

SISTEMA DE SIMULAÇÃO DE PLANTA INDUSTRIAL DE MANUFATURA COM IMPLEMENTAÇÃO EM FPGA

VITOR A. SANTOS¹, CARLOS R. E. LIMA¹

1. CPGEI – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial,
UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Av. Sete de Setembro, 3165, Curitiba, PR – 80230-901
E-mails: vitorsantoss@gmail.com.br, erig@utfpr.edu.br

Abstract— This work is the implementation in FPGA (Field-programmable gate array) of an industrial plant simulator manufacturing process based on the use of PLC (Programmable Logic Controller). Thus, a production line prototype is constructed to obtain data to validate the proposed simulator. Thus, the purpose of using the simulator, is the aid in the development of PLC programs, whether for educational purposes, such as training or even for systems integration companies, performing work with this equipment, both on applications in early stage or optimization of existing systems. To analyse the results, the physical prototype data are compared with data from the model implemented in the FPGA, with the objective of equalization of values.

Keywords— Programmable Logic Controller, Simulation, FPGA, Model, Automation.

Resumo— Este trabalho consiste na implementação em FPGA (*Field-programmable gate array*) de um sistema de simulação de planta industrial fundamentada em processo de manufatura, com base na utilização de CLP (Controlador Lógico Programável). Dessa forma, um protótipo de linha de produção é construído para obtenção de dados que validem a proposta do simulador. Com isso, tem-se como objetivo no uso do simulador, o auxílio no desenvolvimento de programas de CLP, seja pelo ponto de vista didático, em treinamentos ou até mesmo para empresas de integração de sistemas, as quais executam trabalhos com esse equipamento, tanto em aplicações em fase inicial ou otimização em sistemas existentes. Para análise dos resultados, os dados obtidos com o protótipo físico são comparados com os dados recolhidos do modelo implementado na FPGA, tendo como objetivo a equiparação dos valores.

Palavras-chave— Controlador Lógico Programável, Simulação, FPGA, Modelo, Automação.

1 Introdução

Na última década, temas voltados para a automação têm tomado destaque dentro do setor industrial. Questões em torno da aplicação de controlador lógico programável (CLP) em processos contribuíram para que assuntos referentes à otimização de linhas de produção, sistemas de controle automático, segurança humana em máquinas, entre outros, se tornassem cada vez mais relevantes dentro do cenário citado (Moraes; Castrucci, 2007).

Dessa forma, estudos relacionados a métodos de desenvolvimento de programas de CLP, voltados para automação de processos contínuos ou discretos, se mostram com elevada aceitação entre os profissionais e estudantes da área (Rangel et al, 2012).

Com isso, a utilização de simuladores se torna relevante, pois atividades práticas são essenciais no processo de desenvolvimento (Queiroz et al, 2010).

Conforme o apontamento de Queiroz (2010), Carvalho (2010) também salienta a importância da utilização de ferramentas que auxiliem no desenvolvimento de atividades práticas, seja com o propósito de ensino em laboratórios de automação, como em bancada de testes em sistemas reais aplicados na indústria.

Tomando como foco as ferramentas de simulação, Martins (2013) apresenta em seu trabalho um laboratório remoto para estudo de automação, permi-

tindo práticas em torno de assuntos referentes à automação. Contudo, para a simulação de um sistema qualquer, ainda se faz necessário a estrutura, a qual compõem o laboratório.

Considerando sistemas maiores de automação, Santos et al (2013) apresenta em seu trabalho um método de simulação voltado para sistemas flexíveis de manufatura, assim como Pontes (2012) que também mostra uma pesquisa voltada para simulação de um processo manufatureiro.

Braghirolli (2009) reforça em seu trabalho o uso de simuladores, pois as empresas precisam se adaptar às mudanças do mercado e assim aplicar métodos de otimização, para suprir as crescentes variações sofridas. Com isso, entre as ferramentas utilizadas para tal melhoria de sistemas, sem a parada de máquina, têm-se os simuladores.

Considerando a utilização de sistemas fundamentados em *hardware* reconfigurável, Dufour et al (2006) modelam a dinâmica de um motor de imã permanente. Os autores justificam a utilização da simulação em *hardware* devido aos tempos muito baixos para amostragem, os quais inviabilizam a utilização de ferramentas computacionais convencionais.

Em função do previamente exposto, a proposta desse trabalho é apresentar um método de simulação, baseado em *hardware* reconfigurável e realizado em FPGA (*Field-programmable gate array*). Tal abordagem visa à melhoria na interpretação dos dados, a maior similaridade do modelo simulado com o siste-

ma real e a proposta de uma metodologia de representação de modelos de plantas que possam auxiliar o ensino e a pesquisa de processos de controle a eventos discretos, particularmente focados em controladores lógicos programáveis.

Inicialmente o artigo contempla questões sobre automação baseada em CLP e processo de manufatura, assim como alguns trabalhos em torno de simuladores para o ambiente fabril. Na sequência descreve a metodologia e o processo de manufatura utilizado, o protótipo da planta e os modelos implementados na FPGA. Finalmente são mostrados os resultados adquiridos e sugestões para trabalhos futuros.

2 Metodologia Aplicada

Resumidamente, a metodologia considera que sinais de entrada e saída de uma planta física didática, representando um sistema de manufatura, serão comparados com os sinais correlatos da modelagem implementada em FPGA. Com a análise desses dados, se dará a validação do modelo desenvolvido.

Para o desenvolvimento do simulador baseado em *hardware*, o trabalho é dividido em quatro atividades: protótipo físico, sistema de automação, modelos para os circuitos da FPGA e análise dos resultados.

Inicialmente é construído um protótipo de planta industrial, baseada em automação de manufatura para aquisição dos dados pertinentes para futura comparação com os dados obtidos com o do simulador.

Após a construção do protótipo, é desenvolvido o programa do CLP, um sistema de supervisão e um banco de dados para armazenamento das informações, referentes ao protótipo em funcionamento, assim como para o simulador. Este sistema de supervisão conectado ao banco de dados, permite a geração de gráficos comparativos entre as duas abordagens.

Na sequência, são desenvolvidos os modelos para a FPGA, os quais representam as etapas do processo de manufatura, construídos no protótipo físico.

Finalmente, após o recolhimento dos dados referentes ao processo físico o mesmo é substituído pelo simulador. A nova coleta de dados permite a análise dos resultados e por consequência a validação do simulador.

3 Protótipo Físico de Sistema de Manufatura

No desenvolvimento do protótipo físico, é utilizado um exemplo de uma esteira transportadora de peças e um posicionador que executa a ação de marcação da peça transportada.

Sensores de posição são utilizados no início da esteira e na máquina ferramenta. Esses sensores são responsáveis pelas ações de funcionamento da esteira e início do processo de marcação. Um sensor de pulsos rápidos (*encoder*) é utilizado no eixo do motor da

esteira, o qual gerencia a mudança de velocidade no transporte da mesma, como mostrado no diagrama da Figura 1.

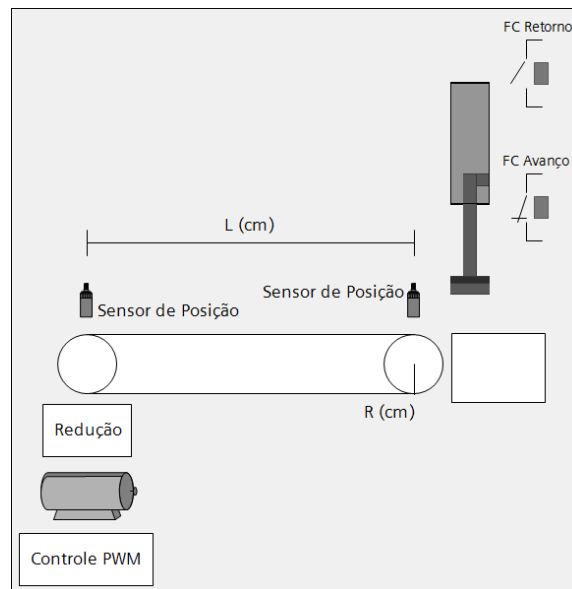


Figura 1. Diagrama esquemático do processo de manufatura

Quanto ao funcionamento do sistema, de forma resumida, ao pressionar o botão de início de processo, ao detectar uma peça no início da esteira, a mesma é ligada. Conforme a contagem de pulsos do *encoder*, a alteração de velocidade ocorre.

Com a chegada da peça na máquina ferramenta, a esteira é desligada e o posicionador de marcação é abaixado, sendo detectado o fim de curso, o mesmo é levantado e ao chegar até o fim de curso superior, é finalizado o processo de marcação. A Figura 2 mostra o protótipo físico utilizado.

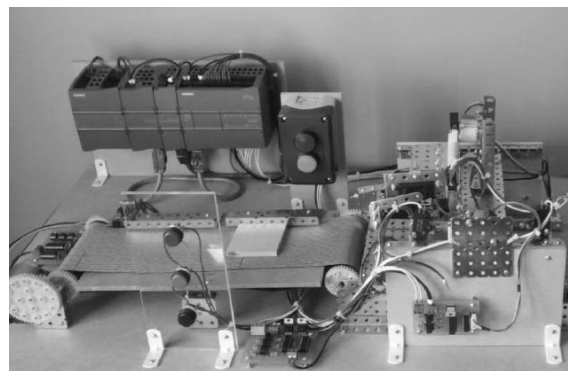


Figura 2. Protótipo físico de planta de manufatura

4 Sistema de Automação e Controle

O desenvolvimento do sistema de automação contempla a modelagem do processo de manufatura apresentado e assim o programa do CLP, a configuração das redes industriais, o sistema de supervisão e por fim a integração do mesmo com o banco de da-

dos, o qual é responsável pelo armazenamento das informações referentes ao processo real e simulado.

4.1 Programação do CLP

A programação do CLP é tratada com conceito de modelagem de sistema sequencial. Para isso, é aplicado o método do GRAFCET (*GRAphe Fonctionnel de Commande Etapes/Transition*), Funções Gráficas para Funções de Etapas e Transições, ferramenta gráfica de modelagem de sistemas sequenciais conforme IEC 60848 (Schumacher; Fay, 2011).

O sistema modelado é convertido para uma linguagem de programação, a linguagem *ladder*, conforme a IEC 61131-3.

Para a programação do CLP é utilizado o *software* TIA (*Totally Integrated Automation*) Portal na versão 13, da Empresa Siemens.

Com o sistema de automação programado, é possível o controle do sistema em modo automático e em modo manual. No entanto, para o processo em manual, somente botões e sinalizadores são suficientes para a simulação, já para o sistema em automático, variáveis da planta são necessárias, pois as ações de controle do CLP dependem diretamente dos estados lógicos dos sensores de campo, os quais retornam valores conforme a dinâmica do processo.

4.2 Redes de Comunicações

Como a planta utilizada tem características de um sistema de manufatura, a etapa de controle teve base nesse formato, assim são utilizados controladores comumente encontrados nesse tipo de automação.

O CLP S7-1200 da família Simatic da Empresa Siemens é utilizado. O conceito de sistema distribuído é aplicado com uma unidade remota ET200S - IM151-3 também da família Simatic. Para a comunicação entre o CLP e a unidade remota é utilizada a rede Profibus-DP, com isso é acoplado ao CLP um módulo mestre da rede Profibus-DP, o CM 1243-5.

Já para a conexão do CLP com o sistema de supervisão é utilizada uma rede em Ethernet com o *driver* de comunicação Mprot.

4.3 Sistema de Supervisão e Banco de Dados

Para o desenvolvimento do sistema de supervisão é utilizada a ferramenta Elipse E3 versão 4.3, da Empresa Elipse Software.

No ambiente de supervisão, um banco de dados é implementado para registro histórico das variáveis que compõe o sistema. O armazenamento das variáveis é realizado por meio de uma estampa de tempo definida na aplicação do sistema de supervisão. A partir dos dados registrados no banco de dados, gráficos referentes aos processos, são levantados para a análise de resultados posteriormente.

5 Modelos Aplicados na FPGA

Para a implementação do sistema na FPGA é utilizado o *kit* didático DE01 da Empresa Altera, a qual contém a FPGA EP2C20F484C7 da família *Cyclone* II. O *software* utilizado é o Quartus II versão 9.1.

Como o CLP e a remota de campo da Siemens, trabalham com tensões de 24 Vdc e a FPGA com tensões de 3,3 Vdc, um circuito auxiliar é necessário para integração, conforme mostra a Figura 3.

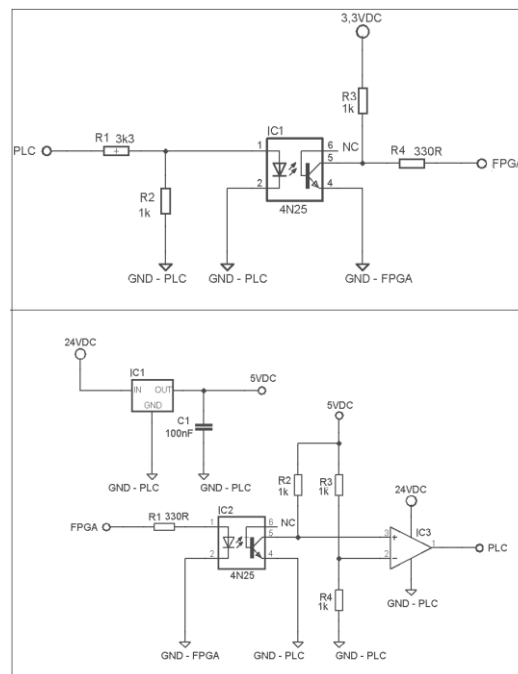


Figura 3. Hardware de conexão da FPGA com o CLP

Após a integração, tem-se a modelagem dos sistemas constituintes do processo de manufatura, ou seja, a esteira transportadora e o posicionador. Para a implementação do modelo da esteira, é considerado o diagrama mostrado na Figura 4.

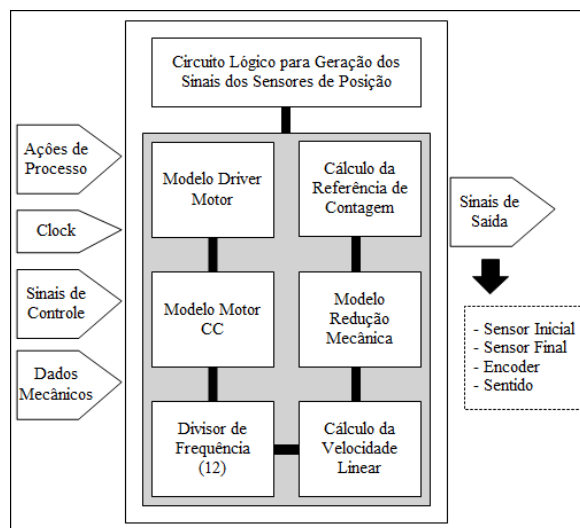


Figura 4. Diagrama da esteira transportadora

Para o funcionamento da esteira, tem-se um circuito de acionamento do motor, e esse acoplado em um sistema de redução mecânica. A saída da redução é conectada no eixo principal da esteira permitindo a movimentação da mesma. Dois sensores de posição são considerados, sendo um no início da esteira e o outro no final da mesma. Para o circuito de acionamento do motor, por meio de dois sinais de controle, os quais são obtidos por meio do CLP, é possível a movimentação com três velocidades distintas, assim como a parada da esteira.

Considerando o esquema simplificado da Figura 4, é apresentado o modelo para a esteira. A Figura 5 mostra o bloco de circuito com o modelo da FPGA utilizada para a esteira transportadora.

Quanto ao funcionamento do modelo, por meio dos controles BIT0, BIT1 e DIR, os quais são identificados como sinais de controle no diagrama da Figura 4, é possível o controle do motor, com a geração de um sinal de controle para o PWM (*Pulse Width Modulation*) e um sinal de direção de rotação, representado pelo bloco de acionamento do motor.

Esse bloco de acionamento é conectado em outro bloco, o qual contém o modelo de um motor de corrente contínua. Na sequência, o bloco do motor recebe a referência de PWM do bloco anterior e um pulso de *clock*, assim, tem-se um sinal pulsado representante do sinal de *encoder*, e um valor de frequência, que é a mesma do sinal pulsado.

Como o *encoder* utilizado no protótipo possui um disco com resolução de doze pulsos, os valores obtidos com o bloco do motor são divididos por essa constante, para aproximação com o sistema real.

Com o valor de frequência apresentado pelo bloco do motor, já normalizada conforme o *encoder* real é calculada a velocidade linear da primeira engrenagem utilizada.

Com a velocidade linear da primeira engrenagem é possível o cálculo da velocidade linear de saída da redução, a qual é responsável pela movimentação da esteira.

Com base nos blocos apresentados e circuitos auxiliares para os sensores de posição tem-se o modelo da esteira transportadora, representado pelo bloco mostrado na Figura 5.

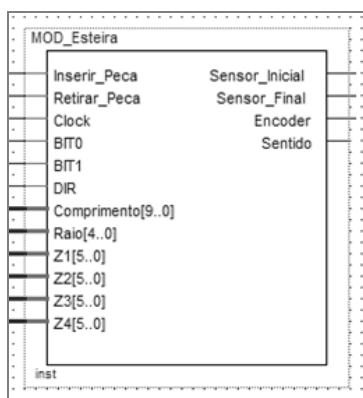


Figura 5. Modelo em FPGA da esteira transportadora

Na sequência da apresentação dos modelos para simulação, com o modelo da esteira finalizado, é implementado o modelo em FPGA do posicionador.

Para o desenvolvimento do mesmo, toma-se como base o diagrama mostrado na Figura 6.

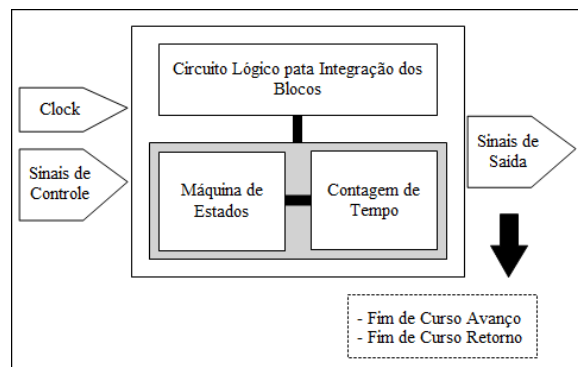


Figura 6. Diagrama do posicionador

O sistema de posicionamento pode assumir duas posições, avançado e recuado, as quais são monitoradas por dois sensores de fim de curso. Como o sistema executa uma ação sequencial de eventos, é utilizada a ferramenta de máquina de estados para sua modelagem, conforme o diagrama da Figura 6.

Por meio da máquina de estados implementada e de alguns circuitos auxiliares, tem-se o bloco representante do modelo em FPGA no posicionador, o qual é mostrado na Figura 7.

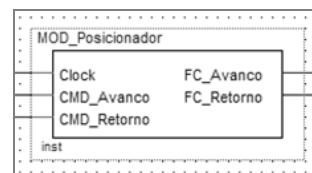


Figura 7. Modelo em FPGA do posicionador

Por meio dos modelos implementados em FPGA, é possível a simulação do programa desenvolvido para o CLP.

6 Análise dos Resultados

Com o sistema em funcionamento, o supervisor monitora o CLP e esse, por sua vez controla o processo. Inicialmente o CLP é conectado à planta física e depois ao modelo da FPGA para coleta dos dados.

São registrados três processos para cada sistema, físico e modelado. Como o volume de dados é elevado, a análise por meio de tabelas é deficiente, ficando a visualização mais eficiente com métodos gráficos das médias dos valores recolhidos. Inicialmente os dados registrados são para a esteira física.

É possível verificar nos gráficos as seguintes ações: comando de partida do processo, detecções dos sensores de posição, acionamento do motor e contagem do *encoder*, conforme a Figura 8.

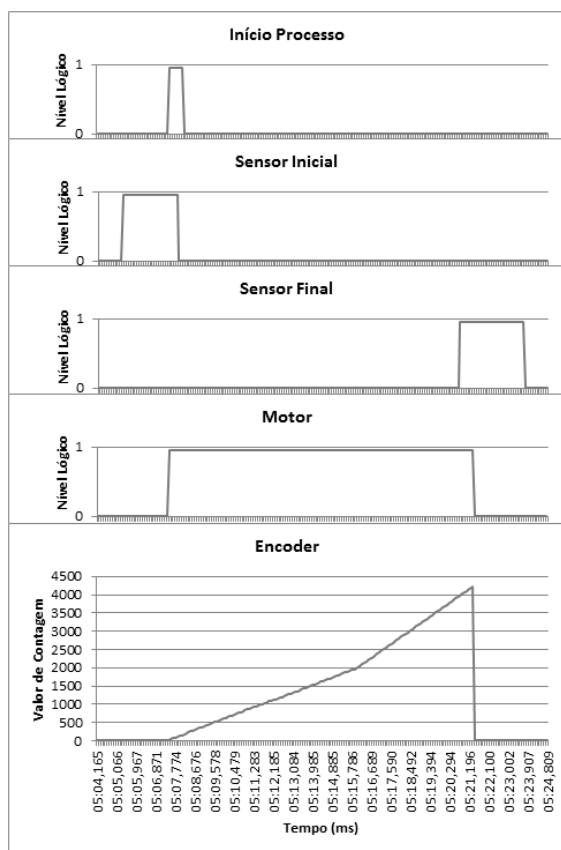


Figura 8. Relação dos acionamentos da esteira para o sistema físico

Considerando as variáveis citadas, as mesmas são monitoradas por meio de níveis lógicos onde o nível lógico "0" indica desligado e "1" ligado. Para o *encoder* é monitorado o valor de contagem.

Todas as informações dos gráficos estão dispostas em uma estampa de tempo, determinada pelo eixo horizontal. Essa estampa de tempo é definida pelo sistema de supervisão.

Depois de coletadas as informações referentes ao sistema físico, são coletadas as informações referentes à planta modelada na FPGA, as quais são mostradas na Figura 9.

Com uma análise comparativa entre os resultados, do processo físico e simulado, é possível verificar uma elevada semelhança nos acionamentos do comando de partida do processo, sensores de posição e motor, assim como no tempo total de execução do processo.

Para o *encoder*, uma pequena diferença é encontrada, pois o sistema físico apresenta um valor mais baixo. Na Figura 8 verifica-se que o valor de contagem ultrapassa a marca de 4000 pulsos, já na Figura 9 verifica-se um valor alcançando a marca de 4500 pulsos. Essa pequena diferença é decorrente de pequenas imperfeições do sistema físico.

Na sequência da exposição dos resultados têm-se os resultados do posicionador. Da mesma forma que na esteira, são recolhidos dados referentes às médias de acionamentos de três processos, e assim plotados os gráficos necessários.

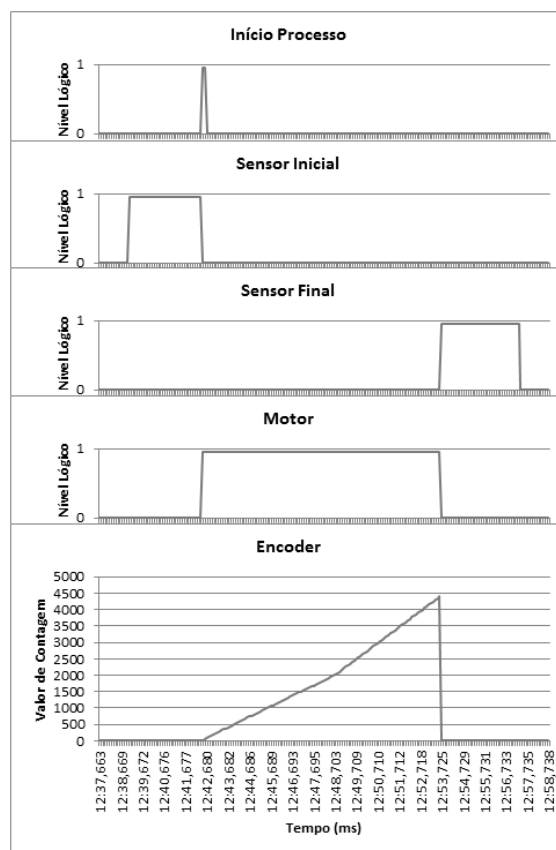


Figura 9. Relação dos acionamentos da esteira para o modelo da FPGA

Os resultados são comandos de avanço e retorno e dos fins de curso de monitoração do posicionador avançado e recuado. A Figura 10 mostra os resultados obtidos com o posicionador do sistema físico.

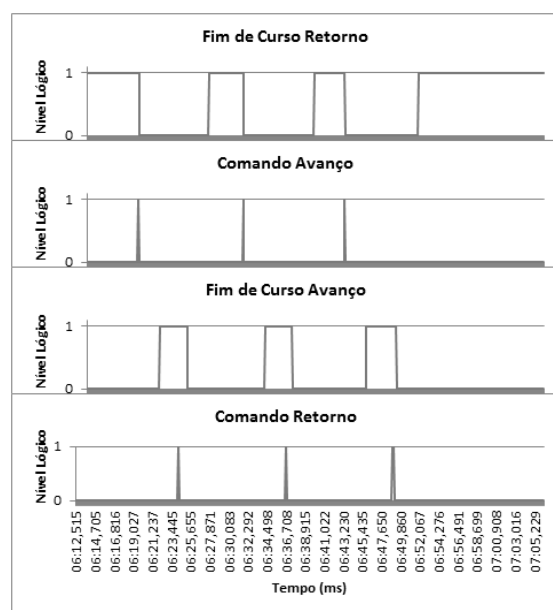


Figura 10. Relação dos acionamentos do posicionador para o sistema físico

Depois de recolhidos os dados referentes ao sistema físico, tem-se os resultados referentes ao modelo da FPGA, conforme mostrado na Figura 11.

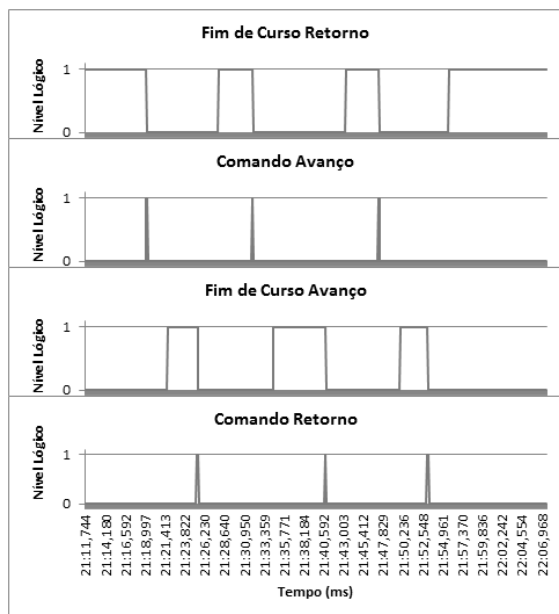


Figura 11. Relação dos acionamentos do posicionador para o modelo da FPGA

Com a análise dos gráficos, é possível verificar uma elevada correlação nos acionamentos dos mesmos, inclusive nos tempos para execução dos processos, já que para o posicionador, são executadas ações repetidas de avanço e retorno.

7 Conclusão

Este trabalho apresenta um simulador fundamentado em *hardware* para simulação de processo de manufatura, com base em aplicação de CLP. Considerando a utilização em treinamentos, ou em empresas de integração de sistemas, esse simulador pode contribuir significativamente.

Em situações reais em obras, o desenvolvimento da automação muitas vezes acontece em estágios finais, devido à necessidade da infraestrutura física. Por meio de um sistema de simulação, programas de CLP podem ser desenvolvidos em etapas iniciais.

Questões relacionadas à otimização de sistemas também podem ser compensados, pois muitas vezes a parada de máquina ou processo inviabiliza os testes em torno de tal assunto, o que não acontece com o uso de ferramentas de simulação.

Em relação à análise dos resultados, considerando as sequências lógicas de acionamentos conforme a necessidade de um processo discreto é possível verificar uma elevada eficiência do sistema. Apesar de, nos pulsos do *encoder* apresentar uma pequena diferença, a mesma pode ser tratada pelas deficiências físicas do protótipo mecânico. No entanto, parâmetros de entradas de dados podem ser utilizados nos blocos da FPGA, para algum tipo de compensação.

Como trabalhos futuros, outros formatos de plantas podem ser utilizados, como planta de processo contínuo, considerando variáveis de temperatura, vazão, nível, pressão, entre outras. Dispositivos em

redes industriais, em sistemas contínuos ou discretos também podem ser considerados para implementações futuras.

No geral, conclui-se que o trabalho cumpriu os requisitos de simulação de processo industrial com base em CLP, e permite alterações em nível de novos modelos, conforme outras necessidades de aplicação.

Referências Bibliográficas

- Braghirolli, L. F., (2009). Estudo da Linearidade da Produção em Células de Manufatura Através de Simulação a Eventos Discretos. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção) Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Dufour, C., Abourida, S., Bélanger, J., Lapointe, V., (2006). Real-Time Simulation of Permanent Magnet Motor Drive on FPGA Chip for High-Bandwidth Controller Tests and Validation. 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, p. 4581-4586.
- Carvalho, R. T., Baldioti, H. R., Silva, N. L., Gomes, F. J., (2010). Módulo Laboratorial para Educação em Controle, em Tempo Real, Baseado em Linux/RTAI. Congresso Brasileiro de Automática.
- Martins, L. M. S., (2013). Projecto dum Laboratório Remoto para Automação de Processos Industriais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Moraes, C. C. de, Castrucci, P. de L., (2007). Engenharia de Automação Industrial. Rio de Janeiro: LTC Editora.
- Pontes, H. L. J., (2012). Desenvolvimento de um Ambiente para Simulação da Manufatura baseado em *Features* e Realidade Virtual. Tese (Doutorado em Engenharia) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Queiroz, F. P., Freitas, L. P., Gawa, V. A., Gomes, F. J., (2010). Desenvolvimento de uma Plataforma HILS para Educação em Controle de Processos Baseada em FOSS. Congresso Brasileiro de Automática.
- Rangel, J. J. de A., Soares, M. B., Souza, A. A. de, (2012). Modelos de Simulação a Eventos Discretos como Ambiente de Treinamento em Controle Digital. Revista Vertices.
- Santos, J. K. S., Braga, P. P. B., Vieira, L. de S. D. de P., Pena, P. N., (2013). Simulação a Eventos de Sistemas Discretos Sob o Controle Supervisório Modular Local. XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente.
- Schumacher, F., Fay, A., (2011). Requirements and Obstacles for the Transformation of GRAFCET Specifications Into IEC 61131-3 PLC Programs. IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), p. 1-4.