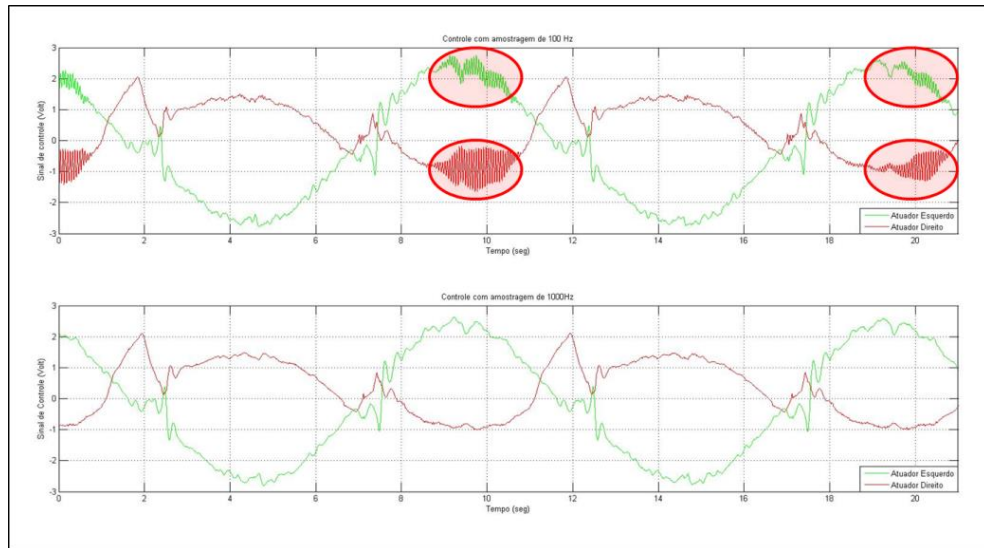


Figura 34 – Comparativo taxa de amostragens.

Fonte: Autoria própria.

4.3 SINTONIA POR GANHO CRÍTICO

Apesar das técnicas experimentais propostas por Ziegler e Nichols serem indicadas para controle de processo, devido à sua simplicidade para sintonia de controladores PID o método foi aplicado à bancada de teste de direção de forma a buscar melhorar o desempenho do sistema.

Como já descrito na seção 2.6.2, há basicamente três passos a serem seguidos para encontrar os parâmetros de sintonia do controlador e a execução dos mesmos é apresentada a seguir.

4.3.1 Determinação do Ganho Proporcional Crítico (K_{cr})

O sistema deve ser colocado em operação plena e os ganhos das ações integrativas (T_i) e derivativas (T_d) devem ser desativados. Já o ganho da ação proporcional deve ser incrementado até que o sistema apresente uma oscilação constante.

Desta forma as próximas figuras 35 e 36, apresentam os resultados obtidos em bancada na determinação dos ganhos críticos de K_c para os atuadores esquerdo e direito respectivamente.

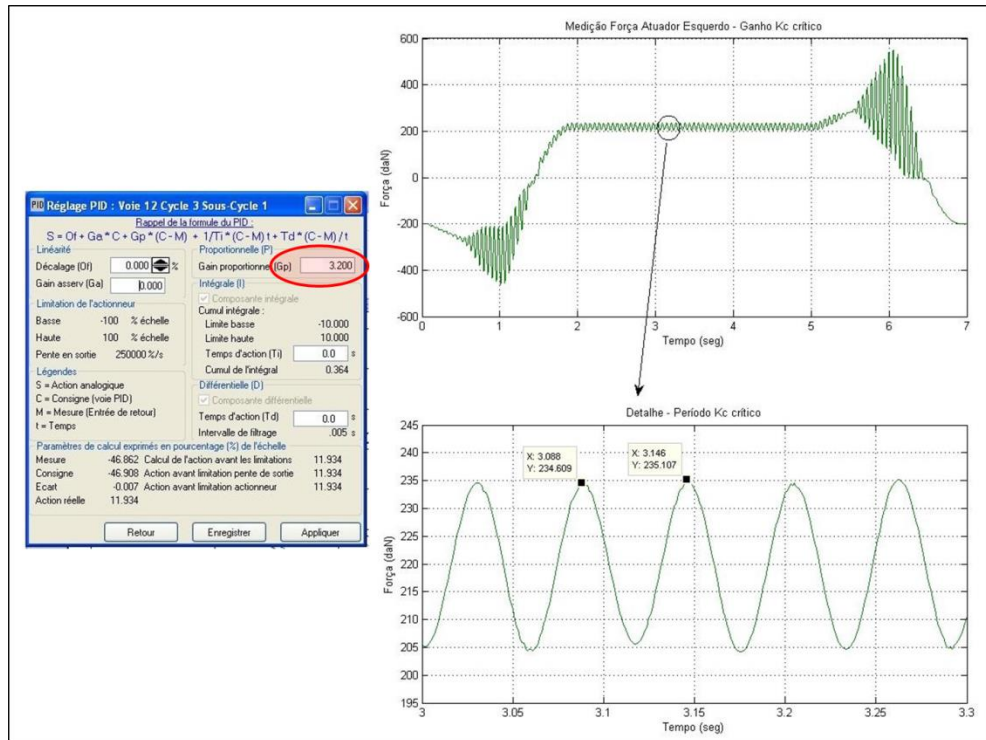


Figura 35 – Ganho crítico atuador esquerdo.

Fonte: Autoria própria.

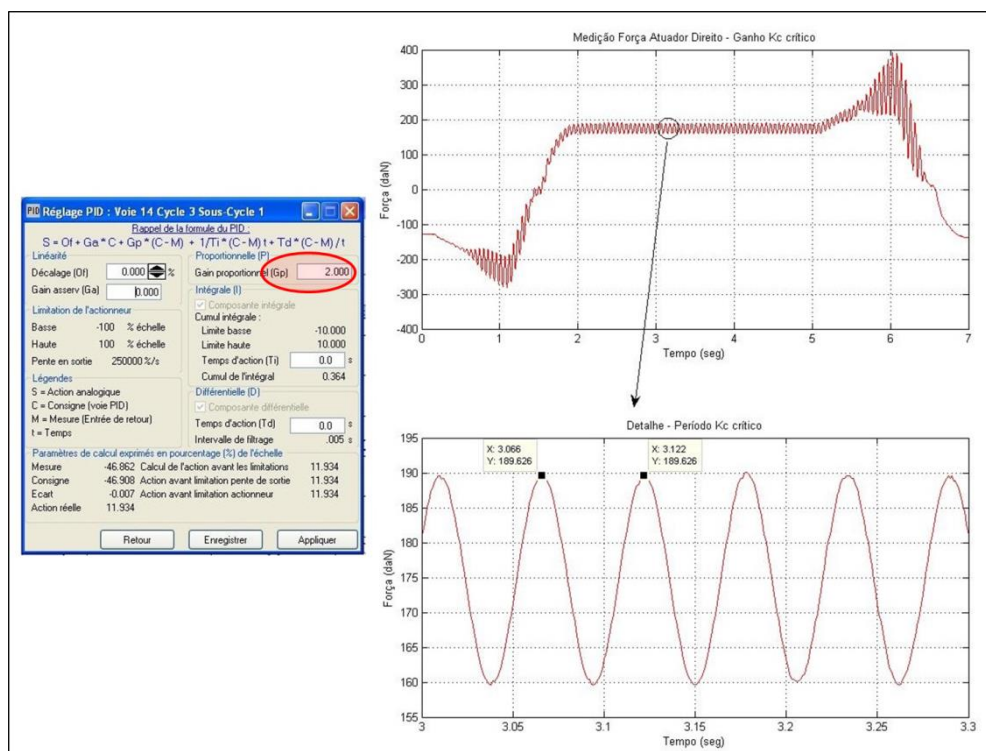


Figura 36 – Ganho crítico atuador direito.

Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Determinação do período crítico (Pcr)

Para encontrar o período crítico, basta avaliar a diferença de tempo existente entre dois picos ou vales consecutivos do sistema em sua condição crítica. A partir das figuras 35 e 36 são obtidos os seguintes valores:

- Malha de controle atuador esquerdo.

$$\text{Período crítico} = \text{tempo2} - \text{tempo1}$$

$$\text{Período crítico} = 3,146 - 3,088$$

$$\text{Período crítico} = 0,058 \text{ s}$$

- Malha de controle atuador direito.

$$\text{Período crítico} = \text{tempo2} - \text{tempo1}$$

$$\text{Período crítico} = 3,122 - 3,066$$

$$\text{Período crítico} = 0,056 \text{ s}$$

4.3.3 Determinação dos parâmetros do controlador

De posse dos valores de ganho crítico e período crítico para os atuadores hidráulicos de força esquerda e direita, é possível calcular os parâmetros de ajuste do controlador conforme fórmulas apresentadas na tabela 2. Os valores de ajuste são dados nas tabelas 3 e tabela 4 para as malhas de controle dos atuadores da esquerda e direita respectivamente.

Ação Kc	Ação Ti	Ação Td
$Kc=0,6 \times K_{cr}$	$Ti=0,5 \times P_{cr}$	$Td=0,125 \times P_{cr}$
$Kc=0,6 \times 3,2$	$Ti=0,5 \times 0,058$	$Td=0,125 \times 0,058$
$Kc=1,920$	$Ti=0,029 \text{ s}$	$Td=0,007 \text{ s}$

Tabela 3 – Cálculo dos parâmetros de ajuste controlador força esquerda.

Fonte: Autoria própria.

Ação Kc	Ação Ti	Ação Td
$K_c=0,6 \times K_{cr}$	$T_i=0,5 \times P_{cr}$	$T_d=0,125 \times P_{cr}$
$K_c=0,6 \times 2,0$	$T_i=0,5 \times 0,056$	$T_d=0,125 \times 0,056$
$K_c=1,200$	$T_i=0,028 \text{ s}$	$T_d=0,007 \text{ s}$

Tabela 4 – Cálculo dos parâmetros de ajuste controlador força direita.
Fonte: Autoria própria.

Com os novos parâmetros de sintonia dos controladores é possível comparar o desempenho do sistema de testes de sistema de direção.

Na figura 37 são apresentadas as respostas do sistema de acordo com o ajuste do controlador. No gráfico superior observa-se os sinais de força em resposta ao controlador que teve seus parâmetros de sintonia ajustados por tentativa e erro. Já o gráfico inferior mostra a resposta do sistema ao controlador sintonizado a partir do método da sensibilidade crítica de Ziegler e Nichols.

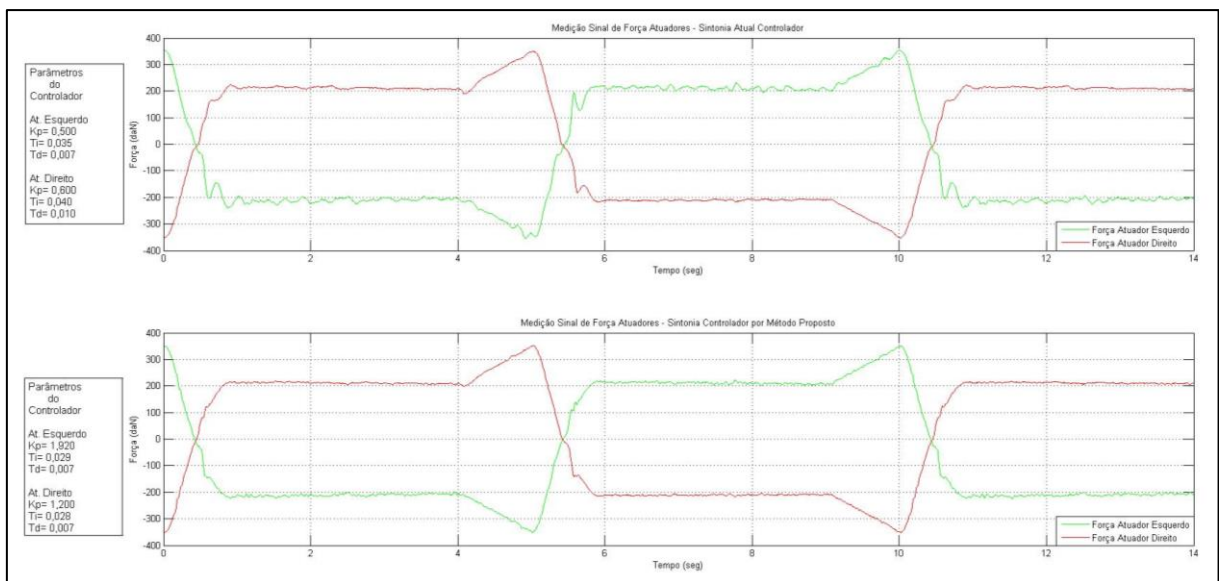


Figura 37 – Comparativo de sintonia de controladores.

Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado na figura 37, uma vez que o controlador é ajustado com os parâmetros calculados, a resposta do sistema tornou-se mais adequada, praticamente isenta de picos e oscilações.

4.4 PARÂMETROS ADICIONAIS

Ainda com relação à configuração dos controladores, verifica-se que o controlador presente no *software* de controle possibilita a configuração de parâmetros adicionais como parâmetro antidisparo (*anti-windup*), e ainda o controlador traz a possibilidade a ajustar a máxima taxa de variação da ação de controle.

A figura 38 mostra a janela de configuração do *software* onde novos ajustes de parâmetros antidisparo e limitante da derivada da ação de controle foram atribuídos.

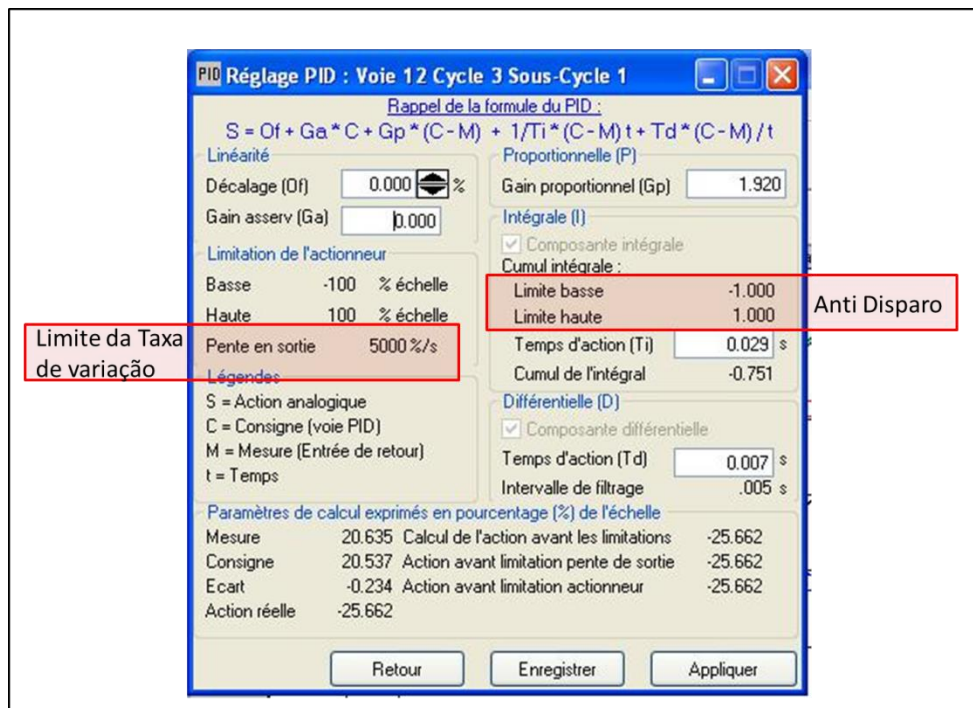


Figura 38 – Configuração de parâmetros adicionais no controlador.

Fonte: Autoria própria.

O objetivo da configuração destes parâmetros adicionais no controlador é limitar a resposta do sistema a perturbações não comuns ao ciclo de teste, como por exemplo, no início e fim dos ciclos de teste, onde são gerados degraus nas curvas de *setpoint*, o que acaba gerando picos na variável manipulada.

4.5 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Com um conhecimento prévio do equipamento de teste e a partir do estudo sobre controladores e técnicas de sintonia de controladores foi possível desenvolver um trabalho prático no equipamento de forma a buscar melhorias na configuração do banco de ensaio e ainda comprovar através de medições que algumas técnicas presentes neste trabalho se mostram eficazes na sintonia de controladores.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Aprofundar os conhecimentos quanto aos recursos e possibilidades de utilização do equipamento de forma racional e coesa nem sempre é uma prática comum na indústria. Ao longo deste trabalho o estudo mais aprofundado e detalhado sobre as características do equipamento de teste de sistema de direção e seus subcomponentes possibilitou levantar pontos de estudo de forma a buscar melhorias a serem trabalhadas.

Com isso, a partir das necessidades de conhecer e operar o equipamento de forma correta gerou interesse sobre malhas de controle e controladores, assim como seus desdobramentos. Pelo estudo realizado foi possível identificar técnicas simples de sintonia de controlador, que embora não sejam as mais indicadas para sintonia do controlador em questão, apresentaram resultado satisfatório na preparação e execução dos testes em sistemas de direção, como pôde ser confirmado pelos resultados de medição apresentados no capítulo quatro.

Com o avanço de conhecimento quanto a operação do equipamento, foi possível verificar que, apesar do equipamento operar em uma faixa de sistema linear, as falhas e distúrbios do sistema, como por exemplo, o *cross-coupling* e *backlash* fazem com que o sistema passe não mais a se comportar de forma linear. Outro fator observado no funcionamento do sistema refere-se a características inerentes a operação de controladores digitais, pois devido ao seu processo de quantização das informações, alguns efeitos são conferidos ao funcionamento do sistema, mas nem sempre os efeitos podem ser positivos.

Propõem-se como continuação deste estudo duas novas frentes de pesquisa. A primeira refere-se à obtenção do modelo matemático do sistema a fim de levantar a função transferência envolvida e assim possibilitar a simulação e estudo de novas técnicas de controle para o equipamento de teste. Já a segunda área de pesquisa refere-se a melhor análise das fontes de distúrbio envolvidas na operação do sistema, uma vez que a ação desta interfere em muito a operação normal do sistema de controle durante a realização dos testes em sistemas de direção.

REFERÊNCIAS

AMOROSO, Anderson L., Anderson. **Notas de aula de controle de processos**. Especialização em automação Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba: 2014.

ASTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. **Advanced PID control**. 1. ed. NC: ISA, 2006.

CAPELLI, Alexandre. **Automação Industrial: controle do movimento e processos contínuos**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2006.

CASTRUCCI, Plínio de L.; BITTAR, Anselmo ; SALES, Roberto M. **Controle Automático**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

Departamento de Física Aplicada. **Control y Estabilidad**. Disponível em <<http://fis.cie.uma.es/old/docencia/2002-03/A109/tema2/tema211.html>>. Acesso em: 02 maio 2015.

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. **Sistemas de controle modernos**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

FRANKLIN, Gene F.; POWELL, J. David; EMANI-NAEINI, Abbas. **Sistemas de Controle para Engenharia**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

Gazeta do Povo. **Paraná “Tropicaliza” tecnologia Japonesa**. Disponível em <>. Acesso em: 02 maio 2015.

KOREN, Yoran. **Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems**. Disponível em: <[http://www-personal.umich.edu/~ykoren/uploads/Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Mfg Systems.pdf](http://www-personal.umich.edu/~ykoren/uploads/Cross-Coupled_Biaxial_Computer_Control_for_Mfg_Systems.pdf)> Acesso em 18 junho 2015.

LJUNG, Lennart. **System identification**. 1 ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1987.

O'DWYER, Aidan. **Handbook of PI and PID controller Tuning Rules**. 3. ed. London: Imperial College Press, 2009.

OficinaeCia. **Sistema de direção.** Disponível em <<http://www.oficinaecia.com.br/bibliadocarro/biblia.asp?status=visualizar&cod=144>>. Acesso em 03 maio 2015.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno.** 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

SILVA, Clarence W. De. **Control sensors and actuators.** 1. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1989.

Sysma, **Marathon.** Disponível em <http://sysma.fr/index.php?id=marathon_en>. Acesso em 10 maio 2015.