

# O conceito de controle de sistema a eventos discretos aplicado na manufatura de tanque de hidrogênio

Sofia Lopes Suesdek Rocha, Soitiro Oura

**Resumo** – Atualmente, a emissão de gases de efeito estufa pela humanidade é um tópico crítico para o aquecimento global, criando a necessidade do desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis. No âmbito de meios de transporte, destacam-se os veículos movidos a hidrogênio, projeto que surgiu há algumas décadas, mas ainda não foi implementado rotineiramente, principalmente pela necessidade de tanques específicos para armazenamento do gás no veículo. Dessa maneira, o presente trabalho busca descrever e modelar as etapas essenciais de fabricação de um tanque de hidrogênio, seguindo como referência os utilizados nos carros Toyota Mirai. Partindo da descrição por meio de Redes de Petri, as principais características e os requerimentos de uma planta de fabricação de tanques de hidrogênio foram esquematizados, traduzindo o modelo para Ladder, ao final.

**Palavras-chave** – Automação da manufatura do tanque de hidrogênio; Veículo elétrico a células de combustível (FCEV); Sistema a eventos discretos (SED)

## 1 Introdução

De acordo com a Organização Meteorológica Mundial - OMM (2021) e o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC (2021), o aquecimento global é principalmente devido a atividades humanas que emitem gases de efeito estufa, como o CO<sub>2</sub>: esses gases se acumulam na atmosfera e retêm calor na Terra. Segundo o relatório da Arcadis (2022) um aumento na temperatura global de mais de 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais pode ter consequências catastróficas: perda de espécies, aumento do nível do mar, propagação de doenças, condições climáticas extremas mais frequentes e a migração de seres humanos. Para limitar o aquecimento global a menos de 1,5 °C e manter o desenvolvimento sustentável, há uma necessidade urgente de redução das emissões de carbono em todo o mundo. Por isso, o Acordo de Paris estabeleceu uma meta de atingir emissões líquidas zero até 2050 (BEIS, 2021).

Uma das principais fontes de emissões de CO<sub>2</sub> é a queima de combustíveis fósseis para fornecer a energia necessária no cotidiano das pessoas, que representa a causa de cerca de 76% de todas as emissões dos EUA causadas por atividades humanas, de acordo com a United States Environmental Protection Agency (2017). Além das emissões de CO<sub>2</sub>, um outro problema dos combustíveis fósseis é que são fontes de energia não renováveis, portanto as reservas de combustíveis fósseis vão se esgotando, conforme estudo de Kalair, et al. (2021). Sendo assim, muitas indústrias vêm tomando medidas para a transição energética: de combustíveis fósseis para fontes de energia limpa e renovável. No setor de transporte, as indústrias procuram por alternativas aos veículos convencionais, movidos a combustão interna. Exemplo de alternativa é o veículo elétrico a células de combustível (FCEV), alimentados por hidrogênio.

O hidrogênio é uma fonte de energia abundante e limpa que não emite CO<sub>2</sub>: sua reação nas células de combustível produz energia, liberando como subprodutos apenas o vapor d'água e calor (BULL, 2021). Porém, necessita-se de um cuidado: segundo Hassan et al. (2023), o hidrogênio só é considerado genuinamente limpo se é produzido por meio da eletrólise, utilizando fontes de energia renováveis como solar, eólica e hidrelétrica. Este tipo de hidrogênio é denominado de hidrogênio verde e se opõe ao hidrogênio produzido pelo método convencional que ocorre a partir do gás natural e emite gases de efeito estufa durante sua produção.

Além de ser uma fonte de energia limpa, o hidrogênio possui um poder calorífico de 120 MJ/kg, cerca de três vezes maior em relação ao diesel ou gasolina, tornando-o no combustível com maior energia por unidade de massa (BOSSSEL, 2003). O hidrogênio tem uma ampla variedade de aplicações na indústria química, na fabricação de componentes eletrônicos e na geração de energia. Entretanto, cerca de 90% do hidrogênio comercialmente disponível é usado no refino de petróleo e na produção de amônia e metanol. Um estudo conduzido pela American Institute of Aeronautics and Astronautics (2017) mostrou que apenas uma pequena porcentagem do hidrogênio é usada no setor de transporte. O primeiro protótipo de FCEV movido a hidrogênio foi introduzido no final da década de 1990 e, a partir dos anos seguintes, muitos fabricantes de automóveis, como a General Motors e a Toyota, desenvolveram mais de 20 tipos diferentes de FCEVs (FUEL CELL STORE, 2019). Na última década, enquanto os veículos elétricos a bateria (BEVs) têm aumentado a popularidade e vendas em todo o mundo, a adoção de veículos movidos a hidrogênio foi bastante lenta, e uma das principais razões para isso são os desafios no armazenamento do hidrogênio inflamável nos veículos (SCHÜTH, 2009).

Os métodos comuns para armazenar hidrogênio incluem o armazenamento em forma líquida, em forma de gás comprimido e em forma de hidretos metálicos (CHENG, 2023). Devido à complexidade técnica do armazenamento em forma líquida e em forma de hidretos metálicos, os FCEVs atuais são dominados pelo sistema de gás comprimido de hidrogênio, que armazena o hidrogênio comprimido em tanques de hidrogênio.

A manufatura dos tanques de hidrogênio é de grande relevância para o avanço da disseminação dos FCEVs. Uma vez que o tanque de hidrogênio é um elemento chave desses veículos, é importante que possuam boa qualidade ao final da manufatura. Portanto, o investimento na automação do processo de manufatura dos tanques de hidrogênio é viável e necessária para: precisão na fabricação; união com bom acabamento entre componentes; produção em escala; redução de custos e desperdícios; controle de qualidade; segurança do trabalhador; rastreabilidade. O sistema automatizado de manufatura pode ser modelado como um sistema a eventos discretos com regras de produção e isso permite a introdução da Rede de Petri (RdP), ferramenta que auxilia no entendimento da lógica de controle do sistema e que é útil para desenvolver a programação a ser inserida no controlador lógico programável (CLP).

## 2 Materiais e métodos

Nesta seção, são apresentados os conceitos que devem ser considerados na modelagem de um sistema a eventos discretos (SED) e a metodologia para desenvolver a Rede de Petri (RdP), uma ferramenta de representação do sistema de controle. Além disso, será apresentada como decorre a transcrição da RdP para a linguagem de programação. Neste trabalho, a linguagem considerada foi o Ladder.

### 2.1 Conceito de sistema a eventos discretos - SED

De acordo com Cardoso & Valette (1997), os sistemas a eventos discretos (SEDs) são sistemas modelados de tal sorte que as variáveis de estado variam bruscamente em instantes determinados e que os valores das variáveis nos estados seguintes podem ser calculados diretamente a partir dos valores precedentes e sem ter que considerar o tempo entre estes dois instantes.

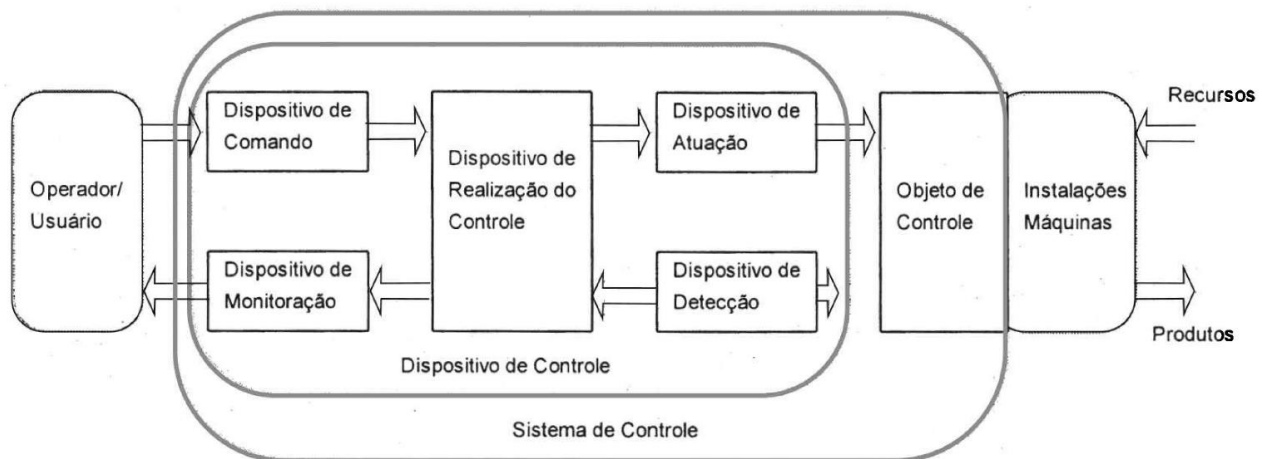
Os conceitos básicos utilizados na modelagem de um sistema baseado numa abordagem por eventos discretos são os seguintes:

- Eventos: são os instantes de observação e de mudança de estado do sistema.
- Atividades: são as caixas-pretas utilizadas para recuperar e esconder a evolução do sistema físico entre dois eventos. Portanto, os eventos correspondem em geral ao início e ao fim de uma atividade.
- Processos: são sequências de eventos e de atividades interdependentes. Por exemplo, um evento provoca uma atividade, que provoca um evento de fim de atividade, que por sua vez pode provocar uma outra atividade e assim por diante.

## 2.2 Modelo estrutural

Conforme Miyagi (1996), a arquitetura física para controle SED é estruturada de acordo com o diagrama da Figura 1. Neste diagrama, observa-se como o sistema de controle interage com o operador/usuário e com os recursos empregados e produtos gerados. Além disso, existe um maior detalhamento do funcionamento do dispositivo de controle, constituído pelos dispositivos de comando, de atuação, de detecção, de monitoração e de realização do controle.

Figura 1 - Diagrama conceitual básico do sistema de controle de SED



A Tabela I apresenta os exemplos dos principais dispositivos utilizados no controle de SED.

Tabela I – Classificação dos dispositivos e exemplos

Classificação	Exemplos de dispositivos
Dispositivos de Comando	botões, chaves rotativas, chaves seccionadoras
Dispositivos de Atuação	válvulas solenoides, contatores, servomotores
Dispositivos de Detecção	chaves-limites, potenciômetros, chaves-fotoelétricas, termostatos, tacômetros, resolvers, codificadores
Dispositivos de Monitoração	lâmpadas sinalizadoras, buzinas alarmes, mostradores (displays), CRT (Cathode Ray Tube), registradores
Dispositivos de Realização do Controle	circuitos elétricos, contadores, controladores programáveis, temporizadores

### 2.3 Modelo comportamental: desenvolvimento da RdP com metodologia PFS/RdP

Para a modelagem do comportamento do sistema, é necessário definir os intertravamentos, que, segundo Miyagi (1996), são condições restritivas como a habilitação ou inibição de operação ou funcionamento de um equipamento. Entretanto, de forma mais concreta, os intertravamentos podem ser considerados como funções que não permitem qualquer tipo de mudança de estado ou de ação até que outros estados ou ações estejam completadas.

Os intertravamentos podem ser divididos em duas classes: intertravamentos primitivos e intertravamentos sistêmicos. Os intertravamentos primitivos são como operadores para serem aplicados como regras básicas para a especificação de lógicas de controle. São eles: os intertravamentos temporizados, intertravamentos de não simultaneidade e intertravamentos de sequência. Entretanto, para gerar o modelo comportamental do sistema de controle, são considerados os intertravamentos sistêmicos, pois correspondem a descrição dos intertravamentos específicos que dependem da natureza do processo que está sendo controlada. Seguem os intertravamentos sistêmicos e suas definições, de acordo com Miyagi (1996):

- Intertravamentos de partida: são condições que devem estar satisfeitas no instante de partida (inicialização) e que não são consideradas durante o estado de funcionamento. Em geral, com a ativação do sinal correspondente ao estado de funcionamento, este intertravamento de partida é bypassado. Como exemplos concretos tem-se o posicionamento inicial para operação da máquina, existência de material na entrada do transportador (alimentador), saída da máquina (esteira) livre, etc.
- Intertravamentos de funcionamento: são condições que devem ser satisfeitas não somente na inicialização, mas também durante o funcionamento. Se tais condições não forem satisfeitas durante o funcionamento, deve-se passar para o estado de parada. Por exemplo, fornecimento de energia dentro das especificações, operação da bomba de lubrificação, não existência de sinal de falha no equipamento, etc.
- Intertravamentos de processo: o sistema de controle de SED realiza a evolução de estados através da ocorrência de eventos, isto é, estabelece as condições de inibição ou habilitação para a transição de estados. Assim, a transição só deve ocorrer se todas as ações e condições das etapas anteriores forem completamente executadas e todos os preparativos para a próxima etapa estarem satisfeitos.

Com os intertravamentos de processo definidos, é possível começar a construir o Production Flow Schema (PFS), um diagrama resultante da representação do fluxo de itens em um processo produtivo. O PFS é constituído por três elementos básicos:

- Elementos (ativos) correspondentes a atividades;
- Elementos (passivos) correspondentes a distribuições;
- Arcos que representam as relações entre os elementos anteriores.

A Figura 2 é um exemplo de PFS, onde as atividades são representadas pelos blocos delimitados por dois colchetes, os distribuidores são representados por círculos. A palavra entre colchetes são nomes dados às atividades. O PFS da Figura 2 pode estar representando um processo de produção, onde há entrada de peça por uma esteira (IN), operação de uma máquina M sobre a peça (OPER) e saída da peça pela esteira (OUT).

Figura 2 - PFS de um determinado sistema



Com o PFS pronto é possível aplicar a metodologia PFS/RdP para obter a Rede de Petri. De acordo com Cardoso & Valette (1997), a RdP é composta por três elementos básicos:

- Lugar (representado por um círculo): pode ser interpretado como uma condição, um estado parcial, uma espera, um procedimento, um conjunto de recursos, um estoque, uma posição geográfica num sistema de transporte, etc. Em geral, todo lugar tem um predicado associado, por exemplo, máquina livre, peça em espera;
- Transição (representada por barra ou retângulo): é associada a um evento que ocorre no sistema, como o evento iniciar a operação;
- Marca (representado por um ponto num lugar): é um indicador significando que a condição associada ao lugar é verificada. Pode representar um objeto (recurso ou peça) numa certa posição geográfica (num determinado estado), ou ainda uma estrutura de dados que se manipula. Por exemplo, uma marca no lugar da máquina livre indica que a máquina está livre (predicado verdadeiro). Se não tem marcas neste lugar, o predicado é falso, por conseguinte a máquina não está livre. Se no lugar peças em espera houvesse três marcas, indicaria que existem três peças em espera.

O estado do sistema é dado pela repartição de marcas nos lugares da Rede de Petri, cada lugar representando um estado parcial do sistema. A cada evento que ocorre no sistema, é associada uma transição no modelo de Rede de Petri. A ocorrência de um evento no sistema (que faz com que este passe do estado atual ao próximo estado) é representado, no modelo, pelo disparo da transição ao qual este está associado.

O disparo de uma transição consiste em dois passos:

1. retirar as marcas dos lugares de entrada, indicando que esta condição não é mais verdadeira após a ocorrência do evento;
2. depositar marcas em cada lugar de saída, indicando que estas atividades estarão, após a ocorrência do evento, sendo executadas.

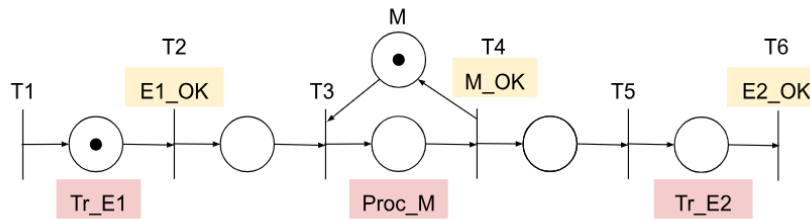
Na prática, a metodologia PFS/RdP consiste na transformação de cada elemento correspondente a uma atividade no PFS em um lugar, cercado por duas transições, e com um arco saindo de uma das transições para o lugar e outro arco saindo do lugar para a outra transição. É como se os colchetes do PFS tivessem se tornado em transições. A Figura 3 é a RdP obtida a partir do PFS da Figura 2. O fluxo de dados com o ambiente externo também foram representadas, com os retângulos amarelos indicando entradas e os retângulos vermelhos indicando saídas. No sistema físico, as entradas acontecem por meio de dispositivos de comando ou de detecção, enquanto as saídas acontecem por meio de dispositivos de atuação e de monitoração. Para o exemplo considerado:

- Entradas (amarelo):
  - E1\_OK: esteira E1 concluiu o transporte da peça até a máquina M;
  - M\_OK: máquina M terminou a operação sobre a peça;
  - E2\_OK: esteira E2 concluiu o transporte da peça para fora do sistema de controle considerado.
- Saídas (vermelho):
  - Tr\_E1: esteira E1 está transportando a peça até a máquina M;
  - Proc\_M: máquina M está realizando uma operação sobre a peça;
  - Tr\_E2: esteira E2 está transportando a peça para fora do sistema de controle.

Na Figura 3, uma marca foi inserida como exemplo no lugar que corresponde à entrada da peça transportada pela esteira 1, Tr\_E1. Nota-se também a adição de um lugar denominado M, que indica a disponibilidade da máquina, um recurso, para realizar a operação: se ela possui uma marca,

a máquina está disponível; caso contrário, não está disponível.

Figura 3 - RdP criado a partir do PFS da Figura 2



O roteiro a ser seguido para a obtenção da RdP completa como a da Figura 3 é o seguinte:

1. Representação dos processos em PFS;
2. Detalhamento dos processos em atividades (funções) do PFS;
3. Detalhamento das atividades introduzindo elementos RdP (operações);
4. Introdução dos elementos de controle de recursos para compartilhamento e geração de componentes conservativos;
5. Representação do fluxo de dados com o ambiente externo.

#### 2.4 Norma IEC 61131-3 para programação

De acordo com Franchi & Camargo (2008), a IEC (International Electrotechnical Commission) define CLP (Controlador Lógico Programável) como: “Sistema eletrônico operando digitalmente, projetado para uso em um ambiente industrial, que usa uma memória programável para a armazenagem interna de instruções orientadas para o usuário para implementar funções específicas, tais como lógica, sequencial, temporização, contagem aritmética, para controlar, através de entradas e saídas digitais ou analógicas, vários tipos de máquinas ou processos. O controlador programável e seus periféricos associados são projetados para serem facilmente integráveis em um sistema de controle industrial e facilmente usados em todas suas funções previstas.”

Justificativas para uso de CLP nas indústrias:

- alta confiabilidade devido ao uso de componentes de estado sólido;
- alta flexibilidade/programabilidade;
- CPU de alto desempenho;
- contadores e temporizadores via software;
- alta expansibilidade devido à arquitetura modular;
- possibilidade de instalar estações remotas de I/O;
- implementabilidade de recursos de diagnóstico.

A norma IEC61131 nasce com o objetivo de propor um padrão para desenvolvimento de sistemas de controle que resultem em: menor custo de desenvolvimento, maior rapidez de programação, redução de erros de programação com recursos de teste off-line, maior facilidade de programação e melhor documentação.

Com a aplicação da norma IEC61131-3, as tarefas definidas no CLP podem ser estruturadas em blocos funcionais e distanciar da linguagem de máquina. A norma permite a declaração de variáveis globais e de variáveis locais. As variáveis globais são aquelas que podem ser acessadas em todo o programa, enquanto as variáveis locais são declaradas e usadas apenas em partes específicas do programa. Seguindo essa norma, o ambiente de programação é dividido em duas partes:

1. Declaração das variáveis e endereçamentos;
2. Ambiente de programação em si.

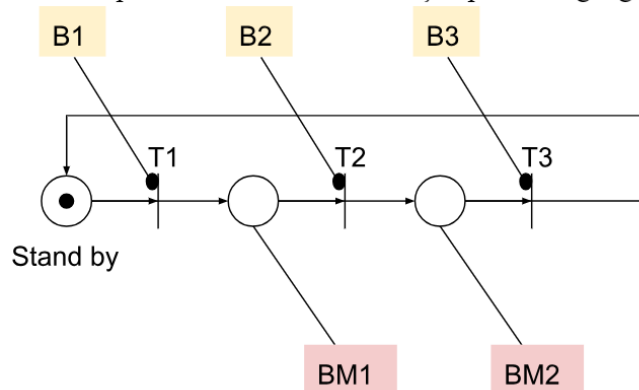
As linguagens que podem estar envolvidas no desenvolvimento da programação do sistema de controle são: álgebra de Boole, IL (Instruction List), ST (Structured Text), LD (Ladder, também conhecido como diagrama de relés), FBD (Function Block Diagram), Fluxograma, SFC (Sequential

Function Chart) e MFG (Mark Flow Graph).

## 2.5 Norma IEC 61131-3 para programação

Neste documento, será apresentado como é feita a conversão sistemática da RdP para a linguagem LD (Ladder), uma linguagem que pode ser usada na programação de CLPs. A conversão será demonstrada por meio de um exemplo simples, partindo da RdP mostrada na Figura 4.

Figura 4 - RdP para demonstrar a transcrição para a linguagem LD

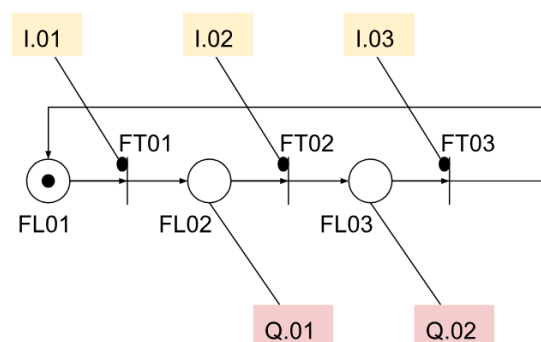


Para transcrever a RdP para a linguagem LD, é necessário definir as variáveis que serão utilizadas na programação:

- Atribuir variáveis internas para as transições;
- Atribuir variáveis internas para os lugares;
- Associar os eventos internos às variáveis de saída de monitoração e atuação;
- Associar os eventos externos às variáveis de entrada de comando e sensoriamento.

Com estas etapas realizadas, obtêm-se uma RdP com variáveis definidas como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - RdP com variáveis definidas



Na linguagem LD, os elementos estão incorporados em linhas horizontais chamadas de rungs. A linguagem LD usa três elementos básicos para o controle de sistemas, que estão associados a variáveis internas virtuais ou físicas. São eles:

- Entradas ou contatos (relés): fazem a leitura do valor de uma variável booleana. Podem ser NA (normalmente aberto, representados pelo símbolo -II-), que fica fechado quando a variável associada é verdadeira, e fica aberta caso contrário; ou NF (normalmente fechada, representada pelo símbolo -I/I-), que fica aberto quando a variável associada é verdadeira, e

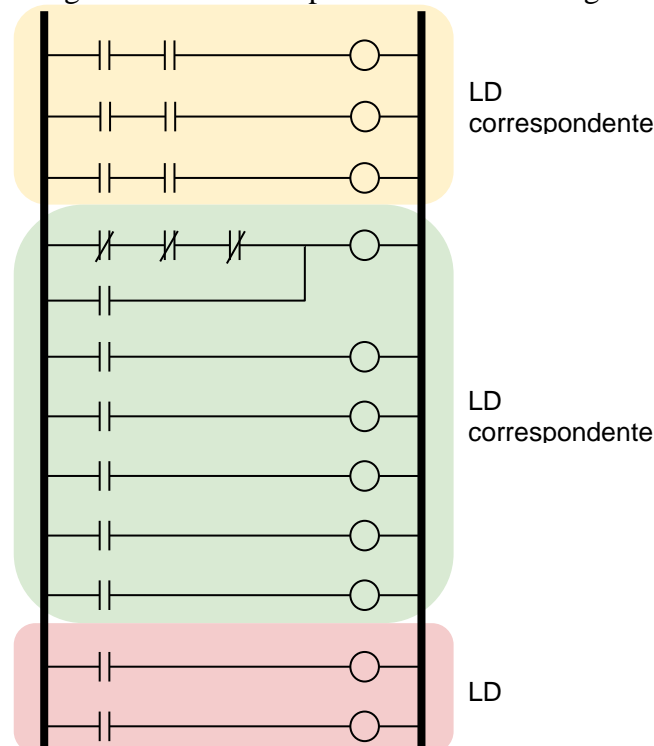
- fica fechado, caso contrário;
- Saídas ou bobinas: escrevem o valor de uma variável booleana ou ativam uma memória. Podem ser simples ou set (S) ou reset (R) e são representadas pelo símbolo -O-;
- Blocos funcionais: possibilitam funções avançadas, como contadores e temporizadores.

Nos diagramas Ladder, os elementos de entrada se combinam para gerar um resultado lógico booleano que, por sua vez, é designado a uma saída. O processo flui da parte esquerda do diagrama para a direita, ligando uma bobina, cujo valor passa a ser verdadeiro.

Portanto, com as variáveis definidas da Figura 5, é possível gerar o LD correspondente. A geração da LD pode ser dividida em 3 grandes etapas pela aplicação do isomorfismo:

1. LD correspondente a habilitação de cada uma das transições (parte amarela da Figura 6):
  - a. Um rung para cada transição;
  - b. Em cada rung uma operação AND entre as pré-condições da transição e as condições de restrição adicionais.
2. LD correspondente a mudança de estado local dos lugares (parte verde da Figura 6):
  - a. Inicialmente deve ser setada a marcação inicial. A condição é de que nenhum lugar deve estar marcado;
  - b. Aplicar comandos de set/reset para atualizar a marcação de cada lugar.
3. LD correspondente aos eventos externos (parte vermelha da Figura 6):
  - a. Corresponde a ativação das saídas.
  - b. Devem ser utilizadas bobinas normais sem memória, uma vez que os estados locais se mantêm setados até que haja alguma transição de estado.

Figura 6 - LD correspondente à RdP da Figura 4



## 2.6 Norma IEC 61131-3 para programação

O roteiro a ser seguido para implementar o projeto de automação de um sistema de produção é:

1. Definição da arquitetura física e documentação do modelo estrutural da arquitetura;



2. Definição dos intertravamentos sistêmicos e modelagem do comportamento do sistema utilizando a metodologia PFS/RdP;
3. Comissionamento do modelo de controle obtido usando software de simulação como o PIPE 4.;
4. Aplicação de isomorfismo para programação do CLP;
5. Comissionamento das I/Os, verificando a conexão de todas as entradas e saídas físicas com o CLP e instalando o programa de controle no CLP para realizar os testes de funcionalidade e de desempenho do sistema.

### 3 Aplicação de Automação Mecatrônica

#### 3.1 Descrição do sistema

O sistema estudado engloba as principais etapas da automatização da fabricação de tanques de hidrogênio. Para o presente trabalho, apenas a manufatura do corpo do tanque foi detalhada, assumindo que componentes como válvulas ou dispositivos de proteção já estivessem prontos para serem adicionados ao conjunto durante a montagem. Utilizando os tanques de hidrogênio projetados para os carros Toyota Mirai como referência, é possível descrever o processo de fabricação destes em seis etapas principais.

A primeira etapa (Moldagem) consiste na obtenção da estrutura de revestimento, responsável por impedir possíveis vazamentos de gás pelas paredes cilíndricas. Para isso, plástico é injetado em moldes com o formato da respectiva metade do tanque que representam. Neste caso, considerou-se que o componente não é simétrico, visto que a válvula para abastecimento do tanque está localizada em apenas uma das extremidades. Uma vez que as duas metades do revestimento são produzidas, avança-se para a próxima etapa (União).

Esta é responsável por unir as duas metades do revestimento em um corpo único e contínuo. Dessa maneira, as peças são posicionadas uma contra a outra e são submetidas a raios infravermelhos na região da união, permitindo a formação de uma junta.

Com o revestimento finalizado, filamentos de fibra de carbono (CFRP) e fibra de vidro (GFRP) são enrolados sobre a estrutura durante a terceira etapa (Enrolamento de Filamento). Forma-se, assim, uma camada de compósito responsável por adicionar resistência mecânica e térmica ao tanque. Para obter bons resultados geométricos em regiões curvas do revestimento, os filamentos devem ser angulados de maneiras diferentes ao longo do processo de enrolamento.

A quarta etapa (Cura), por sua vez, caracteriza-se pela exposição da peça a ar quente, realizando a cura da camada de compósito adicionada. O controle da temperatura e da cura do material é de extrema importância para garantir as propriedades mecânicas desejadas do componente e maior repetibilidade de fabricação.

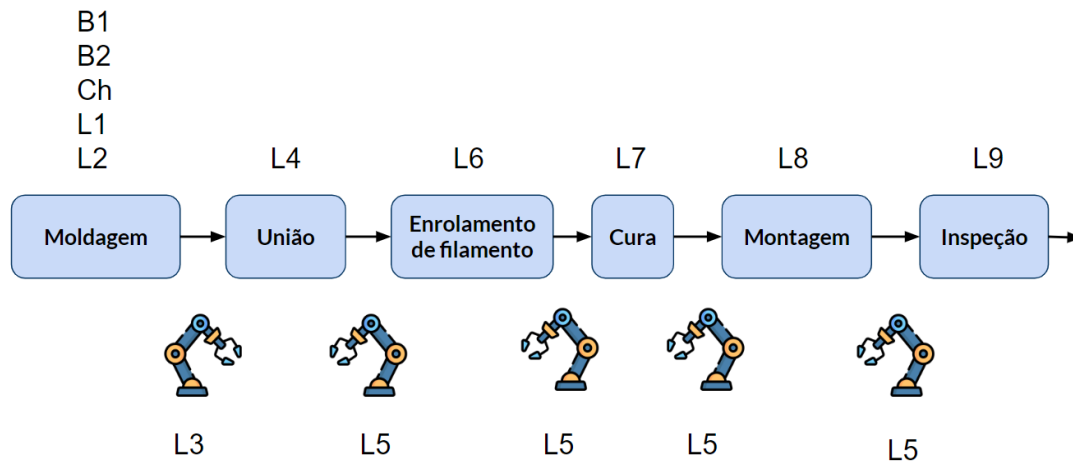
Em seguida, na quinta etapa (Montagem), a estrutura curada é unida a outras partes do tanque de hidrogênio, como válvulas de abastecimento, sensores, dispositivos de segurança e protetores para impactos e chamas.

Por fim, na sexta etapa (Inspeção), o tanque deve ser inspecionado antes de ser enviado para a montagem do carro. Esta etapa é de extrema importância, porque determinará se o componente é seguro ou não para ser utilizado. Dentre os procedimentos realizados, cabe destacar a verificação de estanqueidade e resistência à variação de pressão equivalente ao abastecimento e consumo de hidrogênio ao longo do tempo.

#### 3.2 Modelo estrutural do sistema

Uma vez descrito o sistema, é possível sintetizar o processo de fabricação com o seguinte modelo:

Figura 7 - Modelo estrutural do sistema



Nota-se que dois ícones distintos de robôs foram utilizados para representar os dispositivos que farão o transporte das peças entre as máquinas. O primeiro robô é responsável exclusivamente por retirar as metades do revestimento e levá-las para a etapa de União. O segundo robô é encarregado dos transportes seguintes até o final do processo.

Ademais, alguns dispositivos de comando e monitoração foram definidos. Na figura acima, B1 e B2 representam botões responsáveis pelo acionamento das máquinas de moldagem 1 e 2, respectivamente, enquanto Ch representa a chave geral que energiza e habilita a planta. Em cada etapa de fabricação ou transporte, luzes (L1-L9) são acionadas sempre que uma atividade está sendo executada, sinalizando a ocupação das máquinas.

### 3.3 Modelo comportamental e validação

Partindo do modelo estrutural do sistema e dos dispositivos de comando e monitoração, definiram-se os intertravamentos de partida, de funcionamento e de processo.

Para os intertravamentos de partida, a chave geral Ch e os botões de acionamento das máquinas B1 e B2 foram utilizados. Como nenhuma das outras etapas pode ser disparada sem que a Moldagem seja finalizada, esses dispositivos são suficientes para realizar o intertravamento.

Para os intertravamentos de funcionamento, dois alarmes foram inseridos na planta. O primeiro, AL, é disparado quando há uma falha ou um mau funcionamento de alguma máquina, interrompendo o processo de fabricação dos tanques. O segundo, ALE, é disparado quando detecta-se uma queda de energia, evitando que as atividades sejam posteriormente retomadas incorretamente.

Para os intertravamentos de processo, os dispositivos de monitoração (L1-L9) foram utilizados junto com novas saídas do sistema. Os sinais Mol1\_Ok e Mol2\_Ok foram definidos para indicar que os processos de moldagem foram finalizados em cada máquina. As duas metades são, então, transportadas para a etapa seguinte apenas com a confirmação da disponibilidade da máquina para realizar a união, U1\_livre, e, uma vez que o transporte é terminado, obtém-se a resposta R1\_U1\_Ok. De maneira análoga, o término das operações de união, enrolamento, cura, montagem e inspeção são determinados pelas respostas U\_Ok, E\_Ok, C\_Ok, Mon\_Ok e I\_Ok; e os transportes pelo segundo robô são sinalizados por R2\_E\_Ok, R2\_C\_Ok, R2\_Mon\_Ok e R2\_I\_Ok.

Dessa maneira, é possível construir o seguinte PFS e a Rede de Petri do sistema:

Figura 8 - PFS simplificado do sistema

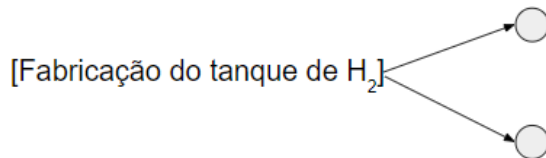


Figura 9 - PFS detalhado do sistema

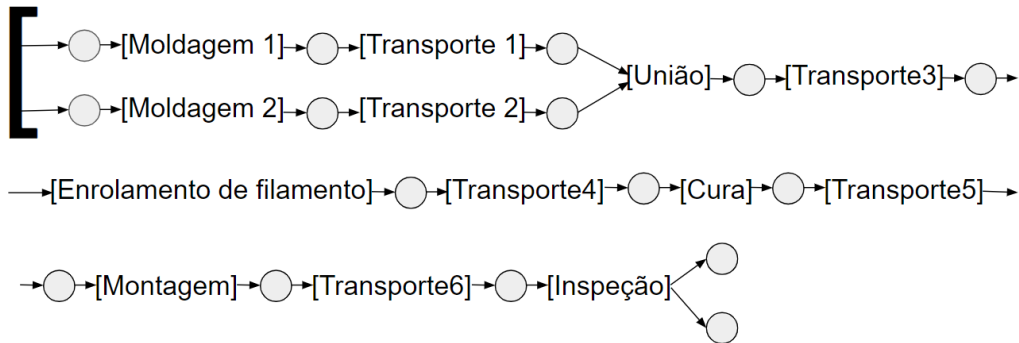


Figura 10 - Rede de Petri do sistema

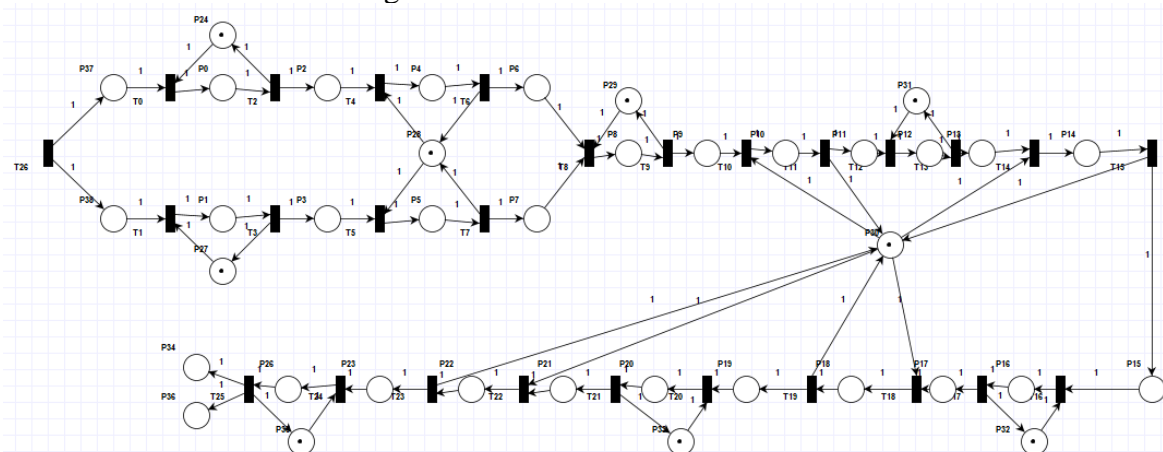
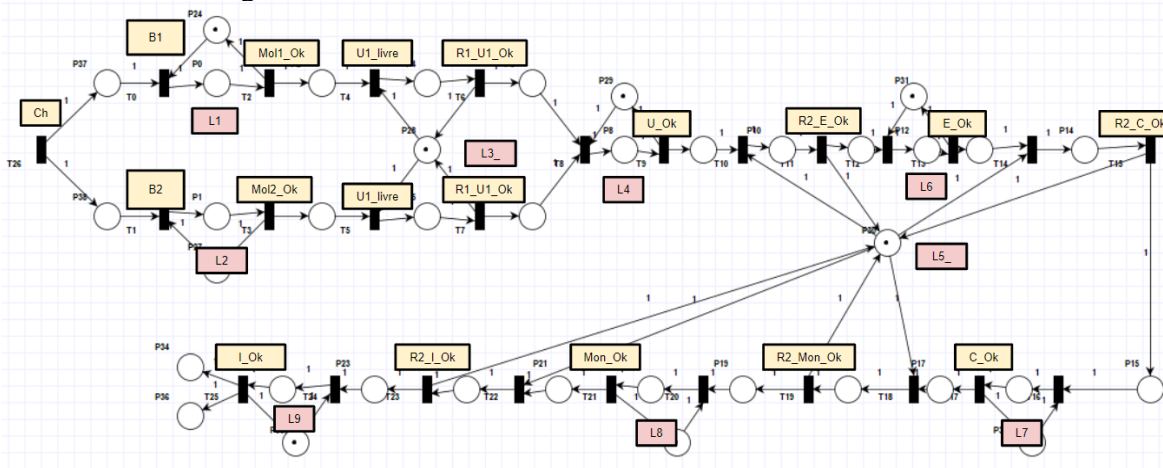
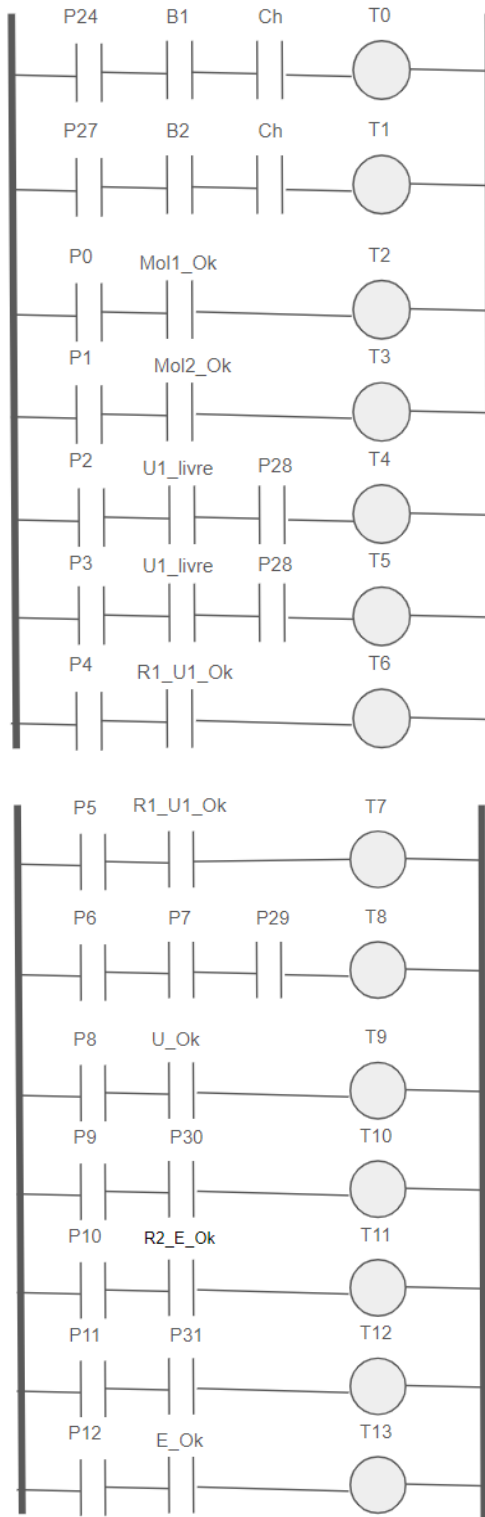


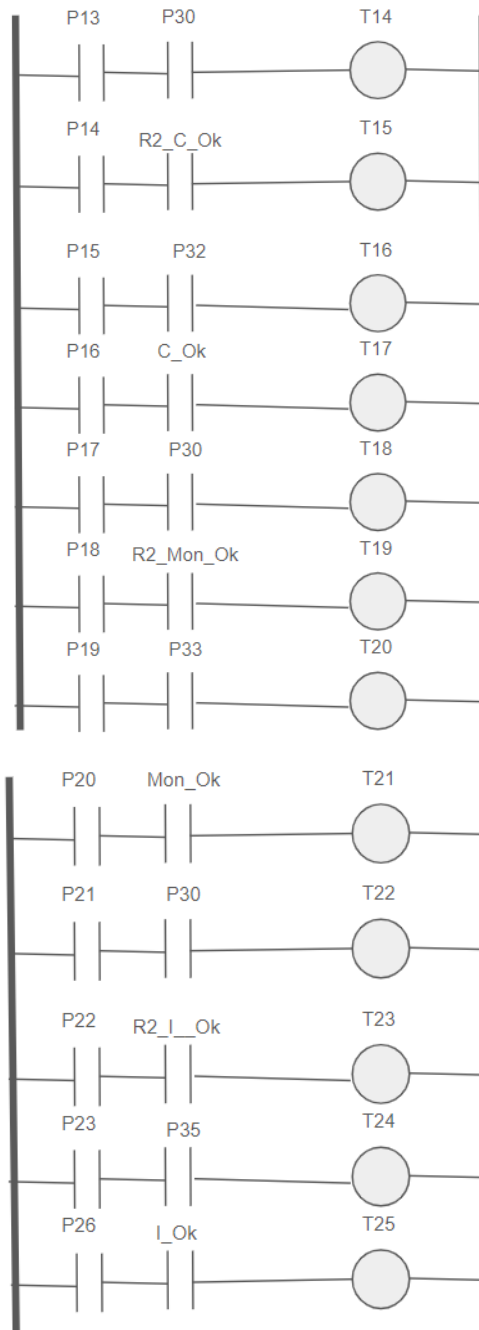
Figura 11 - Rede de Petri do sistema com intertravamentos

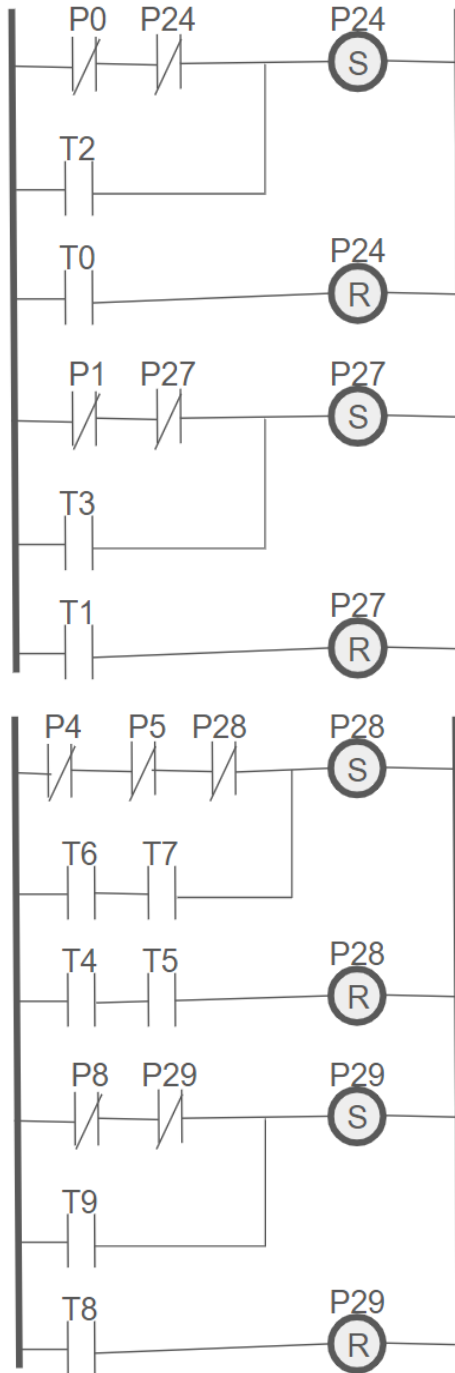


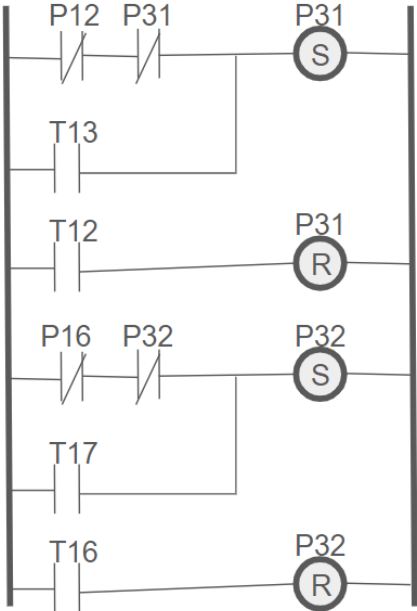
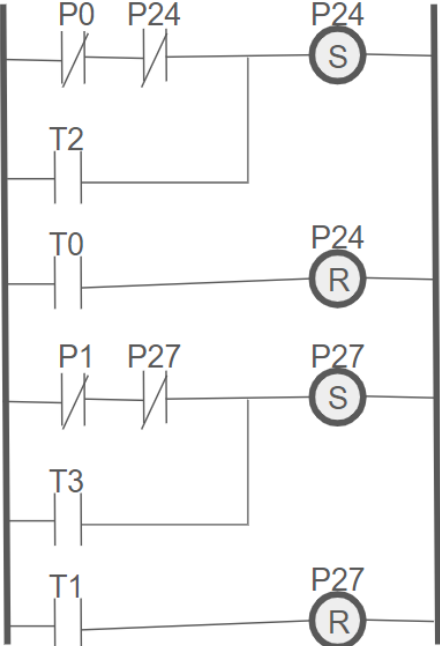
A Rede de Petri foi desenvolvida e validada com auxílio do programa PIPE 4.3. Na Figura 11, é possível observar o resultado final do modelo, descrevendo todo o processo desde a ativação da planta e injeção de material até a separação dos tanques de hidrogênio em aprovados ou não na inspeção.

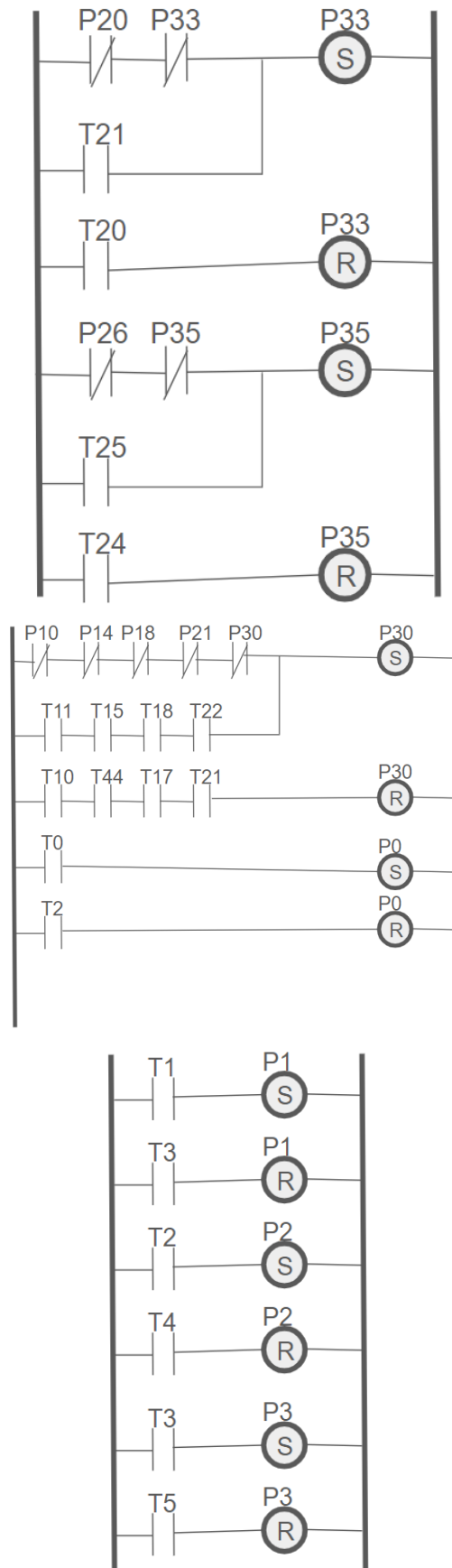
3.4 Modelo do sistema em LD



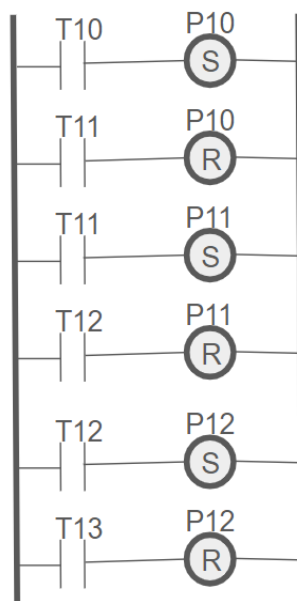
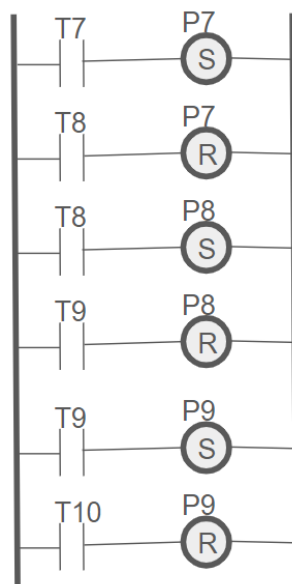
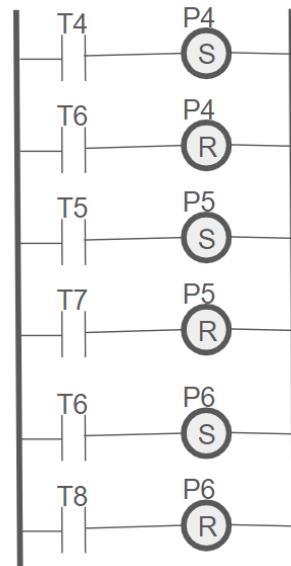


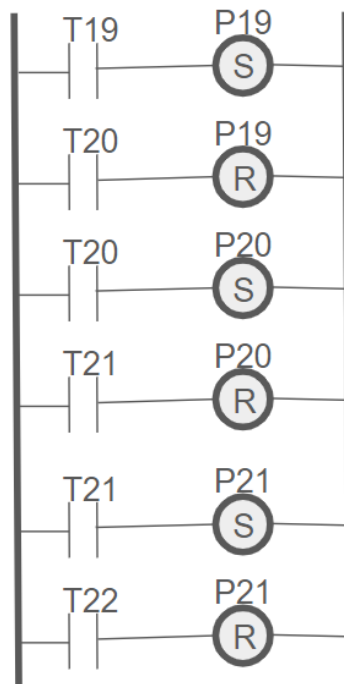
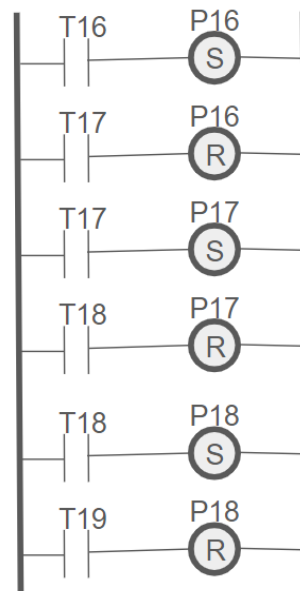
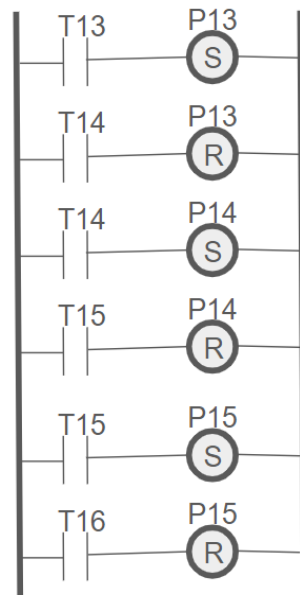


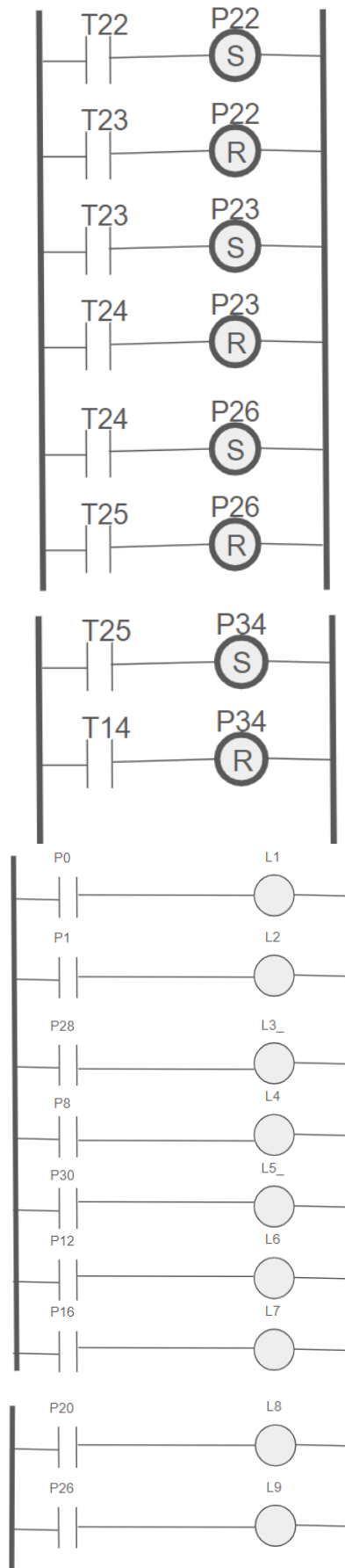












#### 4 Observações Finais

O presente trabalho tem como objetivo modelar a fabricação de tanques de armazenamento de gás para veículos movidos a hidrogênio. A proposta busca expandir o desenvolvimento de meios de transporte mais sustentáveis, reconhecendo que, para isso, as indústrias e montadoras de veículos precisam introduzir novas plantas e maquinários. Descrevendo a fabricação como um sistema a eventos discretos modelado com auxílio da metodologia PFS/Rede de Petri, nota-se que o modelo foi capaz de contemplar as principais etapas para a obtenção de tanques de hidrogênio. Para estudos futuros, recomenda-se a adaptação do modelo para outros métodos de fabricação, a introdução do detalhamento de outros componentes, como válvulas e sensores, e a aplicação do modelo em um caso real para a realização de testes.

#### REFERÊNCIAS

AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS. Guide to Safety of Hydrogen and Hydrogen Systems, 2017.

ARCADIS. Supercharging Net Zero, 2022. Disponível em: [https://www.arcadis.com/en/knowledge-hub/perspectives/global/2021/energy-transition?gclid=CjwKCAiAo4OQBhBBEiwA5KWu\\_02ijmyyz6f3m2oLiY8qflAyuiiOeEw0dTGx6mHGMTvmT19HJwvK\\_RoCIIEQAvD\\_BwE](https://www.arcadis.com/en/knowledge-hub/perspectives/global/2021/energy-transition?gclid=CjwKCAiAo4OQBhBBEiwA5KWu_02ijmyyz6f3m2oLiY8qflAyuiiOeEw0dTGx6mHGMTvmT19HJwvK_RoCIIEQAvD_BwE). Acesso em 7 de fevereiro de 2022.

BEIS. Net Zero Strategy: Build Back Greener, 2021. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/publications/net-zero-strategy>. Acesso em 7 de fevereiro de 2022.

BOSSSEL, U. Well-to-Wheel Studies, Heating Values, and the Energy Conservation Principle. European Fuel Cell Forum, 2003.

BULL, S.R. Renewable energy today and tomorrow. Proceedings of the IEEE, v. 89, pp. 1216-1226, 2021.

CARDOSO, J. & VALETTE, R. Redes de Petri. Editora da UFSC, 1ª edição, pp. 11-28, 1997.

CHENG, Q.; ZHANG, R.; SHI, Z. & LIN, J. Review of Common Hydrogen Storage Tanks and Current Manufacturing Methods for Aluminium Alloy Tank Liners. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2023.

FRANCHI, C.M. & CAMARGO, V.L.A. Controladores Lógicos Programáveis - Sistemas Discretos. Érica. São Paulo, 1ª edição, 2008.

FUEL CELL STORE. Fuel Cell Vehicles - Automobiles, 2019. Disponível em: <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/fuel-cell-vehicles-automobiles>. Acesso em 7 de fevereiro de 2022.

HASSAN, Q.; ALGBURI, S.; SAMEEN, A.Z.; SALMAN, H.M. & JASZCZUR, M. Green hydrogen: A pathway to a sustainable energy future. International Journal of Hydrogen Energy, 2023.

IPCC, Sixth Assessment Report, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport>. Acesso em 6 de fevereiro de 2022.

KALAIR, A.; ABAS, N.; SALEEM, M.S.; KALAIR, A.R. & KHAN, N. Role of energy storage systems in energy transition from fossil fuels to renewables. Energy Storage, v. 3 , pp. 135, 2021.

MIYAGI, P.E. Controle Programável - Fundamentos do Controle de Sistemas a Eventos Discretos. Ed. Edgard Blücher. São Paulo, 1ª edição, pp. 1-34, 1996.

SCHÜTH, F. Challenges in hydrogen storage. The European Physical Journal Special Topics, v. 176, pp. 155-166, 2009.

TOYOTA GOSEI, Technology that supports the spread of FCEVs. Working toward decarbonization with high pressure hydrogen tanks, Disponível em: <https://www.toyoda-gosei.com/seihin/technology/theme/hydrogen/> . Acesso em 04 de dezembro de 2023.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2015 – Main Text, 2017. Disponível em: <https://www.epa.gov/climatechange>. Acesso em 7 de fevereiro de 2022.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. State of Climate in 2021: Extreme events and major impacts. Disponível em <https://public.wmo.int/en/media/press-release/state-of-climate-2021-extreme-events-and-major-impacts>. Acesso em 7 de fevereiro de 2022.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos professores de PMR 3305 - Sistemas a Eventos Discretos (2023) - Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi, Prof. Dr. Diolino José dos Santos Filho e Prof. Dr. Fabrício Junqueira - por terem apresentado e capacitado os seus alunos a modelar os sistemas a eventos discretos. No âmbito deste trabalho, agradecemos especialmente ao Prof. Dr. Diolino José dos Santos Filho por ter acompanhado o desenvolvimento da capacidade de modelagem dos seus alunos quinzenalmente, sempre corrigindo pacientemente os tantos desvios nas modelagens. Também agradecemos a MECATRONE pela oportunidade concedida para apresentar este trabalho.

**Title** – The concept of discrete event system control applied to hydrogen tank manufacturing

**Abstract** – Currently, the emission of greenhouse gases by humanity is a critical factor for global warming, creating the need to develop more sustainable technologies. In terms of transport, hydrogen-powered vehicles stand out, a project that emerged a few decades ago, but has not yet been fully implemented, mainly due to the need for specific tanks to store the gas in the vehicle. Therefore, this work seeks to describe and model the essential stages of the manufacturing process of a hydrogen tank, following as a reference those used in Toyota Mirai cars. Starting from the description through Petri Nets, the main characteristics and requirements of a hydrogen tank manufacturing plant were schematized and then converted to Ladder.

**Keywords** – Automation of hydrogen tank manufacturing; Fuel cell electric vehicle (FCEV); Discrete event system



**Sofia Lopes Suesdek Rocha**, estudante do quarto ano de Engenharia Mecatrônica e bolsista FAPESP de iniciação científica na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Integrante do Projeto Jupiter (projeto de extensão de foguete modelismo da Universidade de São Paulo) desde 2021.



**Soitiro Oura**, estudante do quarto ano de Engenharia Mecatrônica e bolsista PIBITI de iniciação científica na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.