

Modelagem e Projeto de Sistema de Controle baseada em Sistemas a Eventos Discretos aplicada a Planta de Produção de Hidrogênio do Parque Tecnológico Itaipu

Angel A. Quispe*. Sandro Battistella **. Ricardo Ferracin*. Romeu Reginatto **

*Centro de Energias Renováveis, Parque Tecnológico Itaipu,

Foz do Iguaçu, PR, Brasil (e-mail:angel.quispe@pti.org.br; ricardo.jose@pti.org.br).

**Programa de Pós-graduação de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual do Oeste de Paraná, Foz do Iguaçu, PR, Brasil (e-mail: romeu.reginato@unioeste.br; sandro.battistella@unioeste.br)

Abstract: Hydrogen production plants (HPP) are infrastructures that require automation technologies, for the continuous monitoring of the status and execution of the devices, in order to improve plant availability, process safety and constant product quality. This article proposes the formal modeling of discrete behavior and the design of closed-loop control structures of the PPH of the Itaipu Technological Park (PTI). The Supervisory Control Theory (TCS) is used to control individual PPH subsystems, while the overall functioning is implemented through the sequential control of its operation. For modeling the free behavior of the subsystems and the respective interlocking and safety specifications, regular language in the form of automata was used. The control structures, called supervisors, are obtained by the TCS synthesis process. The sequential production control of the H₂ is based on experimental knowledge translated into a flowchart. Both control approaches are implemented in programmable logic controllers (PLC's), following a TCS implementation methodology, and tested on a laboratory bench, which represents, from the point of view of the PPH discrete dynamics, to all its equipment. The results obtained demonstrate the systematization, flexibility and efficiency to carry out the project of the control system of a PPH, in addition to allowing the structuring and verification in a laboratory bench.

Resumo: Plantas de produção de hidrogênio (PPH) são infraestruturas que necessitam de tecnologias de automação para o monitoramento contínuo do *status* e execução dos dispositivos para assim aprimorar a disponibilidade da planta, promove segurança do processo e proporcionar qualidade constante do produto. O presente artigo propõe a modelagem formal do comportamento discreto e o projeto de estruturas de controle em malha-fechada da PPH do Parque Tecnológico Itaipu (PTI). A Teoria de Controle Supervisório (TCS) é empregada para o controle de subsistemas individuais da PPH, enquanto o funcionamento global é implementado por meio do controle sequencial de sua operação. Para modelagem do comportamento livre dos subsistemas e respectivas especificações de intertravamento e segurança, utilizou-se linguagem regular em forma de autômatos. As estruturas de controle, denominadas de supervisores, são obtidas pelo processo de síntese da TCS. O controle sequencial de produção do H₂ baseia-se no conhecimento experimental traduzido em um fluxograma. Ambas as abordagens de controle são implementadas em controladores lógicos programáveis (CLP's), seguindo uma metodologia de implementação da TCS, e testadas em uma bancada laboratorial que representa, sob o ponto de vista da dinâmica discreta da PPH, todos os seus equipamentos. Os resultados obtidos demonstram a sistematisação, flexibilidade e eficiência para realização do projeto do sistema de controle de um PPH, além de permitir a estruturação e comprovação em uma bancada laboratorial.

Keywords: Hydrogen production plant; discrete event systems; automata; supervisory control; programmable logical controller.

Palavras-chaves: Planta de produção de hidrogênio; sistemas a eventos discretos; autômatos; controle supervisório; controlador lógico programável.

1. INTRODUÇÃO

A descarbonização do planeta é uma das metas que países de todo mundo estabeleceram para atingir até o ano de 2050. Diante disso, o interesse pelo hidrogênio (H₂) de fonte renovável (hídrica, eólica, solar, geotérmica etc.) vem desempenhando um papel essencial na descarbonização do sistema de energia (IEA, 2019). O interesse pelo H₂ como transportador de energia tem sido significativo nos últimos anos. Foi identificado como um combustível limpo e flexível, o qual pode ser usado para fornecer energia e calor em vários setores de uso final tais como: indústria, mobilidade, geração de eletricidade, aquecimento entre outras (PNE, 2020). Tecnologias como turbinas a gás movidas a H₂ e células a combustíveis estacionárias podem complementar outras fontes renováveis de eletricidade e substituir a demanda atualmente atendida por combustíveis fósseis. Também pode servir como um meio de armazenamento sazonal em sistemas de energia de geração renovável variável e reposta de baixa demanda,

proporcionando confiabilidade do sistema como uma forma adicional de eletricidade despachável (Ayivor et al. 2018).

A estrutura de uma Planta de Produção de Hidrogênio (PPH) é formada por um conjunto de máquinas e ferramentas de produção, equipamentos de manuseio, dispositivos de segurança e sistemas de computador que controlam todo o processo (Godula, 2015). Entre os tipos de PPH encontram-se as de eletrólise alcalina de água, que são normalmente compostas por múltiplas unidades de processamento, entre elas, produção, purificação, refrigeração, compressão e armazenamento. Estas em geral são organizadas por agrupamentos lógicos que se referem a arranjos de equipamentos que operam como sistemas de produção de uma usina. Em sua maioria estão regidas pela tecnologia de automação, a fim de otimizar o desempenho nos processos de produção e controle permitindo o monitoramento contínuo do *status* e execução dos dispositivos para assim aprimorar a

disponibilidade da planta, segurança do processo e qualidade do produto.

Uma PPH possui um comportamento de natureza híbrida, envolvendo dinâmicas dirigidas pelo tempo ou contínuas (medição de pressão, medição de temperatura, medição de vazão) e dirigidas por eventos - discretos (estado do nível, tomada de decisão, controle da operação e descrição do comportamento de um sensor). Dessa forma, teorias de sistemas a eventos discretos (SED's) vem sendo aplicadas nos sistemas de controle e na indústria como formalismo matemático para a modelagem e análise do comportamento dinâmico discreto como por exemplo: *Veículos subaquáticos autônomos* (Battistella & Queiroz, 2014); *Células de manufatura flexível* (Portilla et al. 2014); e *Estação eletropneumática* (Szpak & Queiroz, 2016); *Sistema de patrulha multirobô* (Lima et al. 2022); *Controle multioperador de exames de robôs* (Miyachi et al. 2022); *Navegação autônoma de múltiplos robôs* (Galindo et al. 2022); *Sistema de neurônios assíncronos* (Chen et al. 2022). Outros trabalhos, além de empregar a teoria de SED's para modelagem e análise, propõem implementar arquiteturas embarcadas fundamentadas em tal teoria.

O presente artigo propõe o projeto, implementação e teste em bancada experimental, de um sistema de controle em malha-fechada baseado em abordagens dirigidas a eventos para a PPH do PTI. A Teoria de Controle Supervisório (TCS) é utilizada para a modelagem formal do comportamento discreto de subsistemas da PPH. Cada subsistema é considerado como independente dos demais subsistemas. Por sua vez, uma abordagem baseada no conhecimento experimental da planta é traduzida em um fluxograma que irá gerar a lógica de controle sequencial da produção da H_2 em toda a PPH. O controle sequencial de operação atua em nível superior ao do controle lógico, pois enquanto o primeiro se encarrega de comandar a sequência de eventos de alto nível de todo o sistema, o segundo se encarrega de garantir o funcionamento correto e seguro dos subsistemas individuais.

A aplicação da TCS envolve a modelagem, que consiste na identificação dos diversos subsistemas e no emprego de modelos baseados em autômatos para representar a dinâmica discreta do seu funcionamento em malha-aberta, bem como especificações de funcionamento, intertravamento e segurança. A partir destes modelos, o processo de síntese da TCS, obtém-se estruturas de controle em malha-fechada, denominadas de supervisores, encarregados de garantir o comportamento desejado de acordo com as especificações. Adotando abordagens similares a outros trabalhos (Battistella & Queiroz, 2014), emprega-se a arquitetura de implementação da TCS apresentada em Queiroz e Cury (2002) que permite a utilização direta dos modelos formais usados na etapa de modelagem e síntese no sistema de controle da planta.

O trabalho é organizado da seguinte forma: A seção 2 descreve as unidades de processamento e subsistemas da PPH instalado no PTI. A seção 3 traz a fundamentação necessária ao entendimento do trabalho, contemplando o tema da TCS, supervisor monolítico, arquitetura de implementação e metodologia de implementação do projeto. O processo de modelagem dos subsistemas e síntese dos supervisores

empregada pela TCS aplicado à PPH é descrito na seção 4. A implementação prática é apresentado na seção 5. Ao final, são apresentadas as conclusões do trabalho.

2. PLANTA DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

Itaipu Binacional, Eletrobras e o PTI, no ano 2011 formaram o convênio com o objetivo de estudar o ciclo de vida do H_2 , envolvendo as etapas de produção, purificação, compressão, armazenamento, controle de qualidade e uso em células a combustível, como vector energético (PTI, 2020). No ano 2014, é instalada a PPH de eletrólise alcalina de água na cidade de Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. Esta planta possui uma capacidade nominal de produção de $10Nm^3/h$, consumo de energia específica de $4,5 kWh/Nm^3$, e uma eficiência global do sistema de 27,6%. Também, a planta possui uma linha de produção de oxigênio (O_2), em paralelo à linha de H_2 .

A PPH do PTI tem um sistema automatizado centralizado num Controlador Lógico Programável (CLP) com um conjunto de elementos dinamicamente relacionados entre si. Este controlador contém o programa de instruções e controle do sistema, que operam sobre entradas que são sinais dos sensores (temperatura, pressão, nível etc.) e fornece saídas que correspondem a comando e sinais enviados aos atuadores (eletroválvulas). Além disso, apresenta dois níveis de controle: controle lógico dos subsistemas e o controle sequencial da operação da planta. O primeiro se encarrega de garantir o funcionamento coerente e seguro de cada subsistema. Cada um destes subsistemas possui um comportamento independente em relação ao controle sequencial da operação. Por sua vez, o controle sequencial consiste em garantir a execução, de forma contínua e segura, do ciclo de produção de H_2 em toda a planta.

2.1 Unidades de Processamento

A PPH de PTI está dividida em unidades de processamento como apresentado na Fig. 1. A unidade de produção é o estágio onde o H_2 é produzido e os principais insumos são: água destilada (H_2O), hidróxido de potássio (KOH) e energia elétrica (em corrente contínua). A unidade de purificação é o estágio, onde o H_2 passa por um processo de limpeza, que remove impurezas. A unidade do compressor e armazenamento são os últimos estágios, onde o H_2 é comprimido, armazenado e disponibilizado para uso. Finalmente, a unidade de refrigeração é o estágio que mantém a temperatura de operação constante no sistema.

2.2 Subsistemas da PPH

Um subsistema é um componente físico específico que conta com dispositivos tais como: sensores e atuadores. Os subsistemas estão dentro das unidades de processamento, os quais são: tanque de água, tanque de lavagem de H_2 , separador líquido de H_2 , filtro de H_2 , entre outros.

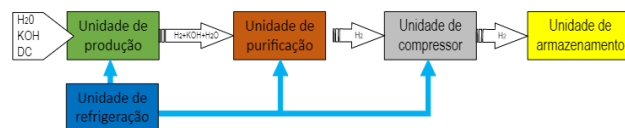


Fig. 1 Unidades de processamento da PPH

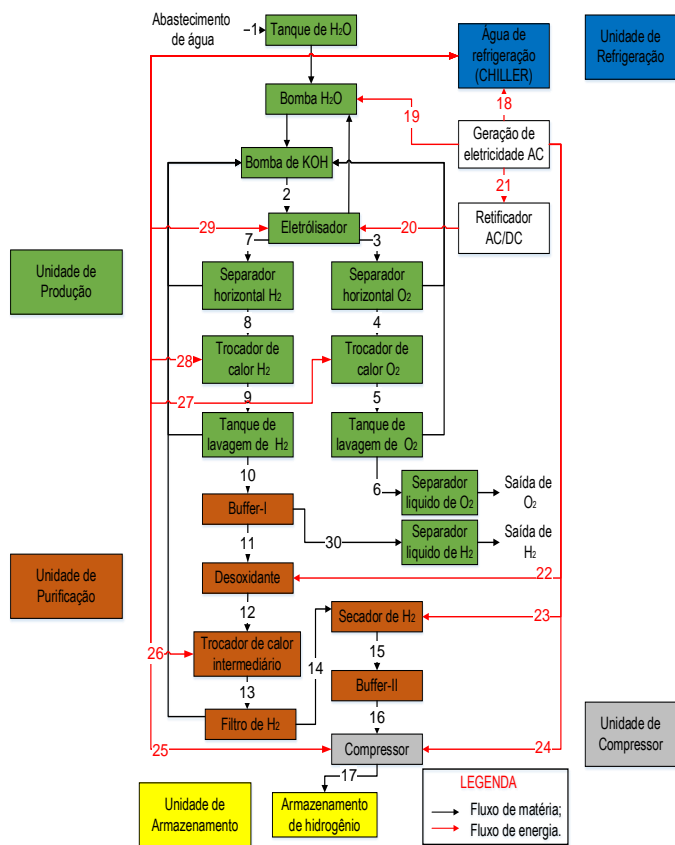


Fig. 2 Esquema dos subsistemas da PPH

Na Fig. 2 são apresentados os subsistemas que se encontram distribuídos em suas respectivas unidades e unidades de processamento, na qual as linhas pretas representam o fluxo da matéria e as vermelhas, o fluxo de energia. A linha de produção de H_2 está indicada a partir da saída do eletrolisador no estado (7) indo até o estado (16), enquanto a linha de O_2 vai do estado (3) até o (6). A produção de H_2 inicia-se quando circulam correntes elétricas contínuas nos eletrolisadores (20) provenientes dos retificadores, provocando assim uma reação eletroquímica da quebra da molécula de água e gerando bolhas gasosas de H_2 , O_2 e calor.

As bolhas de H_2 e O_2 são transportadas separadamente por tubulações até tanques separadores horizontais (7 e 3). Os gases seguem até trocadores de calor (8 e 4), e são resfriados e direcionados para os tanques de lavagem de H_2 e O_2 (9 e 5). O H_2 é levado para o vaso de pressão de H_2 (Buffer-I, 10) até atingir a pressão de operação, enquanto o O_2 é ventilado para o ambiente (6). No caso do H_2 , para ser eliminado no ambiente (30), deve estar em uma etapa de purga, despressurização ou energização, caso contrário, o H_2 continua na linha de purificação (10).

Seguindo a linha de H_2 o reator desoxidante (11) é empregado para reter contaminações de O_2 por meio de uma reação química de catálise. Seguindo o H_2 a linha é refrigerada pelo trocador de calor, onde irá ocorrer a condensação do vapor de água (12) gerada pelo reator desoxidante. Na sequência o H_2 é enviado para o filtro (13) onde é retirada a água, que é realimentada na bomba de KOH. Na continuação, o H_2 é enviado para os secadores (14), depois para um vaso de

pressão (Buffer-II, 15) e finalmente para a etapa de compressão (16) e armazenado em cilindros externos (17).

3. TEORIA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO

A TCS é um método formal de síntese de controladores ótimos não bloqueantes para SED's. A TCS propõe o desenvolvimento de modelos formais de sistemas de controle baseada na teoria de autômatos e linguagens, a qual propicia um processo automático de síntese de supervisores que atendam de forma menos restrita possível as especificações de controle, garantindo que os sistemas funcionem conforme o desejado. O supervisor projetado é minimamente restritivo e não bloqueante, ou seja, é capaz de desabilitar o menor número de eventos, evitando sequência indesejadas de eventos, a fim de garantir um comportamento seguro em malha-fechada (Ramadge & Wonham, 1989).

A TCS propõe uma estrutura clara entre o sistema a controlar, denominado planta, e o agente controlador, denominado supervisor (Ramadge & Wonham, 1989). A planta é um sistema a ser controlado e gera eventos de forma espontânea e assíncrona no tempo, desconsiderando-se qualquer tipo de ação de controle. Os eventos são classificados em controláveis, quando podem ter sua ocorrência inibidas por um agente externo, ou não controláveis, quando sua ocorrência não pode ser impedida. Porém, as especificações representam as imposições de restrição sobre o comportamento espontâneo da planta, ou seja, definem sequências de eventos que devem ser impedidos de ocorrer garantindo o comportamento desejado da planta em malha-fechada. Desse modo, o supervisor é o responsável por observar a mudança da planta e habilitar e desabilitar eventos controláveis informando à planta as vias possíveis a serem realizadas e impedindo sequência indesejáveis. Assim finalmente, o teste de controlabilidade é a condição necessária e suficiente para a existência do supervisor não bloqueante que satisfaz uma determinada especificação desejada para a planta (Ramadge & Wonham, 1989).

3.1 Supervisor Monolítico

O controle de SED's utilizando a TCS é dito monolítico quando existe apenas um único supervisor S (Fig. 3) para restringir o comportamento global de uma planta G , que também é global (Portilla et al. 2014).

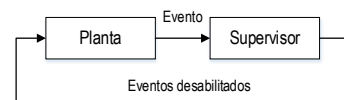


Fig. 3 Estrutura de controle monolítico.

Fonte: Ramadge & Wonham, 1989

O procedimento de modelagem de planta e especificações, e o processo de síntese do supervisor monolito envolve três passos. Passo I: Identificar o sistema (planta) que deseja modelar, definir o alfabeto (símbolos) de eventos, classificar os eventos em controláveis e não controláveis, construir os modelos de autômatos da planta G_i ($i=1, \dots, n$) e obtenção de um único modelo G_s ($G_s=G_1//\dots//G_n$) através do produto síncrono dos vários modelos da planta. Passo II: Identificar as restrições para os comportamentos indesejados do sistema,

construir os modelos de autômatos das especificações de controle do sistema E_j ($j=1, \dots, m$), obter o modelo da especificação global E_s ($E_s=E_1//\dots//E_m$) composto pelo produto síncrono das especificações individuais, obter a linguagem alvo K_s ($K_s=G_s//E_s$) pelo produto síncrono entre a planta G_s e a especificação E_s , e realizar o teste de controlabilidade (referência do Ramadge & Wonham (1989)). **Passo III:** Síntese do supervisor ótimo não bloqueante S_s ($S_s=Lm(S_s/G_s)=SupC(G_s,K_s)$) (Kaszubowski, 2016).

A minimização no supervisor permite a redução do número de estados e transições (Cassandras & Lafortune, 2008), sendo fundamental para determinar a viabilidade da implementação da estrutura de controle supervisão em um microcontrolador ou computador industrial, tendo em vista que o número total de estados do supervisor determina o número de variáveis alocadas para a implementação.

3.2 Arquitetura de Implementação

A arquitetura de implementação de controle permite a tradução dos modelos usados na etapa de modelagem e síntese dos supervisores para a implementação em um CLP. Dessa forma, o objetivo consiste em estruturar a execução do supervisor monolítico para ser implementado em linguagem de CLP's. Para o desenvolvimento e a implementação dos supervisores, no presente trabalho foi utilizada a proposta de Queiroz e Cury (2002), apresentada na Fig. 4.

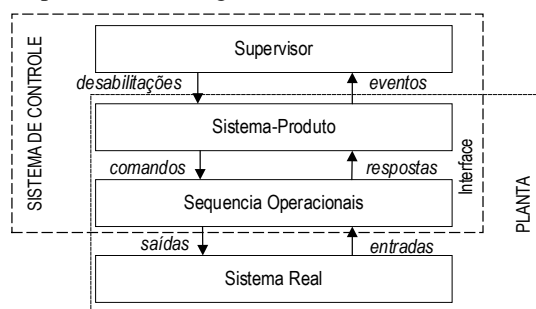


Fig. 4 Arquitetura de Implementação
Fonte: Queiroz & Cury, 2002

O supervisor S_s se encontra no nível superior da arquitetura. O nível sistema-produto contém o modelo da planta G_s que representa o comportamento livre da planta. Este tem como principal função executar os comandos que são permitidos e não são desabilitados pelo supervisor, e também receber respostas enviadas pelas sequências operacionais sinalizando as mudanças de estado para o supervisor. O supervisor é atualizado cada vez que o sistema produto envia comandos ou recebe respostas, habilitando ou desabilitando os eventos controláveis. As sequências operacionais são procedimentos de baixo nível, definindo uma interface entre a solução de controle proposta e o sistema físico real. Sinais de entrada enviados pelo sistema real estão associados a eventos não controláveis e comandos enviados para a planta, a eventos controláveis.

3.3 Metodologia de Projeto de Controle

A metodologia de projeto do sistema de controle baseado na TCS usado neste trabalho se baseia nas primeiras 4 etapas da metodologia proposta em Portilla et. al (2014). Por não

envolver a parte de monitoramento via SCADA, somente as 4 primeiras fases da metodologia são utilizadas, a saber: Projeto Informacional; Síntese de Controle Supervisório; Emulação e Implementação de Controle Supervisório em CLP's. A metodologia envolve desde a modelagem da planta e especificações, a síntese dos supervisores com base na TCS, até a implementação da arquitetura proposta. Através da geração automática de código é possível transcrever os modelos da TCS para a linguagem do CLP.

4. MODELAGEM DOS SUBSISTEMAS E CONTROLE SEQUENCIAL DE OPERAÇÃO DA PPH

Cada subsistema de planta, apresentados informalmente na seção 2.2, tem seu funcionamento lógico interno independente dos demais subsistemas e, portanto, podem ser modelados separadamente dos demais subsistemas. Neste sentido, a abordagem monolítica foi empregada para projetar e implementar as malhas de controle usando a abordagem da TCS em cada um destes subsistemas.

O funcionamento global da produção de H_2 é garantido pelo controle lógico sequencial da planta, que opera em nível de abstração diferente do comportamento interno de cada subsistema. O controle sequencial da operação não foi abordado pela TCS devido aos modelos envolvidos serem complexos e ao número considerável de dispositivos envolvidos, resultando em autômatos com elevado número de estados e transições, dificultando a análise, síntese de supervisores e implementação em arquiteturas com menor poder computacional. Para contornar essa limitação, para este trabalho, optou-se pelo desenvolvimento de um fluxograma que descreve o funcionamento sequencial da operação da planta, a ser apresentado na seção 4.2.

4.1 Controle Supervisório de Unidades da PPH

Cada subsistema é modelado por um autômato G_s obtido pelo produto síncrono dos autômatos G_i individuais que descrevem os modelos dos dispositivos ou elementos que compõem o subsistema. Especificações E_j são usadas para representar as restrições ao comportamento livre do subsistema G_i . Uma especificação global E_s para cada subsistema é obtida pelo produto síncrono das especificações E_i . O supervisor monolítico S_s do subsistema é calculado a partir das linguagens alvo K_s , obtidas, por sua vez, pelo produto síncrono da planta G_s e da especificação E_s do subsistema em questão (seção 3.1).

A seguir é mostrado o processo de modelagem da planta e especificação, e respectivo processo de síntese do supervisor monolítico de dois subsistemas – Tanque de Água e Tanque de Lavagem de H_2 . De modo similar, a mesma abordagem é aplicada nos demais subsistemas que, por motivo de espaço, não serão apresentados.

4.1.1 Tanque de Água

O tanque de água da unidade de produção (seção 2.2) está formado por dois componentes: sensor de nível e válvula solenoide. O tanque de água é o equipamento que armazena água residual dos processos e a mescla com a água destilada de alimentação, para logo ser bombeado para os eletrolisadores. A Fig. 5, mostra o interior do tanque com o sensor de nível LSI e uma válvula solenoide VI .

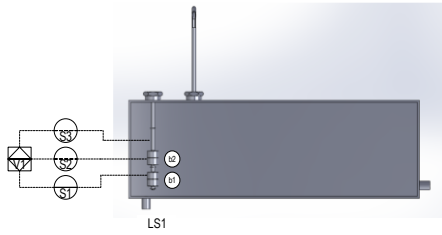


Fig. 5 Vista interna do tanque de água e sensor de nível.

O funcionamento consiste em armazenar água residual no tanque, de modo que a boia *b2* esteja no nível de *S3* e a válvula *VI*, desligada. Quando a água residual é bombeada por meio da bomba de H₂O para os eletrolisadores, o nível da água desce e a boia *b2* muda de posição para o nível *S2*. Nesse momento, a válvula solenoide *VI* liga e inicia o processo de carregamento de água destilada no tanque até que, novamente, a boia *b2* atinja o nível *S3*. Se o nível de água descer e a boia *b1* atingir o nível *S1* o sistema entra no modo de alarme. A Tabela 1 apresenta os eventos usados para a modelagem desse subsistema.

Tabela 1. Eventos do tanque de água.

Evento	Descrição	Controlável
S1_1_in ¹	Interruptor de nível S1	não
S2_1_in	Interruptor de nível S2	não
S3_1_in	Interruptor de nível S3	não
alar_0_in	Desativar alarme	não
alar_1_in	Ativar alarme	não
L_V1_Co	Ligar válvula V1	sim
D_V1_Co	Desligar válvula V1	sim

O autômato G1 (Fig. 6) representa o modelo do tanque de água. O estado 1 representa o tanque com nível alto de água, o estado 2, tanque com nível baixo e o estado 3, tanque com nível muito baixo.

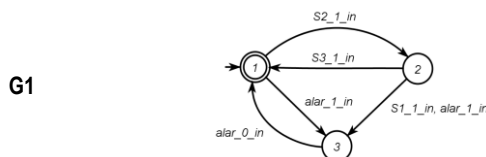


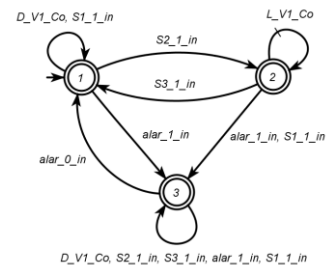
Fig. 6 Modelo do tanque de água.

O autômato G2 (Fig. 7) representa o modelo do comportamento da válvula solenoide *VI*. O estado 1 representa a válvula *VI* fechada, e o estado 2, a válvula *VI* aberta.



Fig. 7 Modelo da válvula solenoide *VI*.

A especificação *E1* (Fig. 8) representa o funcionamento do tanque de água conforme o desejado. Para este caso, sempre que o tanque apresentar nível de solução alto a válvula *VI* é desligada. Assim, se o tanque apresentar nível de solução baixo a válvula *VI* é ligada e quando o nível da solução é muito baixo, a válvula *VI* é desligada e o alarme é ativado.



E1

Fig. 8 Especificação *E1* do tanque de água e a válvula *VI*.

4.1.2 Tanque de Lavagem de H₂

O tanque de lavagem de H₂ é o equipamento que está instalado na saída do trocador de calor de H₂ (Fig. 2), com a função de separar o gás de H₂ da solução de KOH restante do processo anterior (seção 2.2). Sua operação se baseia num processo cinético, no qual o gás H₂ é lavado com o líquido saturado que se encontra em repouso na parte inferior do tanque. A Fig. 9 mostra a vista interior do tanque com seu sensor de nível *LS2* e uma válvula solenoide *V2*.

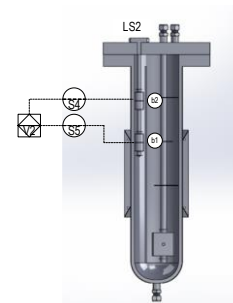


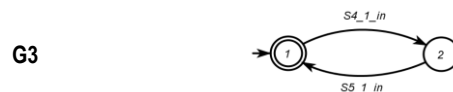
Fig. 9 Vista interna do tanque de lavagem de H₂ e sensor de nível.

O funcionamento consiste em manter o nível da solução abaixo do nível *S5*, de tal forma que a boia *b1* esteja na posição do sensor de nível *S5* e com a válvula *V2* desligada. Quando a solução aumenta de nível desloca a boia *b1* para cima e para fora da posição *S5*, e a boia *b2* chega no nível *S4*. Quando isto ocorre, a válvula *V2* liga e ocorre o processo de descarga, até que a boia *b2* retorne a sua posição inicial e a boia *b1* volte para a posição *S5*. A Tabela 2 apresenta os eventos usados para a modelagem desse subsistema.

Tabela 2 Eventos do tanque de lavagem de H₂.

Evento	Descrição	Controlável
S4_1_in	Interruptor de nível S4.	Não
S5_1_in	Interruptor de nível S5.	Não
L_V2_Co	Ligar válvula V2.	Sim
D_V2_Co	Desligar válvula V2.	Sim

O autômato G3 (Fig. 10) representa o modelo do tanque de lavagem de H₂. O estado 1 representa o tanque com nível baixo de água residual de eletrólito e o estado 2, tanque com nível alto.



G3

Fig. 10 Modelo do tanque de lavagem de H₂.

¹ Para desenvolvimento da análise dos sensores de nível foi considerado que o interruptor (S1_0_in, S2_0_in, S3_0_in..., S32_0_in) estão normalmente abertos e só mudam de estado para normalmente fechado quando a boia está alinhada com o interruptor

(S1_1_in, S2_1_in, S3_1_in..., S32_1_in). Esta consideração também será aplicada nos próximos sensores de nível.

Tabela 3 Dados da síntese dos supervisores monolíticos.

Subsistemas	Dispositivos	Produto Sincrono das Dispositivos	Especificações	Linguagem Alvo	Supervisor Monolítico	Supervisor Monolítico Reduzido
		$G_s = G_1 // \dots // G_n$		$K_s = G_s // E$	$S_s = SupC(G_s, K_s)$	$Min(S_s = SupC(G_s, K_s))$
		Q *		Q	Q	Q
Tanque de água	G1, G2	6	E1	6	6	6
Tanque de lavagem de H ₂	G3, G4	4	E2	4	4	4
Separador líquido de H ₂	G5, G6	4	E3	4	4	4
Filtro de H ₂	G7, G8	4	E4	4	4	4
Tanque de lavagem de O ₂	G9, G10	4	E5	4	4	4
Separador líquido de O ₂	G11, G12	4	E6	4	4	4
Tanques separadores de O ₂ e H ₂	G13, G14, G15, G16, G17, G18, G19, G20	576	E7	1632	1632	1016
Refrigeração	G21, G22, G23, G24	16	E8	16	16	16
Compressor	G25, G26	4	E9	4	4	4
TOTAL	-	622	-	1678	1678	1062

* Número de Estados.

O autômato G4 (Fig. 11) representa o modelo do comportamento da válvula solenoide V2. O estado 1 representa a válvula solenoide V2 fechada, e o estado 2, a válvula solenoide V2 aberta.



Fig. 11 Modelo da válvula solenoide V2.

A especificação E2 (Fig. 12) representa o funcionamento do tanque de lavagem de H₂ conforme o desejado. Para este caso, sempre que o tanque apresentar nível de solução baixo, a válvula V2 é desligada e quando o tanque apresentar nível de solução alto, a válvula V2 é ligada.

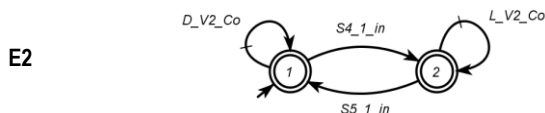


Fig. 12 Especificação E2 do tanque de H₂ e válvula V2.

4.1.3. Síntese dos Supervisores para os Subsistemas da PPH

O mesmo procedimento usado nas Seções 4.1.1 e 4.1.2 foram empregados para a modelagem dos demais subsistemas e respectivas especificações. Assim, para este trabalho foram elaborados 26 modelos dos dispositivos; 9 especificações de controle e 9 supervisores conforme apresentado na Tabela 3. A partir do modelo do subsistema G_s , da especificação E_s , obtém-se a linguagem alvo K_s . Com a linguagem alvo, pelo processo de síntese da TCS, obtém-se o supervisor S_s .

Para o processo de síntese dos supervisores monolíticos foi utilizado a ferramenta de modelagem para SED's *Supremica*. Esta ferramenta permite a modelagem formal, análise, verificação e síntese de supervisores (Akenson et al. 2006). A ferramenta também permite realizar o teste de controlabilidade das especificações.

A Tabela 3 apresenta um resumo do processo de modelagem e síntese utilizados para os 9 subsistemas. A coluna de dispositivos indica o número de componentes que são modelados individualmente em cada subsistema, e a coluna seguinte representa o número de estados do autômato G_s resultante do produto síncrono dos autômatos individuais. Nas

colunas seguintes são apresentadas, respectivamente, o número de especificações E_s , número de estados da linguagem alvo K_s e do supervisor monolítico obtido. Pelo processo de redução de autômatos, é possível encontrar um autômato equivalente com um menor número de estados em transições, porém somente para um subsistema foi possível reduzir, o subsistema dos tanques separadores de O₂ e H₂.

4.2 Controle Sequencial de Operação da PPH

Devido ao custo computacional proibitivo de cálculo e implementação de um modelo baseado na abordagem da TCS para o funcionamento global da planta, optou-se, neste trabalho, pela descrição sequencial das etapas do funcionamento da PPH. Este comportamento é descritivo e tem como base a experiência dos operadores de produção no modelo existente da PPH. O objetivo do controle sequencial consiste em comandar e monitorar o conjunto de subsistemas que estão relacionados a cada etapa do ciclo de produção de H₂.

O fluxograma mostrado na Fig. 13 representa cada uma das etapas da produção de H₂, e que possuem relação com os modelos e supervisores implementados na etapa anterior, através do compartilhamento de eventos e na abstração do funcionamento das condições de alarmes. Neste sentido, os diversos alarmes existentes em cada um dos subsistemas são mascarados ou traduzidos em uma única condição de alarme para o nível de controle sequencial.

As principais etapas da produção de H₂ podem ser mapeadas em nove estados, ou etapas, descritos brevemente a seguir.

Conforme à Fig. 13, o **Estado I - DESLIGADO**: Estado onde a planta não está conectada à energia elétrica, e todos os subsistemas estão desenergizados. **Estado II - STANB-BY**: Estado onde a planta está ligada e inicia a verificação de alarmes ativos. **Estado III - PRE-START**: Estado onde é energizada a bomba de KOH. Inicia processo de circulação da solução pelos eletrolisadores e os separadores horizontais de O₂ e H₂. O estado tem uma duração de 60 seg. **Estado IV - PURGA**: Estado onde são energizados os eletrolisadores, bomba de chiller e duas válvulas solenoides de alívio. Inicia a produção de H₂ e O₂ que são liberados para o meio ambiente por estas duas válvulas. O procedimento serve para retirar o

resíduo de nitrogênio (N₂) dos separadores horizontais, trocadores de calor, tanques de lavagem, Buffer I e nas linhas de tubulação de H₂ e O₂. Este estado tem uma duração de 420 seg.

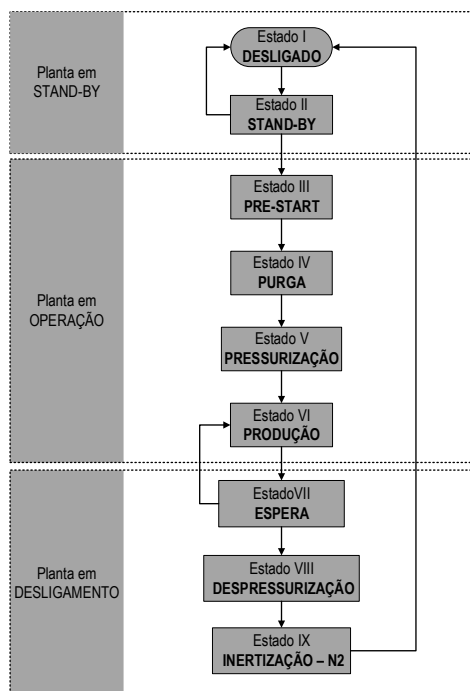


Fig. 13 Fluxograma de controle sequencial da PPH.

Estado V - PRESSURIZAÇÃO: Estado onde as válvulas solenoides de alívio são desenergizadas e o sistema inicia a pressurizar. Quando a pressão no Buffer I alcança 3 Bar são energizados o reator desoxidante, secadores e um conjunto de válvulas solenoides na unidade de purificação. **Estado VI - PRODUÇÃO:** Estado de operação em regime permanente de produção de H₂ e O₂ com pressão maior que 3 Bar. A pressão interna na linha de H₂ aumenta até atingir 17 Bar. Quando a pressão interna do Buffer II alcança 17 Bar, o compressor é ligado e inicia o processo de armazenamento de H₂ nos tanques de alta pressão. Quando a pressão interna do Buffer II diminui e alcança 14 Bar, o compressor é desligado e novamente o sistema inicia a pressurização. Esse ciclo é repetido até que ocorra uma operação manual e o botão *Stanb-by* seja ativado. **Estado VII - ESPERA:** Estado onde os eletrolisadores, o reator desoxidante, os secadores e um conjunto de válvulas solenoides são desenergizados, ainda mantendo o sistema pressurizado. Caso ocorra uma operação manual e o botão *Start* seja ativado o sistema volta para o estado de produção. Se o estado de espera superar os 30 minutos o sistema automaticamente entra em despressurização.

Estado VIII - DESPRESSURIZAÇÃO: Estado de despressurização na linha de H₂ e O₂. Quando a pressão no Buffer I chegar próximo a 0 Bar, o sistema evolui para o próximo estado. **Estado IX - INERTIZAÇÃO:** Estado onde os separadores horizontais, os trocadores de calor, os tanques de lavagem e o Buffer I são obrigados a passar por um processo de limpeza com N₂ por um intervalo de tempo de 180 seg. Essa etapa é fundamental para manter a linha de produção livre da presença de H₂ e assim garantir a operação segura para o próximo ciclo de operação.

5. IMPLEMENTAÇÃO EM CLP

Para o teste do projeto do sistema de controle da PPH é construída uma bancada laboratorial que simula o comportamento dinâmico discreto da PPH. O diagrama de instalação (Fig. 14) apresenta a relação dos equipamentos empregados para a implementação do sistema de controle supervísório e o controle sequencial e a bancada experimental. Os dispositivos eletrônicos utilizados para o teste do sistema são: uma bancada laboratorial que representa a PPH, dois CLP's DU0351 da Altus, uma placa de prototipagem Arduino e um relé. Os CLP's operam sobre entradas que são os interruptores de *Start*, *Stop*, *Emergency*, *Stanb-by*, botão de N₂ e os sensores de nível do tipo boia, temperatura e pressão (30 entradas). Com isso os CLP's fornecem saídas que correspondem a comandos ou sinais enviados aos atuadores, entre eles: eletroválvulas, bombas, reator desoxidante, secadores, eletrolisadores e compressor (28 saídas).

Os sistemas de controle – supervísório e sequencial - foram implementados em duas linguagens diferentes de CLP (IEC61131-3) e em CLP's separados, devido ao número limitado de entradas e saídas.

Para o controle supervísório foi escolhido a linguagem baseada em texto estruturado ou ST (*Structured Text*), por existir ferramenta que gera o código automático para esta linguagem a partir de modelos das plantas, especificações e supervisores codificada a partir da ferramenta IDES2ST (Kingle, 2007). Para a implementação do controle lógico dos subsistemas, foi necessário utilizar a ferramenta *Supremica* que permite a modelagem formal, simulação, verificação e síntese dos supervisores para os subsistemas da planta. Uma vez obtida as estruturas, estas são convertidas na arquitetura de implementação apresentada na seção 3.2 com a ferramenta IDES2ST.

Para o controle sequencial, foi empregada a linguagem *Ladder*, codificada manualmente no CLP. Para a implementação do controle sequencial de operação da PPH, é construído manualmente, a partir do fluxograma que modela a sequência de estados do ciclo de produção de H₂ (Fig. 13), o programa em *Ladder*. A linguagem *Ladder* proporciona uma implementação mais direta do fluxograma, facilitando a transcrição lógica das sequências de operação na elaboração de comando feitos por relés. Além disso, apresenta uma estruturação clara dos estados de operação do fluxograma de controle sequencial da PPH, os blocos funcionais (temporizadores) e as variáveis de entrada e saídas. Porém, também apresenta desvantagens tais como a necessidade de testes mais exaustivos de modo a identificar e corrigir eventuais erros relacionados a codificação manual.

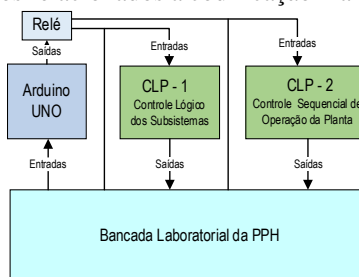


Fig. 14 Diagrama de instalação do projeto de controle.

Finalmente, uma forma de comprovação dos modelos lógicos usados no controle supervísório dos subsistemas e o controle sequencial da operação da planta é realizado através de testes em uma bancada laboratorial, que retrata todas as unidades de processamento da PPH. A bancada permitiu avaliar, de modo demonstrativo ou inicial, o funcionamento de ponto de vista lógico e operacional dos dois controladores empregados na bancada da PPH, possibilitando avaliar aspectos qualitativos (lógica e segurança) das duas abordagens de controle empregadas (supervísório e sequencial). Nos testes laboratoriais com os códigos nos respectivos CLP's foi configurada a varredura cíclica da leitura do programa (*scan*) em 1 mseg, não apresentando problemas de sincronização e simultaneidade, problemas estes que podem ser encontrados em implementações de sistemas de controle com SED's.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta o projeto e implementação de um protótipo de sistema de controle para a PPH. Baseada na SED's para o controle lógico dos subsistemas e em uma implementação baseada num conhecimento experimental da planta traduzida em um fluxograma para o funcionamento sequencial de produção de H₂ em toda a PPH, o trabalho propôs a análise lógica dos subsistemas, derivação de modelos e estruturas de supervisão, além da integração com o nível de produção da PPH. O conjunto das abordagens permitiu definir uma lógica de controle global da planta e assim garantir o correto funcionamento para o ciclo de produção de H₂. Desse modo, este trabalho inicial também tem a pretensão de possibilitar a aplicação e aproveitamento melhor dos conteúdos da pesquisa de automação em plantas de H₂.

A TCS apresenta ser uma solução para o projeto de controle de sistemas de automação na indústria de processo, já que por meio dela foi possível modelar o comportamento de 26 dispositivos que pertencem a 9 subsistemas, da PPH como um SED's e derivar 9 controladores ou supervisores que, por construção, garantem 9 especificações de segurança e operação para a planta controlada. Dessa forma, o processo de projeto conceitual proposto estabelece uma forma organizada, produtiva e segura de combinar a modelagem formal, a arquitetura de controle supervísório, o projeto do controlador e sua implementação em um CLP, com a respectiva linguagem de programação, em uma abordagem formal unificada, favorecendo o desenvolvimento da lógica de controle de sistemas industriais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Parque Tecnológico Itaipu ao qual pertence a PPH e ao programa de Pós-graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual do Oeste de Paraná pelo empréstimo dos equipamentos.

REFERÊNCIAS

Ayivor, P., Torres, J., Meijde, M., Pluijm, R., & Stouwie, B. (2018). Modelling of Large Size Electrolyzer for Electrical Grid Stability Studies in Real Time Digital Simulation. *3rd International Hybrid Power Systems Workshop*.

- Battistella, S., & Queiroz, M. (2014). Arquitetura e Ambiente de Simulação para Sistemas de Missão de AUVs Baseado em Controle Supervísório. *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática*, pp. 1466-1473.
- Cassandras, C. G., & Lafortune, S. (2008). *Introduction to Discrete Event Systems*. (S. Science+Business, Ed.) New York.
- Chen, X., Peng, H., Wang, J., & Hao, F. (June de 2022). Supervisory control of discrete event systems under asynchronous spiking neuron P systems. *Elsevier*.
- Cury, J. E. (2001). *Teoria de Controle Supervísório de Sistemas a Eventos Discretos*. Relatório Técnico, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Automação e Sistemas, Canela, Brasil.
- Galindo, J., Santos, M., Raffo, G., & Pena, P. (October de 2022). Distributed supervisory control for multiple robot autonomous navigation performing single-robot tasks. *Elsevier*.
- Godula, A. (2015). *Hydrogen Production by Electrolysis*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- IEA. (2019). The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities. *Report Prepared by the IEA for the G20*.
- Kaszubowski, L. Y. (2016). *Supervisory Control Theory for Controlling Swarm Robotics*. Thesis of Doctor in Philosophy, University of Sheffield, Sheffield, Inglaterra.
- Kingle, S. (2007). *Supervisory Control of a Manufacturing Cell : Modeling and*. Otto Von Guericke Universität Magdeburg, Magdeburg, Alemanha.
- Lima, C., Khan, D., Humayoon, X., & Lu, C. (26 de abril de 2022). Deliberative/Reactive Architecture of a Multirobot Patrol System Based on Supervisory Control Theory. *IEEE*, pp. 11023 - 11033.
- Miyauchi, G., Lopes, Y., & Grob, R. (12 de July de 2022). Multi-Operator Control of Connectivity-Preserving Robot Swarms Using Supervisory Control Theory. *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.
- PNE. (2020). *Plano Nacional de Energia 2050*. Brasília: Ministerio de Minas e Energia.
- Portilla, C. B., Queiroz, H. M., & Cury, E. J. (2014). Integration of Supervisory Control with SCADA System for a Flexible Manufacturing Cell. *IEEE*, pp. 261-266.
- PTI. (16 de novembro de 2020). *Núcleo de Pesquisa em Hidrogênio*. Fonte: Parque Tecnológico Itaipu: <https://www.pti.org.br/pt-br/hidrogenio>
- Queiroz, M., & Cury, J. (2002). Synthesis and Implementation of Local Modular Supervisory Control for a Manufacturing Cell. *Proceedings - 6th International Workshop on Discrete Event Systems, WODES 2002*, pp. 377-382.
- Ramadge, P. J., & Wonham, W. M. (1989). The Control of Discrete Event Systems. *IEEE - Transactions on Control Theory*, 77, 81-98.
- Szpak, R., & Queiroz, M. (2016). Design and Implementation of Supervisory Control for an Electropneumatic Station Subject to Faults in Material Flow. *Proceedings of the 9th FPNI Ph.D. Symposium on Fluid Power*.