



## FERRAMENTAS DE MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE CONTROLADORES: ATÉ ONDE PODEMOS CHEGAR ATUALMENTE?

Márcio Ferreira e Jorge O. Trierweiler

<sup>1</sup>Nome Grupo de Integração, Modelagem, Simulação, Controle e Otimização de Processos (GIMSCOP)  
Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Rua Luiz Englert,  
s/n, CEP: 90040-040, Porto Alegre - RS – Brasil. {marf, jorge}@enq.ufrgs.br

**Palavras chaves:** auditoria de malhas, controle avançado, controle de processos, auditoria de controladores preditivos,

### Resumo:

O monitoramento e a avaliação de desempenho de malhas de controle são indispensáveis para assegurar a qualidade do controle automático do processo e conseqüente operação segura e lucrativa da planta. O algoritmo de controle e seus parâmetros de ajuste são escolhidos de forma a minimizar o erro existente entre a saída medida do processo e o valor de referência especificado. Estes parâmetros podem diferir significativamente dos parâmetros ótimos causando uma abrupta ou gradual deterioração do desempenho da malha de controle com o passar do tempo. Com o objetivo de se monitorar e avaliar este desempenho foram desenvolvidas várias ferramentas computacionais, com diferentes bases teóricas, que monitoram automaticamente a saída do processo fornecendo notas ou índices que quantificam a qualidade do ajuste e conseqüente desempenho da malha de controle. Entre elas podemos citar as ferramentas tradicionais de desempenho (ISE, IAE, etc.), e as ferramentas baseadas em variância mínima, em correlação entre os sinais de entrada e/ou saída e em detecção de oscilações, entre outras.

De posse destes índices é possível, para o engenheiro, verificar de forma rápida e eficiente qual das suas malhas está com melhor ou pior desempenho, priorizando ajustes e aumentando a eficiência e a lucratividade do processo.

Para uma eficiente avaliação de uma malha de controle é necessária uma correta interpretação dos índices de desempenho existentes. Para isto é importante que se conheçam bem os pontos fortes e fracos de cada um deles e também quais informações cada um está apto a fornecer sobre o processo.

### 1 INTRODUÇÃO

O monitoramento e avaliação de desempenho de malhas são essenciais para assegurar a qualidade do controle de processos e conseqüente operação segura e lucrativa da planta. O projeto inicial de sistemas de controle inclui muitas incertezas causadas por aproximações de modelos, estimações de dinâmicas de perturbações e suposições sobre condições operacionais do sistema. O algoritmo de controle e os parâmetros de ajuste são escolhidos com o objetivo de eliminar estas incertezas e podem diferir significativamente dos parâmetros ótimos da planta. Até mesmo se os controladores operarem inicialmente de forma satisfatória, diversos fatores internos e externos ao processo podem causar uma abrupta ou gradual deterioração do seu desempenho. Entre estes fatores podemos citar alguns principais como erro do sensor ou do atuador, equipamento operando em condições operacionais distintas das inicialmente empregadas no ajuste das malhas, variações de alimentação dos equipamentos, mudanças de especificações de produto e até mesmo influências



## Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

climáticas. Estima-se que 60% de todas as malhas industriais têm problemas graves de desempenho (Miller, 2001), sendo que grande parte destas efetuam uma ação contrária à desejada, ou seja, aumentando a variabilidade da planta e causando enormes prejuízos que não são percebidos em uma análise rotineira. Além disso, na maioria das indústrias, existe a um número reduzido de engenheiros de controle para avaliar centenas ou milhares malhas tornando intratável a análise de dados de forma não automática. Estes fatos acentuam a necessidade do desenvolvimento de técnicas eficientes de monitoramento automático em tempo real para avaliação de desempenho e diagnóstico de malhas de controle.

Os benefícios de se empregar tais técnicas são evidentes: produto com baixa variabilidade e aumento da qualidade, melhor uso da energia e matérias-primas, processo de manutenção melhorado (manutenção preditiva) e assim por diante. Mas estes benefícios somente podem ser alcançados quando respondermos as seguintes perguntas: O processo pode melhorar? E em caso afirmativo, quanto? Para responder estas perguntas necessitamos não só de uma escala, mas também de uma métrica capaz de quantificar o desempenho atual e alcançável da malha analisada.

Na seção 2 deste trabalho teremos uma breve revisão dos índices existentes atualmente e qual informação eles nos fornecem a respeito do desempenho da planta. Na seção 3 será demonstrado e analisado o comportamento de uma unidade de 3 tanques esféricos, a qual serve de exemplo ilustrativo neste trabalho. Nesta seção também serão apresentados os pontos de operação, bem como os diferentes tipos de ajuste (bom, médio e ruim) que serão empregados nos estudos comparativos que serão apresentados na seção 4. Por fim, na seção 5 será apresentada a conclusão do trabalho.

## 2. REVISÃO DOS MÉTODOS DE MONITORAMENTO E DIAGNÓSTICO DE MALHAS DE CONTROLE

Vários métodos estatísticos clássicos sempre estiveram disponíveis e foram largamente empregados para se determinar a qualidade de processos produtivos contínuos. Estes métodos são comumente conhecidos por Controle Estatístico de Processo ou CEP. Um dos principais problemas do CEP é o tratamento ineficaz da parte dinâmica do processo, essencial nas malhas de controle automático.

Crítérios de desempenho bastante versáteis e simples são os critérios baseados nas integrais do sinal de erro (IAE, ISE e ITAE), pois consideram todo o comportamento dinâmico do processo, ao invés de características isoladas. Uma breve descrição de cada um destes índices é apresentada a seguir.

### 2.1 Métodos clássicos de auditoria de desempenho de malhas

A Integral do Erro Absoluto (IAE) é a integral do valor absoluto do sinal de erro no tempo. É equivalente à soma das áreas acima e abaixo do valor de referência estabelecido (*setpoint*).

A Integral do Erro Absoluto Ponderado no Tempo (ITAE) é a integral do tempo multiplicado pelo valor absoluto do sinal de erro no tempo. Este índice penaliza erros que se mantêm no tempo sendo, portanto, bons quando podemos tomar ações intrusivas no processo para avaliação de desempenho.

O índice Integral do Erro Quadrático (ISE) refere-se a integral do quadrado do sinal de erro no tempo. Este índice, por definição, penaliza mais valores maiores do sinal de erro, ou seja, grandes desvios do *setpoint* são mais penalizados que os pequenos.

Qualitativamente, quando estes critérios são utilizados como função objetivo de problemas de otimização de ajuste de controladores, o critério ISE tende a gerar uma resposta mais oscilatória e com maior sobre elevação. Já o critério ITAE produz respostas com menor sobre elevação e tempo de assentamento, mantendo índices de robustez bem satisfatórios.

O tempo de assentamento ( $St$ ) é o tempo necessário para se obter a resposta a uma perturbação no interior de uma faixa percentual arbitrária do valor estacionário, geralmente 5%.

O tempo de subida ( $Rt$ ) é o tempo em que o sistema leva para passar de 10% até 90% do valor estacionário para respostas frente à mudança no valor da variável de referência.

Tanto o tempo de assentamento quanto o de subida são índices de desempenho intrusivos que requerem uma intervenção ou mudança no valor de referência para que possam ser obtidos.



## Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

Todos estes índices são conhecidos e utilizados há muito tempo. Alguns deles ainda são largamente utilizados a fim de se verificar se o desempenho de controladores em malhas fechadas.

A principal desvantagem dos métodos citados acima é a incapacidade dos mesmos em fornecer um índice relativo ao máximo desempenho alcançável para uma malha. Em um sistema desconhecido é praticamente impossível saber se um valor obtido pelos índices é um valor bom ou ruim, pois estes dependem de centenas de fatores do processo. A única forma de se estabelecer um valor de comparação seria obter um *benchmark* em determinado intervalo de tempo que se julga que o controlador esteja operando de forma satisfatória e então, a partir deste momento, comparar o desvio do índice em relação ao *benchmark* estabelecido. Esta forma de verificação de desempenho não é ideal, já que geralmente nunca sabemos com certeza se a malha está operando de forma ótima, portanto podemos estabelecer um falso *benchmark*.

Além disto, a maioria dos métodos citados necessita inserir distúrbios ou mudanças de *setpoint* na planta. Isto é ruim já que, geralmente, estas ações geram produtos fora de especificação e muitas vezes são inseguras de serem executadas na planta, podendo ser ainda mascaradas por distúrbios não medidos que ocorrem simultaneamente aos testes realizados.

### 2.2 Métodos de auditoria baseados no controlador de variância mínima

Harris, em 1989, propôs a idéia de quantificar o desempenho de controladores automáticos utilizando os conceitos de controle de variância mínima como ponto de referência conforme Equação 1. O controlador de variância mínima pode ser utilizado como referência, pois o principal objetivo de uma malha de controle é reduzir a variância da variável controlada.

A grande vantagem deste método é o de fornecer um índice relativo ao máximo desempenho alcançável pela malha de controle, além de ser um método que não requer intervenções no processo, como mudanças de ponto de referência ou inserção de distúrbios.

$$h(d) = \frac{s_{MV}^2}{s_y^2} \quad (1)$$

Onde :

$s_{MV}^2$  é a variância mínima do sistema;

$s_y^2$  é a variância medida do sistema, a qual será sempre maior do que a variância mínima do sistema.

Como  $s_{MV}^2$  sempre é menor do que  $s_y^2$ , a relação  $s_{MV}^2 / s_y^2$  será sempre menor do que 1. Assim, o índice de desempenho  $h(d)$  possuirá sempre um valor entre 0 (ajuste ruim) e 1 (ajuste ótimo).

A variância atual da malha,  $s_y^2$  é facilmente obtida utilizando-se ferramentas estatísticas. O principal problema no cálculo deste índice é a estimação da variância ( $s_{MV}^2$ ) que um controlador de variância mínima produziria na planta. Vários algoritmos para estimar esta variância fornecida foram propostos por diferentes autores.

O Índice de Desempenho Normalizado (ANORM) foi criado por Desborough e Harris (1992). Eles propuseram uma metodologia que permite a fácil estimativa da variância mínima a partir de dados rotineiros de processo e, conseqüentemente, a elaboração de um índice normalizado de desempenho de malhas de controladores. O índice de desempenho é calculado através de uma simples regressão linear.

Outro método, também baseado em variância mínima é o FCOR (*Filtering and Correlation*) que se baseia na filtragem e correlação do sinal de saída da planta (Huang, Shah, 1996). Este método, como o da variância mínima também requer o conhecimento do tempo morto da malha de controle e utiliza-se apenas da saída do processo em operação normal para seu cálculo.



## Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

Além destes métodos baseados em variância mínima existem outras técnicas mais simples, mas não menos importantes, que se baseiam em informações obtidas da instrumentação e da análise estatística dos dados de planta. Podemos citar entre eles os índices que monitoram o erro percentual das variáveis controladas, se ocorre ou não oscilações nestas variáveis, o número de inversões e *travel* da válvula de controle, gráficos de auto-correlação e correlação cruzada, bem como o tempo de operação da válvula em posição saturada. Todos estes, em conjunto podem fornecer um retrato da eficiência do sistema, indicando em alguns casos até como resolver-se o problema causador do mau desempenho da malha de controle. Uma descrição detalhada destes métodos pode ser encontrada em Kempf (2003). A maioria destes métodos encontram-se implementados em softwares comerciais de auditoria de malhas, entre os quais podemos citar o *Process Doctor* da empresa Matrikon e o *TriPerfex* da TriSolutions.

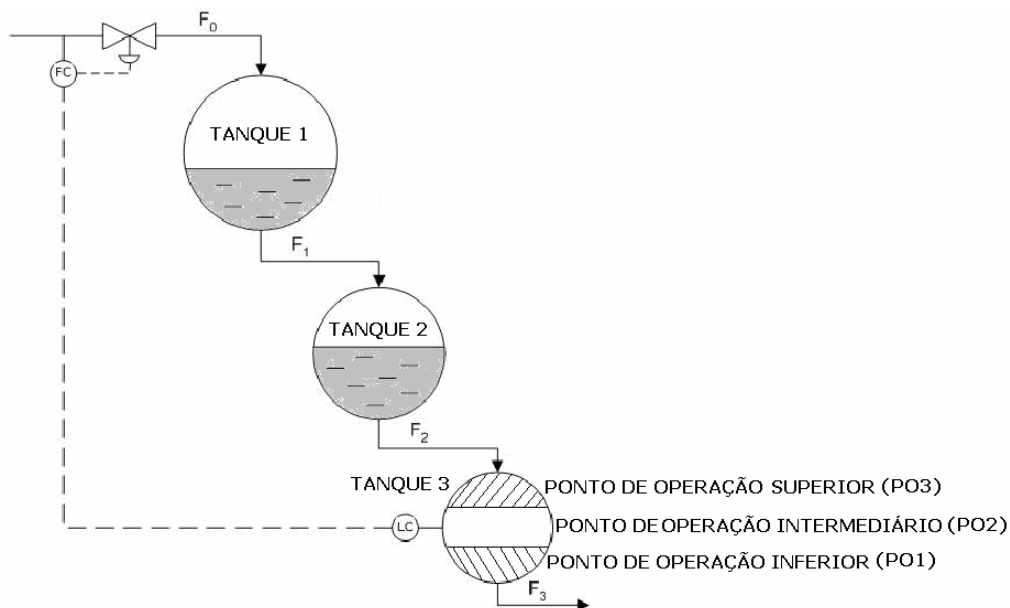
### 3. ESTUDO DE CASO

O presente trabalho utilizou a simulação de um sistema de 3 tanques esféricos acoplados proposta por Faccin (2004) para demonstração e análise dos índices descritos.

Para simulação foi utilizado o Matlab 5.3.1 com o modelo implementado em Simulink 3.0.1.

O sistema proposto possui detalhes de operação importantes e muito comuns em processo industriais como mudanças na dinâmica da planta com a mudança do ponto de operação e múltiplos tempos mortos em série.

O objetivo de controle é manter o nível do terceiro tanque ( $h_3$ ) em três pontos de operação distintos (inferior, intermediário e superior), manipulando a vazão líquida que alimenta o sistema ( $F_0$ ). Os dois tanques anteriores, de maior volume, estão presentes para absorver distúrbios na vazão de alimentação, e tornam o sistema mais complexo. Este sistema pode ser visualizado na Figura 1.



**Figura 1 – Representação esquemática simplificada do sistema de 3 tanques esféricos.**

Nesta representação, a variável manipulada efetiva é a abertura de válvula da corrente de alimentação, contudo, a malha de controle considerada atua sobre o valor de referência da vazão  $F_0$ , que, por sua vez é controlada por outra malha em uma configuração do tipo cascata.

Na prática, esta configuração é bastante usual para diminuir o efeito de distúrbios sobre o sistema, pois a malha interna apresenta dinâmica bem mais rápida. Para considerar a influência da dinâmica de sensores, atuadores e atraso inerente do processo foram adicionados tempos mortos ao modelo do processo. O tempo morto total do sistema foi de 2 segundos, distribuídos igualmente em cada um dos tanques.



## Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

O modelo descritivo do sistema foi obtido através da modelagem fenomenológica do processo, considerando um balanço material sobre cada tanque esférico, onde  $h_i$  é o nível do tanque  $i$ , definido pela Equação 2 e  $F_{in}$  é a vazão de descarga do tanque  $i$ , dependente do nível líquido, considerando fluxo turbulento.

$$\frac{dh_i}{dt} = \frac{F_{in-1} - (CD_i * \sqrt{h_i})}{\rho * (h_i * D_i - h_i^2)} \quad (2)$$

O diâmetro ( $D_i$ ) e o coeficiente de descarga ( $CD_i$ ), possuem diferentes valores para cada tanque, conforme mostrado na Tabela 1.

**Tabela 1 – Diâmetros e coeficientes de descarga de cada um dos três tanques do sistema apresentado na Figura 1.**

$i$	$D_i$ (cm)	$CD_i$ ( $m^{2,5} \text{min}^{-1}$ )
1	35	0,0169
2	30	0,0183
3	25	0,02

Assumindo que o tanque 3 deva operar normalmente em seu nível intermediário (12,5 cm), porém admitindo variações entre 5 e 20 cm, foram considerados os respectivos modelos representativos destes pontos de operação. O intervalo operacional de vazões é de 0 a 10 L/min. Na Tabela 2 são mostrados os níveis estacionários dos três tanques, o respectivo valor de vazão de alimentação e os parâmetros característicos do modelo, para cada ponto de operação.

**Tabela 2 – Caracterização dos pontos de operação do sistema.**

	$h_{1,\infty}$ (cm)	$h_{2,\infty}$ (cm)	$h_{3,\infty}$ (cm)	$F_0$ (L/min)	$K$ ( $\text{min}/m^2$ )	$\tau_1$ (min)	$\tau_2$ (min)	$\tau_3$ (min)
PO1	7,0	6,0	5,0	4,47	22,36	1,929	1,204	0,703
PO2	17,5	14,9	12,5	7,07	35,36	4,764	2,985	1,736
PO3	28,0	23,9	20	8,94	44,72	3,852	2,450	1,405

Os modelos representativos de cada um destes pontos e a sua resposta a um degrau unitário na entrada do sistema são demonstrados na Figura 2.



$$M_1 = \frac{22,36}{(1,929s + 1)(1,204s + 1)(0,703s + 1)} e^{-0,67s}$$
$$M_2 = \frac{35,36}{(4,764s + 1)(2,985s + 1)(1,736s + 1)} e^{-0,67s}$$
$$M_3 = \frac{44,72}{(3,852s + 1)(2,450s + 1)(1,405s + 1)} e^{-0,67s}$$

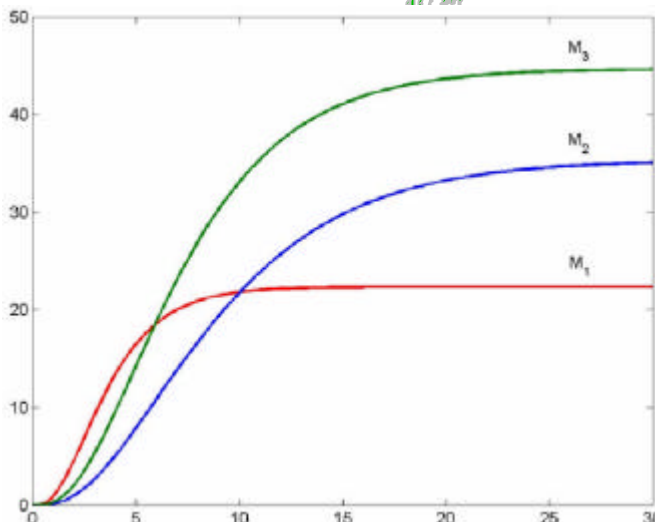


Figura 2 – Representação Resposta a um degrau unitário na entrada do sistema para cada um dos sistemas analisados.

A Figura 2 mostra o comportamento dinâmico dos modelos para uma entrada do tipo degrau unitário. O modelo M1, correspondente ao ponto de operação 1 (nível inferior) apresenta o menor ganho e o menor tempo de assentamento (8,5 min). Já o modelo M3 possui o maior ganho, porém um tempo de assentamento intermediário (17,0 min), enquanto que o modelo M2 é o modelo mais lento (20,9 min).

### 3.1 Ajuste do controlador para operar no ponto de operação intermediário (PO2)

Para comparação entre as diferentes ferramentas de verificação de desempenho de controladores é necessário que se especifiquem diferentes tipos de ajustes para que possamos verificar a eficiência dos mesmos em relação a qualidade da malha de controle. Desta forma foram projetados controladores com ajustes julgados ruins, médios e bons.

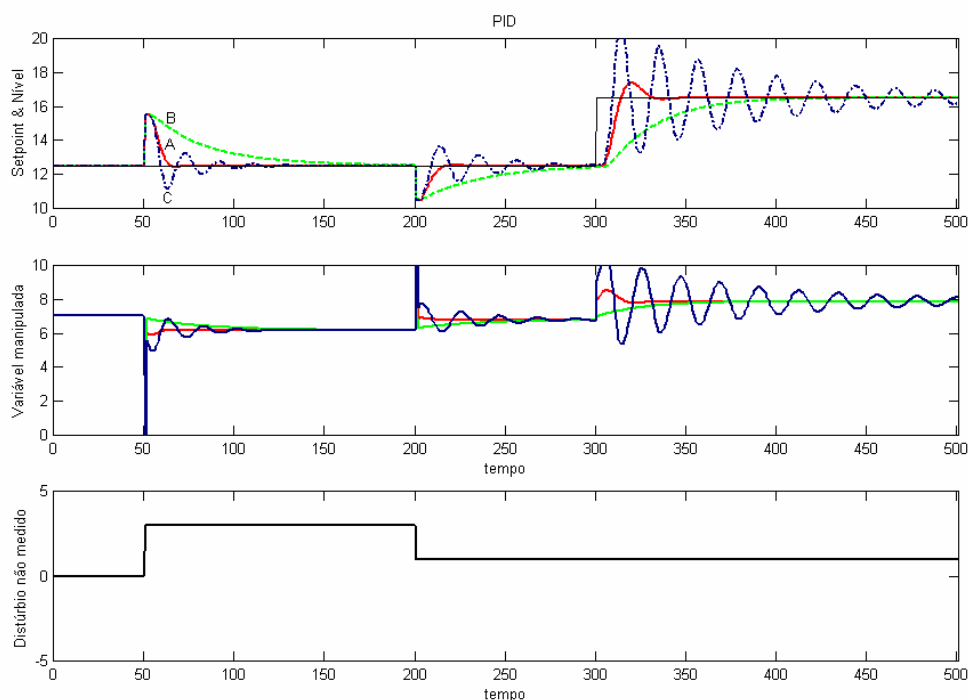
Os parâmetros utilizados no controlador PID do sistema de três tanques esféricos podem ser verificados na Tabela 3.

Tabela 3 – Tipos de ajuste do controlador PID no ponto de operação intermediário (PO2).

	$K_p$	$t_i$	$t_d$
(A) Ajuste BOM	0,30	7,12	1,78
(B) Ajuste MÉDIO	0,06	7,12	1,78
(C) Ajuste RUIM	0,60	5,5	1,00

Aplicando estes ajustes ao PID implementado na simulação do sistema da Figura 1 e aplicando distúrbios na carga e mudanças no *setpoint* obtemos as respostas ilustradas na Figura 3.





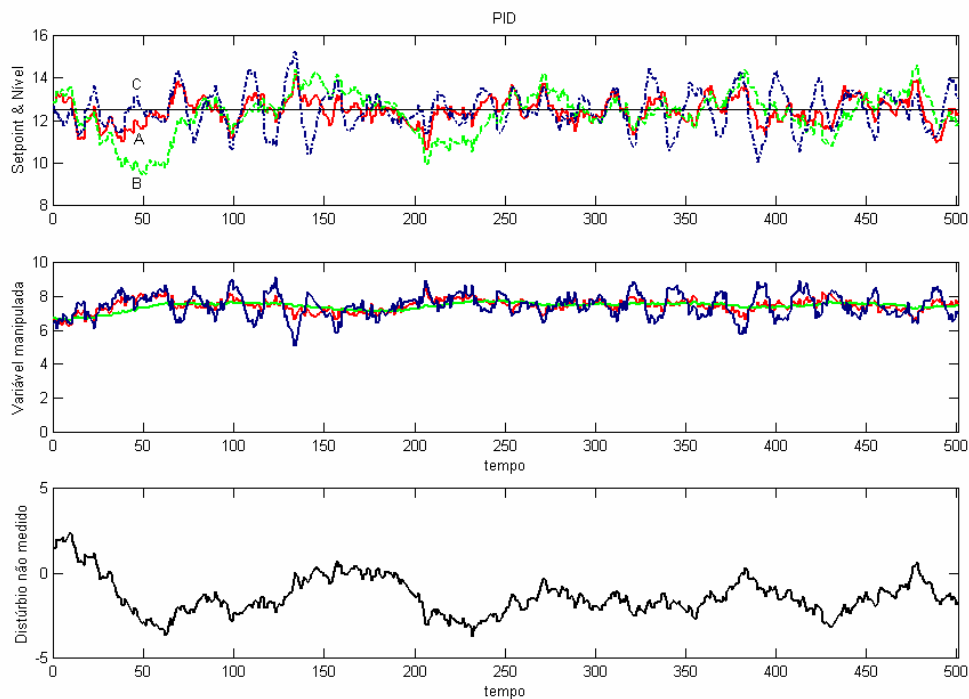
**Figura 3 – Resposta do sistema de 3 tanques esféricos a distúrbios na carga e mudanças no setpoint para os 3 tipos de ajuste apresentados na tabela 3. (A) Ajuste bom, (B) Ajuste Médio e (C) Ajuste Ruim.**

É importante salientar que se admitiu neste trabalho que o ajuste com qualidade média é um ajuste mais lento e o ajuste ruim é o rápido, mas oscilatório. Certamente este tipo de decisão é dependente do processo em estudo. Aqui se optou por esta escolha devido ao ajuste oscilatório ser menos robusto que o ajuste lento sendo, portanto, o pior.

Como citado anteriormente, uma das características mais importantes em um sistema de auditoria de malhas de controle que opere em tempo real é a capacidade de obter informações a respeito do processo de forma **não intrusiva**. Isto quer dizer que as informações a serem analisadas devem ser obtidas sem interferência no funcionamento normal da planta, sem mudanças de *setpoint* ou inserção de distúrbios conhecidos no processo. Desta forma, se dispõe de poucas fontes de informação, basicamente a saída do processo, as ações de controle e algumas outras variáveis coletadas dos instrumentos como válvulas e sensores.

A grande maioria dos métodos de auditoria de malhas de controle empregadas atualmente utiliza os próprios distúrbios existentes no processo para obter os dados necessários para os cálculos. De forma geral, a partir do comportamento passado da planta é possível elaborar um modelo e estimar-se através deste o comportamento futuro. Com isto, os algoritmos podem comparar os dados reais com os modelados e a partir de teorias estatísticas e conceitos de controle de processos estabelecerem um índice que demonstra o desempenho de uma malha em relação ao seu máximo desempenho alcançável.

Para que o sistema modelado tivesse uma maior semelhança com sistemas reais, o distúrbio não medido inserido foi gerado a partir de um ruído colorido. O ruído colorido nada mais é do que um ruído branco com média zero e desvio padrão especificado que passa por uma função de transferência que adiciona uma tendência a este ruído. A resposta da planta ao distúrbio não medido gerado a partir do ruído colorido especificado com os três tipos de ajuste do controlador PID e operando no ponto de operação médio pode ser analisada na Figura 4.



**Figura 4 – Resposta do sistema de 3 tanques esféricos a distúrbios do tipo ruído colorido para os 3 tipos de ajuste apresentados na tabela 3. (A) Ajuste bom, (B) Ajuste Médio e (C) Ajuste ruim.**

Verificamos visualmente, na Figura 4, que o ajuste ruim por ser o mais oscilatório causa uma maior oscilação na variável manipulada. O ajuste médio por ser o mais lento é o que mais se afasta do *setpoint*.

Para comparação dos 3 tipos de ajuste, podemos utilizar os métodos tradicionais (IAE, ISE...), pois já estabelecemos o nosso ajuste ótimo que será o *benchmark*. Os resultados são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4 – Resultados dos índices de desempenho para os diferentes ajustes do controlador no ponto de operação médio (PO2).**

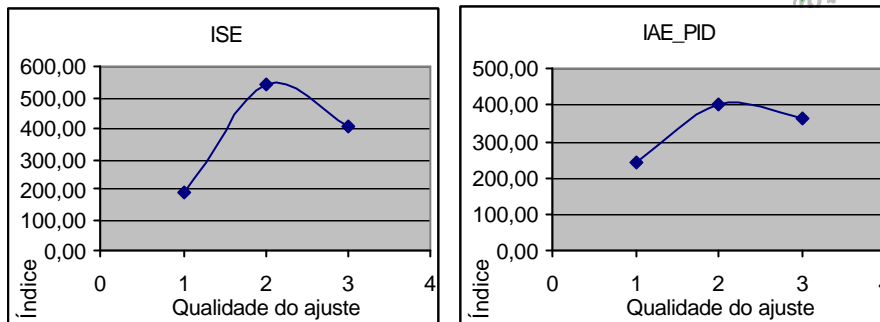
	ISE_PID	IAE_PID
Bom	186,82	244,61
Médio	543,40	399,64
Ruim	408,74	365,80

Verificamos um aumento do valor do índice de acordo com o pior ajuste do controlador verificando a Figura 5.





## Oktober Fórum 2005 – PPGEQ



**Figura 5 – Índices de desempenho ISE e IAE do controlador em função da qualidade do ajuste empregado. 1- Ajuste Bom, 2 - Médio e 3 – Ruim.**

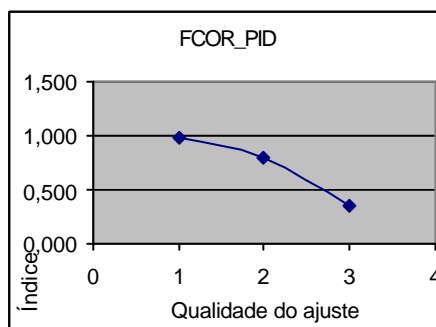
Utilizando os índices de desempenho baseados em variância mínima obtemos os valores da Tabela 5. Estes resultados foram obtidos utilizando-se o algoritmo FCOR com ordem foi igual a 3 e tempo morto igual a 2 segundos distribuídos entre os 3 tanques.

**Tabela 5 – Resultados dos índices de desempenho baseados em variância mínima para os diferentes ajustes do controlador no ponto de operação médio (PO2).**

	FCOR_PID	Var. Mín.	Var_y
<b>Bom</b>	0,996	0,332255	0,577478
<b>Médio</b>	0,811	0,750838	0,962346
<b>Ruim</b>	0,356	0,306069	0,926780

Na Tabela 5 verificamos na primeira coluna o valor fornecido para o índice baseado em variância mínima utilizando o algoritmo FCOR para sua estimativa. Índices próximos de 1 indicam um bom ajuste. Na segunda coluna observamos a estimativa da variância mínima obtida com o algoritmo FCOR e na terceira coluna a variância dos dados de saída da planta.

Graficando os resultados obtemos a Figura 6.



**Figura 6 – Índices de desempenho baseados em variância mínima do controlador em função da qualidade do ajuste empregado para o ponto de operação intermediário. 1- Ajuste Bom, 2 - Médio e 3 – Ruim.**

Analisando os resultados da auditoria no sistema simulado no ponto de operação intermediário verificamos que os métodos clássicos como ISE e IAE foram capazes de capturar a qualidade dos ajustes do controlador empregado. Isto pode ser visto claramente quando analisamos a Figura 5. Analisando os índices ISE e IAE nota-se que no eixo das abscissas temos a qualidade do ajuste previamente especificado. O ajuste bom teve o menor dos índices enquanto o médio teve o índice mais elevado. O ajuste de qualidade ruim teve um índice que ficou entre os 2 anteriores. Conclui-se que os métodos clássicos indicaram o ajuste ruim como sendo melhor que o médio, certamente



## Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

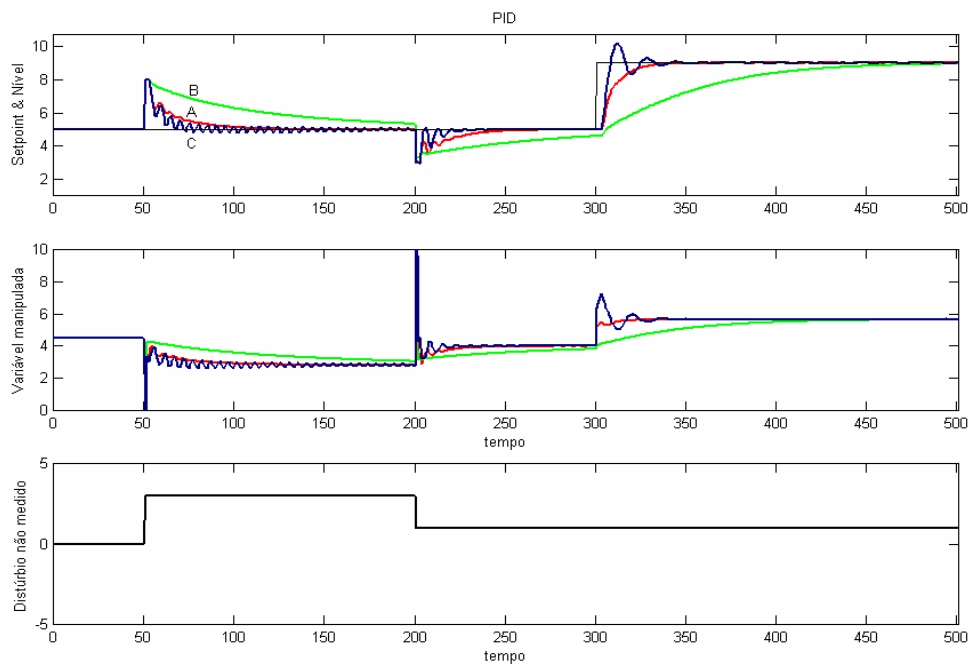
devido ao último ser mais lento e causar uma maior divergência entre a saída do processo e o *setpoint*.

A partir da análise da Tabela 5 e correspondente Figura 6 podemos concluir que o método FCOR, baseado em variância mínima, também foi capaz de diferenciar entre a qualidade dos ajustes do controlador, conforme especificado inicialmente. O índice apresenta valores em uma escala entre 0 e 1, para ajustes ruins e ótimos, respectivamente. O método FCOR indica que o ajuste bom, no ponto de operação intermediário, apresentou um índice em torno de 1, o que indica que não há melhoria a ser feita neste ajuste. O ajuste de qualidade média e ruim apresentaram índices de 0,81 e 0,35, respectivamente, indicando que há possibilidade de melhoria, conforme o esperado. Observa-se que a resposta do método FCOR corresponde ao assumido inicialmente, ou seja, que a resposta mais oscilatória é pior do que a mais lenta. Dessa forma, pode-se dizer que os métodos, ao menos neste caso, consideraram um ajuste robusto melhor do que um ajuste muito rápido.

### 3.2 Desempenho dos Controladores projetados para (PO2) quando aplicados ao (PO1)

Agora, no mesmo sistema citado anteriormente e com os mesmos ajustes do controlador utilizados, demonstrados na Tabela 3, modificamos o ponto de operação do terceiro tanque. No caso anterior a auditoria do sistema com os diferentes índices foi realizada com o nível do terceiro tanque no ponto de operação intermediário e agora o ponto de operação será o inferior.

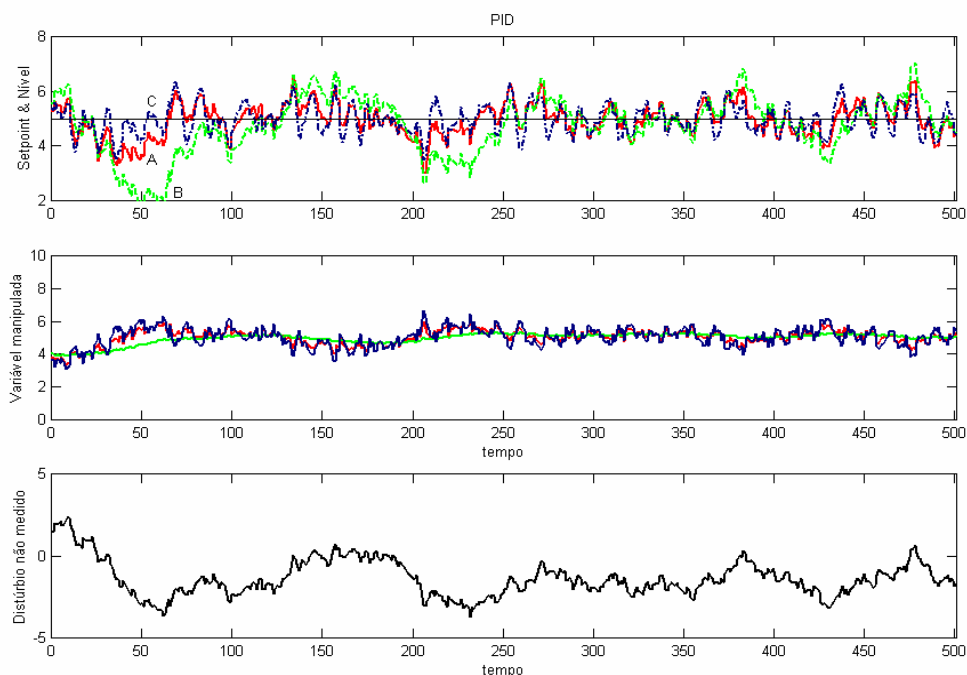
Aplicando o ruído colorido ao sistema no ponto de operação especificado temos como resultado a Figura 8.



**Figura 7 – Resposta do sistema de 3 tanques esféricos a distúrbios do tipo intrusivo para os 3 tipos de ajuste apresentados na Tabela 3 e ponto de operação inferior. Ajuste bom (A), médio (B) e ruim (C).**



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Seminário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química  
Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

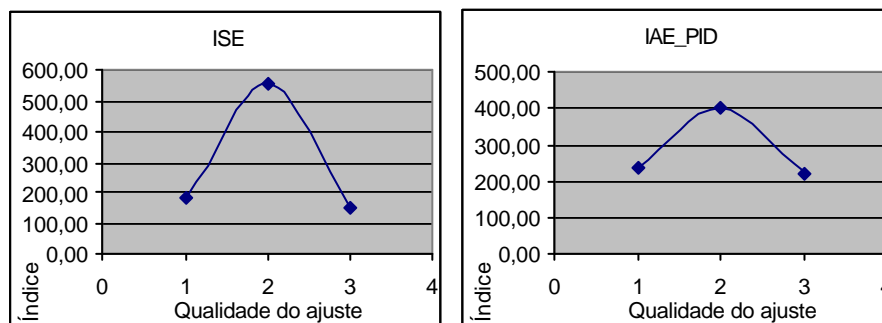


**Figura 8 – Resposta do sistema de 3 tanques esféricos a distúrbios do tipo ruído colorido para os 3 tipos de ajuste apresentados na Tabela 3 e ponto de operação inferior. Ajuste bom (A), médio (B) e ruim (C).**

**Tabela 6 – Resultados dos índices de desempenho para os diferentes ajustes do controlador no ponto de operação baixo (PO1).**

	ISE_PID	IAE_PID
(A) Bom	181,35	238,57
(B) Médio	556,81	404,01
(C) Ruim	148,90	223,09

Verificamos um aumento do valor do índice de acordo com o pior ajuste do controlador verificando a Figura 9.



**Figura 9 – Índices de desempenho do controlador em função da qualidade do ajuste empregado. 1- Ajuste Bom, 2 - Médio e 3 – Ruim.**



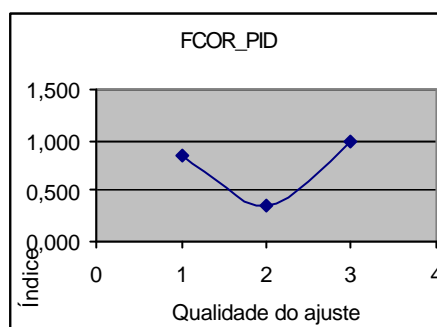
## Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

Utilizando os índices de desempenho baseados em variância mínima obtemos os valores da Tabela 7.

**Tabela 7 – Resultados dos índices de desempenho baseados em variância mínima para os diferentes ajustes do controlador no ponto de operação baixo (PO 1).**

	FCOR_PID	Var. Mín.	Var_y
<b>Bom</b>	0,85	0,26	0,56
<b>Médio</b>	0,35	0,33	0,98
<b>Ruim</b>	1,00	0,31	0,53

Graficando os resultados obtemos a Figura 10.



**Figura 10 – Índices de desempenho baseados em variância mínima do controlador em função da qualidade do ajuste empregado. 1- Ajuste Bom, 2- Médio e 3 - Ruim.**

Analisando o caso onde o ponto de operação do sistema foi o inferior verificamos na Figura 9 que os métodos ISE e IAE apresentaram comportamentos semelhantes. Todos apresentaram o ajuste médio como sendo o pior dos três ajustes. Este resultado condiz com o esperado, já que o ponto de operação inferior possui uma dinâmica mais rápida que o intermediário e conseqüentemente necessita de um ajuste mais rápido do controlador.

O método FCOR apresentou resultados aceitáveis, indicando que o ajuste de qualidade ruim no ponto médio, realmente é o melhor ajuste dos 3 controladores no ponto baixo. Os ajustes de qualidade boa, média e ruim apresentaram valores de 0,66, 0,30 e 0,48 respectivamente, conforme pode ser visto na Figura 10. É importante observar que o método baseado em variância mínima é capaz não só de distinguir entre a qualidade dos ajustes empregados, mas também que todos os ajustes do ponto de operação inferior possuem capacidade de melhora de desempenho. Isto já era esperado, já que os ajustes empregados no ponto inferior foram ajustados para o ponto intermediário. Conforme será discutido posteriormente, esta capacidade de melhora pode ser devido a outros fatores influentes no método e não somente ao desempenho do controlador.

#### 4 ANÁLISES COMPARATIVAS DOS RESULTADOS

Baseado nas discussões sobre os métodos estudados se pode elaborar a Tabela 8.

**Tabela 8 - Análise dos métodos estudados frente a diferentes fatores**

Métodos	Indicador é Absoluto?	Resolução	Análise da Robustez	Análise da Velocidade	Dependência do $t_{amostragem}$
ISE e IAE	Não	-	Ruim	Médio	Baixa
Var. Mínima	Sim	Ruim	Ruim	Bom	Alta

Um indicador pode ser classificado com absoluto quando possui uma escala e uma métrica bem definida para quantificar algum parâmetro. Os métodos ISE e IAE não podem ser classificados como



## Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

índices absolutos, pois não possuem um intervalo fixo de variação do índice. Este é dependente da intensidade do distúrbio aplicado. Este fato é demonstrado no Apêndice A.

Já o método FCOR apresenta um intervalo ou faixa absoluto de variação do índice de desempenho entre 0 e 1 para ajustes ruins e ótimos respectivamente.

A resolução é outro fator importante quando utilizamos um indicador absoluto. A resolução é a capacidade de distribuir os valores relativos às notas do ajuste em questão de forma proporcional sobre a escala, sem concentrações em determinados trechos.

Os métodos de análise de desempenho que utilizam variância mínima como base teórica possuem baixa resolução. Este fato está relacionado com o tempo morto do sistema, pois a ação do controlador só pode ser avaliada depois de transcorrido o tempo morto da malha. Num caso extremo, quando consideramos a relação  $q/t$  (tempo morto / constante de tempo) muito grande pouca diferença fará no desempenho do sistema o ajuste do controlador. Enquanto ele não atua, não ocorre redução da variância e, portanto, o índice de desempenho da malha tem valores reduzidos. No outro extremo, quando o tempo morto é nulo, o controlador atua rapidamente, reduzindo a variância e fazendo com que os índices de desempenho relativos a esta malha se concentrem num intervalo superior da escala.

Podemos concluir que a utilização do método de variância mínima de forma eficiente ainda requer a especificação de uma referência ou *benchmark* devido a sua baixa resolução. Esse problema pode levar a resultados incoerentes como um sistema rápido ( $q/t$  pequeno) de péssimo desempenho a obter índices elevados e sistemas lentos ( $q/t$  elevados) de ótimo desempenho a obter baixos índices. No estudo de caso apresentado a razão  $q/t$  utilizada foi média e não houve variação do tempo morto, o que fez com que a resolução do método fosse relativamente satisfatória.

Os métodos de análise de desempenho de malhas de controle não devem monitorar apenas a velocidade da malha à rejeição de distúrbios ou mudanças de *setpoint*, mas também a sua robustez, ou seja, a sua capacidade de operar eficientemente mesmo com incertezas nos modelos. No estudo de caso apresentado podemos dizer que um controlador robusto é um controlador que poderia operar de forma satisfatória nos pontos superior, inferior e intermediário da planta.

Os métodos clássicos como IAE ou ISE não medem diretamente a robustez do controlador, pois são dependentes diretamente da intensidade do distúrbio aplicado na planta. No cenário fictício apresentado, onde temos os 3 diferentes ajustes e o distúrbio conhecidos verificamos que os métodos clássicos possuem a tendência a penalizar os ajustes mais lentos, que geram um maior erro, enquanto o FCOR foi capaz de classificar o ajuste médio como mais robusto conforme Figuras 5 e 6.

A análise de velocidade da malha é capturada de forma razoável pelos métodos clássicos, apesar deste valor ser ainda dependente da intensidade dos distúrbios, e de forma satisfatória pelos índices de variância mínima. Na Figura 7 podemos verificar que um índice de desempenho elevado é fornecido pelo método FCOR a um sistema com alta velocidade apesar de baixa robustez.

O tempo de amostragem da malha é um fator de elevada importância para os métodos baseados em variância mínima. Estes métodos analisam a correlação do sinal de saída com o distúrbio estimado modelado e a amostragem é muito importante tanto na etapa de predição do distúrbio através do filtro branco quanto na análise de correlação. Já os métodos IAE e ISE são pouco sensíveis a amostragem da malha devido a sua simplicidade de cálculo.

### 5 CONCLUSÃO

Diversos fatores podem fazer com que o ajuste do controlador deixe de ser compatível com a dinâmica da planta. Este fato indica que a auditoria contínua do desempenho e avaliação de malhas de controle em um processo é essencial para manter sua eficiência e conseqüente lucratividade. Como esta tarefa é tediosa esta auditoria deve ser realizada automaticamente por rotinas ou ferramentas computacionais que analisem as variáveis controladas em tempo real. Estas ferramentas baseiam-se nos mais diferentes conceitos para identificar problemas de desempenho em malhas de controle. Cada uma tem suas vantagens e limitações.

Uma análise dos métodos clássicos apresentados (IAE e ISE) e também dos métodos baseados em variância mínima indicam que para sistemas SISO, os índices apresentam desempenhos razoáveis. No exemplo do sistema de 3 tanques esféricos verificamos que os métodos clássicos



## Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

falham quando mudamos o ponto de operação do sistema, pois fornecem uma medida de desempenho inadequada como sendo o melhor.

Com os resultados do estudo de caso apresentados podemos afirmar que os métodos baseados em variância mínima superam os métodos clássicos na indicação da qualidade dos ajustes do controlador empregados.

A principal desvantagem no uso dos métodos de variância mínima é a sua baixa resolução, o que pode fornecer resultados incoerentes na análise das malhas de controle.

A análise de desempenho de malhas de controle possui uma analogia com a avaliação de alunos em sala de aula. Para avaliarmos uma turma de alunos de forma eficaz e justa precisamos aplicar a mesma prova e fornecer o mesmo tempo de resolução a todos os alunos. Em uma malha, o desempenho deve ser avaliado aplicando-se um distúrbio de mesma intensidade e fornecer este distúrbio com o mesmo padrão e tipo para todos os diferentes ajustes.

No estudo de caso apresentado, um cenário fictício, é fácil de estabelecer estas condições, mas na indústria, possuímos distúrbios desconhecidos e apenas um ajuste que queremos avaliar. Este fato indica a necessidade de desenvolvimento de índices absolutos que possuam uma boa resolução ou então do estabelecimento de um desempenho máximo alcançável pela malha de controle para que, baseado neste, possamos estabelecer o real desempenho da malha analisada.

### 1.1 APÊNDICE A

#### 1.1.1 Análise da influência da intensidade do distúrbio nos índices analisados

Os índices obtidos na análise do sistema no ponto de operação intermediário e utilizando os ajustes anteriores e distúrbio normal é exibido na Tabela 9.

**Tabela 9 - Análise dos métodos estudados com distúrbio normal.**

	ISE_PID	IAE_PID	FCOR_PID
<b>Bom</b>	186,82	244,61	0,996
<b>Médio</b>	543,40	399,64	0,811
<b>Ruim</b>	408,74	365,80	0,356

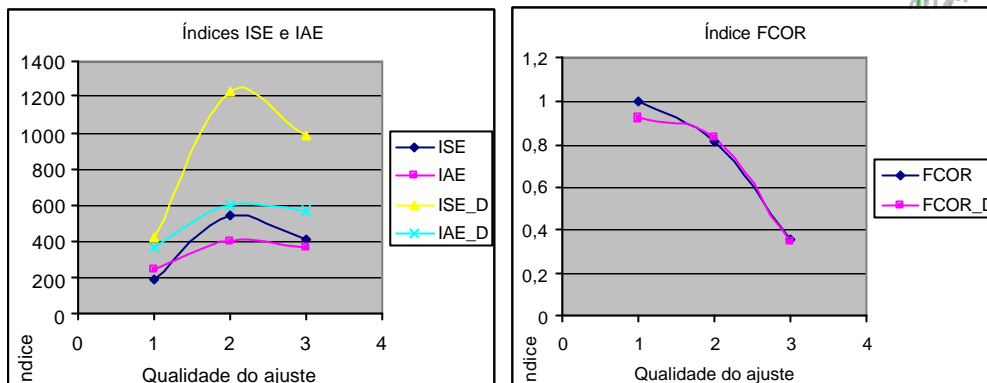
Alterando a intensidade do distúrbio duas vezes obtemos os índices da Tabela 10.

**Tabela 10 - Análise dos métodos estudados com distúrbio normal aumentado 1,5 vezes**

	ISE_PID	IAE_PID	FCOR_PID
<b>Bom</b>	417,85	364,95	0,920
<b>Médio</b>	1222,10	598,98	0,827
<b>Ruim</b>	978,59	568,34	0,343



## Oktober Fórum 2005 – PPGEQ



**Figura 11 – Influência da intensidade do distúrbio nos índices ISE, IAE e FCOR com distúrbio normal e ISE\_D, IAE\_D e FCOR\_D com distúrbio aumentado 1,5 vezes.**

Verifica-se claramente na Figura 11 que os métodos clássicos alteram seus valores muito mais com a variação da intensidade do distúrbio que os métodos baseados em variância mínima como o FCOR.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro concedido pela FINEP/CTPETRO/PETROBRÁS.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HUANG, B.; SHAH, S.; BADMUS, L.; VISHNUHOTLA, A., Control Loop Performance Assessment: An Enterprise Asset Management Solution.
- HUANG, B.; SHAH, S., Performance Assessment of Control Loops. Theory & Applications, Springer, 1999, ISBN 1-85233-6390; DM 139, Journal of Process Control, Volume 11, Issue 4, August 2001, Pages 441-442.
- HUANG, B.; SHAH, S., Practical issues in multivariable feedback control performance assessment, Journal of Process Control, Volume 8, Issues 5-6, October-December 1998, Pages 421-430.
- HARRIS, T. J.; SEPPALA, C. T.; DESBOROUGH, L. D., A review of performance monitoring and assessment techniques for univariate and multivariate control systems, Journal of Process Control, Volume 9, Issue 1, February 1999, Pages 1-17.
- PATWARDHAN, R. S.; SHAH, S. L.; GENICHI, E.; FUJII, H.; Performance Analysis of Model-Based Predictive Controllers: An Industrial Case Study, AICHE Annual Meeting, Miami, Florida, 1998.
- SHAH, S.; HUANG, B.; PATWARDHAN, R. S.; Multivariate Controller Performance Analysis: Methods, Applications and Challenges CPC6 Conference, Tucson, AZ, Janeiro de 2001
- SCHÄFER, J.; CINAR, A.; Multivariable MPC system performance assessment, monitoring, and diagnosis, Journal of Process Control, Volume 14, Issue 2, March 2004, Pages 113-129.
- FACCIN, F.; Abordagem Inovadora no Projeto de Controladores PID. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (2004).
- HUANG, B.; SHAH, S. L.; KWOK, E. K.; Good, Bad or Optimal? Performance Assessment of Multivariable Processes, Automatica, Volume 33, Issue 6, June 1997, Pages 1175-1183.
- MILLER, R., DESBOROUGH, L., Increasing Customer Value of Industrial Control Performance Monitoring – Honeywell's Experience, CPC VI Meeting, 2001.
- Manual de utilização do software TriPerfex da TriSolutions, 2002.
- KEMPF, A. O., Avaliação de Desempenho de Malhas de Controle, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.