

Construção e Automação de um Protótipo de Esteira utilizando CLP em uma Rede ModBus

Pamela G. Barboza, Cindy O. Gamba, Jean J. Schuster,
Cristiano Schuster, Wilmar A. Pineda.

* *Tecnólogo en Mecatrónica Industrial - TMECI, Universidad Tecnológica del Uruguay - UTEC, Rivera - Uruguay (e-mail: pamela.barboza@estudiantes.utec.edu.uy, cindy.ortiz@utec.edu.uy, jean.schuster@utec.edu.uy, cristiano.schuster@utec.edu.uy, wilmar.pineda@utec.edu.uy).*

Abstract:

This paper proposes the construction and automation of a conveyor belt prototype for practical tests of object classification. The proposed control model is programmed in a PLC using FBD language. The prototype allows setup a Modbus network for communication with the PLC. Experimental results show the validity of the proposed prototype.

Resumo: Neste artigo é proposta a construção e automação de um protótipo de esteira transportadora para testes práticos de classificação de objetos. O modelo do controle proposto é programado em um CLP usando linguagem FBD. O protótipo permite configurar uma rede Modbus para comunicação com o CLP. Resultados experimentais mostram a validade da proposta.

Keywords: Automation; Control; PLC; Modbus; FBD Programming.

Palavras-chaves: Automação; Controle; CLP; Modbus; Programação FBD.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico na automação e controle de processos tem motivado o aperfeiçoamento no transporte e manipulação de objetos em linhas de produção. Dessa forma, diversas aplicações incluem a automação de uma parte ou da totalidade do sistema a fim de atender as demandas do mercado em relação aos tempos de produção e qualidade dos produtos (Rosário, 2012)(Sadi et al., 2008). Exemplos comuns são as esteiras transportadoras, largamente usadas para prover soluções nas indústrias farmacêuticas, alimentícias, automotriz e química. Neste contexto, esteiras equipadas com controladores industriais, sensores e atuadores permitem efetuar com precisão atividades repetitivas (verificação, classificação, medição, dentre outras), além de maximizar a produção (Silva, 2020)(Mofidul et al., 2019)

Dada a importância da automação em inúmeras aplicações que envolvem esteiras transportadoras, é usual que profissionais que atuam em áreas afins precisam dar soluções com algum tipo de automatismo. Muitos destes casos envolvem conhecimentos de redes industriais e programação de CLPs (*Programmable Logic Controller*), requerendo assim treinamento especializado. Dessa forma, vários protótipos de esteiras transportadoras para testes de laboratório têm sido propostos a fim de prover habilidades práticas úteis em ambientes industriais.

* Os autores agradecem ao Tecnólogo em Mecatrónica Industrial (TMECI) da Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC) pelo apoio fornecido ao longo deste trabalho.

Em Bueno and Costa (2011) se propõe um protótipo de esteira transportadora para testes de desempenho em algoritmos de reconhecimento de objetos a partir de um PC (*Personal Computer*). Uma esteira para classificar material reciclado, controlada por uma plataforma de baixo custo Arduino, é proposta em Eihara et al. (2014). No entanto, a programação de CLPs é uma prática usual na indústria tal que a automação de protótipos em laboratório fazendo uso de CLPs tem sido também abordados (Ferreira and Nunes, 2019), (Silva, 2020), (Rojas and Barbieri, 2019), (Kulkarni and Metri, 2019), (Al Hinai and Farh, 2019), (Flórez and Hurtado, 2016) .

Em Rivera et al. (2018) os autores apresentam a automação de uma esteira utilizando um CLP para classificação de objetos e uma plataforma de Arduino para o acionamento dos atuadores e leitura dos sensores. De maneira similar, em De La Cruz Rodríguez and Donoso Quimbata (2016) os autores utilizam um CLP e o *software* LabView que implementa um algoritmo de visão computacional no reconhecimento de formas e cores de objetos para logo serem classificados na esteira. A comunicação de dados é realizada utilizando o protocolo OPC entre CLP e um PC.

Este trabalho propõe a construção e automação de um protótipo de esteira transportadora para ministrar aulas práticas de laboratório nas áreas de programação, automação e redes industriais e aplicação de algoritmos de controle a eventos discretos. O protótipo inclui atuadores gerenciados através de uma plataforma de baixo custo Arduino. O modelo do sistema de controle é baseado em uma máquina de estados programada usando linguagem FBD (*Function*

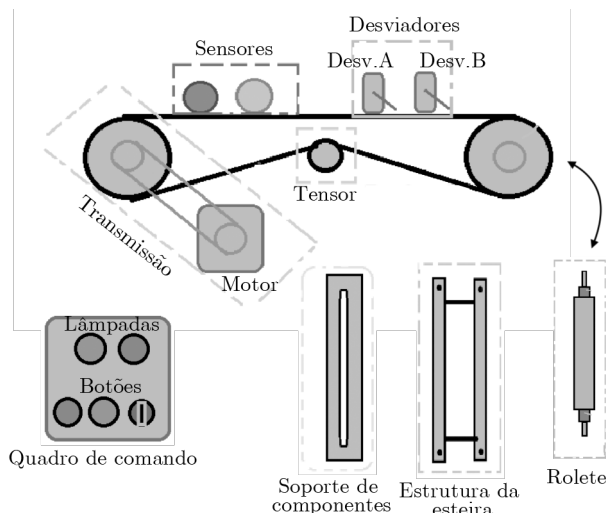


Figura 1. Desenho Conceitual

Block Diagram) em um CLP, para realizar as ações de classificação conforme a leitura dos sensores. Também se propõe a montagem de uma rede industrial Modbus para a comunicação entre o arduino e o CLP. O protótipo pode ser utilizado em práticas de redes industriais que incluem outros protocolos de comunicação, para o desenvolvimento de estratégias de controle e aprendizado em linguagens de programação e automação.

Este artigo é organizado como segue: a seção 2 descreve o protótipo proposto. A seção 3 apresenta o sistema de controle proposto e sua programação em linguagem FBD. A seção 4 detalha os aspectos construtivos. A seção 5 mostra resultados preliminares e, finalmente, a seção 6 conclui o trabalho.

2. DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO PROPOSTO

A Figura 1 mostra o desenho conceitual da estrutura proposta. Neste, a esteira é conformada por três roletes com rolamentos dos quais um destes é um tensor, posicionado na parte central para ajustar a tensão da cinta. Todas as partes são montadas em uma estrutura de perfil "H" em alumínio. O movimento da esteira é dado pelo sistema de transmissão composto por um motor de passo e polias dentadas que transmitem o movimento usando uma correia. A fim de possibilitar diversas práticas de laboratório, o protótipo inclui um sensor indutivo, um sensor capacitivo e dos dois servos motores que constituem os desviadores. É também considerado um quadro elétrico com dois botões, uma chave do tipo liga/desliga e duas lâmpadas. Todas as partes são desenhadas no Autodesk Inventor, a vista do modelo CAD é mostrada na Figura 2.

Para o gerenciamento dos atuadores é utilizada a plataforma de baixo custo Arduino. Esta plataforma permite adicionar módulos de comunicação com interfaces físicas que são utilizadas por diversos protocolos de redes industriais. O protótipo proposto inclui então um módulo *Ethernet* com intuito de implementar uma rede ModBus TCP/IP entre o Arduino e outros dispositivos da rede, como um CLP. Dessa forma, o estado dos atuadores e sensores no protótipo podem ser compartilhados em uma rede para serem controlados por outro dispositivo de rede,

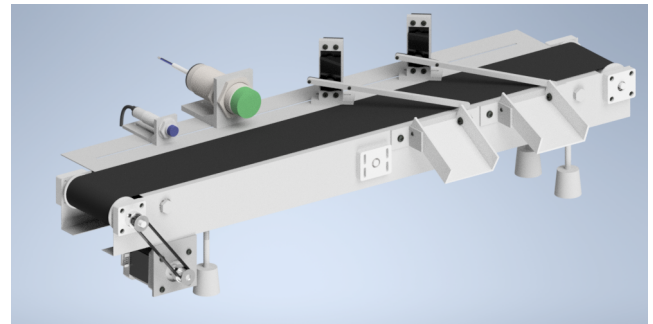


Figura 2. Modelo CAD do protótipo proposto.

expandido as possibilidades nas práticas de laboratório. Nesse sentido, a seguinte seção propõe um modelo de controle do protótipo, para ser implementado em um CLP conectado na rede e utilizando uma programação em linguagem FBD.

3. MODELO DE CONTROLE

São diversas as aplicações das esteiras transportadoras nas indústrias e, dentre muitas, pode-se citar a classificação de objetos em função do tipo de material, cor ou dimensão. Para a proposta deste artigo, os objetos são classificados pelo comprimento e tipo de material, seguindo uma sequência. No entanto, outras práticas com requisitos diferentes podem ser também implementadas.

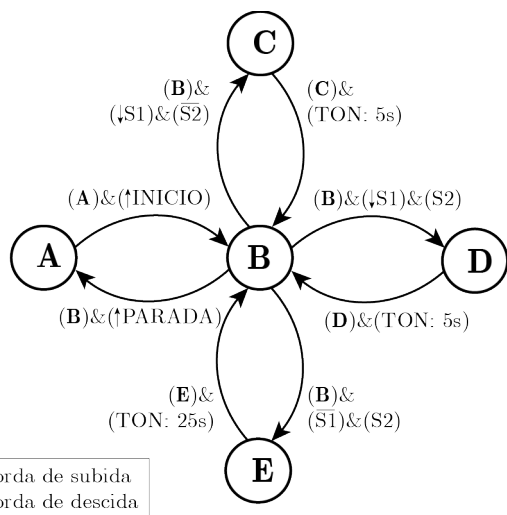
3.1 Sequência de eventos

O sistema inicialmente está com a esteira parada e logo ao pressionar o botão de INICIO entra em movimento. Assim, cada vez que existe uma peça para ser medida e classificada, os botões de INICIO e PARADA iniciam e param o sistema, respectivamente. O ciclo de funcionamento proposto para a esteira, com movimento da esquerda para a direita do ponto de vista frontal na Figura 1 e Figura 2, com uma peça colocada para ser avaliada, e o sensor indutivo posicionado antes do sensor capacitivo, o comportamento da esteira é da seguinte maneira:

- Quando a peça é detectada pelo sensor indutivo e abandona o intervalo de detecção sem ser detectada pelo sensor capacitivo, então a mesma é classificada como peça de longitude A e material AA;
- Quando a peça é detectada pelo sensor indutivo e abandona o intervalo de detecção, sendo detectada simultaneamente pelo sensor capacitivo, então a mesma é classificada como peça de longitude B e material AA;
- Caso apenas o sensor capacitivo faça detecção, então a peça é classificada como de material BB.

As ações tomadas são detalhadas a seguir:

- Peça de material AA e longitude A: o desviador A é acionado por 5 segundos, direcionando a peça pela primeira rampa para ser coletada no primeiro depósito;
- Peça de material AA e longitude B: o desviador B é acionado por 5 segundos, direcionando a peça pela segunda rampa para ser coletada no segundo depósito;



(↑): Borda de subida
 (↓): Borda de descida

Figura 3. Máquina de estados proposta. S1 e S2 representam os sensores indutivo e capacitivo, respectivamente.

Tabela 1. Representação dos estados.

Estado	Descrição	Motor	Desv. A	Desv. B
A	Início do sistema	OFF	OFF	OFF
B	Espera peça	ON	OFF	OFF
C	Long. A, material AA	ON	ON	OFF
D	Long. B, material AA	ON	OFF	ON
E	Material BB	ON	OFF	OFF

- Peça de material BB: a peça avança por 20 segundos até ser coletada no terceiro depósito e duas lâmpadas funcionam de forma intermitente avisando este fato.

3.2 Controle proposto

O modelo de controle empregado para a esteira é baseado em uma máquina de estados do tipo Moore, em que a saída é atualizada a cada estado do sistema (Harris and Harris, 2015). A máquina de estados proposta está conformada por cinco estados (A, B, C, D e E) como mostrado na Figura 3. Neste modelo, os eventos dados pela leitura dos sensores e/ou botões constituem as transições entre estados. Além disso, as condições nas transições incluem o estado atual para assegurar que as transições sejam mutuamente exclusivas, ou seja, não é possível ter dois estados ativos simultaneamente.

Para exemplificar, considere uma transição do estado B para o estado C, nesse caso, para efetuar a transição, o sensor indutivo S1 deve identificar uma borda de descida enquanto que o sensor capacitivo S2 não detecta a peça. Esta transição só ocorre no instante em que a peça não é mais identificada por S1 e também não está no intervalo de detecção de S2, indicando assim, que a peça é de longitude A e material AA. A Tabela 1 detalha a representação dos estados.

3.3 Linguagem FBD

A programação da máquina de estados é realizada em linguagem FBD, que constitui uma das cinco linguagens de programação conforme o padrão IEC 61131-3. O FBD facilita a implementação de máquinas de estado, pois de

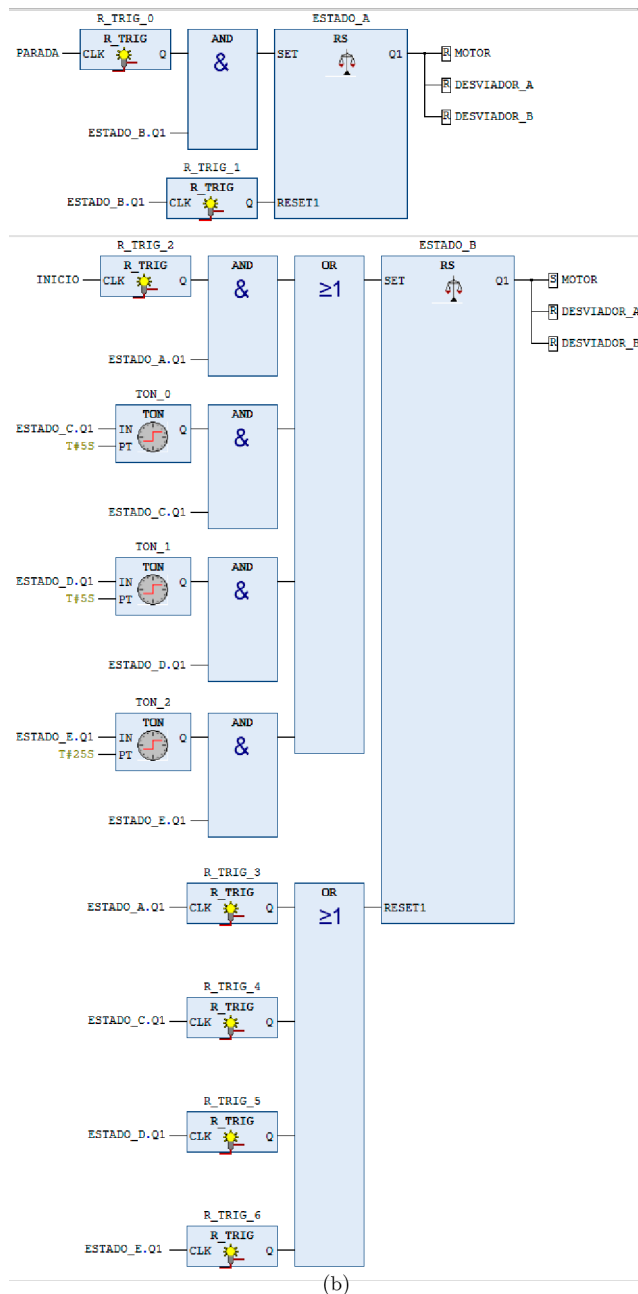
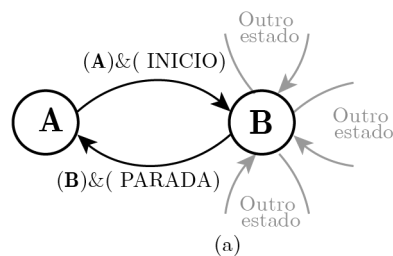


Figura 4. Implementação da máquina de estados. (a) Estados A e B. (b) Conversão para linguagem FBD.

forma similar ao diagrama *Ladder*, é uma linguagem gráfica (Hanssen, 2015). Para identificação de mudanças nos sensores e botões são então utilizadas neste trabalho instruções de reconhecimento de bordas de subida (R_TRIG) e bordas de descida (F_TRIG). Para a implementação dos estados são utilizadas instruções *Flip-Flops* do tipo reset

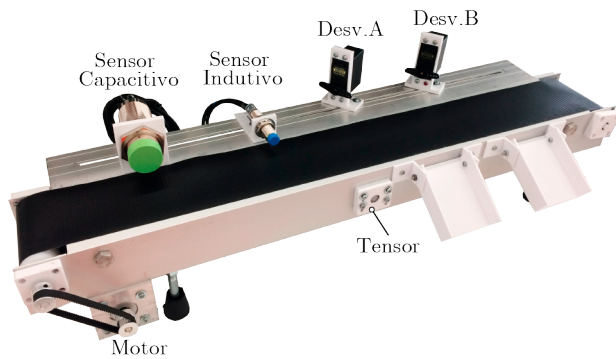


Figura 5. Protótipo para teste em laboratório.

dominante (RS) e para o controle dos tempos, temporizadores com atraso na atuação (TON). A implementação é feita na interface de programação CoDeSys v3.5. A Figura 4 mostra a implementação dos estados A e B, no entanto, a implementação completa possui cinco estados que não são apresentados devido a limitações de espaço para este artigo.

Como pode ser observado, a conversão do modelo da máquina de estados para a linguagem FBD é realizada utilizando instruções RS, para a definição dos estados, como mostrando na Figura 4(b). Essas instruções RS mantém a saída booleana Q1 igual a TRUE mesmo quando a entrada não é mais TRUE, resultando na ativação do estado apenas por um pulso. Dessa forma, quando a condição de transição que precede o estado é verdadeira, mesmo que por um instante de tempo, o respectivo estado é ativado. Além disso, é importante destacar que os estados são desativados através do RESET1 por um pulso do estado futuro através da instrução R_TRIG. Assim, o estado atual desativa o estado anterior, evitando que múltiplos estados sejam ativos em simultâneo.

Pode ser notado da Figura 4(b), que as instruções de temporização TON_0, TON_1 e TON_2 são condições de transição para o estado B, e permitem abandonar os estados C, D e E, respectivamente. Estas condições de transição constituem uma operação OR para o estado B. De maneira similar, o RESET1 do estado B é o resultado de uma operação OR dos pulsos de ativação dos estados futuros A, C, D ou E.

Finalmente, a saída Q1 dos estados é atribuída a variáveis booleanas para o motor da esteira, o desviador A e desviador B, que podem ser mapeadas às portas físicas do PLC ou em um array de variáveis para serem enviadas a um dispositivo externo na rede, como é o protótipo proposto. De maneira similar, os botões e sensores, que constituem eventos de entrada nas transições da máquina de estados e que são instalados no protótipo, podem ser mapeadas na memória do Arduino e enviadas a rede para serem lidas no CLP.

4. ASPECTOS CONSTRUTIVOS

4.1 Montagem

Para a construção do protótipo proposto são utilizados perfis de alumínio, quatro pés e dois parafusos rosqueados para a sustentação dos perfis na distância e altura desejada

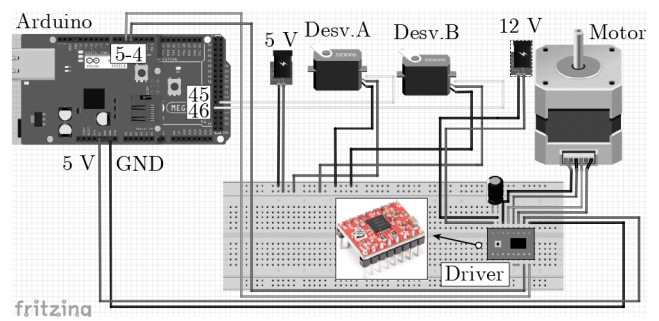


Figura 6. Conexões elétricas dos atuadores.

Tabela 2. Valores dos materiais

Matérias	Quantidade	Valor (Dolar)
Polia 20 dentes	2	3,57
Perfis em U	2	6,34
Perfi L	1	5,45
Correia	1	3,96
Esteira	1	3,00
Rolamentos	6	4,75
Total		\$27,07

os quais conformam a estrutura da esteira, como mostrado na Figura 5. O movimento da correia da esteira é dado por dois roletes usinados em nylon e colocados nos extremos. Um rolete tensor usinado permite ajustar a tensão da correia através da regulagem vertical.

A transmissão da esteira é implementada por um motor de passo, duas polias e uma correia dentada. Dois Servo motores são utilizados para os desviadores, além de um sensor do tipo indutivo e um sensor do tipo capacitivo. Tanto desviadores como sensores são fixados em um perfil de alumínio em formato de "L" que permite adicionar mais sensores/atuadores segundo o requerimento da prática. A Tabela 2 resume o custo de alguns dos materiais usados na montagem.

4.2 Atuadores, sensores e quadro de comando

A correia da esteira é movimentada por um motor de passo modelo NEMA 17HS8401 controlado por um driver A4988. Neste, é utilizada uma fonte de 12 V e uma corrente de 1.5A é configurada no driver. Já os desviadores utilizam Servo motores modelo MG95 e uma fonte de 5V. Ambos tipos de motores são controlados por uma plataforma de desenvolvimento Arduino Mega 2560 em que a biblioteca SERVO.H é adicionada para o controle dos desviadores. Com isso, é possível definir o ângulo de giro dos Servo motores que, neste caso, é 0 graus e 90 graus correspondente a um desvio de peça ou não, respectivamente. A Figura 6 identifica as conexões elétricas do circuito dos atuadores.

Os sensores, botões e lâmpadas estão disponibilizados para serem conectados nos cartões de entrada/saída digital de algum dispositivo de controle externo, como por exemplo um CLP. Não entanto, são também de fácil conexão com o Arduino, podendo ser gerenciados diretamente pelo Arduino no protótipo e enviados na rede implementada. A Tabela 3 resume o custo de alguns dos materiais usados para as conexões elétricas e de comando.

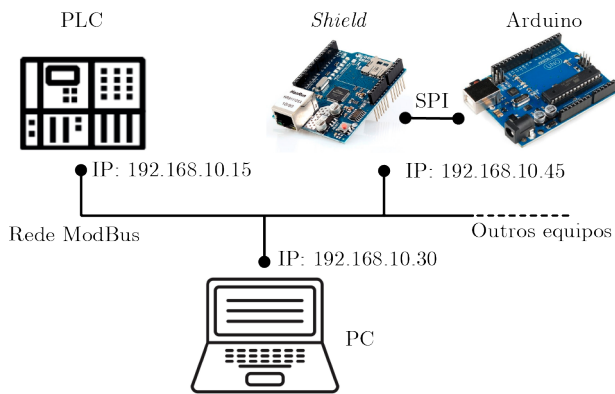


Figura 7. Configuração da rede Modbus.

Tabela 3. Valores dos materiais

Matérias	Quantidade	Valor (Dolar)
Motor 17HS8401	1	13,86
Servomotor MG955	2	22,98
Sensor Indutivo	1	6,34
Sensor capacitivo	1	45,56
Lâmpadas	2	14
Botões	2	12,30
Interruptor	1	8,79
Botoeira de controle	1	3,96
Driver A4988	1	3,96
Arduino Mega 2560	1	29,71
Shield W5100	1	13,67
Total		\$129,57

4.3 Interface Ethernet

Dado que o protótipo proposto inclui um microcontrolador em uma plataforma Arduino, é possível adicionar *hardware* adequado para estabelecer comunicação com um CLP ou outros dispositivos de campo/célula através de um protocolo industrial como o ModBus (IDA, 2015).

A implementação do protocolo Modbus TCP no Arduino é realizado equipando o protótipo com o *shield* W5100 projetado para obter conexão com uma rede cabeada TCP/IP. O procedimento seguido neste trabalho é descrito em (Sarmiento, 2015). Dessa forma, são adicionadas as biblioteca ETHERNET.H e SPI.H para a comunicação do *shield* com o Arduino pelo bus SPI. Finalmente, são adicionadas as bibliotecas MODBUS.H e MODBUSIP.H para indicação do protocolo de transporte Modbus TCP/IP.

5. RESULTADOS DE IMPLEMENTAÇÃO

A operação do protótipo proposto é validada experimentalmente em laboratório utilizando um CLP PM5630 da família AC500 da ABB. O CLP possui cartões de entradas e saídas digitais com 16 entradas e 16 saídas que aceitam valores de 0 – 24 V, o que resulta adequado para ativação de lâmpadas e relés. A comunicação entre o Arduino e o CLP é realizado via ModBus TCP. A Figura 7 ilustra a comunicação entre o Arduino e CLP, assim como do PC utilizado para programação do próprio CLP.

Como mostrado na Figura 7, a rede Modbus no Arduino é configurada definindo o endereço IP, que deve pertencer a mesma rede do CLP. É definida também a tabela de endereçamento de memória Modbus dos atuadores no

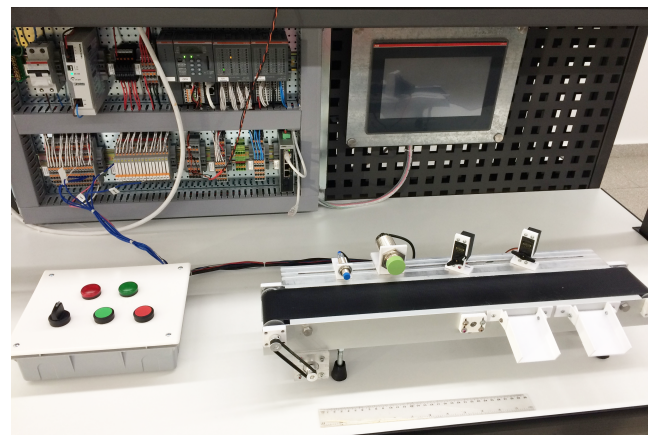


Figura 8. Bancada de laboratório para teste experimental.

Tabela 4. Memória Modbus no Arduino.

Porta	Endereço	Atuador
4-5	30	Motor
45	31	Desviador A
46	32	Desviador B

Tabela 5. Memória Modbus no CLP.

Endereço	Atuador
30	Motor
31	Desviador A
32	Desviador B

Tabela 6. Portas físicas utilizadas.

Entrada/Saída	Endereço	Componente
Entrada	13	Botão: INICIO
Entrada	11	Botão: PARADA
Entrada	12	Interruptor
Entrada	15	S. Indutivo
Entrada	14	S. Capacitivo
Saída	16	Lâmpada
Saída	17	Lâmpada

Arduino, neste caso, Motor, Desviador A e Desviador B. A Tabela 4 detalha o endereço de memória dos atuadores. Quanto ao CLP, neste trabalho, é definido como o cliente da rede que irá solicitar e/ou escrever informações para o servidor (Arduino). Assim, o CLP executa o modelo de controle baseado nas informações dos sensores e atualizando os estados dos atuadores. Para isso, são criadas as posições de memória Modbus no CLP destinadas à troca de informações com o Arduino. Estas correspondem com a leitura dos sensores e escritura dos atuadores. A tabela 5 detalha o endereçamento da memória Modbus.

A comunicação é estabelecida utilizando um *switch* ou *hub* ethernet, não mostrado na Figura 7. A Figura 8 mostra a bancada experimental para validação da proposta. A Tabela 6 detalha as portas físicas do CLP usadas para conexão com o protótipo. O modelo da máquina de estados proposto na Seção 2 é implementado no CLP para o controle do protótipo. Os testes são realizados utilizando peças de alumínio e plástico de comprimentos diferentes. A classificação é dada de forma satisfatória, o que também valida a proposta.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada a construção e automação de uma esteira transportadora. A esteira inclui uma plataforma de Arduino equipada com um *shield* de *Ethernet* que possibilita implementar protocolos de comunicação industrial como o ModBus TCP utilizado neste trabalho. Uma sequência de eventos para automação na classificação de peças foi proposta e programada em um CLP real usando linguagem FBD. Se observou versatilidade para a efetuar diversas práticas de automação, dado que diferentes estratégias de controle em diferentes linguagens de programação podem ser implementadas. É visto que outros protocolos de comunicação podem ser implementados utilizando outros *Shield* disponíveis no mercado. Além disso, é possível fazer teste de implementação de uma interface gráfica supervisória para visualização do funcionamento dos sensores, quantidade de objetos e a demonstração do funcionamento do protótipo de forma gráfica.

REFERÊNCIAS

- Al Hinai, R.F. and Farh, A.F.A. (2019). Building color sensor based on image processing technology for automatic color object sorting using plc system. In *2019 International Conference on Digitization (ICD)*, 222–226. doi:10.1109/ICD47981.2019.9105879.
- Bueno, L. and Costa, M.A.d. (2011). *Automação de uma esteira seletora por meio de CFTV*. B.S. thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- De La Cruz Rodríguez, A.E. and Donoso Quimbita, J.F. (2016). *Diseño y construcción de una máquina didáctica clasificadora de objetos mediante visión artificial para el Laboratorio de Automatización Industrial de Procesos Mecánicos de la Facultad de Ingeniería Mecánica*. B.S. thesis, Quito, 2016.
- Eihara, B.R., Silva, D.C.L., and Santos, E.F. (2014). Esteira para separação automática de material reciclado. *Revista de Gestão & Tecnologia*, 2(1).
- Ferreira, C.R. and Nunes, C.E. (2019). Automação de um sistema pick and place baseado em sistemas a eventos discretos. *Anais do 14^o Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente.*, 2795–2801.
- Flórez, C.A.C. and Hurtado, D.A. (2016). Desarrollo e interacción de un laboratorio virtual asistido y controlado por plc1. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 10(19), 9–15.
- Hanssen, D.H. (2015). *Programmable logic controllers: a practical approach to IEC 61131-3 using CODESYS*. John Wiley & Sons.
- Harris, S. and Harris, D. (2015). *Digital design and computer architecture: arm edition*. Morgan Kaufmann.
- IDA, M. (2015). Modbus application protocol specification v1. 1b3.
- Kulkarni, O.R. and Metri, R. (2019). Automatic toll monitoring system using plc-scada programming. In *2019 9th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence)*, 126–129. IEEE.
- Mofidul, R.B., Sabbir, M.S.H., Podder, A.K., and Shaifur Rahman, M. (2019). Design and implementation of remote controlling and monitoring system for automatic plc based packaging industry. In *2019 1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology (ICASERT)*, 1–5.
- Rivera, M.M., Bravo, R.G., Cabrera, M.A.V., and Chávez, J.A.L. (2018). Módulo didáctico de transporte y clasificación de objetos. *Pistas Educativas*, 38(120).
- Rojas, A.M. and Barbieri, G. (2019). A low-cost and scaled automation system for education in industrial automation. In *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 439–444. IEEE.
- Rosário, J.M. (2012). *Automação industrial*. Editora Baraúna.
- Sadi, S., Mulyati, S., and Kurniawan, D.A. (2008). Items' filling system prototype with sorting system according to the color and height of the conveyors based on plc omron cpele. *Int. Res. J. Eng. Technol*, 869.
- Sarmiento, A. (2015). modbus-arduino. URL <https://github.com/andresarmiento/modbus-arduino>.
- Silva, A. (2020). O projeto de uma esteira separadora didática para o ensino de automação a eventos discretos. *Revista Tecnológica*, 29(1), 130–141.