

# Sistema de Controle Supervisório para Produção de Materiais Plásticos com Injetoras

Diego Buchinger  
Maicol Peterson Gandolphi de Almeida

*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, Brasil, (e-mail: diego.buchinger@outlook.com, gandolphi@hotmail.com)*

**Abstract:** Injection molding machines are extensively used in plastic products manufacture. As many industry segments use this machinery, improving its productivity and reducing raw material wastage through automation benefits the industry as a whole. In this sense, this paper proposes a discrete-event supervisory control system for a modified injection-molding machine. Equipped with extra sensors and actuators, the idealized injection-molding machine can operate with less human supervision even for operations often done manually, like product color or raw material exchange. The injector's sensors and actuators, as well as its control specifications, were all modeled as automata using the theory of discrete-event supervisory control system. As result, a minimum restrictive supervisor was obtained, which has 3.520 states and 24.838 transitions. For testing its correctness, a virtual simulator was developed setting apart its functionalities related to the plant graphic simulation, from the controller scripts. Through testing, the obtained supervisor shows to work as expected for a variety of scenarios.

**Keywords:** injection molding machines; discrete-event supervisory control system; automation.

## 1. INTRODUÇÃO

Diversos produtos que possuem partes plásticas são manufaturados com o auxílio de máquinas injetoras. Estas máquinas possibilitam um alto nível de automação na tarefa de produzir produtos plásticos modelados. Existem diversos tipos de injetora e estas possuem suas peculiaridades, mas de modo geral, elas possuem a estrutura básica apresentada na Figura 1, sendo todas compostas por três partes principais:

- Unidade injetora: é constituído por um reservatório de matéria-prima (polímero), outro para corante (pigmento - para dar coloração desejada às peças) e o canhão de injeção;
- Molde de injeção: duas chapas que são produzidas com o molde das peças a serem produzidas (usualmente um tipo de peça por par);
- Depósito de peças: um compartimento abaixo do molde de injeção no qual as peças caem após um ciclo de produção.

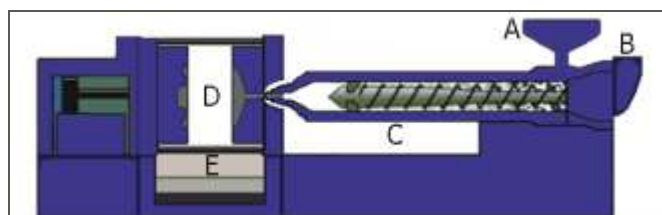


Fig. 1. Modelo de uma Injetora Hidráulica Tradicional - (a) reservatório de matéria-prima, (b) reservatório de pigmento, (c) canhão de injeção, (d) moldes e (e) depósito de peças.

A fim de produzir itens de plástico, uma injetora apresenta o seguinte funcionamento: a matéria-prima de injeção e, opcionalmente, o pigmento desejado são adicionados aos seus repositórios. Caso a unidade de injeção ainda não esteja aproximada a um dos moldes de injeção, ela é movida (fase de avanço) até encostar-se ao anel de abertura do molde, a fim de se iniciar um ciclo de produção. No início do ciclo, as chapas do molde são aproximadas e pressionadas uma contra a outra (fase de fechamento do molde). Então, o canhão de injeção esquenta a matéria prima e mistura o pigmento na proporção programada, expelindo o plástico em altas temperaturas para dentro do molde até preenchê-lo completamente (fase de injeção), mantendo o material pressionado por um período programado, com o intuito de esfriá-lo e evitar deformações por não estar totalmente sólido (fase de resfriamento). Após o tempo de resfriamento, os moldes são distanciados um do outro (fase de abertura do molde) e um mecanismo mecânico extrator é acionado para empurrar a peça para fora do molde, fazendo a peça cair na região de depósito de peças.

Quando a coloração dos itens produzidos é escura e não necessita de uma homogeneidade especial em sua coloração é comum utilizar-se de material reciclado, que é obtido através da trituração de peças defeituosas ou matéria prima contaminada. Assim, é possível poupar material virgem e pigmento, e ao mesmo tempo reaproveitar as peças defeituosas que foram produzidas. A escolha sobre qual material utilizar é realizada manualmente, substituindo material virgem por material reciclado ou vice-versa.

### 1.1 Motivação

Grande parte do processo de produção de itens ou peças utilizando injetoras hidráulicas já é automatizado, entretanto, algumas etapas são realizadas manualmente por operários. Algumas dessas tarefas requerem certo tempo, despendendo recursos humanos que poderiam ser aproveitados em outras atividades e que poderiam ser minimizados com alguma intervenção (semi) automatizada. Algumas destas tarefas são: reabastecer o depósito de matéria prima e pigmento das injetoras, trocar material virgem por material reciclável e vice-versa, e realizar a limpeza do depósito de pigmento quando houver troca de corante.

Além das tarefas destacadas, duas merecem uma maior ênfase. A primeira delas trata do recolhimento das peças na região de depósito de peças injetadas. Este recolhimento deve ser realizado de forma periódica a fim de evitar um acúmulo que possa obstruir o espaço de trabalho do molde. Apesar de ser uma tarefa relativamente rápida, um operário geralmente fica responsável por diversas outras tarefas que podem dificultar a periodicidade neste trabalho de recolhimento. Uma ausência por um período prolongado pode ser significativamente prejudicial à produção.

Outra tarefa em especial que merece ênfase é a troca de pigmento. Esta é uma tarefa que pode demandar muito tempo no ciclo de produção e pode gerar muitas peças de refugo. Nesta, é usual um operário remover manualmente o pigmento restante e deixar a injetora trabalhar até que as peças saiam sem coloração alguma do pigmento antigo, gerando várias peças de refugo. Então a injetora é parada, a fim de realizar uma limpeza do depósito de pigmento. Em seguida é feita a adição do novo pigmento e a injetora é reinicializada. Por vários ciclos de produção dezenas ou centenas de peças refugo são produzidas, sendo necessário que um operário fique observando e separando os refugos até que as novas peças saiam com a cor desejada. Apesar de ser um processo não tão frequente, provavelmente é um dos que mais demandam tempo e atenção dos operários.

Considerando as dificuldades apresentadas no chão de fábrica, este trabalho propõe a modelagem baseada em eventos discretos e simulação de um modelo de controle

supervisório mais automatizado para a manufatura, buscando facilitar e tornar mais rápido a produção de peças plásticas com o uso de injetoras hidráulicas.

### 1.2 Escopo e Nível de Detalhamento

Não faz parte do escopo deste trabalho entrar no mérito de detalhes técnicos do funcionamento de uma injetora, como por exemplo, as configurações de pressão e tempo de injeção, que inclusive são configurações próprias para cada tipo de peça produzida. Entretanto, para a automatização de algumas etapas, será necessário modelar algumas operações básicas da injetora como iniciar injeção ou fechar moldes, por exemplo. Também será proposta a introdução de novos sensores não usuais nas injetoras tradicionais.

O cerne da modelagem está atrelado ao processo de injeção de uma máquina injetora, considerando que as peças produzidas podem ser escoadas diretamente por uma esteira que está continuamente ligada. Apesar de ser modelada apenas uma máquina injetora, por motivos de simplificação, o modelo poderia ser estendido a fim de considerar um conjunto de máquinas injetoras que trabalham paralelamente e compartilham a área de escoamento de produtos.

## 2. PROPOSTA DE SISTEMA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO PARA INJETORAS

A proposta de um sistema de controle supervisório para a produção de peças de plástico injetadas utilizando injetoras consiste em algumas modificações simples no modelo tradicional desta máquina, além da adição de alguns sensores e atuadores. A Figura 2 ilustra o esquema da nova injetora e sua ligação com o sistema de escoamento de peças. Foram ilustrados na Figura 2 oito sensores – quatro de nível, dois de identificação de coloração, um de temperatura e um painel de controle de operações da injetora – além de seis atuadores – quatro de fechamento e abertura e duas lâmpadas de sinalização – e flechas indicativas de movimentação para o canhão de injeção, para os moldes e a esteira.

Foram realizadas também algumas alterações na parte estrutural da injetora. Um novo canal de injeção vertical e um

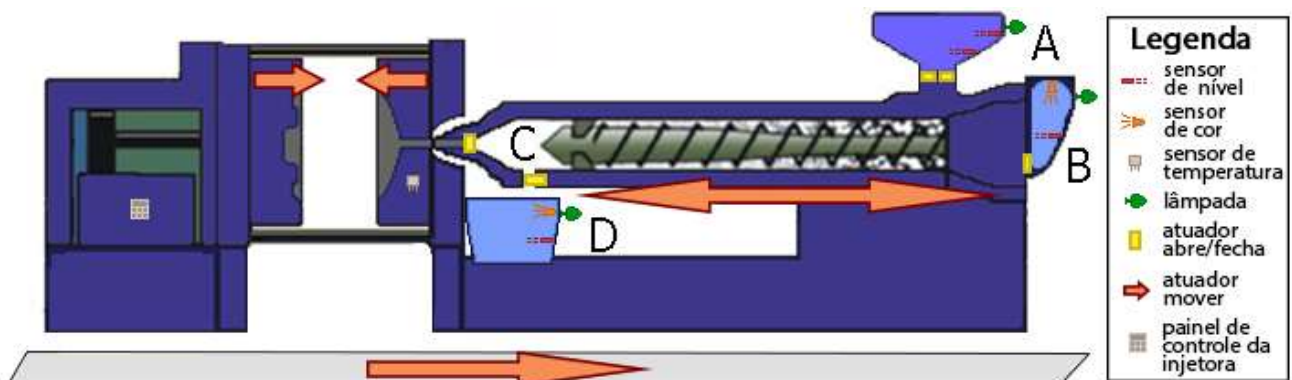


Figura 2 – Modelo da Injetora Proposta – (a) reservatório de matéria-prima virgem ou reciclada, (b) reservatório de pigmento, (c) atuadores sobre os bicos de injeção e (d) depósito de rejeito.

novo reservatório para refugo foram adicionados ao modelo da injetora, sendo que estes dois elementos são utilizados para a injeção durante a transição de pigmentação. Por fim, o espaço de depósito de peças foi removido de tal forma que as peças produzidas caíam diretamente sobre uma esteira de escoamento de produção.

Para construir os modelos que representam a planta e especificações, calcular o modelo supervisor final e simular alguns eventos sobre o resultado obtido, foram utilizadas as ferramentas IDES – *Integrated Discrete-Event Systems* (Rudie, 2006) e Nadzoru (Pinheiro et al., 2015). Os modelos apresentados nas figuras das subseções a seguir foram produzidos com auxílio destas ferramentas.

## 2.1 Identificação dos Subsistemas da Planta

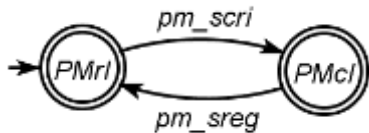
Ao todo, foram identificados seis subsistemas relevantes à problemática e ao controle supervisorio. Após uma análise inicial, percebeu-se que nem todos os elementos propostos são significativamente importantes no mérito do controle supervisorio. As lâmpadas de sinalização de eventos adicionadas neste modelo proposto de injetora pouco influenciam na lógica de controle, pois são meros indicadores. De modo semelhante, o canhão de injeção pode realizar as suas operações de avanço ou recuo, sendo que a injetora opera apenas com o bico avançado. Apesar de essa especificação poder ser mais bem trabalhada em um modelo de controle, pode-se basicamente definir no começo de operação (após ligar injetora) que o primeiro evento seria avançar canhão e o último evento (antes de desligar a máquina) seria recuar canhão.

A seguir é apresentada uma lista dos subsistemas da planta identificados com as suas descrições e autômatos:

(1) Subsistema de controle de matéria-prima: o reservatório de matéria-prima possui dois sensores de nível que são utilizados para identificar se o nível de tal material está alto, moderado ou crítico. Cada nível está associado a uma cor específica que é emitida por uma lâmpada de sinalização. Entretanto, apenas a distinção entre dois níveis é necessária: nível regular ou nível crítico.

Estados: PMrl – *Prime Material in regular level* / PMcl – *Prime Material in critical level*.

Eventos: pm\_scri – *prime material sensor critical level detected* / pm\_sreg – *prime material sensor regular level detected*.



(2) Subsistema de controle de pigmento: o reservatório de pigmento possui um sensor de nível que distingue se o nível de pigmento está crítico (muito baixo) ou não. Existe também uma lâmpada de sinalização que emite uma determinada cor associada ao nível de pigmento. Um atuador de liberação ou bloqueio também é utilizado para permitir a passagem ou não

do pigmento até o canhão de injeção, uma vez que alguns produtos utilizam material reciclável como matéria prima e não precisam da adição de corantes.

Estados: Prl – *Pigment in regular level* / Pcl – *Pigment in critical level* / Pc – *Pigment is closed* / Po – *Pigment is open*.

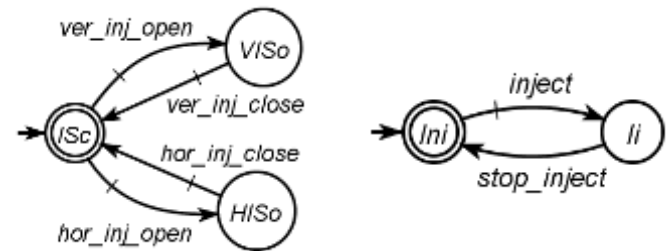
Eventos: pig\_scri – *pigment sensor critical level detected* / pig\_sreg – *pigment sensor regular level detected* / pig-open – *pigment open* / pig-close – *pigment close*.



(3) Subsistema de injeção: a injetora proposta possui um bico de injeção horizontal que é utilizado na produção de peças, e um bico de injeção vertical que é utilizado para injetar refugo até atingir a coloração desejada em uma troca de produção de tipo de peça. A abertura destes bicos é mutuamente exclusiva, isto é, apenas um destes bicos pode estar aberto por vez. Independentemente de qual bico for utilizado, a máquina pode injetar e parar de injetar. Note que o evento de parar injeção não é controlável visto que é necessário aguardar algum tempo enquanto a injeção está ocorrendo. A injeção no bico horizontal, além do tempo de injeção, considera ainda um tempo de resfriamento pós-injeção antes de efetivamente retornar um sinal de término de injeção (usualmente, quando uma peça é produzida, é necessário parar a injeção e aguardar o seu esfriamento por algum tempo antes de reabrir os moldes).

Estados: ISc – *Injection Systems are closed* / HISO – *Horizontal Injection System is open* / VISO – *Vertical Injection System is open* / Ini – *Injector not injecting* / Ii – *Injector injecting*.

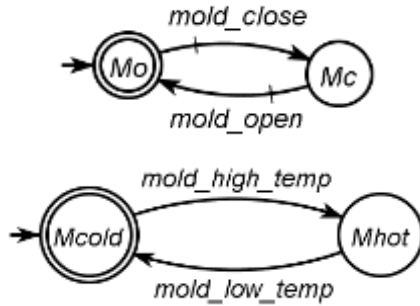
Eventos: hor\_inj\_open – *horizontal injection system open* / hor\_inj\_close – *horizontal injection system close* / ver\_inj\_open – *vertical injection system open* / ver\_inj\_close – *vertical injection system close*.



(4) Subsistema de controle do molde de injeção: os moldes de injeção possuem atuadores para afastar um molde do outro ou aproximá-los e pressioná-los. Além disso, foi adicionado na injetora proposta um sensor de temperatura que é utilizado para verificar se a temperatura dos moldes está em um patamar aceitável ou não.

Estados: Mo – *Mold is open* / Mc – *Mold is closed* / Mcold – *Mold is cold* / Mhot – *Mold is hot*.

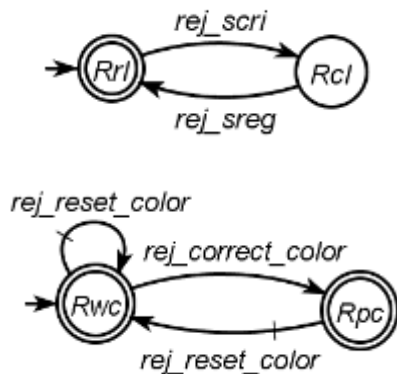
Eventos: mold\_high\_temp – *mold high temperature detected* / mold\_low\_temp – *mold low temperature detected*.



(5) Subsistema de controle de refugo: o reservatório de refugo possui um sensor de nível e uma lâmpada de sinalização que apresentam a mesma lógica do sistema de controle de pigmento. Entretanto, além disso, este reservatório também é equipado com um sensor de coloração utilizado para verificar a cor do material que está sendo produzido. A cor do material pode ou não ser correspondente com a qual se deseja num determinado momento – usualmente cor transparente, cor escura de material reciclado ou cor do pigmento utilizado. Note que no autômato referente ao sensor de ajuste de cor, todos os estados foram marcados, visto que o sistema pode finalizar em qualquer um deles.

Estados: Rrl – *Reject in regular level* / Rcl – *Reject in critical level* / Rwc – *Reject with wrong color* / Rpc – *Reject with proper color*.

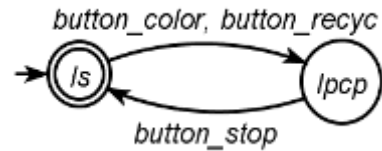
Eventos: rej\_scri – *reject sensor critical level detected* / rej\_sreg – *reject sensor regular level detected* / rej\_reset\_color – *reject reset color pursued* / rej\_correct\_color – *reject with correct color*.



(6) Subsistema de operação da injetora: a injetora possui um painel de controle que possui algumas opções de operações: parar operação, iniciar produção de peça colorida (utilizando material virgem e pigmento) ou iniciar produção de peça reciclada (utilizando material reciclado como matéria prima e sem pigmento). Note que este painel é interpretado como um interruptor de três estágios e não como um painel digital no qual os botões podem ser pressionados livremente.

Estados: Is – *Injection machine stopped* / Ipcp – *Injection machine producing products*

Eventos: button\_stop – *button stop pressed* / button\_color – *button color injection pressed* / button\_recyc – *button recycled injection pressed*.

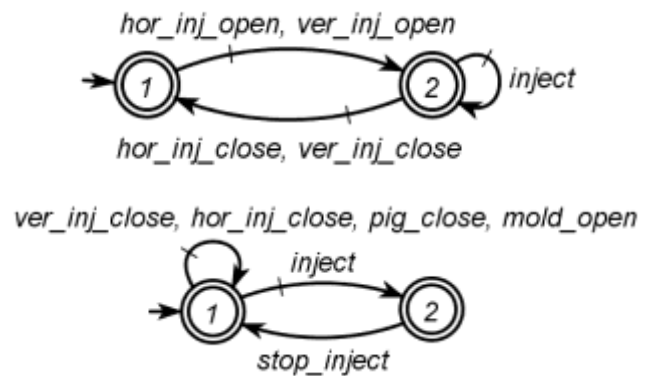


A fim de gerar um autômato para a planta toda foi realizada uma operação de sincronização (composição paralela) utilizando todos os autômatos destacados até então. A planta da fábrica resultante (G) possui 1.536 estados e 17.408 transições, sendo inviável visualizar ou apresentá-la neste artigo. Vale salientar que algumas operações que haviam sido inicialmente idealizadas neste projeto tiveram de ser simplificadas ou omitidas para que a computação desta sincronização e, posteriormente do supervisor, fosse possível.

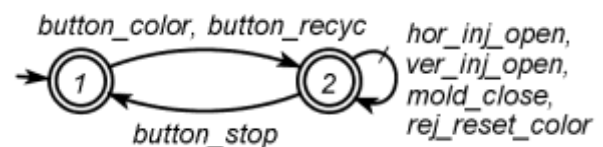
## 2.2 Especificações do Supervisor

A fim de controlar a manufatura de peças injetadas, algumas especificações de controle sobre as ações possíveis da injetora são necessárias. Foram identificadas e utilizadas as seguintes especificações:

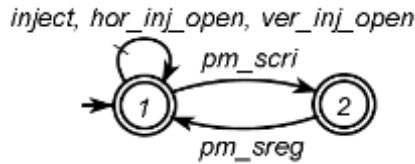
(1) Controle de injeção por bico: existem algumas especificações no processo de injeção que devem ser consideradas. A primeira delas garante que, uma vez que a injetora possui dois bicos de injeção, deve ser possível injetar material apenas quando um deles, e somente um, estiver aberto. A segunda especificação proíbe que, uma vez injetando, os bicos de injeção e o atuador do depósito de pigmento sejam fechados e que o molde seja aberto, antes da injeção efetivamente terminar.



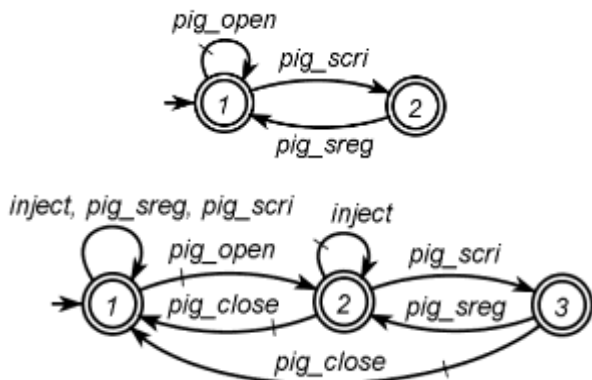
(2) Controle operacional básico: se a injetora não estiver produzindo peças – ou seja, antes do botão de produção de peças recicláveis ou coloridas for apertado – deve-se proibir que os atuadores dos bicos horizontal e vertical sejam abertos, assim como o molde ser fechado e um evento de reset de cor. Tais eventos proibidos só devem ser realizados em situações específicas do processo.



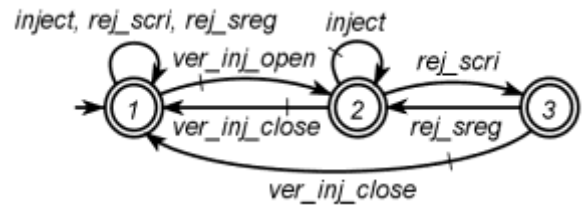
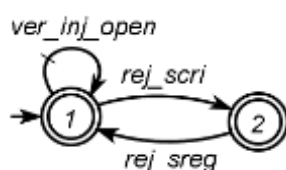
(3) Controle de material na injeção: deve-se interromper o processo de injeção do próximo ciclo de produção caso o nível da matéria-prima seja crítico. Se este for o caso, não deve ser possível abrir os bicos de injeção horizontal e vertical – evitando que o controlador da injetora fique abrindo e fechando repetidamente os bicos nesta situação.



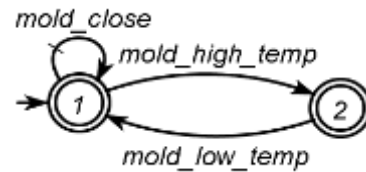
(4) Controle de pigmento na injeção: ao injetar peças coloridas o controlador do depósito de pigmento deve ser aberto. Entretanto, caso o nível de pigmento esteja em nível crítico, não deve ser possível abrir tal compartimento, evitando a tentativa de injeção de peças que não seriam coloridas. Nesse sentido, quando uma operação de produção de peças coloridas, que depende de pigmento, estiver sendo realizada, devem-se impedir ações de injeção caso o atuador do depósito de pigmento esteja aberto e o nível de pigmento seja crítico. Note que indiferentemente se o nível de pigmento estiver regular ou crítico, deve ser possível fechar este depósito com seu atuador sendo que ele não é essencial para uma possível produção de peças não coloridas ou estágios de produção que não usam pigmento (e.g. inicia-se uma produção de produtos coloridos, o nível de pigmento se torna crítico e o processo é abortado, mas na sequência inicia-se a produção de peças com material reciclável).



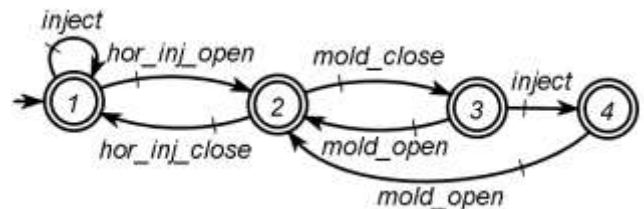
(5) Controle sobre nível de refugo: a injeção vertical (de rejeito) não pode ocorrer se o nível do depósito de refugo estiver em nível alto (crítico). Logo, o bico vertical só pode ser aberto caso o nível do depósito de rejeito esteja em nível regular. Além disso, uma nova injeção na vertical não pode ser realizada até que este depósito de rejeito seja esvaziado ou que o bico vertical seja fechado, uma vez que a injeção na horizontal pode ocorrer normalmente, mesmo com este depósito de rejeito cheio.



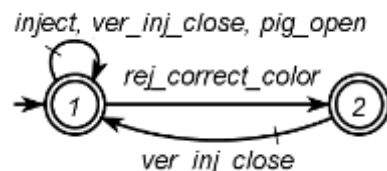
(6) Controle da temperatura dos moldes: um novo processo de injeção deve ser proibido caso o sensor de temperatura instalado no molde acuse uma temperatura acima da tolerada. Neste caso, devem-se afastar os moldes e aguardar até que a sua temperatura fique abaixo de um limiar aceitável. Isto é, deve-se proibir o fechamento dos moldes caso a temperatura destes estiver acima do desejado.



(7) Controle sobre processo base de injeção de produtos: toda injeção de produtos ocorre através do bico horizontal da injetora. Logo, não é permitido o fechamento dos moldes caso o bico horizontal não esteja aberto, e garante-se que uma injeção horizontal só ocorra caso o molde já esteja fechado. Além disso, deve-se garantir que seja realizado apenas um único evento de injeção entre o fechamento e a abertura dos moldes, sendo que apenas este único evento de injeção é necessário e suficiente para preencher a cavidade dos moldes.

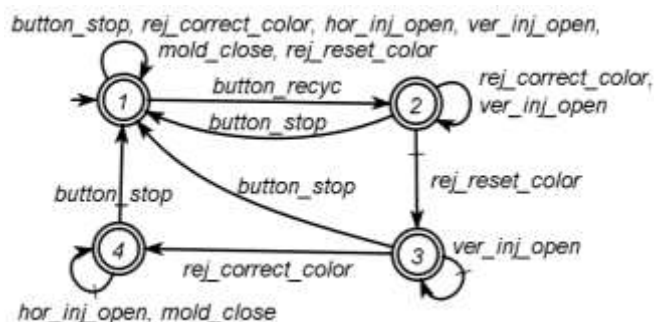


(8) Controle de coloração: sempre que ocorrer um evento indicador de que o rejeito atingiu a cor correta, deve-se proibir novos eventos de injeção e abertura do depósito de pigmento enquanto um evento de fechamento do bico vertical não ocorrer. Isso garante que quando uma peça colorida for produzida, o bico vertical seja fechado, permitindo a abertura do bico horizontal.



(9) Controle base sobre a produção de itens com material reciclável: quando um processo de produção de peças com material reciclável for iniciado, ocorre primeiramente um ajuste de coloração através do bico vertical da injetora. Para isto, inicialmente deve ocorrer um evento de reset da cor desejada, evitando a maioria dos eventos controláveis possíveis que permitiriam uma injeção. A seguir, enquanto

não ocorrer um sinal de que o rejeito está com a cor correta, o bico horizontal não deve ser aberto, sendo possível injetar apenas na vertical. Quando o sensor de cor detectar que a coloração do refugo está igual à coloração de material reciclável (cor correta), o bico de injeção vertical deve ser impedido de abrir, a fim de que a injeção regular de produção de peças ocorra através de injeções pelo bico horizontal. Em qualquer momento deste processo o botão de paralisação do procedimento pode ser pressionado, retornando esta lógica de controle ao estado inicial. Note que praticamente todos os eventos são passíveis de ocorrer no estado inicial, pois não devem ser proibidos de ocorrer se um processo de produção de peças coloridas estiver sendo realizado.



(10) Controle sobre a produção de itens coloridos: um processo similar à produção de itens com material reciclável, sendo que os impedimentos iniciais são os mesmos aplicados em (9) no que tange ao *reset* da cor e à busca pela cor correta através da injeção de rejeito pelo bico vertical, que neste caso é a cor semitransparente (coloração correta inicial). Assim, além do bico horizontal, o atuador do depósito de pigmento também deve ser impedido de ser aberto. Quando o sensor de cor detectar que a coloração do refugo atingiu a coloração transparente, deve-se gerar um evento de *reset* de cor novamente, impedindo os demais eventos controláveis, a fim de atingir a coloração do pigmento (coloração correta final). Após este *reset*, deve-se continuar impedindo que o bico horizontal seja aberto, mas sendo permitida agora a abertura do depósito de pigmentação. Quando o sensor de cor detectar que a coloração do refugo atingiu a coloração do pigmento, o bico de injeção vertical deve ser impedido de abrir, a fim de que a injeção regular de produção de peças ocorra através de injeções pelo bico horizontal com o uso de pigmento.

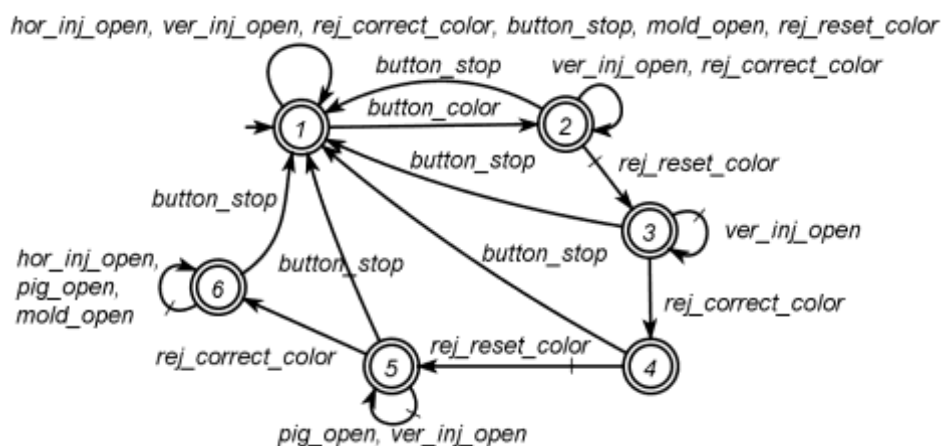
É importante salientar que o atuador do reservatório de pigmento só é aberto para a injeção de peças coloridas e isto somente ocorre depois que o material de rejeito injetado está na cor semitransparente. Note ainda que o botão de paralisação do procedimento pode ser pressionado em qualquer momento deste processo, retornando a lógica de controle ao estado inicial. Novamente quase todos os eventos são passíveis de ocorrer no estado inicial deste controle, pois não devem ser proibidos de ocorrer se um processo de produção de peças recicláveis estiver sendo realizado – com exceção da abertura do depósito de pigmento.

A fim de gerar um autômato para todas as especificações de controle realizadas, foi computada uma operação de sincronização entre o autômato resultante da planta (G) e todos os autômatos de controle destacados. O autômato resultante (R) desta especificação possui 4.864 estados e 34.430 transições, sendo novamente inviável visualizar ou apresentá-la neste artigo.

### 2.3 Controle Supervisório e Simulação

Uma vez obtidos os autômatos da planta (G) e de controle sobre a planta (K) foi realizado o cálculo do supervisor não bloqueante ótimo utilizando a operação *supcon* da ferramenta IDES. O autômato resultante *supC(G,R)* possui 3.520 estados e 24.838 transições. A fim de verificar sua consistência foram realizadas simulações utilizando a ferramenta Nadzoru. Foram testadas diversas operações sobre a injetora verificando se as regras das especificações estavam sendo realizadas. Desde as primeiras especificações propostas até o resultado final apresentado neste artigo, diversos erros ou problemas foram detectados por simulação e corrigidos.

Vale ressaltar que através da simulação, também foi possível perceber uma necessidade de precedência sobre os eventos controláveis quando estes puderem ser executados em um mesmo estado. A sequência de precedência adequada é, do mais prioritário para o menos prioritário: *reset* de coloração, abertura de bico vertical ou horizontal, abertura do depósito de pigmento, fechamento do molde, injeção, abertura do molde, fechamento do depósito de pigmento e fechamento de bico vertical ou horizontal.





### 3. IMPLEMENTAÇÃO DE UM SIMULADOR E DE UM SISTEMA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO

Uma vez definidos os modelos da planta e as especificações de controle, preparou-se um ambiente virtual para a simulação de tal sistema. Para realizar esta simulação foi utilizada a ferramenta Unity 2018.1 (2018), uma *game engine* que simplifica o processo de produção de ambientes virtuais para jogos eletrônicos e simuladores, por exemplo. Além disso, foi utilizada a ferramenta de código aberto Blender (2018) para realizar a modelagem 3D de alguns objetos.

Como a injetora idealizada no projeto é ligeiramente diferente de uma injetora tradicional foi necessário realizar algumas alterações na sua composição básica. Para simplificar este processo, um modelo virtual de uma injetora foi adquirido em uma base de modelos tridimensionais gratuitos (Dassault Systèmes, 2018) e modificado, acrescentando um bico de injeção vertical, um depósito para o material de rejeito, um compartimento visível para pigmento, adaptação nos moldes e no painel controlador da injetora. Foi adicionada ainda uma textura com padrões de azul para o corpo da injetora e duas texturas de metal para as partes metálicas. As figuras 3 e 4 mostram a injetora nos diferentes pontos de vista, juntamente dos elementos de interface com o usuário que são mencionados na legenda da Figura 3. Note que sensores do tipo lâmpada verde-vermelha foram adicionados para representar os estados referentes ao nível do depósito de matéria prima, pigmento e rejeito.

A imagem a esquerda da Figura 3 apresenta a situação inicial do simulador, com base na visão da câmera principal, na qual não há material algum nos depósitos e a injetora não está produzindo; isto é, esta parada. Já a imagem da direita na Figura 4 apresenta uma situação em que foi adicionada alguma porção de material reciclado – representados por pequenos paralelepípedos com coloração mais escura – e

alguma porção de material virgem – representados por pequenos paralelepípedos com coloração mais clara. Os eventos através dos botões de geração de matéria prima fazem com que tais materiais sejam criados logo acima do depósito de matéria prima e, devido à gravidade, caem sobre o funil de depósito. Note que a barra referente ao nível de matéria prima também indica o nível de material considerando uma quantidade máxima de material que pode ser adicionado na simulação (150 unidades).

O término de um processo de injeção também foi ilustrado na Figura 4, a qual apresenta um ponto de vista aproximado dos moldes de injeção. Note que existe uma peça de três unidades rolando pela esteira que está continuamente ligada e que a barra referente à temperatura dos moldes indica que estes estão com uma temperatura maior, mas ainda não estão em um nível crítico.

Para interagir com o ambiente de simulação implementado, pode-se utilizar o teclado e o mouse como controles padrões de interação, sendo que o teclado é utilizado para iterar sobre as três câmeras fixas pelo ambiente virtual, utilizando as teclas alfanuméricas zero (0), um (1) e dois (2), ao passo que o mouse pode ser utilizado para interagir com os botões de controle da injetora no menu do canto superior esquerdo.

#### 3.1 Detalhes sobre a Codificação

Além dos modelos tridimensionais preparados para este projeto do simulador, foi necessário implementar toda a lógica de funcionamento tanto dos elementos de interface com o usuário, assim como os eventos gráficos da planta e o controle lógico da injetora, baseado nas especificações geradas e no modelo de supervisor supC(G,R) computado. Para tanto, foram escritos um conjunto de scripts de Unity utilizando a linguagem de programação C#.



Figura 3 – Modelo da Injetora Modificada com base na idealização do projeto. O menu de controle no canto superior esquerdo contém as seguintes funcionalidades (da esquerda para a direita): parar injeção, iniciar ciclo de produção com material reciclado, iniciar ciclo de produção de peças coloridas, adicionar material virgem, adicionar material reciclado, adicionar pigmento, limpar depósito de rejeito e ajuste do tempo de injeção de peça. O menu de dados exibido no canto inferior direito apresenta, de cima para baixo, uma representação visual dos níveis de temperatura dos moldes, o nível de material de rejeito, o nível de pigmento e o nível de matéria prima.



Figura 4 – Captura de tela durante uma execução de simulação utilizando o segundo ponto de vista para a câmera que foca no molde e na esteira.

Os scripts criados podem ser agrupados basicamente em:

- scripts de controle específico sobre objetos e seus comportamentos, por exemplo, a modelagem da esteira que está em constante movimento, a alternância entre os pontos de vista alternando entre as câmeras, e comportamento de criação e destruição de elementos;
- um script para modelar os dados e os comportamentos da planta, sendo responsável pela atualização visual dos elementos gráficos no simulador. Foram definidos também neste script diversas constantes que definem valores de limiares e de referência (ex: quantidade máxima de matéria prima, limiar que identifica nível crítico e nível regular deste mesmo material garantindo histerese, quantidade de elementos de rejeito que são criados ao ocorrer um evento de injeção no bico de injeção vertical), o que facilita e simplifica futuras alterações para ajustes ou adaptações.
- scripts para modelar o supervisor, a tomada de decisão e o acionamento dos eventos controláveis. Basicamente estes scripts traduzem as especificações do autômato supervisor obtido e fazem a comunicação com a planta virtual. Esta comunicação ocorre em duas frentes: (1) através de uma função que recebe notificações de eventos não controláveis – assim como uma etapa de leitura em um ciclo de varredura, e (2) através de uma função de ação que determina qual comando de controle deve ser enviado à planta quando um determinado evento controlável será realizado.

Note que, com esta divisão modular dos scripts, ficaria relativamente mais simples alterar o sistema de um simulador para outro, ou deste ambiente virtual para um ambiente físico real, sendo necessário adaptar as funções que realizam a comunicação com a planta que são relativamente pequenas – adaptação de oito eventos controláveis que enviam sinal elétrico para os elementos da planta e adaptação da função que recebe os sinais elétricos dos eventos não controláveis, a fim de distingui-los para o controlador.

Outro detalhe de implementação que merece destaque é a forma com que tratamos o processo de injeção, o qual

consome matéria prima que está contida no seu respectivo depósito. Foi utilizada uma estratégia de referência aos elementos de matéria prima utilizando uma fila, de tal forma que sempre os elementos mais antigos, que provavelmente estarão na parte de baixo do depósito de matéria prima, serão removidos do simulador. A quantidade de elementos removida varia de acordo com o bico no qual está sendo realizada a injeção. Adotou-se a postura de utilizar menos elementos de matéria prima na injeção vertical (duas unidades) do que na injeção horizontal (cinco unidades), visto que há necessidade de mais material para injetar peças.

Por fim, vale destacar que a coloração do material de rejeito injetado no bico vertical e os produtos injetados pelo bico horizontal da injetora é dependente da coloração do material utilizado na sua geração. Foi utilizada a média entre as cores dos itens de matéria prima utilizados. A coloração do rejeito é analisada e comparada com sua memória interna de qual cor está sendo buscada no processo de injeção – tom de cinza para produção com material reciclado e a cor do pigmento para produção de peças coloridas.

### 3.2 Parser do Autômato

Uma vez que o autômato do supervisor ficou relativamente grande para ser traduzido manualmente para um script de controle foi implementado um *parser* (utilizando a linguagem de programação C++) para ler o arquivo do autômato do supervisor supC(G,R) e convertê-lo em regras de alteração de estado e tomada de decisão. Para realizar este processo, inicialmente foi necessário estabelecer um padrão bem definido e simples para a geração de código automático.

Um primeiro detalhe importante a ser percebido é que as transições entre estados realizadas com eventos não controláveis possuem um comportamento de codificação diferente das transições controláveis, sendo que estas últimas geralmente estarão atreladas a um evento que deverá ser realizado na planta, isto é, estão atreladas ao envio de um sinal do supervisor para a planta. Dessa forma, o *parser* implementado foi subdividido em dois módulos: um para a geração de código das transições não controláveis e outro para as transições controláveis.

### 3.3 Otimizações de simulação

Apesar da aplicação final não ser muito exigente em termos computacionais gráficos e de poder de processamento, buscou-se otimizar alguns aspectos que poderiam deixar o simulador com uma baixa taxa de quadros por segundo (FPS). Isto é, certos aspectos poderiam deixar o simulador lento ou travando em máquinas equipadas com processadores e placas gráficas mais simples ou modestas.

Um dos aspectos que foi otimizado em detrimento de perda de qualidade visual foi a escolha por não computar as sombras dos objetos em relação às luzes utilizadas na cena. O cálculo de somreamento para máquinas sem uma placa de vídeo pode ser custoso ao processador, podendo reduzir significativamente a performance da aplicação.



Outro aspecto que foi otimizado em detrimento da fiabilidade física do simulador foi o ativamento e desativamento dinâmico da mecânica de gravidade e colisão dos objetos menores que são criados em maior quantidade (matéria prima, pigmento e rejeito). Como a quantidade criada destes elementos pode ser relativamente elevada, o cálculo de movimento relativo à gravidade e à colisão ficam custosos quando existe a interação de muitos objetos. Dado este contexto, optou-se por ativar o componente de mecânica de gravidade para estes objetos por 2,5 segundos, tempo suficiente para a simulação da queda e acomodação da peça no depósito.

### 3.4 Considerações finais

Devido ao curto tempo disponível para a implementação deste simulador, não foi possível concluir a geração de todos os eventos propostos. Assim, deixaram-se semi-implementadas a adição de pigmento e o processo de produção de peças coloridas na planta. Note que o script do supervisor foi quase totalmente codificado com a utilização dos *parsers* mencionados. Inclusive, o script do supervisor foi subdividido justamente pela quantidade excessiva de linhas de código (mais de 30 mil linhas de código) que foram geradas através da transcrição do autômato supervisor.

Através do uso do simulador construído foi possível perceber que pelo menos uma especificação de controle foi esquecida durante a fase de projeto: quando a máquina injetora está produzindo peças e a matéria prima entra em estado crítico, os moldes da injetora ficam realizando um ciclo de fechamento e abertura desnecessário. Apesar de não ser algo crítico, tal evento deveria ser proibido através de uma especificação que proíbe o fechamento dos moldes quando o nível da matéria prima estiver crítico.

O projeto do simulador na ferramenta Unity foi disponibilizado no GitHub de um dos autores, podendo ser adquirido, testado e modificado. O link do repositório é: <https://github.com/buchinger/MCSED-injector-machine>. Para executar o simulador em um ambiente computacional com o sistema operacional Windows, pode-se simplesmente executar o arquivo MCSED-injetora.exe localizado no diretório principal.

## 4. CONCLUSÕES

O uso de injetoras tradicionais para a produção de produtos plásticos é bastante comum na indústria. Apesar de bastante automatizado, o processo de produção de produtos com injetoras tradicionais possui algumas etapas que podem demandar esforço e tempo consideráveis dos operários. Considerando este cenário e a constante busca por maior eficiência, um projeto de um novo modelo de injetora equipada com elementos adicionais que poderia automatizar ainda mais este processo foi apresentada.

Utilizando-se de técnicas de controle voltadas a sistemas baseados a eventos discretos, os subsistemas da máquina injetora foram modelados como autômatos, assim como as

especificações de controle para o funcionamento correto da injetora em uma linha de produção usual. Utilizando ambos os conjuntos de autômatos, gerou-se um autômato final que representa um supervisor minimamente restritivo em acordo com as especificações definidas.

Com o intuito de validar o correto comportamento da injetora proposta foram realizados testes iniciais em uma ferramenta de autômatos. Após as validações preliminares, foi implementado também um simulador virtual para a injetora. Buscou-se separar os componentes de código-fonte da aplicação ligados à planta e ao subsistema controlador de tal forma que modificações sejam simples de serem realizadas no controlador, sem a necessidade de se preocupar com os detalhes de implementação das simulações dos atuadores e sensores da planta virtual.

Como o intuito da construção deste simulador era validar as especificações de controle realizadas, foi elaborado um *parser* para converter o arquivo de definição do autômato do supervisor minimamente restritivo em código fonte para o subsistema controlador. Neste sentido, pode-se considerar que uma das principais contribuições deste trabalho foi a apresentação de um método de implementação de controle de sistemas a eventos discretos juntamente com a aplicação da teoria de controle supervisão aplicada em um software de simulação 3D.

Trabalhos futuros poderiam expandir as funcionalidades do simulador ou agregar novos elementos a este. Também seria interessante alterar a forma com que o subsistema do controlador foi implementado, de tal modo que o *parser* seja embutido dentro deste elemento, sendo possível ler o próprio arquivo do autômato supervisor minimamente restritivo e operar com base neste. Assim, a definição do controle sobre a máquina injetora poderia ser facilmente alterada, simplesmente trocando o arquivo do autômato controlador, sem necessidade de escrever ou recompilar o código fonte. Esta sugestão poderia agregar grande valor pedagógico prático na área de controle de sistemas baseados a eventos discretos.

## REFERÊNCIAS

- Blender. (2018) Disponível em: <https://www.blender.org/>. Acesso em: 28 jun. 2018.
- Dassault Systèmes (2018). 3D Content Central. Disponível em: <http://www.3dcontentcentral.com/>. Acesso em: 09 jun. 2018.
- Rudie, K. (2006) The Integrated Discrete-Event Systems Tool. In: 8<sup>th</sup> International Workshop on Discrete Event Systems, Ann Arbor (USA), jul. 2006.
- Pinheiro, L.P., Lopes, Y.K., Leal, A.B., Rosso Jr., R.S.U. (2015). Nadzoru: A software tool for supervisory control of discrete event systems. IFAC-PapersOnline, 48(7):182-187.
- Unity. (2018) Unity Technologies. Disponível em: < <https://unity3d.com/> >. Acesso em: 28 jun. 2018.