



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU



Alexandre Henrique Fideles

Estado de Arte de Sistema de Controle e Algumas Ferramentas Computacionais para
Avaliação de Desempenho de Malhas de Controle

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO

Ouro Preto, 2014

Alexandre Henrique Fideles

**Estado de Arte de Sistema de Controle e Algumas Ferramentas Computacionais para
Avaliação de Desempenho de Malhas de Controle**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Agnaldo J. R. Reis

Ouro Preto

Escola de Minas – UFOP

Agosto/2104

F451e Fidelis, Alexandre Henrique.
Estado de arte de sistema de controle e algumas ferramentas computacionais para avaliação de desempenho de malhas de controle [manuscrito] / Alexandre Henrique Fidelis. - 2014.

37f.: il.: grafis; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis .

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. Malhas de controle. 2. Avaliação de desempenho. 3. Ferramentas computacionais. I. Reis , Agnaldo José da Rocha . II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 681.5

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

Monografia defendida e aprovada, em 11 de agosto de 2014, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis - Orientador



Profa. MSc. Luciana Gomes Castanheira - Professora Convidada



Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro – Professor Convidado

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por ser minha principal sustentação.

Agradeço a todos os professores que me proporcionaram chegar até aqui. Em especial a meu orientador Agnaldo pelo apoio e a todos os professores do DECAT e da Escola de Minas.

Agradeço a minha família pelo incentivo e por permitirem a realização dessa conquista.

Resumo

Em muitas situações na indústria, observa-se que parte das malhas de controle apresenta desempenho abaixo do desejado e/ou são operadas de forma manual. É nesse contexto que se insere este trabalho de conclusão de curso. Este apresenta algumas soluções computacionais para avaliação de desempenho de malhas de controle industriais, alguns índices de desempenho, e uma breve revisão bibliográfica sobre sistemas de controle.

Palavras chaves: malhas de controle, avaliação de desempenho, ferramentas computacionais.

ABSTRACT

In many situations in industry, it is observed that some of the control loops presents underperforming and / or are operated manually. It is in this context that this work of completion. Here we discuss the importance of computational tools for evaluating the performance of control loops within the industry, the major indexes used by them and what the expected return.

Key words: *control loops, performance evaluation, computational tools*

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Curva de Resposta de Sistema de Controle	14
Figura 4.1 – Curva de Resposta de um Sistema de 1 ^a ordem com tempo morto.	21

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Parâmetros da Sintonia ZeN.	20
Tabela 4.2 – Parâmetros para Sintonia ZeN.	21
Tabela 4.3 – Parâmetros para sintonia CHR (Servo).....	24
Tabela 4.4 – Parâmetros para Sintonia CHR (Regulatório)	25
Tabela 4.5 – Parâmetros para sintonia CHR (servo)	25
Tabela 4.6 – Contantes IAE ITAE.....	27
Tabela 4.7 – Parâmetros de sintonia IAE e ITAE.	28
Tabela 4.8 – Sintonia IAE e ITAE.	29

Sumário

1	Introdução:	10
1.1	Objetivo	10
1.2	Justificativa	11
1.3	Metodologia	11
2	Sistemas de controle	12
2.1	Sistema de controle Malha Aberta	12
2.2	Sistema de controle em Malha Fechada	12
2.3	Objetivo de Análise e Projeto de sistema de controle:	13
2.3.1	Resposta transitória.....	13
2.3.2	Resposta de Estado Estacionário.....	13
2.3.3	Estabilidade	15
3	Controladores Automáticos.....	16
3.1	Controladores Proporcionais.....	16
3.2	Controladores Proporcionais e Integrais	17
3.3	Controladores Proporcionais Integrais e Derivativos.....	17
4	Sintonia de Controladores PID	19
4.1	Método Heurístico de Ziegler e Nichols	19
4.1.1	Algumas considerações sobre o Método Ziegler e Nichols.....	22
4.2	Método CHR	23
4.2.1	Algumas Considerações sobre o Método CHR	25
4.3	Método Integral do Erro:.....	26
4.3.1	Algumas Considerações sobre o Método Integral do Erro:.....	28
5	Índices de Desempenho de Malhas de Controle.....	30
5.1	Índice para Acompanhar a Variabilidade do Processo	30
5.2	Índice Baseado em Controle com Variância Mínima.....	31
5.2.1	Algumas Considerações sobre o Índice Baseado em Controle com Variância Mínima	32
5.3	Algoritmo para Detecção de oscilações	33

5.3.1	Algumas Considerações sobre a Detecção de Oscilações	33
5.4	Percentual do tempo fora do modo automático	34
5.5	Percentual do tempo com o controle saturado	34
5.6	Algumas Considerações sobre os Índices de Desempenho	34
6	Soluções em Avaliação de Desempenho Oferecidas pelo Mercado	35
6.1	PlantTriage	35
6.2	Econ CPA.....	35
6.3	TriCLP.....	36
7	Considerações Finais	37
7.1	Sugestão de Trabalho Futuro	37
8	Referências Bibliográficas	38

1 Introdução:

Atualmente, para se manter no mercado, as empresas precisam produzir mais, sem perder a qualidade de seus produtos. Por conseguinte, a busca pela melhoria contínua de seus processos tornou-se imprescindível para quem deseja se destacar. Uma medida para melhoria de processos industriais é a avaliação e monitoramento do desempenho de suas malhas de controle, ou seja, quanto melhor o desempenho mais ganhos de produção e qualidade a empresa vai obter.

Portanto, uma maneira de aumentar a produtividade de uma planta industrial, sem perder a qualidade de seus produtos (ou seja, aumentar sua competitividade no mercado), é buscar sempre o melhor desempenho de suas malhas de controle. No entanto, manter o desempenho desejado da planta, durante todo o tempo de operação não é uma tarefa simples devido a uma série de fatores, como por exemplo, o grande número de malhas de controle a serem monitoradas em uma unidade industrial. (Campos e Teixeira, 2006).

Este trabalho tem como motivação apresentar ferramentas computacionais oferecidas no mercado para avaliação e desempenho de malhas de controle e descrever os principais parâmetros utilizados pelas mesmas. Visto que, estas são de grande auxílio para os colaboradores das empresas na difícil missão de manter o bom desempenho de suas malhas de controle.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é apresentar ferramentas computacionais, para avaliação de desempenho de malhas controle, oferecidas pelo mercado atual, e descrever os seus principais parâmetros.

1.2 Justificativa

Um sistema de controle industrial pode ser malha aberta ou malha fechada. No entanto, tende-se a utilização de sistemas de controle malha fechada em ambientes industriais, pois estes são mais precisos e robustos a perturbações e não necessitam de intervenção humana direta para seu funcionamento. Todavia conseguir manter um bom desempenho destes ao longo do tempo não é uma tarefa simples devido a fatores como: mudança da condição de operação da planta, mudança da dinâmica de funcionamento dos instrumentos, complexidade das malhas de controle a serem monitoradas. Desta forma, utilizar ferramentas computacionais para monitorar o desempenho de malhas de controle torna-se uma tarefa de grande relevância para a indústria. (Campos e Teixeira, 2006).

1.3 Metodologia

Para o desenvolvimento deste trabalho faz-se uma breve revisão bibliográfica sobre sistemas de controle, enfatizando as estratégias de controle mais utilizadas na indústria. Em seguida apresenta os principais parâmetros de desempenho utilizados pelos softwares disponíveis no mercado. Por fim apresenta algumas soluções disponíveis no mercado atual e também uma sugestão para trabalhos futuros.

2 Sistemas de controle

Sistema de controle é todo sistema que tem como finalidade manter algumas de suas variáveis em valor de referência.

2.1 Sistema de controle Malha Aberta

Um sistema de controle em malha aberta é aquele em que o sinal de saída não é medido e nem comparado com o valor de referência (*set-point*), ou seja, o sinal de saída não é realimentado no sistema. Por isso, um bom desempenho deste sistema depende diretamente do bom funcionamento dos equipamentos e instrumentos envolvidos, ou seja, depende de uma boa calibração destes. Uma limitação dos sistemas de controle em malha aberta é que eles não conseguem eliminar possíveis perturbações (internas ou externas). Geralmente estes sistemas operam de maneira sequencial realizando tarefas em função do tempo (Ogata, 2003).

Os sistemas em malha aberta apresentam baixos custos de implantação, contudo não compensam as variações internas e nem a perturbações externas da planta.

2.2 Sistema de controle em Malha Fechada

Um sistema de controle em malha fechada é aquele em que o sinal de saída é realimentado no sistema, ou seja, o sinal de saída é monitorado e comparado com o valor de referência. Em termos práticos as denominações de controle em malha fechada e controle com realimentação são utilizadas de forma indistinta. Para esse sistema utiliza-se o sinal de erro, que é a diferença entre o sinal de saída e o valor desejado, realimentando-o no controlador do sistema. Desta forma, o controlador executa uma determinada ação para tentar eliminar o sinal de erro (Ogata, 2003).

O controle em malha fechada pode gerar oscilações e instabilizar o processo. Sendo assim, este traz um conceito imprescindível o de estabilidade de processo (Campos e Teixeira, 2006).

2.3 Objetivo de Análise e Projeto de sistema de controle:

Os três objetivos principais da análise e projeto de sistemas de controle são: produzir a resposta transitória adequada para o processo, diminuir o erro de estado estacionário (erro em regime permanente) e obter a estabilidade do processo (Nise, 2002).

2.3.1 Resposta transitória

A mudança gradual da resposta de um sistema, inicialmente em repouso, submetido a uma excitação é chamada de resposta transitória ou regime transiente (Nise, 2002).

Para efeito de análise a resposta transitória está diretamente ligada à velocidade de reação do sistema quando excitado a uma entrada.

2.3.2 Resposta de Estado Estacionário

Resposta de estado estacionário é a resposta real, ou seja, é a resposta final que permanece depois da excitação do sistema. Quando um sistema é excitado, geralmente, a resposta transitória tende a se reduzir a zero quando o tempo tende ao infinito, o resultado que permanece é a resposta de estado estacionário. A diferença entre o valor desejado e a resposta de estado estacionário denomina-se de erro de estado estacionário (Nise, 2002).

Para efeito de análise a resposta de estado estacionário está diretamente ligada à precisão do sistema. A figura 2.1, mostra a curva de resposta para um sistema de controle e os principais parâmetros utilizados.

Os principais parâmetros para resposta de estado estacionário:

- M_p - Máximo sobre valor;
- t_d – tempo de atraso;
- t_p – tempo de pico;
- t_r – tempo de subida;
- t_s – tempo de acomodação;

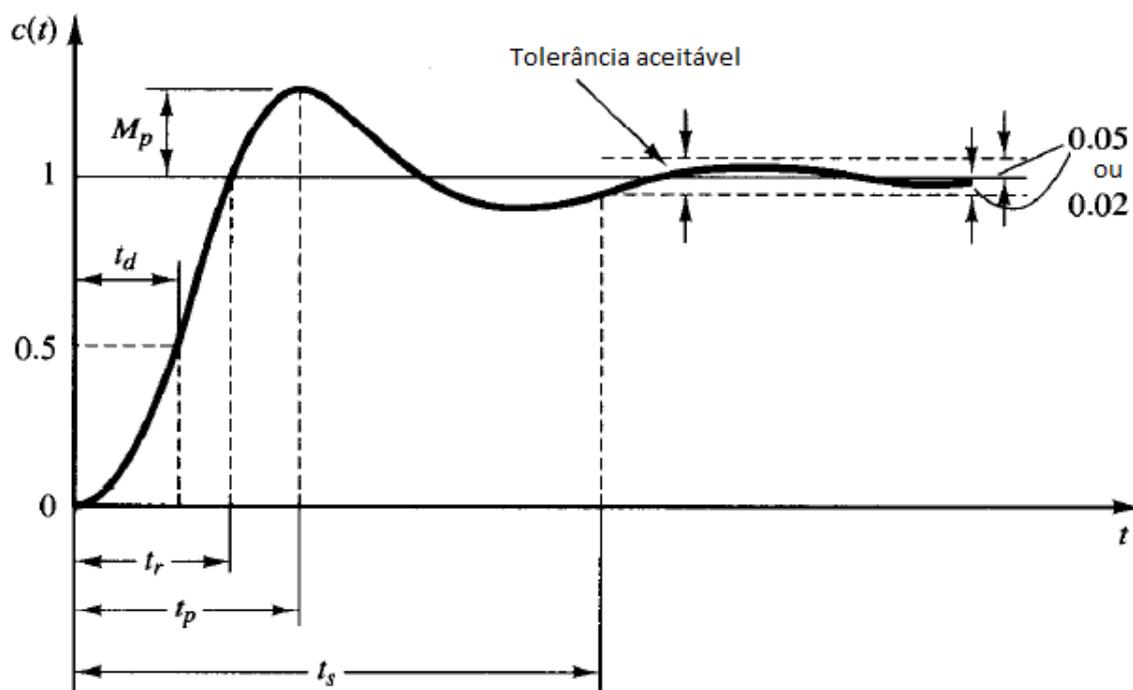


Figura 2.1 – Curva de Resposta de Sistema de Controle
Fonte: Ogata,

CAMPOS, M. C. M. M.; TEIXEIRA, H. C. G. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. [S.l.]: Edgard Blücher, v. 1, 2006. 396 p.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de controle modernos**. 8. ed. [S.l.]: LTC, 2001. 724 p.

ECON. **ECON**. Disponível em: <http://www.econ.eng.br/Econ_-_Engenharia_de_Controlo_Industrial/Software_para_Monitoramento,_Avaliacao,_Diagnostico_de_Malhas_de_Controlo_e_Sintonia_PID_-_Econ_CPA.html>. Acesso em: 06 Julho 2014.

EXPERTURNE. **ExpertTune**. Disponível em: <<http://www.expertune.com/plantriage.aspx>>. Acesso em: 10 Julho 2014.

NISE, N. S. **Engenharia de sistemas de controle**. 3. ed. [S.l.]: LTC, 2002. 695 p.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4. ed. [S.l.]: Pearson Prentice Hal, 2003.

PIRES, L. C. REVITALIZAÇÃO DO SISTEMA DE AUDITORIA DE MALHAS DE CONTROLE NA PELOTIZAÇÃO, Ouro Preto, p. 54, Janeiro 2011.

RODRIGUES, B.-H. S. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE MALHAS DE CONTROLE, Ouro Preto, 2010. 74.

TRISOLUTION. **Trisolution**. Disponível em: <<http://www.trisolutions.com.br/produtos-interna/triclpmp/>>. Acesso em: 06 Julho 2104.

2.3.3 Estabilidade

Um sistema linear e invariante no tempo é estável quando este excitado com uma entrada finita produz uma saída finita (Ogata, 2003).

A resposta final ou total de um sistema linear invariante no tempo é a soma da resposta natural com a resposta forçada. Para o sistema ser estável a componente natural deve tender a zero quando o tempo tender ao infinito (Nise, 2002).

Para um sistema de controle ser útil, este deve ser obrigatoriamente estável.

3 Controladores Automáticos

Um controlador automático pode ser físico ou virtual, sua função é tentar manter a resposta de saída igual ao valor desejado do processo. Ele compara a resposta da saída com o valor de entrada. Quando estes apresentam valores diferentes de zero, o controlador aplica algumas ações no sistema, denominadas ações de controle. Os controladores automáticos são classificados de acordo com suas ações de controle (Ogata, 2003).

3.1 Controladores Proporcionais

Para um controlador com ação proporcional a relação entre o seu sinal de saída e o sinal de erro atuante do sistema é igual uma constante (K_p) denominada de ganho proporcional do controlador. A seguir mostra-se a equação do algoritmo do controlador proporcional (Ogata, 2003):

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (3.1)$$

Na qual, $u(t)$ é o sinal de saída do controlador e $e(t)$ o sinal de erro atuante.

Na prática, em geral, o controlador proporcional pode ser de dois tipos: com ação direta ou com ação reversa. Define-se controlador com ação direta, aquele em que ao aumentar o valor da variável de processo (variável a ser controlada), aumenta conseqüentemente o valor da saída do controlador. Desta mesma forma, o de ação reserva, é aquele que quando aumenta o valor da variável de processo, conseqüentemente diminui o valor da saída do controlador (Campos e Teixeira, 2006).

Um limitador do controlador proporcional, é que independente do valor do seu ganho sempre existirá o sinal de erro, ou seja, quando usado isoladamente não consegue eliminar o sinal de erro. Quanto maior o ganho, menor o erro, porém maior também a tendência de instabilizar o processo.

3.2 Controladores Proporcionais e Integrais

Para um controlador com ação proporcional integral sua saída é proporcional ao erro e proporcional ao integral do erro. Segue abaixo a equação (3.2) do controlador proporcional Integral paralelo clássico, cujo ganho proporcional também multiplica o termo integral (Campos e Teixeira, 2006):

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_p \cdot \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \quad (3.2)$$

Na qual T_i é o tempo integral.

Na prática, o algoritmo mais encontrado do controlador PI (proporcional e integral) é o paralelo clássico. Para alguns fabricantes o termo a ser ajustado para sintonia é o $(1/T_i)$ conhecido como ganho integral e não o T_i (tempo integral) (Campos e Teixeira, 2006).

Uma vantagem do controlador proporcional integral é que este consegue eliminar o erro em regime permanente, pois o termo integral aumentará ou diminuirá a saída do controlador indefinidamente enquanto o sinal de erro atuar no processo. Contudo este efeito gera um possível problema, o de saturação. Este acontece, pois na prática, os componentes utilizados no processo possuem limitações físicas e não conseguem acompanhar um aumento constante gerado pelo termo integral (Campos e Teixeira, 2006).

3.3 Controladores Proporcionais Integrais e Derivativos

O controlador Proporcional-Integral-Derivativo é o algoritmo de controle mais utilizado na indústria. Para o controlador proporcional integral e derivativo o sinal de saída é proporcional ao erro, proporcional a integral do erro e proporcional a derivada do erro. A equação (3.3) do algoritmo do controlador proporcional integral e derivativo paralelo clássico é mostrada abaixo (Campos e Teixeira, 2006):

$$u(t) = Kp \cdot e(t) + Kp \cdot \frac{1}{Ti} \int e(t) dt + Kp \cdot Td \cdot \frac{de}{dt}(t) \quad (3.3)$$

Na qual, o fator multiplicativo Td é o tempo derivativo.

Na prática, o termo derivativo tenta estimar um possível aumento ou diminuição do erro, ou seja, o termo derivativo tem um papel preditivo. Sendo mais utilizado em processos com dinâmica mais rápida (Campos e Teixeira, 2006).

4 Sintonia de Controladores PID

O principal objetivo para sintonia de controladores é sempre manter o processo estável. Contudo alguns objetivos secundários são indispensáveis para realização de determinadas atividades dentro de uma planta industrial. Segue abaixo alguns exemplos:

- Manter a temperatura em torno de 200°C e não exceder 250°C;
- Mudar o ponto operacional, sem sobre valor, com máxima velocidade (Campos e Teixeira, 2006).

Para alcançar estes objetivos alguns critérios de desempenho são utilizados para a sintonia dos controladores, dentre eles estão:

- O menor sobre valor ou ausência sobre valor;
- Tempo de subida;
- Tempo de assentamento;
- Razão de declínio;
- Utilização de um índice de desempenho para monitorar a qualidade da ação do controle (Campos e Teixeira, 2006).

A sintonia de controladores representa diretamente o comportamento do seu sistema de controle, ou seja, como o sistema irá responder para atingir seu objetivo final.

4.1 Método Heurístico de Ziegler e Nichols

O trabalho de Ziegler e Nichols (1942) apresenta uma metodologia simples e objetiva para sintonia de controladores PID. Neste sentido como foi pioneiro no assunto, tornou-se referência para indústria da época .

Ziegler e Nichols propõem dois métodos para se determinar a dinâmica de processos SISO (*Single Input Single Output*/ uma entrada uma saída). No primeiro aumenta-se, gradativamente, o ganho do controlador proporcional (somente o ganho P) em malha fechada até o sistema começar a oscilar com amplitude constante, ou seja, até o sistema ficar marginalmente estável. Desta forma, neste ponto, determinam-se os parâmetros K_u (ganho último) e P_u (período de oscilação). Na qual, K_u é último ganho do controlador P, ou seja, qualquer outro ganho maior que K_u gera instabilidade para o processo e P_u é o período de

oscilação, ou seja, o tempo gasto para se completar um ciclo. Determinados esses valores, que representam a dinâmica do processo, para sintonizar o controlador PID utiliza-se a tabela 4.1. O critério de desempenho para esta sintonia é o de declínio de $1/4$. Vale ressaltar, que apesar do bom desempenho deste tipo de sintonia, para controladores em geral, antes de usá-lo deve-se analisar, primeiramente, o processo a ser controlado. Na prática este método não é muito utilizado, por ser em malha fechada pode gerar oscilações incontroláveis (Campos e Teixeira, 2006).

Tabela 4.1 – Parâmetros da Sintonia ZeN.
Fonte: Campos e Teixeira ,2006.

Controlador	Kp	Ti	Td
P	0,5. Ku	-	-
PI	0,45. Ku	Pu/1,2	-
PID	0,6. Ku	Pu/2	Pu/8

O segundo método propõe, para a identificação da dinâmica do processo, um teste em malha aberta. Com o controlador em manual gera uma excitação em degrau. A partir da curva de reposta para esta perturbação determina-se R (taxa de variação) e R (tempo morto) do processo (Campos e Teixeira, 2006).

Como exemplo tem-se um processo G_p , de primeira ordem com tempo morto definido pela equação:

$$G_p(s) = \frac{K \cdot e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (4.1)$$

Na qual, K é o ganho do processo, θ é o tempo morto do processo e τ é a constante de tempo do processo.

Para sintonizar o controlador PID, de acordo com este método, utiliza-se a tabela 4.2, onde os parâmetros estão identificados na figura (4.1).

Tabela 4.2 – Parâmetros para Sintonia ZeN.
 Fonte: Campos e Teixeira, 2006.

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\tau / (K \cdot \theta)$	-	-
PI	$0,9 \cdot \tau / (K \cdot \theta)$	$3,33 \cdot \theta$	-
PID	$1,2 \cdot \tau / (K \cdot \theta)$	$2 \cdot \theta$	$0,5 \cdot \theta$

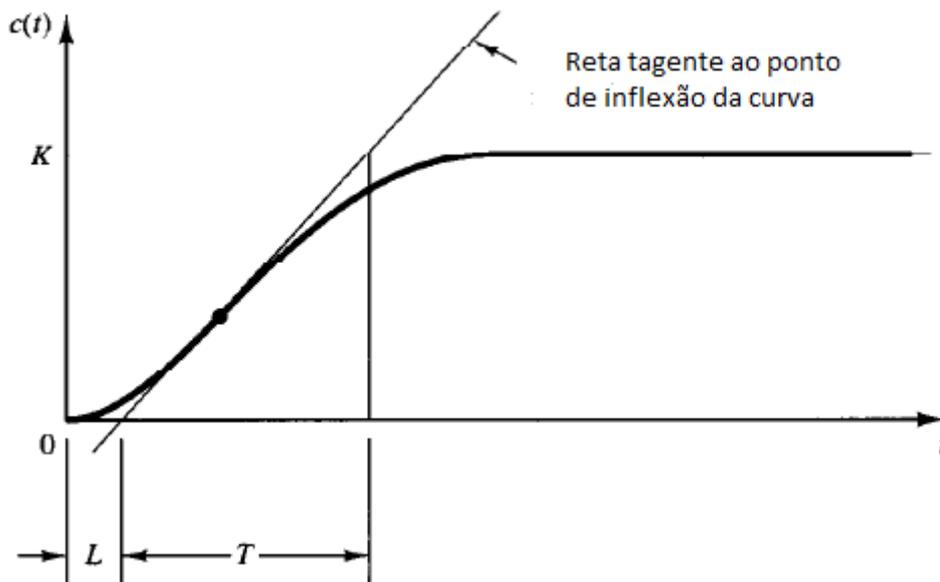


Figura 4.1 – Curva de Resposta de um Sistema de 1ª ordem com tempo morto.
 Fonte: Nise (2007).

Parâmetros da curva de resposta:

L - Tempo morto do processo;

T - Constante de tempo do processo;

K - Ganho do processo.

4.1.1 Algumas considerações sobre o Método Ziegler e Nichols

A seguir estão descritas algumas considerações sobre o método Ziegler e Nichols (Campos e Teixeira, 2006):

- O ganho do controlador K_p é inversamente proporcional ao ganho do processo;
- O ganho do controlador K_p também é inversamente proporcional à razão entre o tempo morto e a constante de tempo do sistema. Esta razão é conhecida como razão de incontabilidade do processo. Portanto quanto o maior o tempo morto em relação a constante de tempo do processo, mais difícil de controlar o processo, e menor é ganho do controlador (Corripio, 1990 apud Campos e Teixeira, 2006).
- O tempo integral está relacionado diretamente com a dinâmica do processo, ou seja, quanto maior o tempo morto (mais lento o processo), maior deve ser o tempo integral. Desta maneira, o controlador levará mais tempo para repetir a ação proporcional.
- O tempo derivativo também está relacionado diretamente com a dinâmica do processo, ou seja, quanto maior o tempo morto, maior deve ser o tempo derivativo. Ziegler e Nichols utilizavam a relação de $1/4$ entre T_d/T_i , ou seja, $T_i = 4T_d$.

A seguir alguns cuidados para a utilização da tabela 4.2 (Campos e Teixeira, 2006):

- Na literatura não há um consenso se a tabela para sintonia Ziegler e Nichols utilizava controlador do tipo série ou paralelo. Contudo sabe-se que o ganho proporcional, neste trabalho, também afeta o tempo integral e o tempo derivativo;
- As equações de sintonia Z&N são boas para processos com fator de incontabilidade entre 0.1 e 0.3. Isto é, para processos em que o tempo morto não é muito significativo (Corripio, 1990 apud Campos e Teixeira, 2006);
- O desempenho é razoável para processo com fator de incontabilidade entre 0.2 e 1.4 (Rivera et al., 1986 apud Campos e Teixeira);
- A robutez do sistema é boa para o fator de incontabilidade aproximadamente igual a 0.3. Para fatores maiores que 4 a equações de Z&N instabilizam o processo;
- A tabela foi desenvolvida para controladores analógicos e não digitais. Portanto se o tempo de amostragem for relativamente grande pode-se gerar oscilações com razão de declínio maior que $1/4$, tendendo a instabilizar o sistema. Uma solução é aumentar o tempo morto a um valor igual à metade do tempo de amostragem ($(\theta' = \theta + TA/2)$).

Este método de sintonia serve de referência, mas pode gerar sistemas de controle instáveis, por diversas razões (Campos e Teixeira, 2006):

- Modelos que não traduzem a dinâmica do processo;
- Interações entre as malhas de controle, devido ao fato que em ambientes industriais a maioria dos sistemas são multiváriaveis. (*MIMO - Multiple Input – Multiple Output*/ Múltiplas entradas e Múltiplas saídas);
- Controladores atuais digitais e não analógicos;
- Critério de desempenho de 1/4 pouco robusto, ou seja, próximo à região de instabilidade, qualquer perturbação na planta pode instabilizar o processo.

Na prática, sugere-se: primeiro diminuir os ganhos propostos por Z&N e depois, gradativamente, aumentar e observar o comportamento do processo. Vale ressaltar que este método não garante nenhum desempenho e nem a estabilidade, ou seja, devem ser utilizados com cautela (Campos e Teixeira, 2006).

4.2 Método CHR

Segundo Chien este método é dividido segundo os seguintes critérios (Chien, Hrones e Reswick, 1952 apud Campos e Teixeira, 2006):

- A resposta mais rápida possível sem sobre valor;
- A resposta mais rápida possível com 20% de sobre valor.

Neste método as sintonias são obtidas para dois casos: o primeiro para o problema de controle servo (mudança em degrau variável desejada) e o segundo para o problema de controle regulatório (neste caso perturbação de carga em degrau com “set point” constante) (Campos e Teixeira, 2006).

Neste trabalho comparam-se, as sintonias do método CHR para o controlador proporcional com as sintonias do método Zigler Nichols.

A tabela (4.3) mostra os parâmetros para a sintonia CHR, para o problema servo (mudança de set point em degrau), utilizando como critério de desempenho a resposta mais rápida sem

sobre valor. O algoritmo utilizado na tabela é o PID paralelo clássico (Campos e Teixeira, 2006).

Tabela 4.3 – Parâmetros para sintonia CHR (Servo).
Fonte: Campos e Teixeira, 2006.

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{0,3 \cdot \tau}{K \cdot \theta}$	-	-
PI	$\frac{0,35 \cdot \tau}{K \cdot \theta}$	$1,16 \cdot \tau$	-
PID	$\frac{0,6 \cdot \tau}{K \cdot \theta}$	τ	$\frac{\theta}{2}$

A tabela (4.4) mostra os parâmetros para sintonia CHR, para o problema regulatório (perturbação de carga em degrau), utilizando como critério de desempenho a resposta mais rápida sem sobre valor. Percebe-se que esta é uma sintonia mais agressiva que no problema servo (Campos e Teixeira, 2006).

Tabela 4.4 – Parâmetros para Sintonia CHR (Regulatório)
 Fonte: Campos e Teixeira, 2006.

Controlador	Kp	Ti	Td
P	$\frac{0,3. \tau}{K. \theta}$	-	-
PI	$\frac{0,6. \tau}{K. \theta}$	4. θ	-
PID	$\frac{0,95. \tau}{K. \theta}$	2,375. θ	0,421. θ

A tabela (4.5) mostra os parâmetros do método CHR, para o problema servo (mudança em degrau no set point), utilizando como critério de desempenho a resposta mais rápida possível com 20% de sobre valor (Campos e Teixeira, 2006).

Tabela 4.5 – Parâmetros para sintonia CHR (servo)
 Fonte: Campos e Teixeira, 2006.

Controlador	Kp	Ti	Td
P	$\frac{0,7. \tau}{K. \theta}$	-	-
PI	$\frac{0,6. \tau}{K. \theta}$	τ	-
PID	$\frac{0,95. \tau}{K. \theta}$	1,357. τ	0,473. θ

4.2.1 Algumas Considerações sobre o Método CHR

Quando se utiliza o critério de desempenho resposta mais rápida possível sem sobre valor, tem-se o menor ganho para o controlador proporcional. Na prática, uma resposta menos rápida, contudo com menos oscilações é a mais adequada. Por isso, este é um dos melhores critérios de desempenho para a maioria das malhas de controle industrial. Outra vantagem é que com o ganho do controlador proporcional mais baixo, o sistema fica mais robusto, ou seja, o sistema fica mais distante do limite de estabilidade. Desta forma, o sistema consegue

corrigir variações da planta como não linearidades, desgastes de equipamentos entre outros (Campo e Teixeira, 2006).

4.3 Método Integral do Erro:

Este método utiliza como critério de desempenho a integral de uma função do erro, dentro de um limite de tempo satisfatório para eliminar o erro em regime permanente. Desenvolvido por Lopez em 1967, para o problema regulatório com perturbação em carga, e logo depois por Rovira 1969, para excitação em degrau no valor de entrada do sistema, este método tem como característica considerar toda resposta do sistema (Lopez et al., 1967 e Rovira et al., 1969 apud Campos e Teixeira, 2006).

Os critérios de desempenho IAE (Integral do valor Absoluto) - $\int |e(t)| . dt$ e ITAE (Integral do produto do tempo pelo valor do erro absoluto do sistema) - $\int t . |e(t)| . dt$, são os mais utilizados na prática. Uma característica do critério ITAE é que ele é menos sensível às perturbações iniciais, ou seja, quando tempo está próximo de zero (Campos e Teixeira, 2006).

Este método considera como algoritmo o PID paralelo clássico. E também propõe que a dinâmica do processo pode ser representada adequadamente por um sistema de primeira ordem com tempo morto equação (4.1) (Campos e Teixeira, 2006).

Lopez considera o problema para perturbação em carga com o valor de referência fixo, ou seja, problema regulatório. Em seu trabalho em 1967, otimizou-se as integrais do erro, ou seja, obteve os resultados que minimizassem os seus valores, para os fatores de incontrobabilidade entre 0 e 1 (θ/τ). Desta forma, utilizou-se regressão para conseguir as seguintes equações de sintonias (Lopez et al., 1967 apud Campos e Teixeira, 2006):

$$Kp = \frac{1}{k} . (A . \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^B) \quad (4.2)$$

$$Ti = \frac{\tau}{(c . \left(\frac{\theta^D}{\tau}\right))} \quad (4.3)$$

$$Td = \tau. \left(E. \left(\frac{\theta^F}{\tau} \right) \right) \quad (4.4)$$

Para os critérios (IAE e ITAE) as constantes A, B, C, D, E, F são obtidas na tabela (4.6).

Tabela 4.6 – Contantes IAE ITAE.

Fonte: Campos e Teixeira, 2006.

Controlador	Critério	A	B	C	D	E	F
PI	IAE	0,984	-0,986	0,608	-0,707	-	-
PI	ITAE	0,859	-0,977	0,674	-0,68	-	-
PID	IAE	1,435	-0,921	0,878	-0,749	0,482	1,137
PID	ITAE	1,357	-0,947	0,842	-0,738	0,381	0,995

Rovira considera o problema de mudança na variável de entrada (problema servo), ou seja, excitação, por exemplo, em degrau. Da mesma forma, otimizando as integrais e fazendo a regressão determinou-se as seguintes equações de sintonia com os parâmetros definidos na tabela (4.7) (Rovira et al., 1969 apud Campos e Teixeira, 2006):

$$Kp = \frac{1}{k}. \left(A^* . \left(\frac{\theta}{\tau} \right)^{B^*} \right) \quad (4.5)$$

$$Ti = \frac{\tau}{(C^* + D^* . \left(\frac{\theta}{\tau} \right))} \quad (4.6)$$

$$Td = \tau. (E^* \cdot \left(\frac{\theta^{F^*}}{\tau}\right)) \quad (4.7)$$

Tabela 4.7 – Parâmetros de sintonia IAE e ITAE.
Fonte: Campos e Teixeira, 2006.

Controlador	Critérios	A*	B*	C*	D*	E*	F*
PI	IAE	0,758	-0,861	1,02	-0,323	-	-
PI	ITAE	0,586	-0,916	1,03	-0,165	-	-
PID	IAE	1,086	-0,869	0,740	-0,130	0,348	0,914
PID	ITAE	0,965	-0,850	0,796	-0,147	0,308	0,929

4.3.1 Algumas Considerações sobre o Método Integral do Erro:

Na prática, de modo geral, as malhas de controles devem ser robustas a variações principalmente no valor de entrada, ou seja, apresentarem uma resposta mais suave quando excitadas com algum sinal. Por isso, o método integral do erro para perturbação na entrada é mais utilizado (Campos e Teixeira, 2006).

Em um trabalho mais recente, para reduzir as variáveis, utilizou-se de análise dimensional, para desta forma obter a sintonia ótima do PID. O modelo escolhido foi de primeira ordem com tempo morto e o fator (θ/τ) de incontabilidade de (0.1 a 2). De acordo com este trabalho as sintonias ficaram determinadas como mostra a tabela 4.8 (Tavakoli e Tavakoli, 2003 apud Campos e Teixeira, 2006).

Tabela 4.8 – Sintonia IAE e ITAE.
 Fonte: Campos e Teixeira, 2006.

Fator Adimensional	IAE	ITAE
$Kp \times K =$	$\frac{1}{((\theta/\tau) + 0,2)}$	$\frac{0,8}{((\theta/\tau)) + 0,1}$
$\frac{Ti}{\theta}$	$\frac{(0,3 \cdot (\theta/\tau) + 1,2)}{((\theta/\tau) + 0,08)}$	$0,3 + (\frac{1}{(\theta/\tau)})$
$\frac{Td}{\theta}$	$\frac{1}{(90 \cdot (\frac{\theta}{\tau}))}$	$\frac{0,06}{((\theta/\tau) + 0,04)}$

5 Índices de Desempenho de Malhas de Controle

Índice de desempenho para malhas de controle é uma medida quantitativa para avaliar um sistema de controle de acordo com algumas especificações pré-determinadas, ou seja, são índices que avaliam um sistema de controle de acordo com parâmetros que lhe são mais importantes (Dorf e Bishop, 1998).

Ao longo dos anos, a análise de desempenho de sistemas de controle, geralmente, era feita visualmente com aplicação de um degrau no valor desejado do processo e desta forma determinavam-se o sobre valor, tempo de assentamento. Todavia, com a evolução dos sistemas de aquisição de dados, hoje, outros índices são utilizados (Campos e Teixeira, 2006).

Segue abaixo alguns exemplos de índices de desempenhos (Campos e Teixeira, 2006):

- Índice de Harris;
- Variabilidade;
- Número de mudanças no “*setpoint*”;
- Tempo de assentamento;
- Critério ITAE;
- Percentual do tempo de operação da malha de controle em manual;
- Percentual do tempo de operação da malha de controle saturada, ou seja, operando com 100% na saída do controlador.

5.1 Índice para Acompanhar a Variabilidade do Processo

A variabilidade do processo é um índice que mostra a dispersão da variável de processo em relação ao valor desejado, ou seja, mostra a proximidade da variável de processo do valor de referência. Portanto é uma medida estática. A variabilidade de processo, geralmente, é calculada como sendo duas vezes o desvio padrão do erro dividido pela média (que neste caso normalmente é valor de referência). A equação (5.1) mostra o cálculo da variabilidade de processo (Campos e Teixeira, 2006).

$$\text{Variabilidade} = \frac{2 \cdot \delta}{\mu} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

Na qual:

δ = desvio padrão.

μ = média (neste caso o valor de referência do processo).

Como a média, para diferentes malhas de controle, possuem valores diferentes a equação (5.1) não permitir a comparação entre as malhas. Uma solução para este problema é substituir a média, por uma região de interesse. Por exemplo, em um controle de temperatura, de duas malhas diferentes, é de interesse que ambas operem aproximadamente em torno de 30° do seu valor de referência. Portanto a média pode ser substituída por essa faixa de interesse, geralmente denominada de range. A equação (5.2) mostra o novo cálculo para variabilidade de processo (Campos e Teixeira, 2006).

$$\text{Variabilidade} = \frac{2 \cdot \delta}{\text{Range}} \cdot 100\% \quad (5.2)$$

Enfim, este índice por ser acompanhado e assim propor soluções para reduzi-lo. Contudo deve-se conhecer bem o processo, pois alguns exigem que essa variabilidade seja alta (Campos e Teixeira, 2006).

5.2 Índice Baseado em Controle com Variância Mínima

Este índice é o que compara a variância atual da saída do sistema com a estimativa da variância mínima teórica. Desta forma, esta análise é feita a partir dos dados de operação da planta, sem a utilização de testes iniciais, por isso é muito utilizado como parâmetro. A variância mínima teórica é obtida a partir do trabalho de Aström em 1970, sobre processo de predição ótima de processos. Sendo este, o melhor controlador linear que minimiza a variância da saída do processo. Posteriormente, em 1989 Harris demonstrou em seu trabalho que se pode determinar a variância mínima do sistema, utilizando os dados ao longo tempo da planta e o tempo morto da mesma (Campos e Teixeira, 2006).

No trabalho de Desborough e Harris, em 1992, determinou-se um índice de desempenho de malhas de controle com a utilização de controladores de variância mínima. Este índice, denominado índice de Harris, é calculado como sendo a razão entre o controlador de variância mínima (teórica) e a variância atual da saída do sistema. Desta forma, melhor controlador é aquele que apresentar o índice mais próximo de 1. A equação apresenta o índice de Harris (Desborough e Harris, 1992 apud Campos e Teixeira, 2006):

$$\text{Índice de Harris} = \frac{\sigma^2_{MV}}{\sigma^2_Y} \quad (5.3)$$

Na qual:

σ^2_{MV} = variância mínima do controlador;

σ^2_Y = variância da saída do sistema.

A principal característica deste índice é que ele permite estimar o valor da variância mínima do controlador, utilizando os dados atuais da planta, ou seja, não é necessária uma interferência na operação. Todavia ainda é necessária a estimativa do tempo morto do sistema. Os cálculos detalhados e outras formas de se obter a variância mínima são apresentados no trabalho de Kempf 2003 (Kempf, 2003 apud Campos e Teixeira, 2006).

5.2.1 Algumas Considerações sobre o Índice Baseado em Controle com Variância Mínima

O índice de Harris, geralmente, é utilizado como referência e não como um valor absoluto. Desta forma, depois de uma análise do sistema, determina-se que o desempenho da malha é bom quando o índice Harris é igual a um valor arbitrário, por exemplo, 0,5. Este valor arbitrário é então o seu valor de referência, ou seja, quanto mais próximo de (0,5) melhor o desempenho da malha. (Campos e Teixeira, 2006).

Na prática, em alguns casos, deseja-se que a variância mínima seja da variável manipulada e não da variável de processo (Campos e Teixeira, 2006).

5.3 Algoritmo para Detecção de oscilações

O trabalho de Hägglund, em 1995, sugere uma metodologia para detectar oscilações em controladores proporcionais e integrais e controladores proporcionais integrais e derivativos. Baseado no valor do índice de desempenho da integral do valor absoluto do erro (IAE). A equação 5.4 mostra como é calculado este índice (Campos e Teixeira).

$$IAE = \int_{t_1}^{t_2} \|PV - SP\| dt \quad (5.4)$$

Na qual:

PV = Variável de processo ou variável controlada;

SP = Valor desejado.

O algoritmo, deste trabalho, descreve o seguinte procedimento: quando o valor da integral for maior que o determinado limite incrementa-se um contador, pois este é indicativo que existe uma perturbação no sistema. Se ao longo do tempo, que é outro parâmetro do algoritmo, o número de perturbações for maior que um determinado limite, então o resultado do algoritmo é que existe oscilação na malha de controle (Campos e Teixeira, 2006).

5.3.1 Algumas Considerações sobre a Detecção de Oscilações

Como a detecção de oscilações não é um índice, ou seja, apenas determina-se a existência ou não de oscilação na malha de controle. Então deve ser feita uma análise a fim de isolar e solucionar a possível causa do problema (Passos et al., 2005 apud Pires, 2011).

Desta forma, detectada a oscilação, sua causa pode se identifica partindo desses pontos:

- Oscilação devido à carga ou perturbação;
- Oscilação devido à sintonia inadequada;
- Oscilação devido ao desgastes dos instrumentos da malha de controle ou mau dimensionamento (Pires, 2011).

5.4 Percentual do tempo fora do modo automático

Este índice mostra percentualmente o tempo em que o controlador opera em modo manual. Desta forma, quanto menor melhor o desempenho, ou seja, o controlador está atuando no sistema.

5.5 Percentual do tempo com o controle saturado

Este índice mostra percentualmente o tempo em que controlador opera com sua saída com valor máximo, ou seja, 100%.

5.6 Algumas Considerações sobre os Índices de Desempenho

Um método para comparar estes índices é normalizá-los em relação a uma referência (R) e ao limite de máximo ou mínimo. Sendo assim quanto menor este índice melhor o desempenho da malha de controle. A equação mostra o cálculo deste índice (Brittain, 2003 apud Campos e Teixeira, 2006).

$$\text{Índice} = 100. \left(\frac{\text{Índice} - R}{\text{Limite} - R} \right) \quad (5.5)$$

6 Soluções em Avaliação de Desempenho Oferecidas pelo Mercado

Essas soluções consistem basicamente em softwares que coletam os dados das unidades industriais e os transformam em informações de desempenho das malhas de controle das plantas. Atualmente existem diversos sistemas computacionais e com diferentes funcionalidades. Tudo isso dificulta na escolha do melhor para uma determinada aplicação. Este capítulo apresenta algumas das soluções disponíveis no mercado.

6.1 PlantTriage

Oferecido pela ExperTurner, o PlantTriage é um software de monitoramento, avaliação e diagnóstico de malhas de controle. Sendo que, ele avalia as malhas de controle, propõe possíveis soluções além de gerar relatórios. Toda essa análise é feita através de 60 índices de desempenho (Rodrigues, 2010).

Suas principais funcionalidades são (Pires, 2011):

- Monitoração 24h de todas as malhas de controle;
- Vários índices de avaliação diferentes;
- Listagem das principais malhas de controle com maior oportunidade de retorno econômico, direcionando assim os recursos de manutenção;
- Apresentação do desempenho das malhas de controle, unidades e planta através de navegadores *Web*, permitindo o monitoramento a partir de qualquer computador e em a única tela;
- Utiliza protocolo de comunicação OPC;
- Ferramentas para diagnósticos rápidos de problemas e sintonias de malhas.

6.2 Econ CPA

Oferecido pela Econ é um software para avaliação de desempenho de malhas de controle. A análise é feita primeiramente com a coleta de dados via OPC DA. O desempenho das malhas de controle é gerado a partir do acompanhamento de diversos índices (Econ, 2014).

Segue abaixo a descrição de alguns de seus índices (Econ, 2014):

- Indicador de Oscilação;
- Indicador de Oscilação;
- Indicador de Inatividade: Identifica as malhas com sintonia muito conservadora;
- Indicador de Harris: Este índice é uma medida de quão ideal estão às ações de controle;
- Indicador de Perturbação;
- Indicador de Agarramento;
- Indicador de Não-Linearidade;
- Principais frequências de oscilação.

6.3 TriCLP

O TriCLPM (TriSolutions Control Loop Performance Monitor) é um *software* para avaliação e monitoramento do sistema de controle do processo industrial. Permite a identificação das malhas de controle críticas com mau desempenho e das suas causas, reduzindo o tempo gasto com análises e possibilitando a manutenção preditiva (TriSolutions, 2014).

Algumas de suas funcionalidades são (Pires, 2011):

- Detecção de oscilação;
- Correlação entre as malhas e possíveis causas de oscilações;
- Quantificação do potencial de redução de variabilidade;
- Condição de atuadores e elementos finais de controle;
- Fatores de serviços de controladores;
- Monitoramento de alteração de ajuste de controle PID;
- Coleta de dados via OPC;
- Permitir o desenvolvimento de drivers de comunicação específicos para protocolos proprietários.

7 Considerações Finais

Este assunto é de extrema importância para indústrias. Todavia não existe nenhum estudo, não comercial, que compara o desempenho destes softwares, nem a distribuição do mesmo no mercado. (Pires, 2011).

Por fim, a utilização destas ferramentas se torna um componente indispensável para as indústrias atingirem seus objetivos de desempenho em suas plantas. Contudo para que esse ganho seja efetivo é necessário o acompanhamento de um profissional qualificado, para em posse de todas essas informações. Tomem as decisões que realmente solucionem os problemas e/ou melhorem o desempenho.

A escolha da ferramenta deve ser fruto de um estudo que abrangem a disponibilidade, custo implantação, e custo de acompanhamento e atualização do sistema.

7.1 Sugestão de Trabalho Futuro

Para a realização de um trabalho prático sugere a utilização de pelo menos dois índices de desempenho desses discutidos neste trabalho, pra avaliar diferentes tipos sintonias de controle, por exemplo, método ZeN e método CHN, para uma determinada malha controle. O desenvolvimento deste trabalho pode ser utilizando o software Matlab.

8 Referências Bibliográficas

- CAMPOS, M. C. M. M.; TEIXEIRA, H. C. G. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. [S.l.]: Edgard Blücher, v. 1, 2006. 396 p.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de controle modernos**. 8. ed. [S.l.]: LTC, 2001. 724 p.
- ECON. **ECON**. Disponível em: <http://www.econ.eng.br/Econ_-_Engenharia_de_Control_e_Monitoramento,_Avaliacao,_Diagnostic_o_de_Malhas_de_Control_e_Sintonia_PID_-_Econ_CPA.html>. Acesso em: 06 Julho 2014.
- EXPERTURNE. **ExperTurne**. Disponível em: <<http://www.expertune.com/plantTriage.aspx>>. Acesso em: 10 Julho 2014.
- NISE, N. S. **Engenharia de sistemas de controle**. 3. ed. [S.l.]: LTC, 2002. 695 p.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4. ed. [S.l.]: Pearson Prentice Hal, 2003.
- PIRES, L. C. **REVITALIZAÇÃO DO SISTEMA DE AUDITORIA DE MALHAS DE CONTROLE NA PELOTIZAÇÃO**, Ouro Preto, Janeiro 2011. Monografia (Programa de Especialização em Pelotização, do convênio entre a Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP e a Valer- Educação Vale). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2011.
- RODRIGUES, B.-H. S. **AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE MALHAS DE CONTROLE**, Ouro Preto, 2010. Monografia (Trabalho de Final de Curso em Engenharia de Controle e Automação). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2010.
- TRISOLUTION. **Trisolution**. Disponível em: <<http://www.trisolutions.com.br/produtos-interna/triclpm/>>. Acesso em: 06 Julho 2104.

