SÍNTESE E IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE SUPERVISÓRIO EM REDE FOUNDATION FIELDBUS

Otávio Polonio Muler*, Max Hering de Queiroz*, José Eduardo Ribeiro Cury*

*Departamento de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina
CTC - DAS - Secretaria, Sala 214 - UFSC Campus Universitário - Bairro: Trindade
Florianópolis, Santa Catarina CEP 88040-900, Brasil

Emails: otavio.p.muler@posgrad.ufsc.br, max.queiroz@ufsc.br, jose.cury@ufsc.br

Abstract— The present article presents the formal synthesis and implementation of supervisory control for level safety of a pilot plant with the objective of investigating the application of Supervisory Control Theory (SCT) in industrial processes. While continuous control is responsible for tracking reference, supervisory control constitutes an independent level of control to discrete events aiming to avoid forbidden states such as transhipment and emptying of the tank. The SCT enables the synthesis of a minimally restrictive supervisor, which restricts the system to maximum controllable, non-blocking behavior and that complies with the safety specifications imposed on the system. The optimal supervisor is implemented in a programmable logic controller in a real Foundation Fieldbus (FF) network pilot plant, so that the valve opening calculated by the PI control is limited to safe values only when necessary. The experimental results indicate the feasibility of the application of the SCT to guarantee safety specifications in the control of processes in FF networks.

Keywords— Discrete event systems. Supervisory Control Theory. Foundation Fieldbus.

Resumo— O presente artigo apresenta a síntese formal e implementação de controle supervisório para segurança de nível de uma planta piloto com o objetivo de investigar a aplicação da Teoria de Controle Supervisório (TCS) em processos industriais. Enquanto o controle contínuo é responsável pelo seguimento de referência do nível do tanque, o controle supervisório constitui um nível independente de controle a eventos discretos encarregado por evitar estados proibidos, como o transbordamento e esvaziamento do tanque. A TCS possibilita a síntese de um supervisor minimamente restritivo, que restringe o sistema ao máximo comportamento controlável, não-bloqueante e que respeita as especificações de segurança impostas ao sistema. O supervisor ótimo é implementado em um controlador lógico programável de uma planta piloto real baseada em rede Foundation Fieldbus (FF), de modo que a abertura da válvula, calculada pelo controle PI, é limitada a valores seguros apenas quando necessário. Os resultados experimentais indicam a viabilidade da aplicação da TCS para garantir especificações de segurança no controle de processos em redes FF.

Palavras-chave— Sistemas a eventos discretos. Teoria de Controle Supervisório. Foundation Fieldbus.

1 Introdução

O controle de processos industriais visa atender propriedades como seguimento de referência, estabilidade, tempo de resposta e rejeição de perturbações, problemas que são tipicamente modelados como sistemas dinâmicos de variáveis contínuas. Porém, a dinâmica dos problemas de sequenciamentos, intertravamentos e outras lógicas relativas à produção e segurança pode ser interpretada como sendo da classe de sistemas a eventos discretos (SED). Os SEDs são sistemas cuja dinâmica é governada pela ocorrência de eventos que acontecem abruptamente e, possivelmente, em intervalos de tempo irregulares e desconhecidos (Cassandras and Lafortune, 2009).

Ramadge and Wonham (1987) introduziram a Teoria de Controle Supervisório (TCS) para tratar de problemas de controle em SEDs. A TCS fundamenta a síntese formal a partir dos modelos da planta (comportamento fisicamente possível do sistema) e das especificações esperadas para o sistema. A síntese garante o comportamento desejado do sistema por construção. Desde a formulação da síntese pela TCS, uma grande quantidade de trabalhos acadêmicos tem surgido sobre o assunto, mas ainda são escassas as aplicações em meio industrial, especialmente na indústria de processos (Zaytoon and Riera, 2017).

O controlador supervisório de SEDs difere dos controladores de ações de comando. Estes possuem uma sequência lógica bem definida e rígida, forçando a planta a permanecer dentro de um objetivo desejado, normalmente relacionado ao processo produtivo. O controlador supervisório é mais flexível e tem uma ação permissiva que deixa a planta executar qualquer evento, desde que essas ações não levem o sistema a algum acontecimento indesejado. Seu papel geralmente é referente às questões de segurança.

Processos industriais envolvem elementos contínuos que necessitam de alto grau de abstração para serem tratados como SEDs, como válvulas e tanques. Muitas vezes a lógica de controle discreta é implementada empiricamente na indústria. Com o intuito de se investigar a viabilidade da TCS como ferramenta formal para síntese dos supervisores na indústria de processos será implementado numa planta piloto um caso inspirado em problemas reais desta indústria.

O problema de controle consiste em manter o nível de um tanque dentro de limites seguros, através de comandos sobre uma válvula de controle. A planta é instrumentada por um sistema distri-

buído de controle composto por um controlador lógico programável e um conjunto de sensores e atuadores inteligentes interligados por rede de campo industrial do tipo Foundation Fieldbus. Isso torna a implementação diferente dos casos encontrados na literatura, normalmente voltados para a indústria de manufatura (Zaytoon and Riera, 2017).

Na seção 2 é realizada uma breve revisão sobre a TCS. O problema de controle supervisório a ser implementado é visto na seção 3. O processo de síntese do supervisor é realizado na seção 4. A estratégia de controle e implementação em rede Foundation Fieldbus é mostrada seção 5. A implementação em CLP está na seção 6. A seção 7 apresenta o comportamento do sistema sob supervisão. No final são discutidos os resultados.

2 Teoria de Controle Supervisório

Em Ramadge and Wonham (1987) é formulada a Teoria de Controle Supervisório (TCS), no qual um agente de controle do sistema, chamado de supervisor, age sobre a planta. A planta é modelada por um autômato. Autômatos são representados pela quíntupla $G = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m)$, onde Q é o conjunto de estados desse autômato; Σ é o conjunto de eventos; $\delta : \Sigma \times Q \rightarrow Q$ a função de transição parcial definida em cada estado de Q para um subconjunto de Σ; q_0 é o estado inicial, com $q_0 \in Q$; e Q_m é o subconjunto de estados marcados, com $Q_m \subseteq Q$.

São associadas ao autômato G a linguagem gerada $L(G)$ e a marcada $L_m(G)$. Todas as sequências de eventos possíveis, partindo do estado inicial, são representadas pela linguagem $L(G)$. As sequências que, a partir do estado inicial levam aos estados marcados, são representadas por $L_m(G)$. O sistema é bloqueante se houver uma sequência de $L(G)$ que não possa ser completada para nenhuma sequência de $L_m(G)$. Certas linguagens $L(G)$ e $L_m(G)$ contêm sequências indesejadas, pois levam a situações de risco para o sistema ou bloqueios.

O conjunto de eventos da planta pode ser particionado em dois subconjuntos: Σ_c são os eventos controláveis e Σ_u os não-controláveis, sendo $\Sigma = \Sigma_c \dot{\cup} \Sigma_u$. O supervisor pode habilitar ou desabilitar os eventos controláveis, mas não consegue impedir os não-controláveis de ocorrerem.

Um autômato é um grafo dirigido, em que os nós são os estados; os arcos são a ocorrência dos eventos e fazem a transição entre estados; uma flecha aponta para o estado inicial; e os estados marcados possuem círculos duplos. Os eventos não-controláveis são representados com ponto de exclamação (!) antes do nome do evento.

A síntese do supervisor é realizada a partir do modelo da planta e das especificações impostas ao sistema. O supervisor é projetado para restringir o sistema ao máximo comportamento controlável, devendo ser não-bloqueante e respeitar as especificações impostas ao sistema, sempre de forma minimamente restritiva.

O supervisor S se relaciona com a planta G em malha fechada, relação descrita por S/G. Nessa interação, o supervisor recebe o estado atual da planta e determina os eventos que podem ser habilitados. A cada novo evento em G, o supervisor atualiza a entrada de controle, a interpreta, e então desabilita os eventos indesejáveis para o sistema.

3 Sistema a ser supervisionado

A planta piloto em que é implementado o controle supervisório está localizada no Laboratório de Controle e Automação (LCA) do Departamento de Automação e Sistemas (DAS) da UFSC, mostrada na Figura 1. É fabricada pela Smar© e permite a simulação de processos industriais com a medição e o controle de variáveis como vazão, pressão, temperatura e outras grandezas. São empregados instrumentos e controladores com a tecnologia Foundation Fieldbus, sistema que conecta equipamentos Fieldbus e com capacidade de processamento descentralizado, em que certas tarefas podem ser realizadas no próprio dispositivo de campo.

Figura 1: Planta piloto.

O controle supervisório será implantando na planta piloto com o objetivo de manter o nível do tanque dentro de valores seguros, impedindo que o tanque transborde ou esvazie. A vazão no tanque é controlada por duas válvulas. A válvula de controle de entrada, denominada de V1, é dotada de tecnologia Foundation Fieldbus. Isso permite que o controle de vazão do sistema seja exercido por um bloco de função PID integrado à válvula. Um controlador PI é configurado nesta válvula com a função de manter o nível do tanque no valor desejado pelo usuário (*Setpoint*). A válvula de saída,

chamada de V2, é manual, podendo apenas ser controlada pelo operador. A vazão máxima de V1 é maior que a vazão máxima de V2. Um transmissor de pressão mede o nível de água no tanque. Uma bomba, que se encontra sempre ligada, leva água do reservatório para o tanque. O CLP lê os valores de nível no tanque e pode controlar a bomba e a válvula V1. O diagrama da planta utilizada na implementação está representado na Figura 2.

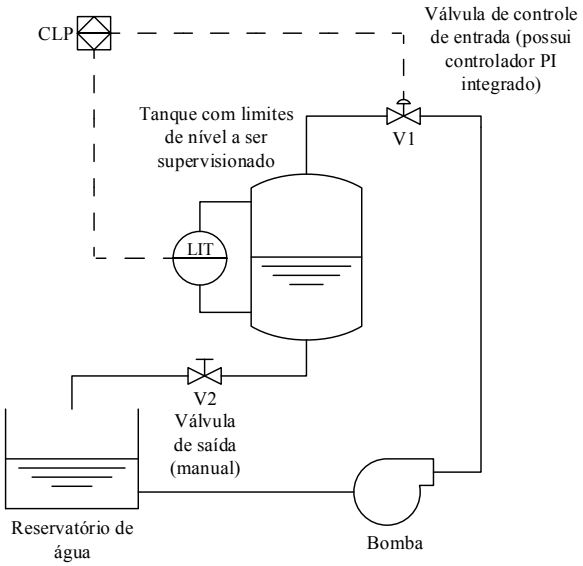


Figura 2: Diagrama da planta utilizada na implementação.

4 Síntese de Supervisor

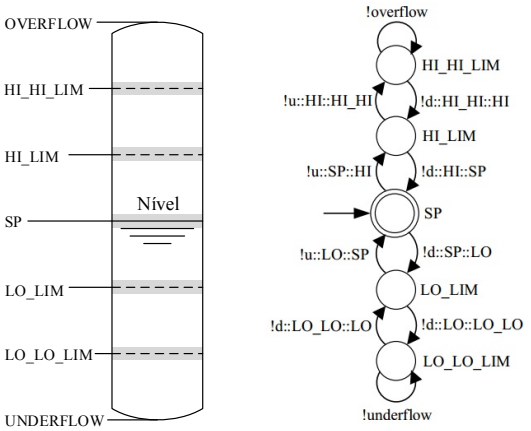
A seguir são descritos os modelos dos componentes que compõem a planta do sistema e da especificação para a realização da síntese.

4.1 Modelagem da planta

A discretização do tanque, que possui valores de níveis contínuos de 0% a 100%, é necessária para que seja possível tratá-lo como um problema de sistemas discretos. No modelo da Figura 3(a) é mostrada a altura do tanque dividida em níveis, não necessariamente igualmente espaçados.

Nesse caso, o tanque foi dividido em cinco níveis, considerando os parâmetros padronizados para projetos de controle e automação em redes Foundation Fieldbus, definidos em Diedrich and Neumann (1998). Tais parâmetros informam quando os valores medidos no sistema atingem certos limites de interesse para a geração de alarmes.

Existem os limites de aviso inferior (LO_LIM) e superior (HI_LIM), que representam situações de nível fora do aceitável, mas sem risco de esvaziar ou de transbordo. Há os limites críticos inferior (LO_LO_LIM) e superior (HI_HI_LIM), que são situações de nível fora do aceitável e que demonstram risco de esvaziar ou de transbordo. Também se considera no modelo os casos em que o nível está dentro de uma faixa próxima à definida pelo usuário (*Setpoint* - SP). No modelo, as ocorrências de transbordamento (*overflow*) e de esvaziamento (*underflow*) são consideradas. Todos os eventos são não-controláveis e observáveis. A Figura 3(b) ilustra o modelo do tanque.



(a) Nível do tanque discretizado.

(b) Autômato representando nível do tanque.

Figura 3: Modelo de nível do tanque (G_{niveis}).

O estado de *Setpoint* é o único marcado, pois é importante que o sistema fique ou sempre possa retornar a esse valor. Na prática, caso o *Setpoint* não seja exatamente o estado inicial, o supervisor inicia atuando de forma que o sistema avance a este estado. Para efeitos de implementação, é introduzida uma histerese aos eventos de subida e descida do nível para diminuir a ocorrência de flutuações, quando o nível se encontra próximo de um dos estados limites.

A válvula de entrada do tanque, V1, é uma válvula contínua (pode ser aberta em qualquer valor percentual de 0% a 100%). A abstração do modelo considera os estados da válvula em relação às condições de enchimento ou esvaziamento do tanque. O estado *q0* representa quaisquer valores de abertura da válvula insuficientes para manter o nível atual do tanque, enquanto *q1* representa valores que permitam o nível atual subir. Dependendo da situação, é possível que a válvula permaneça no estado atual (evento *V1_mantem*). Ao desabilitar a ocorrência desse evento, a válvula é forçada a mudar de estado. O estado marcado é o *q0*, em que a válvula está fechada, pois, por questão de segurança, não pode haver bloqueio para este estado. A Figura 4 ilustra esse modelo. Os eventos são todos controláveis.

O modelo de V2 é semelhante ao V1. A diferença é que, como é considerada uma válvula de acionamento manual, os eventos a ela relacionadas são não-controláveis. É representada na Figura 5.

Os modelos das válvulas e dos níveis do tan-

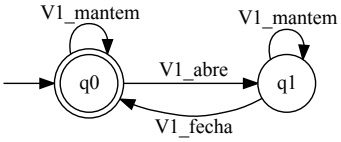


Figura 4: Modelo da válvula V1 (G_{V1}).

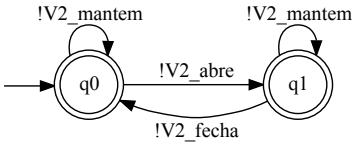


Figura 5: Modelo da válvula V2 (G_{V2}).

que são modelados sem considerar a relação de eventos entre eles. Porém, para se modelar a variação de nível no tanque relacionada à válvula V1, consideram-se as possibilidades de vazão no tanque quando V1 está aberta e quando está fechada. Seu modelo está na Figura 6.

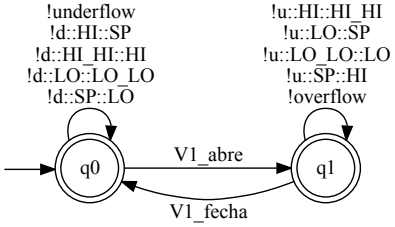


Figura 6: Modelo da vazão em relação à V1 (G_{vazao_V1}).

A Figura 7 representa o modelo de vazão no tanque relacionada à V2.

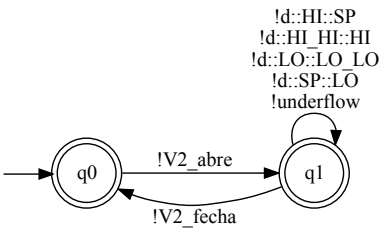


Figura 7: Modelo da vazão em relação à V2 (G_{vazao_V2}).

Como o supervisor não executa eventos (apenas desabilita eventos controláveis), não haveria como impedir a ocorrência de múltiplas subidas ou descidas consecutivas de nível (eventos não-controláveis). Como solução, quando a dinâmica envolvendo a execução de transições controláveis é muito mais rápida do que as não-controláveis, utiliza-se o modelo de preempção da Figura 8. A cada evento que indica mudança de nível deve haver uma decisão de ação sobre a válvula: abrir, fechar ou manter seu estado atual. Assim, pode ser evitada a ocorrência de certos eventos não-controláveis na planta através da execução de eventos controláveis.

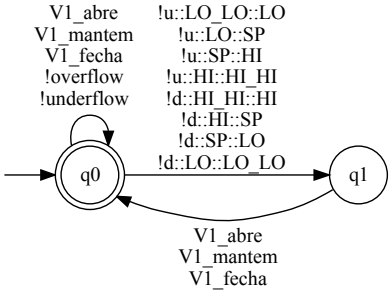


Figura 8: Modelo de preempção ($G_{preempcao}$).

4.2 Modelagem da especificação

É desejado que o nível no tanque nunca transborde (*overflow*) e nem fique vazio (*underflow*), por questões de segurança. Essa especificação é mostrada na Figura 9. O modelo representa que os eventos *overflow* e *underflow* nunca devem ocorrer.

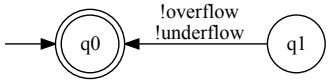


Figura 9: Especificação para limites de nível ($E_{limites}$).

4.3 Síntese do Supervisor

A partir dos modelos da planta e da especificação é realizada a síntese, através da ferramenta Supremica (Akesson et al., 2003), obtendo-se um supervisor de 32 estados. Através da ferramenta TCT (Feng and Wonham, 2006), é realizada a redução do supervisor, diminuindo-o para três estados (Figura 10). Os eventos desabilitados em cada estado são mostrados em linhas tracejadas. O supervisor reduzido possui a mesma ação de controle do não-reduzido, porém, com igual ou menor número de estados. A solução do problema torna-se mais clara, facilitando a compreensão e a implementação.

Nota-se que no estado $S0$ é permitido o nível do tanque ficar apenas entre os limites de nível crítico superior e inferior. Quando um dos limites é atingido, o supervisor avança para $S1$, impedindo a válvula de permanecer no mesmo estado. Assim que a válvula fechar, se estiver aberta, ou abrir, se estiver fechada, o supervisor avança para o estado $S2$, mantendo o estado de V1 constante até que o nível retorne às condições seguras (estado $S0$). É importante notar que não é necessário considerar a válvula de saída V2. Isso é compreensível porque, além de ser não-controlável, a vazão de V1 é maior que a de V2, tornando qualquer correção no nível do tanque possível independente de V2.

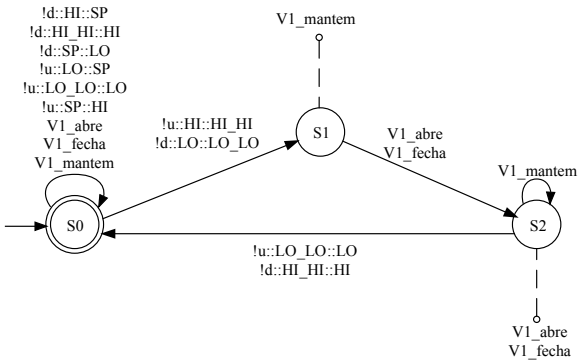


Figura 10: Supervisor reduzido ($S_{reduzido}$).

5 Implementação em rede Foundation Fieldbus

Foudation Fieldbus é uma tecnologia aberta para interconectar equipamentos de controle e automação industrial. Uma de suas características é a interoperabilidade, o que permite que equipamentos de diferentes fabricantes possam trabalhar integralmente na mesma rede. As ações de controle são efetuadas de forma distribuída nos próprios equipamentos da rede. Utilizam-se Blocos de Função para executar tarefas fundamentais e implementar a estratégia de controle para a aplicação existente. Funções como leitura de dados, cálculos e controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID) podem ser realizadas no próprio equipamento.

Para se realizar a implementação a partir do supervisor sintetizado, é necessário estabelecer as relações entre os eventos do sistema modelado e o real. Certas abstrações são necessárias para se trabalhar com modelos, e isto pode tornar as equivalências não tão simples de serem determinadas.

O nível de água no tanque é representado por valores contínuos em percentual de 0% a 100%. Para a relação de correspondência entre os valores reais e os do modelo, definiu-se como limite crítico inferior 15%, e para o superior 60%. Pela análise do supervisor, nota-se que é somente necessário considerar estes dois valores de nível na implementação. Esses valores foram escolhidos pois impõem uma certa margem de segurança ao sistema.

Para se obter a equivalência dos estados de abertura e fechamento da válvula de entrada entre o modelo e o sistema real, são utilizados os piores casos. Nesta situação, os piores casos considerados na implementação do controle supervisório são em relação à posição da válvula de saída.

Considerando o nível mínimo (15%), em que o nível não pode cair, o pior caso é quando a vazão de saída é alta, ou seja, quando V2 está aberta. A abertura de V1 que mantém o nível estável neste caso é 77%. O pior caso para o nível máximo (60%), em que o nível não pode subir, é quando a vazão de saída é baixa, ou seja, quando V2 está fechada. A abertura de V1 que mantém o nível estável neste caso é 0%, ou seja, totalmente fechada.

O supervisor obtido é implementado considerando uma histerese de 2% sobre o valor do nível para a atuação do controle supervisório. Para que o supervisor atue sobre a válvula, o nível deve cair abaixo de 13%, deixando de atuar quando for maior que 17%. O supervisor atua também quando o nível for maior que 62%, deixando de agir quando for menor que 58%.

A Figura 11 apresenta a arquitetura proposta para implementação de controle supervisório em rede Foundation Fieldbus, que é a principal contribuição deste artigo. O controle supervisório é executado em CLP, observando as variáveis de processo oriundas da rede FF e estabelecendo valores de limite para a saída do controlador PI configurado na própria válvula FF . Desse modo, essa arquitetura permite que o controle contínuo para seguimento de referência implementado em Rede Foundation Fieldbus funcione de forma transparente ao controle a eventos discretos para a lógica de segurança, sem afetar a síntese e nem a implementação em CLP dos supervisores modulares. Além disso, essa arquitetura é de fácil implementação na rede FF, bastando-se inserir um bloco funcional de saturação entre o bloco de PID e o bloco de saída analógica, além das interfaces de sinais com o CLP.

O controlador PI da malha de controle do sistema tem o objetivo de manter o nível do tanque no valor desejado pelo usuário (*Setpoint*). Paralelamente a este controlador PI, o supervisor implementado tem o objetivo de manter o nível do tanque dentro de valores seguros. Em uma situação real o nível do sistema pode ficar fora dos valores seguros quando o usuário determinar um *Setpoint* além dos limites, ou quando o PI não estiver corretamente projetado.

O supervisor recebe o valor atual do nível do tanque e o compara com os valores limites para atualizar o estado. Caso o supervisor esteja no estado normal, a válvula é aberta de acordo com valor calculado pelo controlador PI, que segue a referência de nível definida pelo usuário (*Setpoint*). Mas, caso o nível se encontre muito alto (acima de 62% nesse caso) ou muito baixo (abaixo de 13%), então o supervisor atua limitando a saída do controlador PI. Essa saturação faz a válvula de entrada ser aberta com um valor que leve o nível do tanque a permanecer entre os valores limites, não ocorrendo *underflow* nem *overflow*.

O sensor de leitura do nível no tanque e a válvula de controle estão configurados na rede Foundation Fieldbus. Para que o CLP possa ler e enviar dados para essa rede, é necessário configurar alguns blocos na estratégia de controle, mostrada na Figura 12.

L_AI é bloco de leitura do valor do nível; V_PI é o controlador PI; e V_AO é o bloco que comanda a abertura da válvula V1. Esses são os três blocos

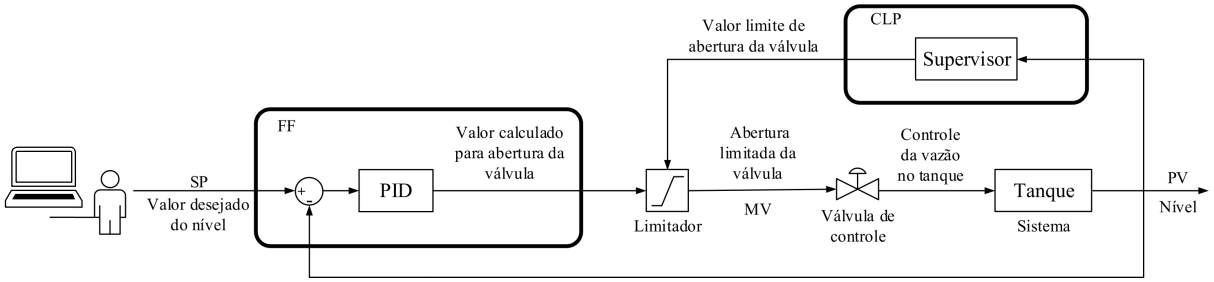


Figura 11: Arquitetura de controle de processo em Foundation Fieldbus sob ação de controle supervisório.

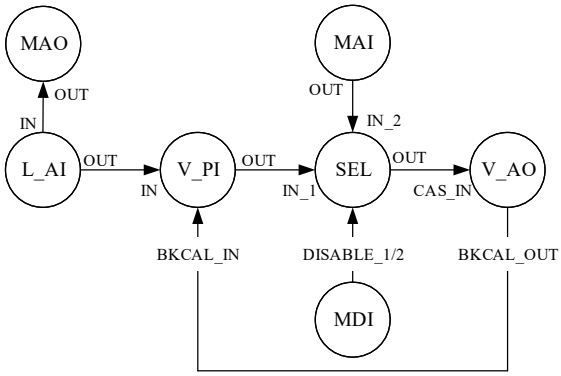


Figura 12: Estratégia de controle implementada em rede Foundation Fieldus.

para realizar o controle de nível do processo em malha fechada. O valor do nível é enviado para o CLP através de MAO, bloco de saída analógica. Como não é possível alterar o valor de saturação da válvula diretamente no bloco PID com o sistema operando, é necessário adicionar o bloco de seleção SEL para que a saturação possa ocorrer. O bloco de seleção SEL atua como saturador entre o valor de saída do controlador PI e o enviado para válvula. Em condições normais de nível, a válvula é aberta com o valor calculado pelo controlador PI. Porém, se o supervisor precisar atuar, SEL recebe um sinal de MDI e o valor de MAI é enviado diretamente para a válvula de entrada, fazendo o PI ser saturado. MAI é o valor vindo do CLP com o qual a válvula deve ser limitada.

6 Implementação em CLP

Em Fabian and Hellgren (1998) é elaborado um método para representar autômatos em diagrama ladder, uma linguagem de programação de CLPs. O supervisor do sistema é representado por um autômato de estados finitos. Autômatos são dirigidos pela ocorrência de eventos, enquanto o CLP por sinais booleanos. Nesse método, um contato normalmente aberto, representando o estado, está em série com um contato que representa a ocorrência de um evento. Assim que acontece uma transição, a bobina *reset* que representa o estado atual é desenergizada, enquanto a bobina *set* do estado seguinte é energizada. Uma bobina *set* mantém o estado até que sua correspondente *reset* seja energizada.

A presente implementação em CLP se baseia na arquitetura proposta em Queiroz e Cury (2000), em que os supervisores modulares são programados em diagrama ladder como autômatos concorrentes cujas transições são disparadas de acordo com eventos da planta. Um mapa associa os estados ativos de cada supervisor às respectivas desabilitações. Nem sempre os sinais de desabilitação gerados pelo supervisor podem ser diretamente associados a ações de controle que de fato impeçam a ocorrência de eventos controláveis do processo. Quando os eventos controláveis não ocorrem espontaneamente como a modelagem pressupõe, devem ser executados por comandos gerados a partir do modelo a eventos discretos da planta, que também pode ser implementado em CLP na forma de autômatos concorrentes. Já os eventos não controláveis são derivados à partir das variáveis observadas do processo, neste caso oriundas da Rede Foundation Fieldbus.

A seguir são expostas as implementações em ladder de cada uma das transições do supervisor apresentado na Figura 10 e suas desabilitações. Emprega-se a tag NIVEL_REAL como o valor do nível do tanque recebido da rede Fieldbus, as tags NIVEL_13%, NIVEL_17%, NIVEL_58% e NIVEL_62% como constantes reais usados para comparação, e as tags VALVULA_0% e VALVULA_77% são as constantes reais enviadas à rede Foudation Fieldbus para comandar o fechamento e abertura da válvula de controle.

Bobinas auxiliares *NIVEL_BAIXO* e *NIVEL_ALTO* são utilizadas para indicar qual dos limites de nível é atingido. Na lógica apresentada na Figura 13 é verificado se o limite de nível superior (62%) é atingido, ativando-se a bobina *NIVEL_ALTO*. Quando o nível voltar aos limites seguros (abaixo de 58%), *NIVEL_ALTO* é desativada. A lógica para o caso do nível baixo é semelhante. Porém, a bobina *NIVEL_BAIXO* é ativada quando se atinge o limite de nível inferior (13%), sendo desativada quando o nível retornar aos limites seguros (acima de 17%).

A implementação dos estados e transições do

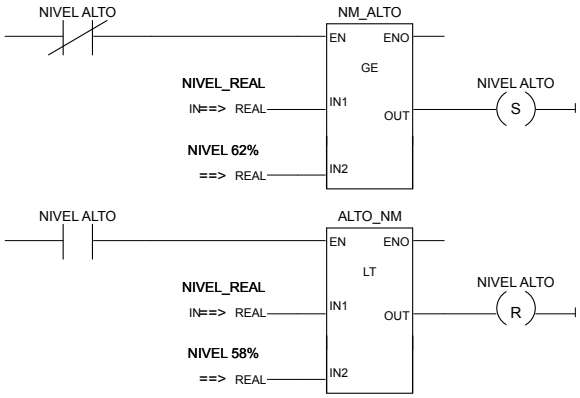


Figura 13: Detecção de NIVEL_ALTO com histerese.

supervisor reduzido no CLP do sistema é mostrado na Figura 14(a). A primeira linha do código é para que o estado *S0* (o inicial) seja ativado logo que o sistema for iniciado. Na segunda linha é verificado se os limites de nível superior ou inferior são atingidos, representando a transição do estado de *S0* para *S1*. Como não é considerado travamento e outras falhas na válvula, supõem-se que a atuação do supervisor, indicada pelo contato *V1_MUDA*, implica ocorrência dos eventos *V1_abre* ou *V1_fecha*. Desse modo, na terceira linha acontece a transição do estado *S1* para *S2*. Na quarta linha está a transição do estado *S2* para *S0*, que ocorre após o retorno do nível do tanque a valores seguros.

Segundo o mapa de desabilitações do supervisor, no estado *S1* a posição da válvula não pode ser mantida. Para lidar com o fato que na realidade os eventos controláveis não ocorrem espontaneamente, como acontece na TCS, é necessário que o supervisor atue. O sinal de desabilitação do supervisor nesse caso equivale a limitar a abertura da válvula. O bloco de seleção na Figura 14(b) seleciona e envia o valor para a rede: se o nível está baixo, é enviado o primeiro valor (77%); e se está alto, então envia-se o segundo valor (0%). No estado *S2* do supervisor a válvula deve ser mantida em sua posição atual. Dessa forma, enquanto o supervisor estiver no estado *S2*, segue limitando a válvula com o mesmo valor anterior.

7 Resultados

Para se analisar o funcionamento do controle supervisório nesse sistema, são realizados alguns testes e obtidos os gráficos de nível e abertura da válvula de entrada, tanto da abertura calculada pelo controlador PI quanto da abertura real. A válvula de saída é mantida constantemente aberta em um valor intermediário. Para cada teste são variados os parâmetros de *Setpoint* (SP), que inicialmente se encontra em 30%. Para realização dos testes, a forma mais simples é alterar o valor de *Setpoint*.

Para mostrar o comportamento do nível do tanque sob a atuação do supervisor para evitar *underflow* no tanque, o *Setpoint* é alterado de 30% para 5%. Neste caso é utilizado o valor de 5%, mas poderia ser utilizado qualquer valor abaixo de 13% para realização do teste. Isso faz com que o supervisor opere para manter o nível mínimo em 15% (Figura 15).

Como pode ser visto nos gráficos, devido ao atraso entre a leitura de nível do tanque e a real atuação do supervisor sobre a abertura da válvula, a variação do nível acaba sendo um pouco grande, ficando entre 10% e 24% (média de 17%, próximo do valor esperado de 15%). Mas, apesar desta variação, não ocorreu *underflow* no tanque, evento que o controle supervisório deve evitar.

Quanto a análise da abertura da válvula (Figura 16), nota-se que muitas vezes ela é saturada no valor mínimo (77%), com o valor real de abertura (linha azul contínua) diferindo daquele calculado pelo PI (linha laranja pontilhada), o que mostra a ação do supervisor.

Em seguida, o nível de *Setpoint* é alterado de 30% para 80% (Figura 17), fazendo o supervisor atuar quando chegar em 60%, de modo a evitar *overflow* (transbordamento). Neste caso também poderia ser utilizado qualquer valor acima de 60% para realização do teste.

A variação do nível fica entre 50% e 66% (média de 58%, valor próximo do esperado de 60%), não ocorrendo *overflow*. O controle supervisório, portanto, cumpre sua função.

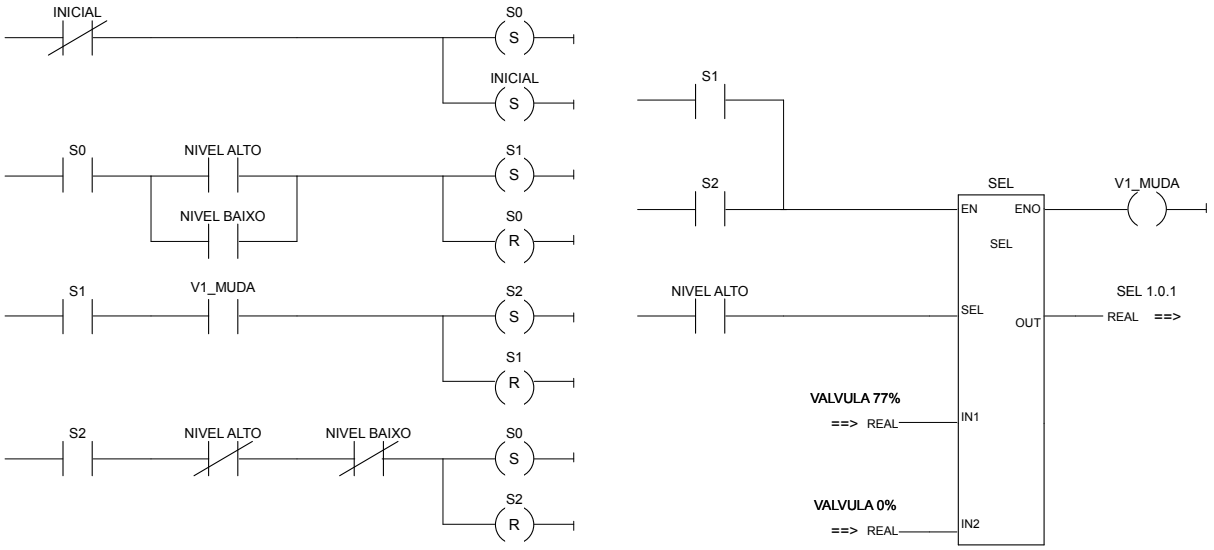
Pelo gráfico da abertura das válvulas (Figura 18), também nota-se que o valor da abertura real (linha azul contínua) e da calculada pelo controlador PI (linha laranja pontilhada) diferem em alguns pontos. Isso ocorre quando o supervisor satura o valor de entrada da válvula com um valor máximo (0% neste caso).

8 Conclusão

O controle supervisório implementado demonstrou a viabilidade do método para aplicações em processos industriais. O supervisor é implementado no sistema em paralelo com o controlador (no caso, um PI), mas só atua em situações necessárias para evitar situações inseguras, como transbordamento ou esvaziamento do tanque. Diferentemente dos trabalhos na literatura, a arquitetura de implementação de controle supervisório apresentada permite a interação de um supervisor ótimo em CLP com o controle de processos distribuído em uma rede de campo industrial Foundation Fieldbus.

Referências

Akesson, K., Fabian, M., Flordal, H. and Vahidi, A. (2003). Supremica - a tool for verification



(a) Máquina de estados.

(b) Desabilitações.

Figura 14: Implementação em ladder do $S_{reduzido}$.

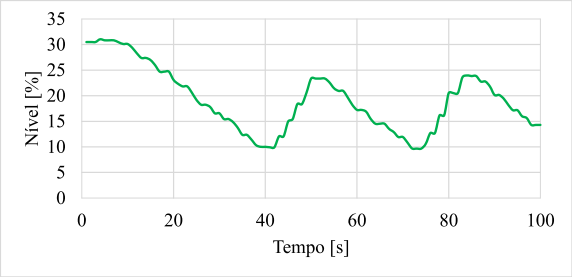


Figura 15: Comportamento do nível com supervisor atuando em limite baixo.

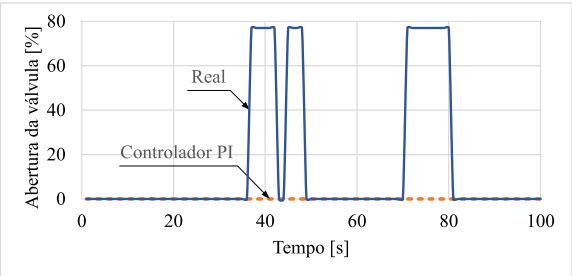


Figura 16: Comportamento da válvula V1 com supervisor atuando em limite baixo.

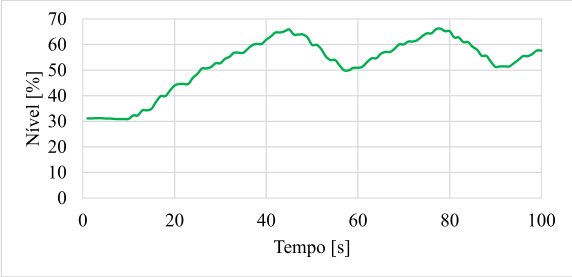


Figura 17: Comportamento do nível com supervisor atuando em limite alto.

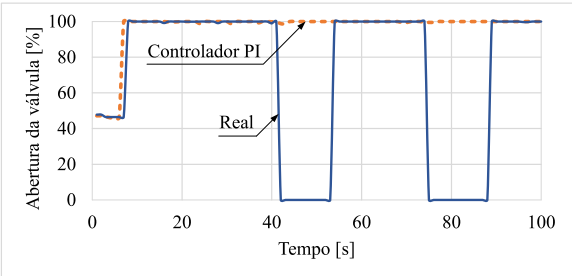


Figura 18: Comportamento da válvula V1 com supervisor atuando em limite alto.

and synthesis of discrete event supervisors.

Cassandras, C. G. and Lafortune, S. (2009). Springer Science & Business Media.

Diedrich, C. and Neumann, P. (1998). Standardisation in automation systems, *Proc. of the 9th IFAC Symposium on Information Control in Manufacturing* **31**(15): 53–58.

Fabian, M. and Hellgren, A. (1998). PLC-based implementation of supervisory control for discrete event systems, *Proc. of the 37th CDC* **3**: 3305–3310.

Feng, L. and Wonham, W. (2006). TCT: A computation tool for supervisory control synthesis, *Proc. 8th Int. Workshop Discrete Event Syst.* pp. 388–389.

Ramadge, P. J. and Wonham, W. M. (1987). Supervisory control of a class of discrete event processes, *SIAM J. Control Optim.* **25**(1): 206–230.

Zaytoon, J. and Riera, B. (2017). Synthesis and implementation of logic controllers - a review, *Annual Reviews in Control* .