

CONTROLE VSI-MRAC APLICADO A SISTEMAS INSTRUMENTADOS DE
SEGURANÇA - SIS

José Adilson Silva de Jesus¹

Eduardo Alves da Costa²

Graziella Santos Ferreira³

Abstract - The industries today seek to create safe conditions for their control activities in areas that require security and preservation of the environment, without exposing the human and material heritage unnecessary risks in its safety instrumented systems. That a condition arises to propose automatic adjustment options implantation conditions adaptive control systems in order to improve the performance, stability and safety of these systems.

Keywords: VSI-MRAC, PID, SIS, Performance, Stability, Control.

Resumo - As indústrias na atualidade buscam criar condições seguras para suas atividades de controle em áreas que demandam segurança e preservação do meio ambiente, sem expor o ser humano e o patrimônio material a riscos desnecessários em seus sistemas instrumentados de segurança. Surge que uma condição para propor opções de ajustamento automático com condições de implantação de sistemas de controle adaptativo com o objetivo de melhorar o desempenho, estabilidade e segurança destes sistemas.

Palavras-chave: VSI-MRAC, PID, SIS, Desempenho, Estabilidade, Controle.

1. INTRODUÇÃO

Os Sistemas Instrumentados de Segurança (SIS) são instalados em linhas de processo para manter as condições operacionais de uma planta de processo dentro de limites toleráveis e funcionais e que em condições de falha ou defeito levem o processo a condição a uma condição segura ou mesmo na condição de shutdown.

¹ Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de São Paulo. Mestrando. jose.jesus@sp.senai.br

² Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de São Paulo. Doutor em Ciências. edu.costa@ifsp.edu.br

³ Faculdade de Tecnologia Adib Moises Dib. Graduanda. grazy_gfs@hotmail.com

As condições com os quais o SIS atuais devem operar os processos industriais são agrupados de duas formas:

- O primeiro conceito em relação à legislação de segurança é garantir que todos os sistemas sejam instalados e operados de forma segura;
- E o segundo é que instrumentos e alarmes envolvidos com segurança sejam operados com confiabilidade e eficiência.

Estas condições dos Sistemas Instrumentados de Segurança (SIS) são evitar acidentes dentro e fora das fábricas, como incêndios, explosões, danos aos equipamentos, proteção da produção e da propriedade e mais do que isto, evitar riscos de vidas ou danos à saúde pessoal e impactos catastróficos para a comunidade (CASSIOLATO, 2016).

Durante anos os sistemas de segurança foram projetados de acordo com os padrões alemães (DIN V VDE 0801 e DIN V 19250), aceitos durante anos pela comunidade mundial de segurança e que convergiram para um padrão mundial, a IEC 61508 e a IEC 61511, que alicerçam todos os projetos de segurança operacional que envolvam sistemas elétricos, eletrônicos, dispositivos programáveis para qualquer tipo de indústria. Este padrão cobre todos os sistemas de segurança que têm natureza eletromecânica.

Estes padrões tratam sistematicamente de todas as atividades do ciclo de vida de um SIS (Sistema Instrumentado de Segurança) e é voltado para a performance exigida do sistema, isto é, uma vez atingido o nível de SIL (nível de integridade de segurança) desejável, o nível de redundância e o intervalo de teste ficam a critério de quem especificou o sistema.

A IEC 61508 busca potencializar as melhorias dos PES (Programmable Electronic Safety, onde estão incluídos os PLC's, sistemas microprocessados, sistemas de controle distribuído, sensores e atuadores inteligentes, entre outros) de forma a uniformizar os conceitos envolvidos.

A ideia básica deste trabalho é elaborar uma metodologia para implantação de um SIS Adaptativo em um processo para que a planta busque através de um algoritmo, se adaptar a uma condição segura em relação à falha ou defeito e reencontrar sua condição ótima de trabalho, mesclando condições adaptativas de controle e segurança sem levar a planta a condição de shutdown.

2. FUNDAMENTOS BÁSICOS

2.1 Processo de Construção de um Sistema Instrumentado de Segurança IEC 61508: Soluções Típicas de SIF (Função Instrumentada de Segurança)

Uma SIF é montada analisando a tolerância a falha dos componentes que iram formar o processo de segurança. A norma prevê que após uma análise detalhada usando ferramentas de HAZOP ou FMEDA (Failure Modes, Effects, and Diagnostic Analysis). O sistema pode ser configurado da seguinte forma:

- Simplex ou votação 1oo1 (1 de 1);
- Duplex ou votação 1oo2 ou 2oo2;
- Triplex ou votação 2oo3;

Na Figura 1, uma estrutura típica com arquitetura SIS 2003.

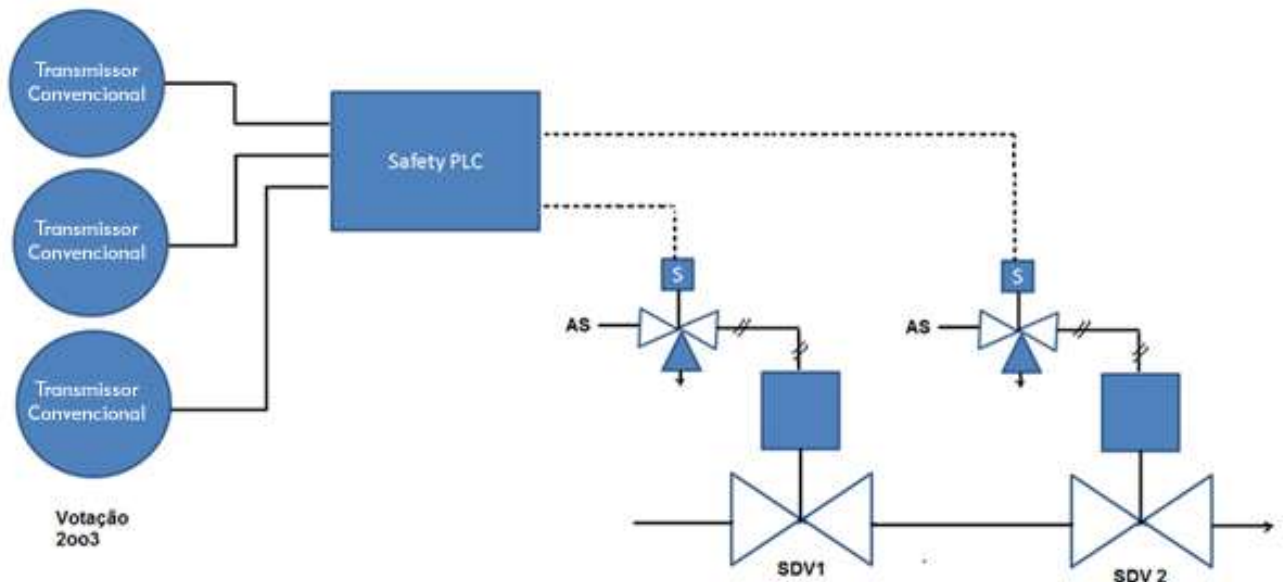


Figura 1: Arquitetura SIS 2003

3. APLICAÇÃO DO SIS CONFORME NORMA IEC 61508

A Figura 2 mostra um processo SIS de um reator, onde um fluido é adicionado continuamente e automaticamente. Se o sistema de controle falhar por uma condição de pressão ou temperatura muito alta, ocorre um alívio de segurança, produzindo um odor indesejável fora da planta. Considera-se que uma taxa de risco aceitável para tal evento é 0.01/ano ou menos (uma vez em cem anos ou 1 chance em 100 por ano). Vamos especificar um Sistema Instrumentado de Segurança (SIS) que atinja estes requisitos de segurança.

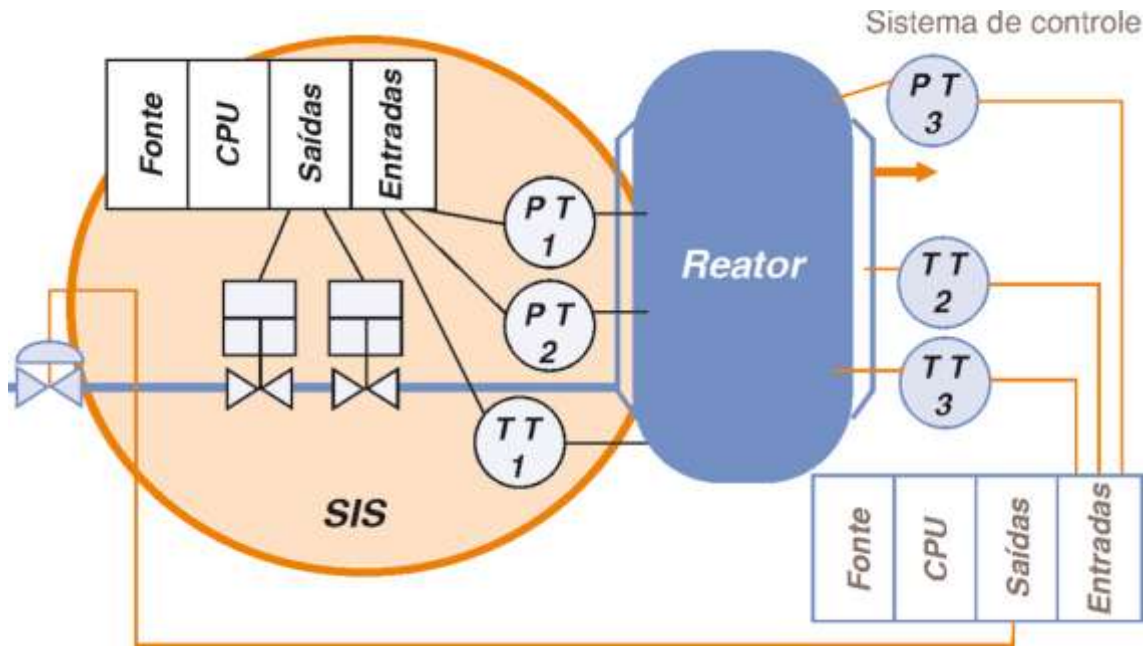


Figura 2: Componentes básicos de um sistema instrumentado de segurança

Fonte: *Understanding Safety Instrumented Systems*, 2007

Para se definir os requisitos de integridade de segurança, a taxa de demanda em relação ao SIS deve ser estimada. Neste exemplo, a taxa de demanda do SIS deve ser a taxa de falha perigosa da malha de controle.

A taxa de falha geral para a malha de controle é estimada a partir das taxas de falhas para os componentes, fornecida pela Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros básicos de taxa de falhas

	Falhas / Ano
Transmissor de pressão	0.6
Controlador	0.3
I/P	0.5
Válvula de controle	0.2
Total de falhas	1.6

A malha de controle em estudo pode falhar em qualquer direção, assumindo-se que as duas são igualmente prováveis. Pelo fato da malha de controle ativo estar sob supervisão do operador, assume-se que apenas 1 falha em 4 seria repentinamente suficiente para causar uma demanda para uma condição de parada sem uma intervenção prévia do operador. Isto gera o resultado geral de (1 em 2) X (1 em 4) ou 1/8 da taxa de falhas geral, que deve ser usada como a taxa de demanda para uma parada. Neste

ponto o projetista defini a arquitetura de trabalho com base no conhecimento específico do equipamento e condições operacionais.

Portanto:

Taxa de Demanda = $1.6/8 = 0.2/\text{ano}$

A indisponibilidade aceitável:

$$\frac{\text{Taxa de Risco}}{\text{Taxa de Demanda}} = \frac{0,01}{0,2} = 0,05$$

A disponibilidade requerida é $= 1 - 0.05 = 0.95$

Propõe-se um SIS com ligação simples e direta para cortar a alimentação quando a pressão do sistema atinge 80% do valor de ajuste da válvula de segurança.

A conformidade pode ser avaliada pela estimativa da indisponibilidade da malha e as taxas de falhas, colocadas como exemplo poderiam ser consultadas para cada fabricante. A malha é projetada para falhar na direção segura, assim admite-se que apenas 1 em 3 falhas seria na direção não segura. Todas estas falhas do sistema passivo não seriam diagnosticadas.

Portanto, a taxa de falhas não diagnosticadas:

$FT = 0.6/3 = 0.2/\text{ano}$

Com uma frequência anual de teste:

$FDT = \frac{1}{2} \times FT = \frac{1}{2} \times 0.2/\text{ano} \times 1 \text{ ano} = 0.1$

Isto proporciona uma disponibilidade de 0.9, que ainda não atende aos requisitos de segurança. Entretanto, a disponibilidade pode ser aumentada com uma frequência maior de testes. Com testes mensais temos:

$FDT = \frac{1}{2} \times 0.2/\text{ano} \times (1/12) \text{ ano} = 0.0083$

Atingindo uma disponibilidade > 0.99 . A frequência de teste do projeto deve ser especificada como parte da documentação de projeto. De acordo com a tabela 1, um sistema SIL 1 com testes frequentes deve prover uma disponibilidade de 0.99 atendendo a disponibilidade de 95% requerida (CASSIOLATO, 2016).

Tabela 2: Parâmetros SIL

SIL Safety Integrity Level (per IEC 61508)	Safety Availability	PDF Probability of Failure on Demand 1 - Availability	RRF Risk Reduction Factor 1 / PFD
4	> 99.99%	< 0.0001 ($1E^{-4}$)	> 10,000
3	99.9 – 99.99%	0.001 – 0.0001 ($1E^{-3}$ to $1E^{-4}$)	1,000 – 10,000
2	99 – 99.9%	0.01 – 0.001 ($1E^{-2}$ to $1E^{-3}$)	100 – 1,000
1	90 – 99%	0.1 – 0.01 ($1E^{-1}$ to $1E^{-2}$)	10 - 100
0	Basic Process Control		

4. SISTEMA ADAPTATIVO

O controle das plantas industriais é objeto de estudo da área de sistemas de controle. Quando falamos sobre controladores adaptativos, estamos nos referindo a controladores que mudam seu comportamento conforme novas circunstâncias operacionais. Técnicas de controle adaptativo estão sendo desenvolvidas e cada vez mais são usadas em sistemas de controle industriais. Entretanto, apesar do crescimento significativo e amadurecimento da teoria de controle adaptativo nas últimas décadas, algumas classes de sistemas permanecem longe destas aplicações por motivos quer de norma, ou comerciais, por exemplo os sistemas de segurança das plantas industriais SIS.

O controlador Adaptativo Indireto por Modelo de Referência e Estrutura Variável (Indirect Variable Structure Model Reference Adaptive Controller - VSI-MRAC), dentre outras características, fornece uma menor complexidade no projeto do algoritmo que o caso direto e reduz a amplitude do sinal de controle e o número de relés (Oliveira and Araújo, 2008). O processo de desenvolvimento de um sistema VSI-MRAC aplicado a sistemas instrumentados de segurança pode ser representado por diferentes técnicas. Uma das principais formas é através da especificação dos critérios que tornam o sistema estável do ponto de vista operacional. Como uma generalização dos conjuntos clássicos para compor um processo que englobe o aspecto segurança, foi considerado o modelo da planta piloto da Figura 2 para aplicação do modelo VSI - MRAC proposto por (ARAÚJO et. al 2013).

5. PARAMETRIZAÇÃO DA PLANTA PARA O VSI-MRAC

Nesta seção, será apresentada uma parametrização para plantas *SISO LTI*, sem zeros e de ordem arbitrária, que será útil para os cálculos dos parâmetros da planta e do controlador para implantação em *SIS* a serem apresentados em seções posteriores deste artigo.

Considere a seguinte planta *SISO LTI*

$$y = \frac{Z(s)}{R(s)} = \frac{b}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0} \quad (1)$$

onde b, a_{n-1}, \dots, a_1 e a_0 são constantes desconhecidas e um sinal de controle u deve ser escolhido de maneira que os polos da planta em malha fechada sejam as raízes de um polinômio de Hurwitz mônico $A^*(s)$, conhecido como polinômio característico, e y siga um sinal de referência constante $r, \forall t \geq 0$. A Equação (1) pode ser expressa como uma equação diferencial de ordem n dada por

$$y^{(n)} = -a_{n-1}y^{(n-1)} - \dots - a_1y^{(1)} - a_0y + bu \quad (2)$$

Segue de (2) que o erro de rastreamento $e_1 = y - r$ satisfaz

$$e_1^{(n)} = -a_{n-1}e_1^{(n-1)} - \dots - a_1e_1^{(1)} - a_0e_1 + bu \quad (3)$$

Operando cada lado de (3) com $s \triangleq \frac{d}{dt}$, obtêm-se:

$$e_1^{(n+1)} = -a_{n-1}e_1^{(n)} - \dots - a_1e_1^{(2)} - a_0e_1^{(1)} + bu^1 \quad (4)$$

Adicionando o termo $\alpha^{*T} > \varepsilon$ em cada lado de (4), obtêm-se a seguinte representação:

$$e_1^{(n+1)} + \alpha^{*T} \varepsilon = \theta^{*T} \Psi + \alpha^{*T} \varepsilon \quad (5)$$

Onde:

$$\begin{aligned} \alpha^* &= [\alpha_n^*, \alpha_{n-1}^* \dots \dots \alpha_1^*, \alpha_0^*]^T \in R^{n+1} \\ \varepsilon &= [e_1^{(n)}, e_1^{(n-1)} \dots \dots e_1^{(1)}, e_1]^T \in R^{n+1} \\ \theta^* &= [b, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0]^T \in R^{n+1} \\ \Psi &= [u^{(1)}, -e_1^{(n)}, \dots, -e_1^2, -e_1^{(1)}]^T \in R^{n+1} \end{aligned}$$

e α^{*i} são os coeficientes do polinômio característico $A^*(s)$, ou seja:

$$A^*(s) = s^{n+1} + \alpha_n^*s^n + \alpha_{n-1}^*s^{n-1} + \dots + \alpha_1^*s + \alpha_0^* \quad (6)$$

Reescrevendo a Equação (5) na forma de um modelo paramétrico linear, tem-se:

$$e_1 = W(s)(\theta^{*T} \Psi + \alpha^{*T} \varepsilon) \quad (7)$$

Onde:

$$W(s) = \frac{1}{s^{n+1} + \alpha_n^* s^n + \dots + \alpha_1^* s + \alpha_0^*} = \frac{1}{A^*(s)}$$

Pode-se reescrever (7) na forma

$$e_1 = W(s)L(s)(\theta^{*T}\phi + \alpha^{*T}\xi) \quad (8)$$

Onde:

$$\phi = L^{-1}(s)\psi, \quad \xi = L^{-1}(s)\varepsilon$$

e $L(s)$ é um polinômio escolhido de maneira que $L^{-1}(s)$ seja uma função de transferência própria estável e $W(s)L(s)$ uma função de transferência estritamente real positiva (ERP) e estritamente própria.

6. LEI DE SEGURANÇA PARA O MODELO ADAPTATIVO

Quando se conhece o modelo da planta onde se deseja instalar um sistema SIS, que cumpra seus objetivos rigorosamente conforme IEC 61508, deve-se prever um sistema em separado um para segurança e outro para controle. Neste artigo propõe-se a instalação de segurança que cumpra seu papel bem como efetive o controle do sistema com um controlador simplex adaptativo.

Os parâmetros da planta em (1), com A seguindo a lei de controle por posicionamento de polos:

$$Q_m u = -P_c(s)(y - r) \quad (9)$$

onde $P_c(s)$ é um polinômio de grau n a ser encontrado e $Q_m(s)$ é o modelo interno de r , ou seja, r deve satisfazer

$$Q_m(s)r = 0 \quad (10)$$

Como o sinal r está sendo considerado constante, $\forall t \geq 0$, tem-se que $Q_m = s$. Aplicando (9) ao modelo da planta (1), obtém-se a equação da planta em malha fechada:

$$y = \frac{Z(s)P_c(s)}{Q_m R(s) + P_c(s)Z(s)} r \quad (11)$$

Cuja equação característica é:

$$Q_m(s)R(s) + P_c(s)Z(s) = 0 \quad (12)$$

tem ordem $n + 1$. Com isso, o objetivo é escolher $P_c(s)$, tal que:

$$Q_m(s)R(s) + P_c(s)Z(s) = A^*(s) \quad (13)$$

seja satisfeita pelo polinômio $A^*(s)$ de grau $n + 1$.

Como $Q_m(s)R(s)$ e $Z(s)$ são coprimos, a solução para $P_c(s)$ existe e é única (Ioannou and Sun, 1996).

Devido ao fato do vetor $\theta^* = [b, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0]$ ser desconhecido, utilizaremos a mesma lei de controle, mas com o polinômio do controlador $P_c(s) = p_c s^n + \dots + p_1 s + p_0$ calculado utilizando o vetor de estimativas θ no lugar de θ^* , em cada tempo t , como se seus elementos fossem os verdadeiros parâmetros da planta, assim como é feito quando se utiliza leis de estimação de parâmetros convencionais, de acordo com o princípio de equivalência à certeza (Edgart, 1979).

Portanto, $\hat{P}_c(s) = \hat{p}_c s^n + \dots + \hat{p}_1 s + \hat{p}_0$ é gerado resolvendo a seguinte equação polinomial

$$Q_m(s)\hat{R}(s) + \hat{P}_c(s)\hat{Z}(s) = A^*(s) \quad (14)$$

para $\hat{p}_n, \hat{p}_{n-1}, \dots, \hat{p}_1$ e \hat{p}_0 sendo calculados a partir das estimativas dos parâmetros da planta $\hat{b}_n(t), \hat{a}_{n-1}(t), \hat{a}_{n-2}(t), \dots, \hat{a}_1(t)$ e $\hat{a}_0(t)$, como parâmetros congelados em cada tempo t .

A solução única da Equação Diofantina (14) é dada por:

$$\hat{p}_i = \frac{\alpha_i^* - \hat{a}_{i-1}}{\hat{b}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

$$\hat{p}_0 = \frac{\alpha_0^*}{\hat{b}}$$

onde $\hat{b} \neq 0$. Considerando o polinômio $\hat{P}_c(s)$, o sinal de controle é calculado de maneira semelhante a (9), ou seja:

$$Q_m(s)u = -\hat{P}_c(s)(y - r) \quad (16)$$

Portanto,

$$u = \frac{-\hat{p}_n s^n - \hat{p}_{n-1} s^{n-1} - \dots - \hat{p}_1 s - \hat{p}_0}{s} e_1 \quad (17)$$

A partir da definição apresentada em (8), tem-se que

$$\Phi_1 = \frac{su}{L(s)} \quad (18)$$

Substituindo (17) em (18), obtém-se

$$\Phi_1 = \frac{-\hat{p}_n s^n - \hat{p}_{n-1} s^{n-1} - \dots - \hat{p}_1 s - \hat{p}_0}{L(s)} e_1 \quad (19)$$

ou seja,

$$\Phi_1 = -\hat{p}^T \xi \quad (20)$$

Onde

$$\hat{p} = [\hat{p}_n, \hat{p}_{n-1}, \dots, \hat{p}_1, \hat{p}_0] \quad (21)$$

Para os demais termos de Φ , tem-se

$$\Phi_i = -\frac{s^{n-i+2} e_1}{L(s)} = -\xi_{i-1} \quad (22)$$

para $i = 2; 3; \dots; n + 1$.

7. SIMULAÇÃO

Nesta seção, simulações para plantas instáveis de segunda e terceira ordem sem zeros serão apresentadas.

O objetivo em cada simulação é escolher o sinal de controle u de maneira que os polos de malha fechada sejam alocados nas raízes do polinômio característico $A^*(s)$ e o sinal de saída y siga um sinal de referência constante. No caso das simulações aqui apresentadas, $r = 1$. O passo de integração utilizado foi de $h = 0.001s$ e o método de aproximação no cálculo das derivadas foi o método de Euler.

Nas duas subseções a seguir, os parâmetros e equações de projeto são apresentados em detalhes, de acordo com as equações gerais apresentadas nas seções anteriores.

A generalização desta técnica para plantas de ordem qualquer foi apresentada em (Silva Jr. e Araújo, 2005). Como não envolve o cancelamento de zeros e polos, o projeto do VSI-MRAC pode ser aplicado a plantas de fase mínima e não mínima, para melhorar a ação de segurança e de estabilidade em sistemas de controle. Com esta inclusão nas malhas de controle a possibilidade de se eliminar as redundâncias de instrumentos em processos industriais pode vir a ser analisada e implementada nas indústrias de processo contínuo.

7.1 PLANTA DE SEGUNDA ORDEM

Para a primeira simulação, o modelo da planta da figura 2:

$$G(s) = \frac{1}{(s-1)^2}$$

Os polinômios de projeto escolhidos foram

$$A^*(s) = (s+4)^3, \quad L(s) = (s+3)^2$$

Para os cálculos das estimativas dos parâmetros da planta, são calculados os seguintes vetores de sinais:

$$\Psi = [u^{(1)}, -e_1^{(2)}, -e_1^{(1)}]^T, \quad \Phi = L(s)^{-1}\Psi$$

onde o erro de rastreamento é dado por $e_1 = y - r$.

Trabalhos que demonstram cálculos de estimativas de parâmetros de uma planta industrial podem ser vistos nos trabalhos de (ARAÚJO, JUNIOR, OLIVEIRA, 2013), que são utilizados neste modelo Adaptativo:

$$\begin{aligned} \hat{b} &= \bar{b} \operatorname{sgn}(e_1 \Phi_1) + b_{nom}, & \bar{b} &> |b - b_{nom}| \\ \hat{a}_1 &= \bar{a}_1 \operatorname{sgn}(e_1 \Phi_2), & \bar{a}_1 &> |a_1| \\ \hat{a}_0 &= \bar{a}_0 \operatorname{sgn}(e_1 \Phi_3), & \bar{a}_0 &> |a_0| \end{aligned}$$

Com as estimativas dos parâmetros da planta, calculamos os parâmetros da lei de controle conforme (15), ou seja,

$$\hat{p}_2 = \frac{\alpha_2^* - \hat{a}_1}{\hat{b}}, \quad \hat{p}_1 = \frac{\alpha_1^* - \hat{a}_0}{\hat{b}}, \quad \hat{p}_0 = \frac{\alpha_0^*}{\hat{b}}$$

Calculados os parâmetros do controlador, geramos o sinal de controle conforme (17), ou seja,

$$u = \frac{-\hat{p}_2 s^2 - \hat{p}_1 s - \hat{p}_0}{s} e_1$$

O comportamento do sistema é apresentado na figura 3, com uma variação de 10% nos valores nominais dos seus parâmetros, em $t > 3s$. As constantes utilizadas nos relés para esta simulação foram: $b_{nom} = 1.1$, $\bar{b} = 0.2$, $\bar{a}_1 = 2.2$ e $\bar{a}_0 = 14$.

O tempo de convergência foi de $0.997s$, considerando uma tolerância de 2%, e a porcentagem de overshoot foi de 1.86%.

Além de apresentar transitório rápido e sem oscilações, podemos observar que o sinal de controle é suave, de forma diferente do sinal de controle do VS-MRAC e das abordagens que o aperfeiçoaram, onde o sinal de controle é chaveado em alta frequência. A justificativa para isso é que no projeto aqui apresentado, tem-se a presença do modelo interno de r , $Q_m(s)$, conforme pode ser visto no denominador de (17).

As escolhas para as constantes de projeto interferem diretamente no resultado da simulação e de uma implementação prática. Por exemplo, a escolha dos polos de malha fechada, que são as raízes do polinômio $A^*(s)$, afeta a magnitude do sinal de controle, o que pode tornar necessária a sua saturação, a resposta transitória do sistema, que pode apresentar oscilações, e o tempo de convergência do sinal de saída da planta para a referência. A simulação apresentou transitório bastante rápido e sinal de controle suave, mesmo com a agregação do controle por estrutura variável, o que não causa a necessidade de diminuição do chaveamento e/ou de suavização, possibilitando assim a

aplicação desta técnica em diversos tipos de atuadores para estabilizar processos nas condições de trabalho segura e eficientes (ARAÚJO et al. 2013).

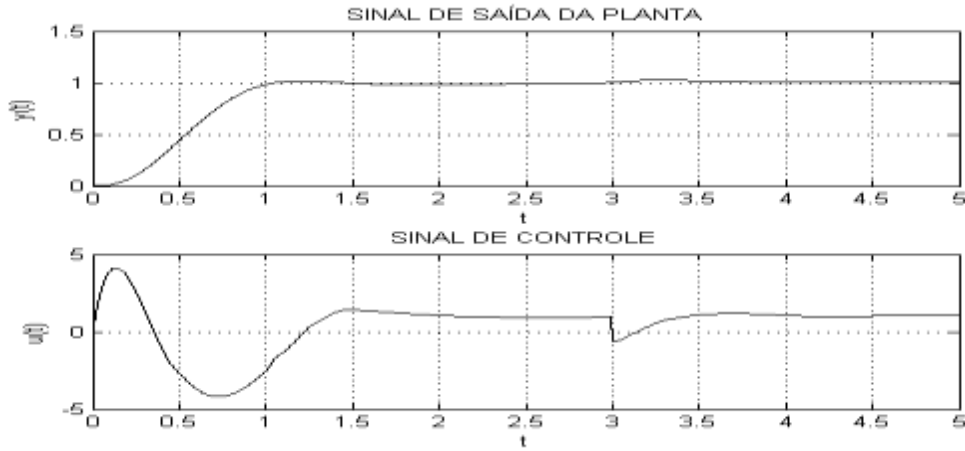


Figura 3: VSI-MRAC aplicado a planta com $\frac{1}{(s-1)^2}$

7.2 PLANTA DE TERCEIRA ORDEM

Para a segunda simulação, o modelo matemática da planta da figura 2:

$$G(s) = \frac{2}{s(s-2)(s+2)}$$

Para este caso, os polinômios de projeto foram:

$$A^*(s) = (s+4)^4, \quad L(s) = (s+3)^3$$

Os vetores de sinais são gerados da seguinte maneira:

$$\Psi = [u^{(1)}, -e_1^{(3)}, -e_1^{(2)}, -e_1^{(1)}]^T, \quad \Phi = L(s)^{-1}\Psi$$

onde o erro de rastreamento é dado por $e_1 = y - r$.

As estimativas dos parâmetros da planta são definidos como:

$$\begin{aligned} \hat{b} &= \bar{b} \operatorname{sgn}(e_1 \Phi_1) + b_{nom}, & \bar{b} &> |b - b_{nom}| \\ \hat{a}_2 &= \bar{a}_2 \operatorname{sgn}(e_1 \Phi_2), & \bar{a}_2 &> |a_2| \\ \hat{a}_1 &= \bar{a}_1 \operatorname{sgn}(e_1 \Phi_3), & \bar{a}_1 &> |a_1| \\ \hat{a}_0 &= \bar{a}_0 \operatorname{sgn}(e_1 \Phi_4), & \bar{a}_0 &> |a_0| \end{aligned}$$

Os parâmetros da lei de controle são calculados conforme (15), ou seja:

$$\hat{p}_2 = \frac{\alpha_2^* - \hat{a}_1}{\hat{b}}, \quad \hat{p}_1 = \frac{\alpha_1^* - \hat{a}_0}{\hat{b}}, \quad \hat{p}_3 = \frac{\alpha_3^* - \hat{a}_2}{\hat{b}}, \quad \hat{p}_0 = \frac{\alpha_0^*}{\hat{b}}$$

O sinal de controle é gerado conforme (17), ou seja,

$$u = \frac{-\hat{p}_3 s^3 - \hat{p}_2 s^2 - \hat{p}_1 s - \hat{p}_0}{s} e_1$$

O comportamento do sistema é apresentado na Figura 4, com uma variação de 10% nos valores nominais dos seus parâmetros, em $t > 4s$. As amplitudes dos relés foram: $b_{nom} = 1.9$, $\bar{b} = 0.2$, $\bar{a}_2 = 0.3$, $\bar{a}_1 = 4.1$ e $\bar{a}_0 = 31.6$. O tempo de convergência foi de 1.6686s, considerando uma tolerância de 2%, e a porcentagem de overshoot foi de 1.99%. Os comentários feitos para a simulação anterior também valem para esta simulação.

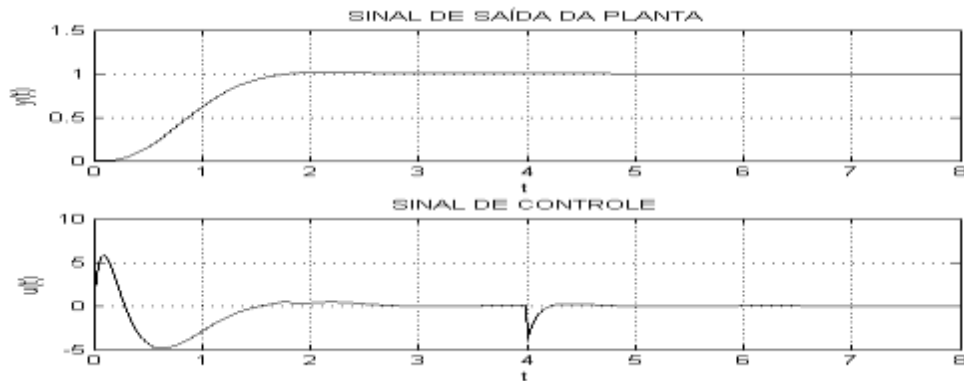


Figura 4: VSI-MRAC aplicado a planta com $\frac{2}{s(s-2)(s+2)}$

8. CONCLUSÃO

Nas simulações a planta não atingiu as condições de shutdown em resposta às condições críticas de teste de sobre pressão e sobre temperatura. Esta característica é definida pela norma IEC 61508/61511. A conformidade com o padrão exige uma análise dos perigos e riscos para estabelecer as exigências de segurança para as funções instrumentadas nos termos de níveis de segurança. Todas as funções de segurança identificadas devem ser integradas em um SIS. Diversas técnicas para executar a análise de risco do processo devem ser discutidas e suas vantagens e desvantagens devem ser identificadas no sentido de escolher a melhor para cada caso. Os benefícios de cada técnica, nos termos do preço inicial, custo da flexibilidade e de ciclo de vida devem ser discutidos. Para o caso em análise foi utilizada uma técnica qualitativa para mapeamento das ações de controle para maximizar a segurança da instalação. Uma implementação como esta deve ser composta da avaliação do risco associado a fim de determinar as funções de segurança que serão incorporadas a um SIS e devem cumprir com os padrões definidos na norma.

Este artigo apresentou os resultados de um projeto e a análise de sistemas instrumentados de segurança que em condições de falha ou defeito não levam a planta a parada ou bloqueio dos seus sistemas operacionais. O acréscimo de um controle adaptativo em seu modo de operação busca a eliminação da falha operacional e devolução das características de controle da planta com um controlador adaptativo do tipo VS-MRAC por posicionamento de polos e estrutura variável para plantas sem zeros em sistemas instrumentados de segurança - SIS. Os modelos apresentados é uma técnica proposta por (Araújo et. Al. 2005) para controle dinâmico de processos industriais, senso aqui utilizado para a implantação do Sistema Instrumentado de Segurança - SIS.

REFERÊNCIA

Alves, Camile. Uma Aplicação da Técnica de análise de Camadas de Proteção (LOPA) na Avaliação de Risco de Incêndios nas Rotas de Cabos de Desligamento de um Reator Nuclear [Rio de Janeiro] 2007.

Cassiolato, César. Sistemas Instrumentados de Segurança. SMAR, 2016

Cunha, C. D., Araújo, A. D. and Mota, F. C. (2009). Controlador em Modo Dual Adaptativo Robusto para Plantas com Grau Relativo Arbitrário, Controle & Automação 20: 72-82.

Edgart, B. (1979). Stability of Adaptive Controllers, Springer-Verlag, New York.

Hsu, L. and Costa, R. R. (1992). Robustness of VS-MRAC with Respect to Unmodelled Dynamics and External Disturbances, International Journal of Adaptive Control and Signal Processing 6: 19-33.

Ioannou, P. A. and Sun, J. (1996). Robust Adaptive Control, Prentice Hall, New Jersey. **Liao, F., Lum, K. Y., Wang, J. L. and Benosman, M. (2009).**

Narendra, K. S. and Valavani, L. S. (1978). Stable Adaptive Controller Design - Part i - Direct Control, IEEE Transactions on Automatic Control AC-23(4): 570-583.

Oliveira, J. B. and Araújo, A. D. (2008). Design and Stability Analysis of an Indirect Variable Structure Model Reference Adaptive Control, International Journal of Control 81(12): 1870-1877.

Silva Jr., F. C., J. B. O. and Araújo, A. D. (2011). Design and Stability Analysis of a Variable Structure Adaptive Pole Placement Controller for First Order Systems, Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Control & Automation pp. 895-900.

Silva Jr., F. C. and Araújo, A. D. (2005). Variable Structure Adaptive Pole Placement Control, Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control pp. 2859-2864.

Silva Jr., F. C., Oliveira, J. B. and Araújo, A. D. (2004). A Proposal for a Variable Structure Adaptive Pole Placement Control, 8th International Workshop on Variable Structure Systems.

Utkin, V. I. (1978). Sliding Modes and Their Applications in Variable Structure Systems, Mir Publishers, Moscow.

Zifang, Q., Zhenbin, D. and Zhaowei, L. (2007). Adaptive Fuzzy Control for SISO Nonlinear Time-Delay Systems, Proceedings of the 2007 Chinese Control Conference pp. 246- 249.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61508-1: Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 1: General requirements. 2nd ed. Geneva: IEC, 2010.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61511-3: Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector - Part 3: Guidance for the determination of the required safety integrity levels. 1st ed. Geneva: IEC, 2003.

INSTRUMENTATION, SYSTEMS, AND AUTOMATION SOCIETY, ISA-TR84.00.02- 2002 - Part 2: Safety Instrumented Functions (SIF) - Safety Integrity Level (SIL) Evaluation Techniques - Part 2: Determining the SIL of a SIF via Simplified Equations. 1st ed. North Carolina: IHS, 2002.

INSTRUMENTATION, SYSTEMS, AND AUTOMATION SOCIETY, ISA-TR84.00.04- 2005 - Part 2: Example Implementation of ANSI/ISA-84.00.01-2004 (IEC 61511 Mod). 1st ed. North Carolina: IHS, 2005.