

## E-cycle: sistema seletor de recicláveis

Eduardo Milanez Araujo, Miguel Oliveira Passos Figueiras Marques, Vítor Viana de Paula

**Resumo** – O processo de seleção de materiais recicláveis envolve a identificação e classificação de materiais de acordo com sua característica e sua condução até seus respectivos recipientes. Para automatizar esse processo, pensou-se em um sistema de esteira transportadora que, com a presença de sensores, direciona o resíduo para seu respectivo coletor. A solução permite que esse processo de classificação de materiais presente em campos voltados para a sustentabilidade, como a reciclagem, seja otimizado e também que o trabalho humano envolvido nessa etapa seja dotado de maior inclusão. Como há emprego de mão de obra, trata-se de um sistema que não é totalmente independente. Considerando o sistema completo com todas as sub redes de intertravamentos, tem-se um total de 22 entradas e 11 saídas controladas e o processo será modelado utilizando a metodologia Production Flow Schema (PFS) para obtenção de uma rede de Petri (RdP), apresentada no formato de rede interpretada, associando sinais de entrada às transições e saídas aos lugares. O modelo de controle será validado através da verificação de boas propriedades de RdP utilizando um software como ferramenta e do comportamento da rede em termos dos estados alcançados ao longo de uma simulação. Para programação do controlador será utilizado Ladder, com a lógica do processo dada pela disposição vertical de rungs, obtidos através da conversão da rede de Petri por isomorfismo. Por fim, comparou-se os comportamentos observados na rede de Petri e no Ladder desse sistema para avaliar a coerência do mesmo e os resultados foram alinhados com o esperado.

**Palavras-chave** – Coleta seletiva; Recicláveis; Rede de Petri; Controle Programável; Sistemas a Eventos Discretos

### 1 Introdução

A reciclagem é essencial para enfrentar o desafio global dos resíduos sólidos. No Brasil, apenas 4% das 76 milhões de toneladas de lixo recolhidas anualmente são recicladas, destacando a necessidade de melhorias nos sistemas de gestão de resíduos. Em São Paulo, durante o processo de construção de estações de reciclagem mecanizadas, que aconteceu em 2014, foi exposto pela prefeitura da época que cada uma das centrais produzia mais do que as atuais 20 não mecanizadas produziram juntas, evidenciando o potencial da mecanização para impulsionar a eficiência da reciclagem (ABLP, 2014).

É crucial ressaltar que a mecanização não visa substituir os catadores, mas garantir melhores condições de trabalho. Além de aumentar a eficiência, a mecanização pode elevar a renda dos catadores, promovendo inclusão no processo e gerando novos postos de trabalho. Assim, a modernização dos métodos de reciclagem não só contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também impulsiona o desenvolvimento social ao criar oportunidades econômicas para comunidades

envolvidas no processo. Por fim, para o sucesso dessa evolução, é necessário uma abordagem integrada, incluindo investimentos em infraestrutura, educação ambiental e políticas públicas.

Tendo isso em vista, para mecanizar esse processo, pensou-se em um sistema de esteira transportadora que, com a presença de sensores, direciona o resíduo para seu respectivo coletor. O ciclo operacional da esteira transportadora de resíduos se inicia com o depósito do lixo como um buffer de entrada. Em seguida, a esteira alimentadora transporta separadamente unidades de material para a esteira seletora. Na esteira seletora, o material avança até atingir uma seção de análise, onde é temporariamente retido por uma barreira.

Nessa fase crítica, sensores especializados, como o sensor indutivo para metais, o sensor óptico infravermelho para vidro e o sensor fotoelétrico para papel, entram em operação. Esses sensores realizam uma análise detalhada do tipo de material presente e os desviadores designados encaminham o material para o container adequado. Por fim, o depósito final na coleta seletiva, representado encerra o ciclo, contribuindo para a eficiência na gestão de resíduos e a promoção da sustentabilidade ambiental. Dado que as ações executadas pelo sistema são decorrentes da ocorrência de eventos, trata-se de um Sistema a Eventos Discretos (SED).

O corpo do presente documento é composto pela discussão acerca de conceitos fundamentais na compreensão do funcionamento e modelagem do sistema, pela descrição de metodologias utilizadas para projeto e pela apresentação dos resultados obtidos.

## 2 Materiais e métodos

Primeiramente, é válido ressaltar que o sistema que se busca modelar é classificado como um Sistema a Eventos Discretos (SED), uma vez que os processos são resultados da ocorrência de eventos, ou seja, caso uma condição seja satisfeita, uma ação é desencadeada. Nesse sentido, enquanto que nos sistemas de variáveis contínuas é aplicada a teoria de Controle Moderno com base na comparação entre uma variável com um valor de referência, em um SED é aplicado o Controle Programável, no qual um programa define a lógica sequencial dos processos (MIYAGI, 1996).

Em termos de estrutura do sistema de controle em SED, o dispositivo de controle é composto pelo controlador programável juntamente com suas entradas e saídas, as quais são responsáveis por estabelecer uma comunicação com o operador e com o objeto de controle. Dessa maneira, o controlador recebe sinais de comando e envia sinais para monitoração do processo através do módulo de I/Os correspondente ao painel de controle. Já em relação à planta, são recebidos os sinais coletados pelos sensores e outros dispositivos de detecção e são enviados sinais para os atuadores. Vale lembrar que o sistema de controle corresponde à união entre dispositivo e objeto de controle.

Por sua vez, o comportamento do sistema é obtido através do estudo da rede de Petri (RdP), fundamental para se obter uma melhor visualização dos estados possíveis e das ações realizadas, através da análise das propriedades comportamentais a partir das distribuição de marcas na rede.

No contexto das propriedades que caracterizam o comportamento de uma RdP, tem-se que a alcançabilidade está relacionada com o alcance da rede de Petri em termos de estados possíveis; a limitabilidade é associada ao número máximo de marcas em um lugar, ou de modo equivalente, há um limite de recursos utilizados; a vivacidade é definida pela presença ou ausência de deadlocks, isto é, condições de travamento do sistema e a reversibilidade está ligada ao caráter cíclico do processo, descrevendo a possibilidade de se retornar para um estado desejado ou inicial (FATTORI et al., 2020).

Diante da importância dessa técnica na área de SED, PFS/RdP é uma metodologia para modelagem de sistemas, sendo uma sistematização rigorosa do processo de obtenção da rede de Petri. Uma observação válida é que no PFS é esquematizado o fluxo do processo, de forma que não existem, por exemplo, as marcas da rede de Petri. A metodologia é descrita por 5 passos básicos, de forma que nos 2 primeiros são utilizados elementos do PFS (atividade, distribuidor e arco) e nos demais, é feita a conversão da rede para RdP.

Nessa lógica, os passos a serem seguidos na metodologia são a representação dos processos e o detalhamento dos processos em atividades no PFS, seguidos pelo detalhamento das atividades com a introdução de elementos de rede de Petri, introdução de elementos para compartilhamento de recursos e representação da rede em sua forma interpretada, associando sinais de entrada a transições e sinais de saída a lugares da RdP.

Ademais, aplica-se também o conceito de intertravamento à rede no sentido de restringir o comportamento do sistema de acordo com as especificações do projeto. Dessa maneira, o intertravamento de processos é intrínseco à RdP obtida, o de partida está associado ao processo de setup do sistema e o de funcionamento está associado à garantia de boas condições de uso, levando o sistema para um estado seguro em condições adversas.

Finalmente, a rede deve ser validada de modo a garantir boas propriedades de RdP, eliminando eventuais deadlocks, e assegurar sua fidedignidade ao sistema real. Essa etapa é realizada por meio do uso de ferramentas, a exemplo do software PIPE.

Conforme descrito anteriormente, no controle de um SED é utilizada a programação de controladores, a qual deve seguir a padronização segundo a norma internacional IEC 6113. A norma estabelece padrões para as diferentes linguagens, além da divisão do ambiente de programação nas partes de declaração de variáveis e endereçamentos e de lógica. Associam-se ainda variáveis globais à comunicação entre controladores e variáveis locais às entradas e saídas físicas (FILHO, 2023).

Respeitando essa norma, é possível obter a partir da rede de Petri a programação de CPs em Diagrama de Relés, em SFC e em Ladder, aplicando sistemáticas para conversão entre modelos. No caso do Ladder, a transcrição da RdP para linguagem de programação pode ser feita aplicando isomorfismo, uma maneira sistemática de conversão que é possível no sentido RdP para LD.

De maneira breve, essa transcrição tem como base os passos: atribuição de variáveis internas para transições e lugares; associação de eventos internos e externos a variáveis; LD para habilitação de transições; LD para mudança de estado local dos lugares e LD para eventos externos. Como os rungs são executados em ordem vertical de cima para baixo, é necessário que a ordem seguida dos passos seja a ordem apresentada. Além disso, mais detalhes serão discutidos na próxima seção.

Diante do exposto, o desenvolvimento do presente trabalho é resultado da aplicação de uma Metodologia de Projeto de Sistemas de Controle de SED, a qual reúne diversos dos aspectos discutidos, a saber: o modelo estrutural, a aplicação da metodologia PFS/RdP, a validação da rede obtida, a conversão para LD através do isomorfismo e o comissionamento das I/Os. Então, a seção seguinte se destina a apresentar a definição do sistema a ser modelado e os passos dessa metodologia.

### 3 Aplicação de automação mecatrônica

A reciclagem é essencial para enfrentar o desafio global dos resíduos sólidos. No Brasil, apenas 4% das 76 milhões de toneladas de lixo recolhidas anualmente são recicladas, destacando a necessidade de melhorias nos sistemas de gestão de resíduos. Em São Paulo, durante o processo de construção de estações de reciclagem mecanizadas, que aconteceu em 2014, foi exposto pela prefeitura da época que cada uma das centrais produzia mais do que as atuais 20 não mecanizadas produziram juntas, evidenciando o potencial da mecanização para impulsionar a eficiência da reciclagem.

É crucial ressaltar que a mecanização não visa substituir os catadores, mas garantir melhores condições de trabalho. Além de aumentar a eficiência, a mecanização pode elevar a renda dos catadores, promovendo inclusão no processo e gerando novos postos de trabalho. Assim, a modernização dos métodos de reciclagem não só contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também impulsiona o desenvolvimento social ao criar oportunidades econômicas para comunidades envolvidas no processo. Por fim, para o sucesso dessa evolução, é necessário uma abordagem integrada, incluindo investimentos em infraestrutura, educação ambiental e políticas públicas.

### 3.1 Descrição do sistema

No sentido de fomentar o processo de reciclagem, é necessária uma mudança comportamental dos indivíduos da sociedade brasileira. Nesse patamar, destaca-se a coleta seletiva como uma estratégia de gestão de resíduos no sentido de viabilizar a reciclagem dos materiais.

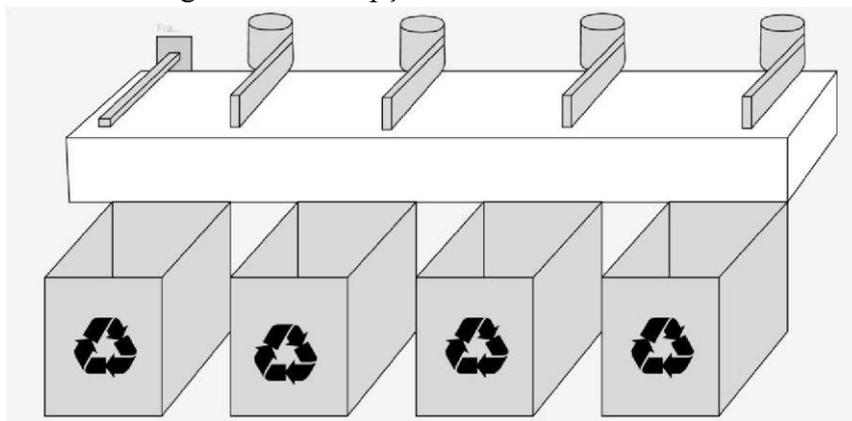
Então, a proposta é um sistema capaz de direcionar os itens para o contêiner do material correspondente, separando-os de acordo com sua composição. Ademais, não seria totalmente uma linha totalmente autônoma, podendo oferecer empregos para parcela da população cuja renda é derivada da coleta de lixo para funções como operador.

O sistema em questão é composto por um buffer com todo o material coletado, o qual seria posicionado em unidades espaçadas na esteira alimentadora por um operador. O espaçamento deve respeitar a necessidade de alimentar a esteira transportadora (principal) com um material por vez.

Na esteira principal, o item será movido até o atuador de parada, o qual funciona como uma espécie de barreira, de forma que os sensores podem detectar a natureza do material. Para tanto, são utilizados quatro sensores: o indutivo detecta a presença de metais, o infravermelho de vidro, o capacitivo de plástico e o fotoelétrico de papel.

Com a verificação do material haverá acionamento do desviador correspondente, para assegurar que haverá depósito no contêiner adequado, e liberação da passagem pelo atuador de parada. Caso nenhum material seja detectado, não haverá direcionamento, de modo que o item será depositado no contêiner de lixo orgânico ao fim da esteira.

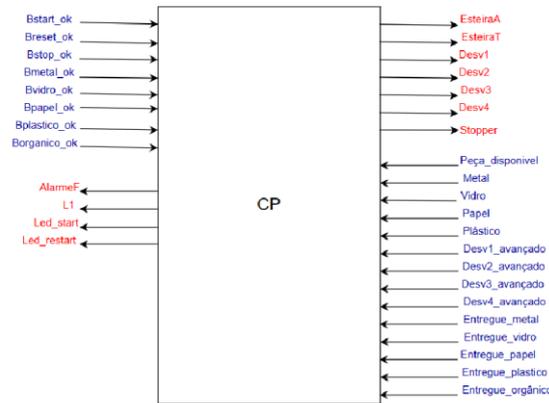
Figura 1 - Concepção da esteira desviadora.



### 3.2 Modelo estrutural

Ao todo são 22 entradas e 11 saídas, de forma que é necessário um módulo de 8 DI/DO para o painel de controle e outro 8 DI/DO para a planta com um módulo de extensão para aumento do número de I/Os. Na Figura 2, as entradas são apresentadas em azul e as saídas em vermelho e do lado direito estão os sinais de comunicação com a planta e do lado esquerdo com o painel de controle.

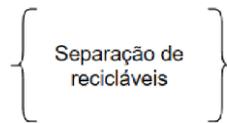
Figura 2 - Modelo estrutural



### 3.3 Aplicação da metodologia PFS/RdP

O processo principal é a separação de materiais recicláveis, de forma que o primeiro passo da metodologia conforme descrito na seção 2 é apresentado na Figura 3.

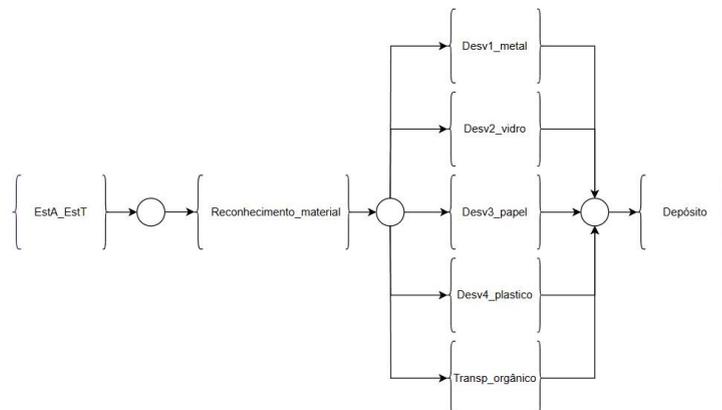
Figura 3 - Representação dos processos em atividades do PFS



A primeira atividade no fluxo do processo é a alimentação da esteira transportadora com um único item [EstA\_EstT]. Em seguida, é efetuado o reconhecimento do tipo de material em [Reconhecimento\_material].

Há as possibilidades de direcionamento do item para um contêiner ou transporte até o fim da esteira, correspondendo às seguintes atividades: [Desv1\_metal], [Desv2\_vidro], [Desv3\_papel], [Desv4\_plástico] e [Transp\_organico]. Finalmente, é realizado o depósito do material em [Depósito]. Como há opções de destino diferentes e apenas uma é selecionada de cada vez, o fluxo de atividades é caracterizado por um conflito, presente na Figura 4.

Figura 4 - Detalhamento dos processos em atividades do PFS

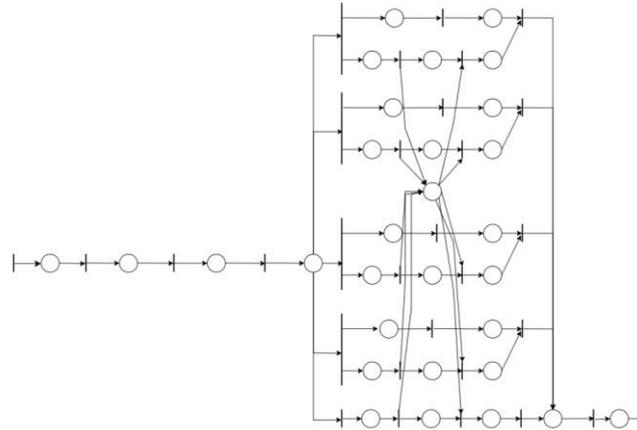


Para o detalhamento das atividades, foram introduzidos elementos de rede de Petri, de forma que os elementos distribuidores e atividades foram convertidos em lugares e as chaves delimitadoras

das atividades em transições. Devido à complexidade da atividade de depósito, o seu detalhamento será realizado posteriormente.

Na Figura 5, é possível notar que as atividades de desvio são descritas por ramos em paralelo, considerando a lógica de o acionamento do desviador preceder o recuo do atuador de parada (o qual está associado a transições em todas as atividades).

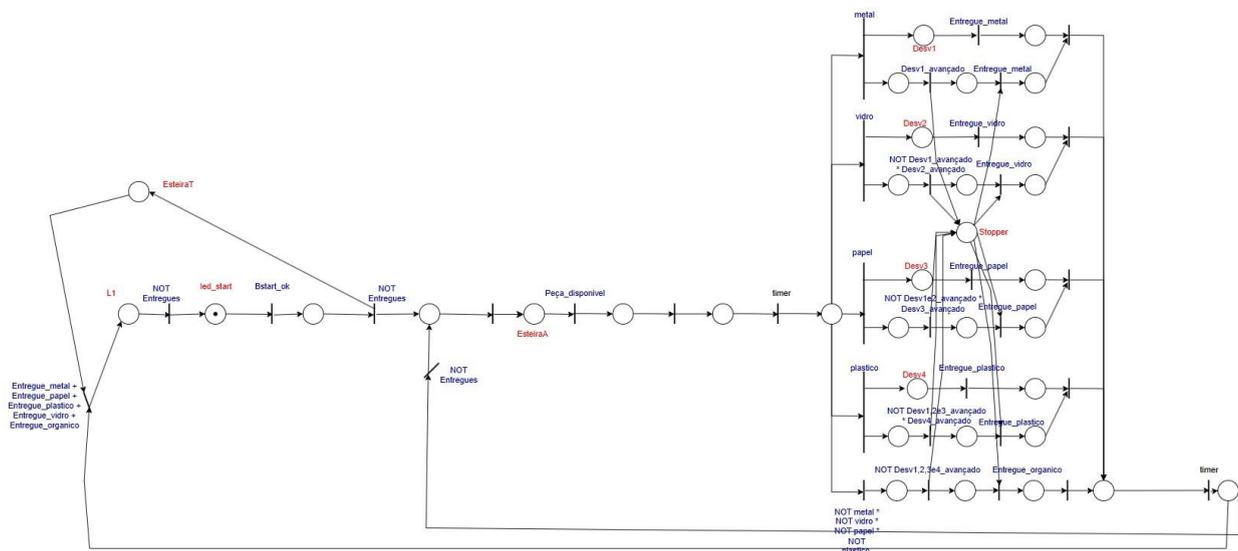
Figura 5 - Detalhamento das atividades introduzindo elementos RdP



Como não foram utilizados na cadeia do processo braços robóticos ou máquinas, não foi introduzido nenhum compartilhamento de recursos na RdP, já que se trata apenas de atuadores.

No último passo do PFS, listou-se as entradas e saídas, associando aos componentes da rede de Petri, como citado na seção 2. Vale ressaltar que os sinais de botão de stop, botão de reset e led de reset não foram incluídos na rede dado que não foi implementada a rede de partida e apenas um intertravamento de funcionamento foi adicionado à RdP. As entradas estão presentes em azul e as saídas em vermelho na Figura 6.

Figura 6 - Fluxo de dados com o ambiente externo



De acordo com a Figura 6, a esteira transportadora permanece ligada após inicialização enquanto nenhum contêiner estiver cheio, situação em que o processo é parado e um operador deve manualmente esvaziar os depósitos para retornar a operação (intertravamento de processo). Além disso, no estado inicial há indicação com o led para que o operador aperte o botão de start no painel de controle.

Outro ponto importante é que a esteira alimentadora só ficará ligada enquanto a esteira transportadora estiver esperando a chegada de um item. Ao detectar um novo material, este é levado

para o atuador parada e é acionado um temporizador cujo tempo deve ser superior ao maior tempo de resposta entre os sensores de identificação do tipo de material. Com isso, com o sinal de reconhecimento, o fluxo segue o ramo correspondente do processo.

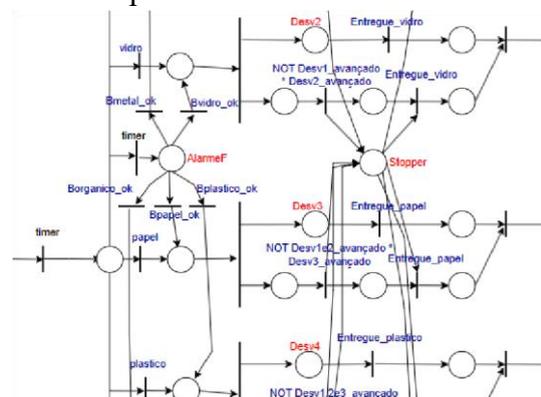
A atividade de depósito foi apresentada com maiores detalhes de modo a tornar o processo cíclico. É possível perceber que após a chegada de um item ser detectada por um dos sensores na entrada dos contêineres, um temporizador é acionado para em seguida haver a verificação do depósito cheio ou não, obtendo novamente o sinal do sensor. Caso o sensor para de detectar o material, nenhum dos recipientes está cheio e o processo pode seguir em seu funcionamento principal.

Dessa maneira, a etapa de intertravamento de processos é concluída. Em termos de intertravamento de partida, tem-se uma rede à parte com o botão de reset para levar ao estado seguro e ao lugar cuja saída é o led\_start indicado na rede anterior. Assim, garante-se que todos os atuadores do sistema encontram-se na posição zero no início do processo. Além disso, para início do processo deve-se assegurar a disponibilidade de materiais para todo o tempo estabelecido de operação.

Já em intertravamentos de funcionamento, tem-se que se a esteira transportadora apresentar uma falha, a esteira alimentadora deve parar; em situações em que o material transportado não caiu no recipiente após direcionamento pelo desviador e caso um desviador trave na posição de recuo, as esteiras param. Uma situação de anomalia seria o caso em que mais de um sensor detecta o tipo de material: um exemplo seria o caso de uma garrafa contendo algum rótulo que não foi previamente retirado.

Os intertravamentos de partida e funcionamento devem ser implementados juntamente à rede de Petri com os de processo. Nesse sentido, optou-se por exemplificar com a introdução do intertravamento de funcionamento para o caso de reconhecimento de mais de um tipo de material, presente na Figura 7.

Figura 7 - Exemplo de intertravamento de funcionamento

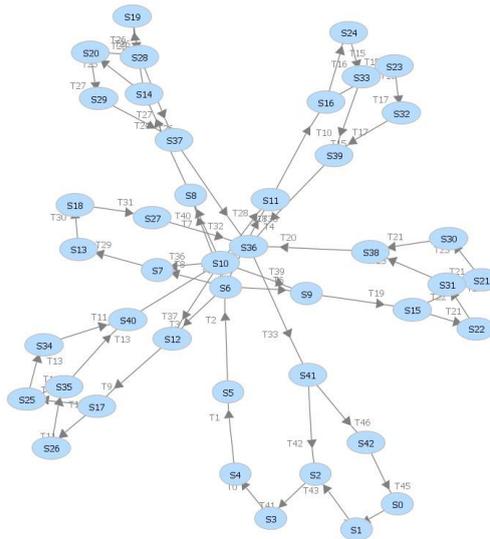


Após o fim da contagem de tempo com o item bloqueado pelo stopper, caso mais de uma entrada relativa ao material esteja ativa, é disparado um alarme para que o operador decida no painel de controle qual o destino adequado. Com a decisão tomada, o mesmo aperta o botão correspondente ao direcionamento para um dos depósitos e o processo retorna ao funcionamento normal.

### 3.4 Validação do modelo

Para validar a rede de Petri obtida, foi utilizado como ferramenta o software PIPE para modelar a rede e realizar simulações. Com a marcação inicial presente na Figura 6, observou-se o comportamento da rede de acordo com o esperado no modo de animação, ativando transições aleatoriamente. Além disso, através da árvore de alcançabilidade da Figura 8 foi possível notar que a rede não apresenta nenhum deadlock e, portanto, ela é viva. A rede também é reversível, 1-limitada e segura.

Figura 8 - Árvore de alcançabilidade

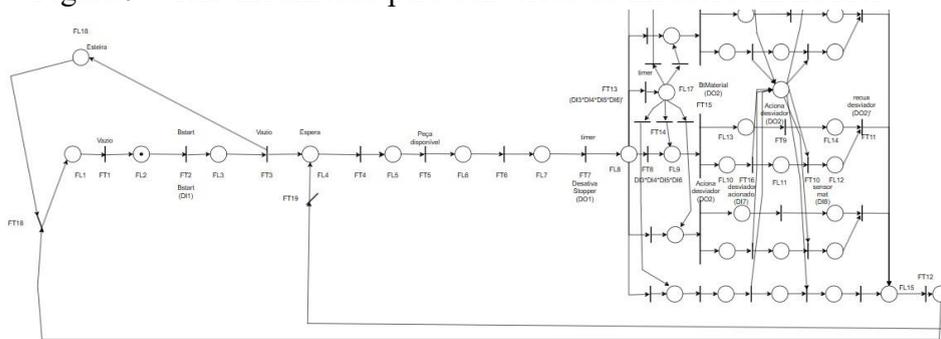


3.5 Aplicação do método para programação do controlador

Para realizar a tradução da rede de Petri para a programação do controlador, será feito o uso da linguagem de Ladder a partir de metodologia pré-determinada.

O primeiro passo para a conversão do modelo é atribuir variáveis internas para cada transição, no formato FT-XX. Da mesma forma, devem ser atribuídas variáveis do tipo FL-XX para os lugares. Posteriormente a essas duas etapas, as variáveis de saída (comandos) devem ser associadas aos eventos internos. Para eventos externos, é proposto associar variáveis de entrada (sinais de comando) a transições. Isso pode ser observado na Figura 9, com a versão modificada da RdP para auxiliar na conversão de modelos, considerando ainda que para a elaboração do programa em Ladder foi adotado apenas um caminho possível para deposição de material a título de exemplificação.

Figura 9 – RdP modificada para conversão de modelos em Ladder.



Com essas anotações feitas na rede de Petri, deve ser gerado o Ladder com a habilitação de cada uma das transições. Em seguida, deve ser feito o diagrama para indicar a mudança de estado, utilizando set e reset. Destaca-se a particularidade do estado inicial da rede de Petri, que para ter o estado acionado, deve ter todos os outros lugares do sistema sem marca, ou então, uma transição habilitada como apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Estado inicial da rede de Petri representado em Ladder



Por fim, deve ser feita a geração do sinal dos eventos externos, que depende do acionamento dos respectivos lugares da rede de Petri associada, como definido em passos anteriores da metodologia.

#### 4 Observações finais

Em suma, o projeto como um todo apresentou um excelente desempenho. A proposta inicial era verificar se até certo ponto de desenvolvimento prático o projeto seria possível de ser executado. Dessa forma, partindo de uma necessidade eminente do mercado, passando pela prototipação e modelagem e encerrando com a programação do controlador lógico programável, verificou-se que o projeto, até esse ponto, poderia ser uma alternativa viável para fomentar o desenvolvimento e aperfeiçoamento da reciclagem no Brasil, dando maior dignidade aos trabalhadores, tornando o trabalho dos profissionais da reciclagem menos exaustivo durante a seleção de materiais e introduzindo um grau de escalabilidade que pode aumentar o percentual de lixo reciclado no país. Nos próximos passos, o grupo objetiva iniciar os primeiros protótipos e realizar os primeiros testes.

#### AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossos sinceros agradecimentos aos professores Diolino, Paulo Miyagi, Fabrício Junqueira e Marcosiris pela incrível experiência durante a disciplina de PMR3305 - Sistemas a Eventos Discretos. Sua dedicação e paixão pelo ensino foram inspiradoras, proporcionando um ambiente de aprendizado estimulante e desafiador. A abordagem envolvente e as orientações valiosas de cada um de vocês contribuíram significativamente para o meu entendimento aprofundado dos conceitos abordados no curso e que agora estão expressos nesse artigo.

#### REFERÊNCIAS

Fattori, C.C.; Kano, C.H.; Jorge, A. A.; Junqueira, F.; Miyagi, P.E. Rede de Petri e o aplicativo Platform Independent Petri net Editor (PIPE). Apostila, PMR, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

Filho, D. J. S. Controladores Programáveis. Material de aula, PMR, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

Miyagi, P.E. Controle programável. São Paulo: Editora Blucher, 1996, 194p.

Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública. Revista Limpeza Pública. Automação na Reciclagem. 86ª edição, São Paulo, 2014. Disponível em <http://www.ablp.org.br/revista-limpeza-publica/>

**Title** – E-cycle: recyclable selection system

**Abstract** – The process of selecting recyclable materials involves identifying and classifying materials according to their characteristics and conveying them to their respective containers. To automate this process, a conveyor belt system was designed that, with the presence of sensors, directs the waste to its respective collector. The solution allows this material classification process present in fields focused on sustainability, such as recycling, to be optimized and also for the human work involved in this stage to be more inclusive. As labor is employed, it is a system that is not completely independent. Considering the complete system with all interlocking subnetworks, there is a total of 22 inputs and 11 controlled outputs and the process will be modeled using the Production Flow Schema (PFS) methodology to obtain a Petri net (RdP), presented in the format of an interpreted network, associating input signals with transitions and outputs with places. The control model will be validated by verifying good RdP properties using software as a tool and the behavior of the network in terms of the states reached throughout a simulation. Ladder will be used to program the controller, with the process logic given by the vertical arrangement of rungs, obtained through the conversion of the Petri net by isomorphism. Finally, the behaviors observed in the Petri net and in the Ladder of this system were compared to assess its consistency, and the results were aligned with the expected ones.

**Keywords** – Selective collect; Recyclable; Petri net; Programmable Control; Discrete Event Systems



**Eduardo Milanez Araujo**, cursa Engenharia Mecatrônica na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo desde o ano de 2021. Participou da empresa júnior Poli Junior no ano de 2022. Atualmente participa do grupo de extensão Turing USP, voltado à inteligência artificial, e faz iniciação científica na área de modelos de linguagem em Português.



**Miguel Oliveira Passos Figueiras Marques**, cursa Engenharia Mecatrônica na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo desde o ano de 2021. Participou e foi Presidente do grupo de extensão empresa júnior Poli Finance no ano de 2023, sendo possível construir conhecimentos relacionados à engenharia e finanças, envolvendo conhecimentos desde programação a modelagem de empresas.



**Vítor Viana de Paula**, cursa Engenharia Mecatrônica na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo desde o ano de 2021. É integrante de uma equipe de desenvolvimento de software para dispositivos móveis, com foco em acessibilidade, na Superintendência de Tecnologia da Informação na mesma universidade e participa do grupo de extensão Turing USP voltado à inteligência artificial.