

# Aplicação de um Robô SCARA na Etapa de Revestimento do Processo de Fundição de Precisão

Ana Luiza Bieger Ceconi  
Instituto Federal de Educação, Ciência  
e Tecnologia - IFRS  
Av. São Vicente, 785  
Farroupilha, RS, Brasil  
analuziabiegerceco@hotmail.com

Gustavo Künzel  
Instituto Federal de Educação, Ciência  
e Tecnologia - IFRS  
Av. São Vicente, 785  
Farroupilha, RS, Brasil  
gustavo.kunzel@farroupilha.ifrs.edu.br

**Resumo**—A fundição de precisão, também conhecida como microfusão ou fundição por cera perdida, é amplamente utilizada na fabricação de itens diversos devido a sua precisão e detalhamento. Uma das etapas mais críticas desse processo é o revestimento, que influencia diretamente na qualidade do produto final, já que forma o molde no qual o metal derretido será inserido. Embora a automação ainda seja escassa nesse setor, sua implementação pode melhorar a consistência e a eficiência do processo. Este trabalho explora o projeto e construção de um modelo em escala do processo de revestimento utilizando um braço robótico do tipo SCARA. Foi desenvolvido um sistema supervisor para programar o robô e monitorar o processo, utilizando o protocolo Modbus RTU. Ao final, foram realizados testes de repetibilidade para avaliar a confiabilidade do sistema desenvolvido.

**Palavras-chave** - fundição de precisão, SCARA, automação

## I. INTRODUÇÃO

O processo de fundição de precisão, também chamado de microfusão ou fundição por cera perdida, tem seu uso registrado há vários milênios. Primeiramente, foi utilizado para a arte e começou a ser empregado para a fabricação de motores e turbinas ao final da Segunda Guerra Mundial [1].

A confecção de uma peça inicia-se na injeção de cera em um molde. Posteriormente, essa peça recebe um revestimento cerâmico, o que forma uma espécie de "casca". Por fim, metal líquido é colocado dentro da casca, que ao ser removida revela a peça pronta.

A confecção da casca, quando feita de forma manual, exige um grande esforço por parte do operador, já que os cachos, que compõem um conjunto de peças, muitas vezes são pesados e o processo exige agilidade. Em vista disso, algumas soluções automatizadas foram desenvolvidas para manipulação dos cachos, com o uso de braços robóticos.

A solução utilizando braço robótico apresenta diversas vantagens, entre elas a melhora na qualidade do produto final, em virtude da consistência do processo. Além disso, com a possibilidade de determinação de tempos de ciclo, gera maior controle do processo produtivo. Outra vantagem é o aumento da capacidade de produção.

No entanto existem alguns impasses no uso dessa solução. Se utilizado um braço robótico convencional, com seis graus de liberdade, a capacidade de força exigida para atender a

aplicação é grande, aumentando o investimento necessário para implementação.

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um modelo em escala de uma aplicação de um braço robótico do tipo SCARA no processo de revestimento na fundição de precisão. O protótipo do braço foi desenvolvido em [2], utilizando um sistema de controle em malha aberta.

Os objetivos específicos estão descritos abaixo:

- Projetar a planta em escala, utilizando software de CAD (*Computer Aided Design*);
- Fabricar a planta, utilizando manufatura aditiva de polímeros;
- Desenvolver protótipo de ferramenta/manipulador para que o braço possa movimentar as peças;
- Programar o braço para atender à aplicação;
- Analisar os resultados, a fim de levantar as melhorias necessárias para o desenvolvimento do sistema real e sua viabilidade;
- Avaliar o desempenho do SCARA para esse tipo de utilização.

Este trabalho é organizado da seguinte forma: Na seção II é apresentada a Fundamentação Teórica, a fim de melhor explicar e contextualizar os conceitos relacionados à aplicação. Já na seção III, a proposta de solução é explicada, além do desenvolvimento dos objetivos. Na seção IV está presente a implementação e resultados dos testes práticos. Finalmente, na seção V, as conclusões do projeto são comentadas.

## II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### A. Fundição de Precisão

A Fundição de Precisão é uma prática que permite a fabricação de diversos itens presentes nas mais variadas atividades humanas. Suas aplicações variam de peças automotivas a próteses cirúrgicas. Isso se deve à precisão e nível de detalhe dos produtos obtidos, eliminando outros processos de conformação do material, como a usinagem, por exemplo. As etapas do processo são apresentadas na Fig. 1 e também serão descritas abaixo.

A produção inicia com a injeção de cera em um molde com a geometria da peça a ser fabricada. Várias peças de cera

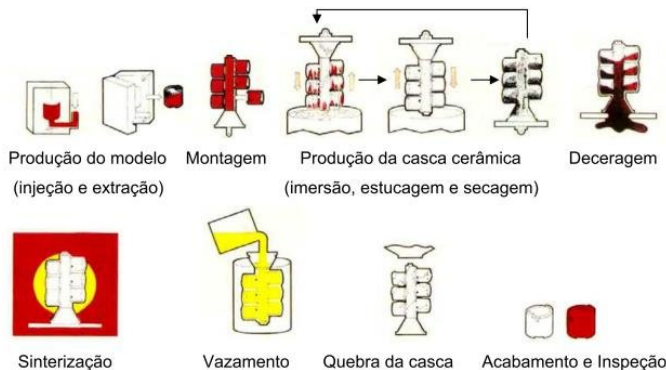


Figura 1: Etapas do processo de Fundição de Precisão. Fonte: [3].

são unidas a um canal, formando um "cacho" ou "árvore" de cera [4]. Dentro do cacho, é inserido um tipo de gancho, para facilitar a manipulação das peças. O gancho é feito de metal e pode ter vários tipos de formato.

O cacho é levado para o processo de revestimento, onde receberá camadas de lama refratária seguida de areia, formando uma casca cerâmica. Essa etapa é repetida diversas vezes, respeitando o tempo de secagem entre camadas. Ao final dessa etapa, o gancho que havia sido inserido é removido.

No próximo passo, a cera é removida em um forno do tipo autoclave, que aplica vapor e pressão em conjunto com o aumento da temperatura para remover a cera. Essa cera pode ser recuperada, permitindo sua reutilização. Em seguida, é necessário aquecer o molde, de forma que ele possa adquirir a resistência necessária para suportar o metal. Esse processo, chamado de calcinação, ocorre em altas temperaturas.

Com o molde preparado, o metal derretido é inserido em seu interior. Após sua solidificação, a casca é removida, revelando as peças prontas, que serão separadas do canal. Por fim, processos de acabamento e lixamento são realizados para retirar pequenos defeitos [5]. Na Fig. 2 são apresentados os diversos processos aplicados em um cacho.

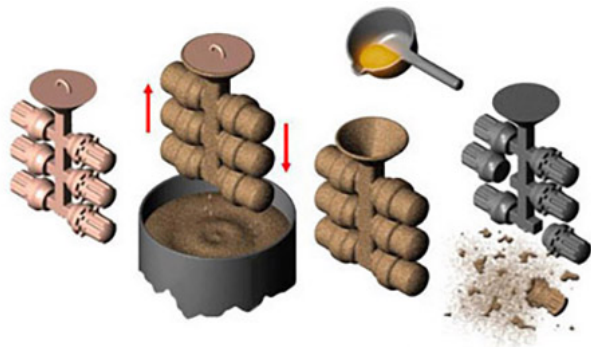


Figura 2: Processos aplicados em um cacho: peça em cera (I), revestimento cerâmico (II), preenchimento com metal (III) e remoção da casca (IV). Fonte: [4].



(a) Tanque de Lama

(b) Leito Fluidizado

Figura 3: Tanque de Lama e Leito Fluidizado. Fonte: [6].

### B. Máquinas Utilizadas no Processo de Revestimento

No processo de revestimento existem duas etapas principais: a cobertura com lama e a cobertura com areia. As máquinas que realizam essas tarefas são variadas. Aqui, serão apresentadas duas delas: o tanque de lama e o leito fluidizado, ambos apresentados na Fig. 3.

- *Tanque de Lama*: consiste em um reservatório para a lama refratária. Ele é mantido em ininterrupta rotação para evitar que a lama seque. Um motorreductor mantém a velocidade de rotação constante. Ainda, o tanque possui uma pá interna para auxiliar na homogeneização do material (Fig. 3a).
- *Leito Fluidizado*: é um equipamento que funciona através da passagem constante de ar comprimido no meio dos grãos de areia, fluidificando-a e possibilitando a imersão da peça sem danificá-la (Fig. 3b).

### C. O Braço Robótico SCARA

O braço robótico SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*) foi conceitualizado na década de 1980 por Hiroshi Makino. O modelo possui quatro graus de liberdade, sendo utilizado em funções onde não há necessidade de grande liberdade no movimento vertical (eixo Z). Já no movimento horizontal (plano XY), o braço permite maior mobilidade [7].

O modelo de braço utilizado foi desenvolvido em [2], e foi construído com manufatura aditiva, além de outros componentes, como motores de passo, guias lineares, rolamentos e outros elementos mecânicos. Para o controle do movimento e operação do usuário, o robô conta com um Arduino Mega e uma interface gráfica no software MatLab.

No espaço de trabalho, o braço utilizado tem área que permite operações à frente, esquerda e direita do braço, em cerca de 30 centímetros para cada direção. Ainda, o braço é capaz de variar sua altura de trabalho em 16 centímetros. A resolução de cada junta é apresentada na Tabela I, e posição das juntas é visível na Fig. 4.

Em relação à capacidade de movimentar cargas, é necessário avaliar o modelo de SCARA escolhido e a aplicação na qual será utilizada. No processo de fundição de precisão, a

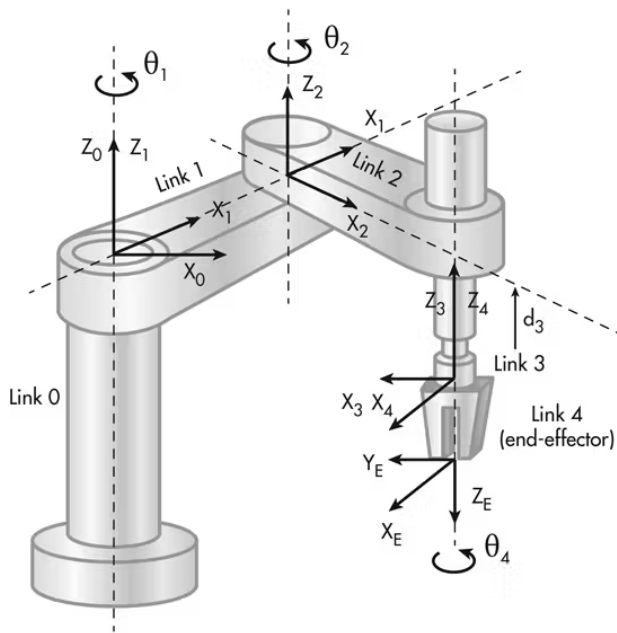


Figura 4: Juntas de um SCARA. Fonte: [8].

Junta	Resolução
$\theta_1$	0,0225°
$\theta_2$	0,0281°
$\theta_4$	0,1125°
$d_3$	0,01 mm

Tabela I: Resolução das juntas do modelo SCARA utilizado. Fonte: adaptado de [2].

geometria e tamanho das peças são variados, o que reflete na capacidade de carga necessária em um SCARA. Alguns modelos comerciais, como o KUKA KR 60, têm capacidade para altas cargas, chegando até 60 kg em sua capacidade máxima [9].

#### D. A Automação no Processo de Fundição de Precisão

Com o avanço da automação na indústria como um todo, inicia-se o pensamento de sua aplicação no processo de fundição de precisão. O artigo [10] apresenta um estudo de caso sobre a necessidade de automação nesse segmento, voltado para a etapa de revestimento. Nesse estudo, conclui-se que os defeitos aparentes nas peças são resultado de erro humano em sua maioria. O fator principal é a inconsistência de diversas variáveis presentes no processo, como espessura da camada de lama e velocidade de rotação. Essas variações ocorrem pois o operador não consegue manter exatamente o mesmo padrão de tempo de imersão do cacho e rotação para todos os lotes de peças. Ainda, é levantada a necessidade de uma solução automatizada para plantas com menor capacidade de produção.

Em [11], o *Investment Casting Institute* - ICI, apresenta um atlas com diversos defeitos presentes nas peças microfundidas.

Novamente, percebe-se que muitas das falhas ocorrem na fase do revestimento. A solução presente na indústria atualmente consiste em braços robóticos, geralmente com seis graus de liberdade, manipulando os cachos nas etapas de revestimento. Porém, como as peças manuseadas são pesadas, é necessário um braço muito grande, o que torna a solução inviável para plantas pequenas.

Dessa forma, é pertinente o desenvolvimento de uma solução diferente da presente na indústria. É importante que seja aplicável a diversos tamanhos de planta e volumes de produção, para permitir a melhora da qualidade no maior número de empresas possível.

#### E. Trabalhos Relacionados

Na indústria, cada vez mais o uso de braços robóticos é explorado. Em [12], a aplicação de um braço robótico do tipo SCARA é avaliada para a indústria de fármacos. Foi constatado, além de um aumento na capacidade de produção, a possibilidade de aplicação em setores que têm funções perigosas ou insalubres, garantindo a segurança dos colaboradores.

Na área de fundição de precisão, não existem muitos artigos acerca da aplicação mencionada. Contudo, alguns autores já levantaram a necessidade de evolução nesse setor. Em [10], são levantadas as possíveis melhorias com a aplicação de um sistema automatizado na microfusão, como melhora na qualidade das peças e aumento na produção.

### III. PROPOSTA

Nessa seção é descrita a proposta de planta em escala utilizando o robô SCARA. Inicialmente, é apresentada a planta em escala através de um software de CAD. Em seguida, há a descrição dos componentes utilizados, e como se relacionam entre si.

#### A. Planta em escala

Existem diversos tipos de máquinas que podem ser utilizadas na etapa de revestimento. Para a situação proposta, são utilizados dois equipamentos em escala: um tanque de lama e um leito fluidizado.

Para a movimentação dos cachos, é inserido um gancho dentro de sua base. Isso facilita seu manuseio. Os cachos são então pendurados em uma espécie de suporte, fabricado com tubos. Após a etapa de revestimento, cada cacho é colocado de volta no mesmo suporte.

Assim, um layout de revestimento com o braço robótico SCARA contém, além do braço, um tanque de lama, um leito fluidizado e um suporte para cachos. O *layout* contendo esses componentes é apresentado na Fig.5.

As dimensões dos equipamentos reais podem variar. O tanque de lama considerado tem diâmetro de 1 m e altura de 1,1 m. Já o leito fluidizado tem diâmetro de 0,6 m e altura de 1 m. A escala aplicada para confecção da planta foi de 1:6,5.

A construção dos elementos em escala foi feita utilizando a manufatura aditiva, através de uma impressora 3D. O material consiste em um filamento de polímero, que é derretido para a criação do modelo em camadas da peça.

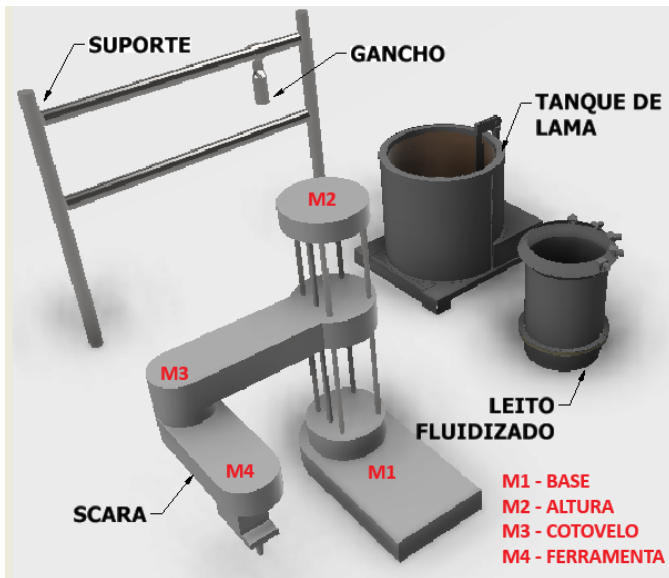


Figura 5: Layout da planta feito em software de modelagem 3D. Fonte: autores.

### B. Sequência do Processo

As posições nas quais o SCARA está durante sua operação estão ilustradas na Fig.6. A ordem de operações deve seguir a lista abaixo:

- 1) O SCARA aguarda o sinal do computador indicando o início da sequência;
- 2) O SCARA pega o cacho da primeira posição do suporte, utilizando o gancho para movimentá-lo;
- 3) O SCARA leva o cacho para a posição sobre o tanque de lama;

- 4) O cacho é submerso na lama;
- 5) O SCARA aguarda o tempo pré-definido para a cobertura total do cacho com lama;
- 6) O SCARA levanta o cacho para a posição sobre o tanque novamente;
- 7) O SCARA aguarda o tempo necessário para que o excesso de lama escorra do cacho;
- 8) O SCARA movimenta o cacho para a posição acima do leito fluidizado;
- 9) O cacho é inserido no leito fluidizado
- 10) O SCARA aguarda o tempo pré-definido para a cobertura do cacho com areia;
- 11) O SCARA levanta o cacho para a posição sobre o leito fluidizado novamente;
- 12) O SCARA aguarda o tempo necessário para que o excesso de areia caia do cacho;
- 13) O SCARA devolve o cacho para o mesmo lugar no suporte;
- 14) O processo é repetido até revestir todos os cachos;
- 15) O SCARA aguarda o sinal para iniciar novamente.

### C. Manipulador/Garra

Foi desenvolvido um manipulador para manusear os cachos pela planta. A garra segura o gancho que é inserido nos cachos de cera, além de manter a peça firme, garantindo uma cobertura uniforme de material refratário.

O manipulador foi confeccionado por manufatura aditiva, através de impressão 3D de polímeros. Para abertura e fechamento da garra, foi utilizado um motor do tipo servo. O projeto da garra em CAD é mostrado na Fig. 7.

Como existem diversos tipos de gancho, podem ser necessários alguns modelos diferentes de manipulador para permitir o trabalho com todos eles. Por padrão, foi considerado um gancho similar ao da Fig. 8, que é confeccionado com tubos redondos e bastante utilizado na indústria.

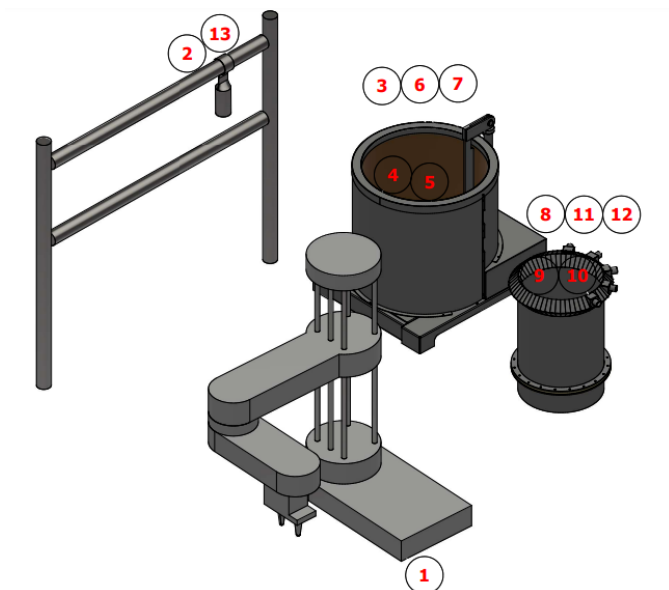


Figura 6: Etapas do processo na planta enumeradas. Fonte: autores.

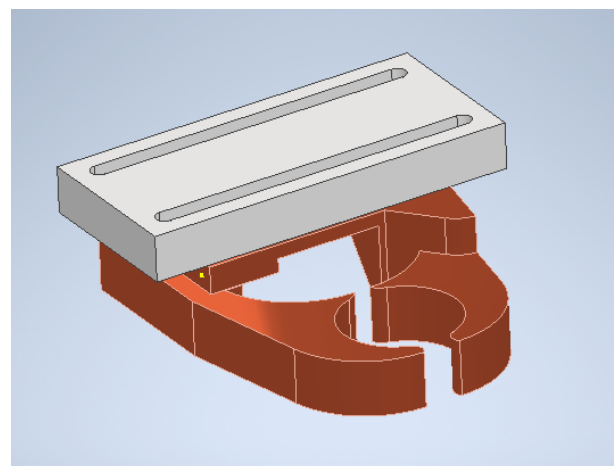


Figura 7: Projeto da garra manipuladora em software de modelagem 3D. Fonte: autores.

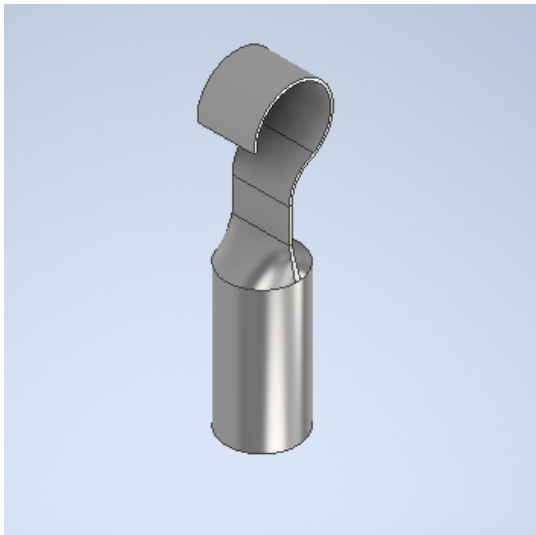


Figura 8: Modelo de gancho projetado em software de modelagem 3D. Fonte: autores.

#### D. Componentes do Sistema e Diagrama de Blocos

Além dos componentes empregados em [2], alguns outros elementos foram acrescentados, para garantir o funcionamento da planta como um todo. Na Fig. 9 é apresentado o diagrama de blocos que ilustra o funcionamento do sistema.

1) *Computador*: O computador é o intermédio entre o operador e a planta. Nele é possível programar a sequência de movimentos que o robô irá realizar durante a operação. Para melhor interação do operador com a planta, foi desenvolvido um sistema supervisório. O sistema consiste em duas telas: uma de programação, e uma de operação. Também conta com duas classes de usuários: uma para programação, e outra apenas para operação. Como exemplo de parâmetro que pode ser alterado, pode-se citar o tempo em que o cacho fica

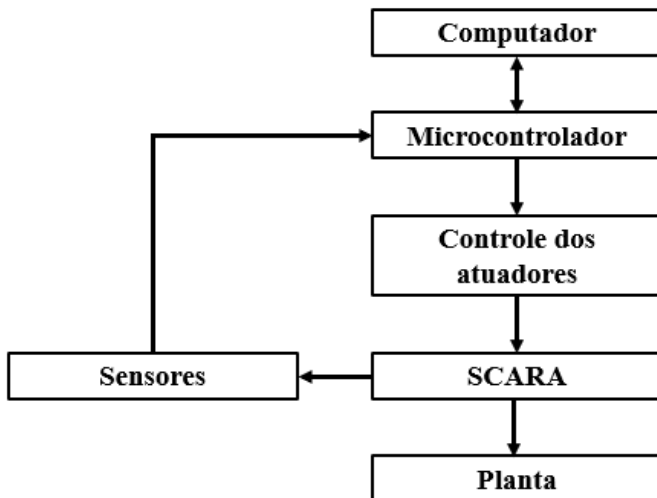


Figura 9: Diagrama de Blocos do sistema. Fonte: adaptado de [2].

submerso na lama, até que esteja totalmente coberto.

2) *Microcontrolador*: É o responsável pelo controle dos atuadores com base nas informações que recebe do computador e dos sensores. O microcontrolador armazena a sequência de movimentos que será executada pelo robô para realizar o revestimento da peça. Para salvar e alterar essa sequência, o sistema supervisório disponibiliza a tela de programação, na qual o usuário define e grava as posições que o robô para as quais o robô deve se movimentar durante o processo. Essas posições, no microcontrolador, serão convertidas em quantidade de passos de cada motor. A interação entre o computador e o microcontrolador é feita pelo através de um protocolo aberto. Como a sequência de posições que o braço realizará será sempre repetida, não há a necessidade de calcular a cinemática para a ação dos motores.

3) *Atuadores*: Consistem em motores de passo, alguns deles com redução através de polias e correias. São acionados conforme o programa utilizado no microcontrolador. Também possui um servomotor para abertura e fechamento da garra.

4) *Sensores*: O braço utilizado possui quatro sensores de fim de curso. Quando estão todos acionados, o microcontrolador reconhece que o braço está na posição zero. Isso é importante para garantir que o braço consiga repetir sempre a mesma posição quando executa uma sequência de movimentos.

5) *Planta*: Nesse sistema, a planta é apenas representativa quanto às posições que o SCARA deve alcançar durante sua operação. As máquinas em escala estão dispostas de acordo com a configuração de plantas industriais reais.

## IV. IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS

Nesta seção será apresentada a implementação do projeto, englobando o funcionamento do braço SCARA e a comunicação com o computador. Além disso, serão apresentados os resultados encontrados com o teste funcional da planta em escala.

#### A. Máquinas em Escala e Layout

Foram confeccionadas, através de manufatura aditiva, réplicas em escala de um tanque de lama e um leito fluidizado, apresentadas na Fig. 10. A escala utilizada para impressão foi de 1:6,5 em relação ao tamanho real das máquinas.

A disposição das máquinas em escala foi feita conforme o layout apresentado anteriormente, na Fig. 5. Foram utilizadas placas de MDF com marcações para garantir que os elementos tenham uma posição fixa. O sistema é mostrado na Fig. 11.

#### B. Sistema Supervisório

Para realizar a operação e programação do sistema, foi desenvolvido um sistema supervisório no software *Eclipse*. O sistema consiste em duas telas: uma tela de programação, onde é possível gravar as posições necessárias para execução da operação pelo SCARA; e uma tela de operação, que possibilita iniciar a sequência de movimentos salva e alterar o tempo de banho das peças.

Para garantir que o sistema não seja alterado indevidamente, foram criados dois tipos de usuários. O usuário PROGRAMADOR tem pleno acesso aos sistema, podendo alterar e



Figura 10: Máquinas em Escala construídas com manufatura aditiva. Fonte: autores.

excluir posições da sequência conforme necessário, além de executar a sequência de movimentos para testes. Já o usuário OPERADOR, não pode alterar os movimentos salvos, podendo apenas executar a sequência pré configurada e ajustar o tempo de banho das peças.

Para programar a sequência de movimentos que o SCARA deve executar durante o processo de revestimento, o usuário, logado com o usuário Programador, deve acessar a página de

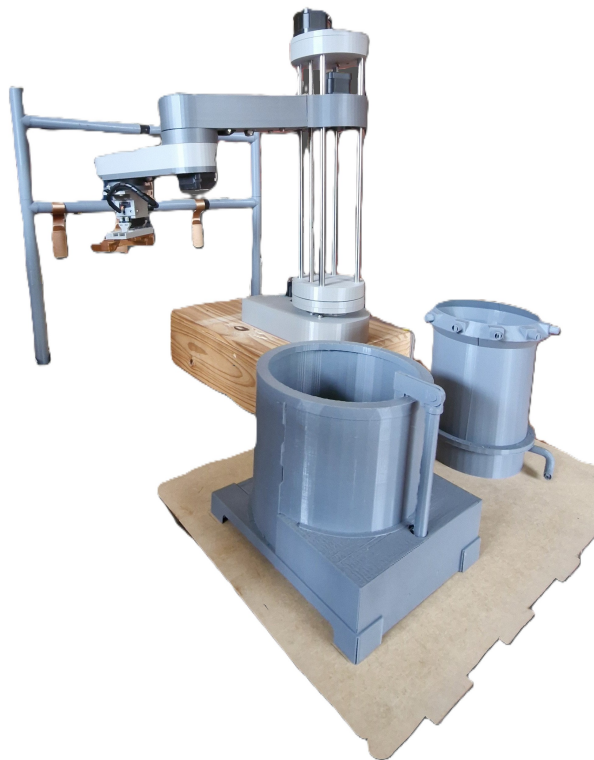


Figura 11: Modelo em escala construído com robô SCARA. Fonte: autores.

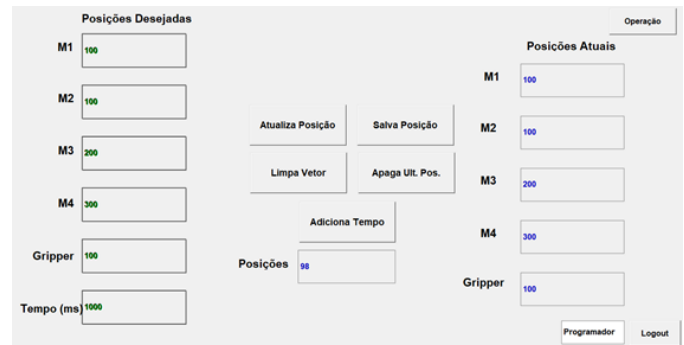


Figura 12: Interface de programação desenvolvida no software Eclipse. Fonte: autores.

programação, mostrada na Fig.12 . As funcionalidades de cada elemento da interface estão descritas abaixo:

- *Setpoints M1, M2, M3, M4 (Posições Desejadas)*: o usuário deve digitar, na caixa correspondente, a quantidade de passos que deseja para cada motor.
- *Setpoint "Gripper"*: o usuário deve digitar o ângulo correspondente à posição da garra desejada ( $0^\circ$  = aberto,  $165^\circ$  = fechado).
- *Setpoint "Tempo"*: o usuário deve digitar o tempo desejado para o banho das peças, em milissegundos.
- *Botão "Atualiza Posição"*: ao clicar no botão, se a posição digitada nas "Posições Desejadas" está dentro do *range* do braço, o SCARA irá se mover para aquela posição.
- *Botão "Salva Posição"*: ao clicar no botão, salva a posição atual do SCARA na sequência de posições.
- *Botão "Limpa Vetor"*: ao clicar no botão, apaga todas as posições salvas na sequência de posições.
- *Botão "Apaga Ult. Pos."*: ao clicar no botão, apaga apenas a última posição da sequência de posições.
- *Botão "Adiciona Tempo"*: ao clicar no botão, adiciona uma "pausa" na última posição salva, correspondente ao tempo de banho do cacho.
- *Display "Posições"*: mostra quantos pontos estão salvos na sequência de execução do SCARA.
- *Displays "Posições Atuais"*: Mostram a quantidade de passos atuais dos motores, ou seja, a posição atual do SCARA e o ângulo da garra.

Para operar o sistema, pode-se estar logado com ambas as classes de usuários. Ao clicar no botão "Executa Sequência", o SCARA desloca-se para a posição inicial e começa a realizar a sequência de posições programada. Durante a operação, também é possível alterar o tempo configurado para o banho das peças, por ser necessário ajustá-lo durante o processo.

### C. Braço SCARA e Arduino

O microcontrolador presente no braço SCARA utilizado é o Arduino Mega. Ao ser energizado, o sistema inicialmente realiza o zeramento do robô. Apenas após concluído esse passo se inicia a comunicação. Após, no *loop*, é feita a atualização das variáveis periodicamente, comunicando com o sistema

supervisor e realizando as leituras e escritas necessárias, o que garante a atualização na tela em tempo real.

Para garantir que o sistema guarde a sequência de posições salvas pelo usuário mesmo que seja desligado, foi utilizada a EEPROM para salvamento. Ao gravar uma nova posição do SCARA na sequência, o Arduino checa se há espaço disponível na EEPROM e, caso haja, salva os valores referentes à quantidade de passos de cada motor naquela posição e atualiza o valor de pontos salvos. Ao utilizar a EEPROM, teve-se o cuidado de realizar o salvamento apenas no momento em que o botão é pressionado, pois a mesma apresenta um limite de cerca de 100000 salvamentos por byte antes de comprometer sua confiabilidade [13].

Para armazenar a sequência de posições salvas de forma padrão, foi criada uma estrutura "Conjunto" que contém seis variáveis, descritas abaixo:

- *M1*: quantidade de passos do motor M1.
- *M2*: quantidade de passos do motor M2.
- *M3*: quantidade de passos do motor M3.
- *M4*: quantidade de passos do motor M4.
- *tempo*: marcador que indica se há ou não uma pausa após atingir a posição programada, correspondente ao tempo de banho das peças.
- *grip*: ângulo do servomotor que corresponde à abertura ou fechamento da garra.

Cada variável possui tamanho de dois bytes, totalizando 12 bytes por conjunto. Como a EEPROM do Arduino Mega tem 4096 bytes, é possível salvar cerca de 341 posições dessa estrutura.

Para cada botão utilizado no supervisor, existe uma variável *holding register* configurada no Arduino. Ao se pressionar o botão, o valor do *holding register* correspondente é alterado. Após realizar a ação necessária, o valor do *holding register* é resetado. Ao acionar os botões no supervisor, as seguintes ações são tomadas no Arduino:

- *Botão "Atualiza Posição"*: ao acionar o botão, o microcontrolador testa se as posições desejadas estão dentro do *range* do SCARA. Caso positivo, executa o movimento.
- *Botão "Adiciona Tempo"*: ao acionar o botão, adiciona um marcador de tempo (bit 1) na variável "tempo" na estrutura do último conjunto de dados salvos.
- *Botão "Apaga Ult. Pos"*: ao acionar o botão, apaga o último conjunto de dados salvo.
- *Botão "Salva Posição"*: ao acionar o botão, testa se o conjunto de posições desejadas estão dentro do *range*. Se sim, salva a posição na sequência.
- *Botão "Limpa Vetor"*: ao acionar o botão, apaga todos os conjuntos de posições salvos na sequência.
- *Botão "Executa Sequência"*: ao acionar o botão, o Arduino lê da EEPROM os conjuntos de valores previamente salvos, conforme a estrutura mencionada anteriormente. Em seguida, aciona os motores de acordo com a quantidade de passos salva para cada motor. Caso a variável "tempo" esteja com valor igual a 1, após atingir a posição, aguarda o intervalo de tempo definido no

Nome	Dispo...	Item
Driver		
• TagRegPosAtualM1	1:	hr&h0000
• TagRegPosAtualM2	1:	hr&h0001
• TagRegPosAtualM3	1:	hr&h0002
• TagRegPosAtualM4	1:	hr&h0003
• TagRegPosAtualGripper	1:	hr&h0004
• TagRegPosDesejadaM1	1:	hr&h0010
• TagRegPosDesejadaM2	1:	hr&h0011
• TagRegPosDesejadaM3	1:	hr&h0012
• TagRegPosDesejadaM4	1:	hr&h0013
• TagRegPosDesejadaGripper	1:	hr&h0014
• TagRegQtdePosicoes	1:	hr&h0015
• TagRegFlagAddPos	1:	hr&h0020
• TagRegFlagExecPos	1:	hr&h0021
• TagRegFlagLimpaPos	1:	hr&h0022
• TagRegFlagAtualiza	1:	hr&h0023
• TagRegTempoMov	1:	hr&h0024
• TagRegFlagSetTempo	1:	hr&h0025
• TagRegFlagApagarUltimo	1:	hr&h0026

Figura 13: Endereços configurados no driver Modbus

supervisor para o banho das peças; caso esteja com o valor igual a 0, segue a sequência sem pausas.

#### D. Protocolo de Comunicação

A configuração adotada para o sistema foi do tipo Mestre/Escravo, na qual o mestre é o sistema supervisor SCADA, que comanda o sistema, e o escravo é o Arduino. O protocolo utilizado foi o Modbus RTU, com comunicação serial a uma taxa de 19200 bps (bits/segundo).

No Arduino, foram inseridas duas bibliotecas de comunicação: *ArduinoRS485* e *ArduinoModbus*. Com as bibliotecas inseridas, foram definidos os endereços de cada *holding register*. Para realizar a comunicação com o Arduino no Elipse, foi utilizado o driver Modbus, que gerencia a comunicação das variáveis presentes no programa. No SCADA, foram configurados os endereços programados no Arduino para cada variável, podendo assim vinculá-las aos botões e displays da interface gráfica. Os endereços configurados são mostrados na Fig. 13

#### E. Teste de Repetibilidade

Para avaliar a repetibilidade da sequência e garantir que o braço SCARA consiga executá-la múltiplas vezes, realizou-se um teste repetindo a sequência salva.

Primeiramente, o SCARA foi ligado, executando sua rotina de *homing* padrão, acionando os sensores de fim de curso e salvando a posição zero. Em seguida, foi colocado em uma posição inicial, com as seguintes quantidades de passos para

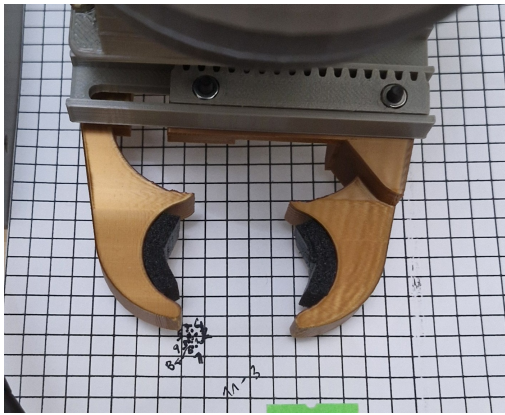


Figura 14: Marcações realizadas durante o teste de repetibilidade. Fonte: autores

cada motor:  $M1 = 1000$ ,  $M2 = 16000$ ,  $M3 = 1500$  e  $M4 = 500$ . Para o servomotor da garra, utilizou-se o ângulo zero, deixando-a completamente aberta.

Alinhado à base do motor, foi posicionado um papel quadriculado, com quadrados de 5 mm cada. A posição da ponta esquerda da garra foi marcada no papel como a posição "1". Na sequência, foi executado o vetor de posições salvo por dez vezes seguidas, e após cada execução, foi marcada novamente a posição da ponta da garra. As marcações são mostradas na Fig. 14. Com as medições coletadas, foram calculadas a média e desvio padrão das amostras. O resultado das medições em relação à posição inicial, bem como a média e o desvio padrão estão dispostos na Tabela II.

Iteração	$\Delta X (mm)$	$\Delta Y (mm)$
1	2	1
2	4	3
3	3	6
4	5	5
5	3	2
6	4	6
7	3	3
8	5	0
9	2	5
10	4	3
Média	3,5	3,4
Desvio padrão	1,08	2,06

Tabela II: Variações na medição em relação à referência. Fonte: autores.

As variações encontradas são pequenas, e não apresentaram influência negativa na execução da sequência. Isso indica que o sistema se manteve estável e operando dentro dos limites aceitáveis de variação.

## V. CONCLUSÃO

O teste funcional de uma situação real da indústria em um protótipo em escala, como é o caso da planta de revestimento utilizando o SCARA, engloba diversos aspectos do curso de Engenharia de Controle e Automação. Embora alguns aspectos não sejam completamente fiéis aos reais, a planta em escala fornece uma boa visão de como o processo acontece, quais os

pontos críticos que necessitam de atenção, as possíveis falhas e as melhorias que podem ser implementadas.

A utilização da EEPROM foi uma alternativa para a dificuldade encontrada da necessidade de salvamento das posições. No entanto, para uma aplicação mais segura e confiável, a EEPROM pode não ser a melhor escolha, sendo possível o uso de um cartão de memória ou outra opção para essa questão.

O braço SCARA utilizado foi confeccionado por meio de impressão 3D, o que resulta em certa instabilidade estrutural, especialmente nas posições em que está mais estendido. Embora não tenha tido um impacto significativo na repetibilidade da sequência avaliada, para melhorar a precisão e reduzir problemas com peso na estrutura, uma possível melhoria envolve utilizar um material mais resistente, como o aço.

A garra desenvolvida atendeu à necessidade de movimentação do gancho. Para um sistema aplicado, porém, o servomotor pode não ter o torque necessário para segurar a peça, podendo ser substituído por outro tipo de motor ou ainda ter acionamento pneumático para garantir a firmeza no deslocamento dos cachos.

No geral, a proposta de desenvolver uma planta em escala da etapa de revestimento do processo de fundição de precisão utilizando um robô SCARA foi concluída com êxito. Foi possível manipular os ganchos pela planta e colocá-los de volta no suporte com precisão em todas as execuções. O sistema supervisor desenvolvido permitiu programar os movimentos do robô e acompanhar a execução, além de possuir usuários com níveis de permissão diferentes. A comunicação entre o Arduino e o Eclipse demonstrou-se confiável. Os testes de repetibilidade realizados foram satisfatórios.

## REFERÊNCIAS

- [1] Hitchiner Manufacturing CO. *History of the process*. URL: <https://www.hitchiner.com/history-of-the-process>. Acesso em 20 de setembro de 2024.
- [2] E. Lazzari. "Desenvolvimento de um sistema de controle em malha aberta para prototipo de SCARA". Em: (2021).
- [3] Research Gate. *Etapas do processo de fundição de precisão*. Acesso em 08 de setembro de 2024. URL: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Etapas-do-processo-de-fundicao-de-precisao\\_fig1\\_329153925](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Etapas-do-processo-de-fundicao-de-precisao_fig1_329153925).
- [4] Global Microfusão. *Processo de Microfusão*. URL: <https://www.globalmicrofusao.com.br/#processo>. Acesso em 08 de setembro de 2024.
- [5] C. S. Kiminami, W. B. de Castro e M. F. de Oliveira. *Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos*. Blucher, 2013.
- [6] Cecomatec. *Equipamentos Microfusão*. 2018. URL: <https://www.cecimatec.com.br/produtos/categorias/equipamentos-microfusao>. Acesso em 13 de outubro de 2024.
- [7] W. E. dos Santos e J. H. C. Gorgulho Junior. *Robótica industrial: fundamentos, tecnologias, programação e simulação*. Erica, 2019.

- [8] C. Gonzales. *What's The Difference Between Industrial Robots?* 2017. URL: <https://www.machinedesign.com/markets/robotics/article/21835000/whats-the-difference-between-industrial-robots>. Acesso em 10 de dezembro de 2024.
- [9] KUKA Deutschland GmbH. *KR 60 R1200 Z400 – Dados técnicos*. Versão V1.1. Data sheet nº 0000-455-738. Fev. de 2025.
- [10] N. Vanikar. “Need of Automation in Investment Casting Industry Due to Major Defects Caused by Manual Operations”. Em: *International Journal for Scientific Research Development* 3 (nov. de 2015).
- [11] Investment Casting Institute. *Atlas of Casting Defects*. ICI, 2017.
- [12] R. T. et al SANTOS. *MANIPULADOR ROBÓTICO SCARA NA INDÚSTRIA: ESTUDO DE CASO EM SISTEMA DE PALETIZAÇÃO DE FÁRMACOS*. 2017. URL: <https://semanaacademica.org.br/artigo/manipulador-robotico-scara-na-industria-estudo-de-caso-em-sistema-de-paletizacao-de-farmacos>. Acesso em 10 de dezembro de 2024.
- [13] Arduino.cc. *EEPROM Library*. 2024. URL: <https://docs.arduino.cc/learn/built-in-libraries/eeprom/>. Acesso em 10 de maio de 2025.