

CONTROLE DE PLACA DIDÁTICA COM SIMULTANEIDADE DE PROCESSOS UTILIZANDO FPGA¹

Marcelo Henry Kato da FONSECA²

Graduando em Engenharia Eletrônica
IFSP/Câmpus São Paulo

Raniely da Silva MIRANDA³

Graduanda em Engenharia Eletrônica
IFSP/Câmpus São Paulo

Thiago Henrique dos Santos LIMA⁴

Graduando em Engenharia Eletrônica
IFSP/Câmpus São Paulo

Ricardo PIRES⁵

Doutor em Sistemas Automáticos e
Microeletrônicos/Université Montpellier II
Docente do Departamento de Elétrica
IFSP/Câmpus São Paulo

RESUMO

O presente artigo aborda o desenvolvimento por meio de uma plataforma online colaborativa de uma placa didática que faz a conexão entre uma planta industrial e um controlador FPGA Cyclone V também confeccionado. Neste trabalho é apresentada a comparação de tempos necessários para a realização de um processo industrial pelos métodos tradicionais sequenciais utilizando um controlador lógico programável e o controle por meio de FPGA com técnicas de *pipelining* realizando processos de forma simultânea, demonstrando então um grande ganho em otimização de tempo ao adotarem-se processos simultâneos, além das vantagens do projeto para o ensino de matérias relacionadas.

Palavras-chave: FPGA; VHDL; Pipelining; Controle; Planta-industrial.

¹ Artigo resultante de Trabalho de Conclusão de Curso. Orientador Prof. Dr. Ricardo Pires.

² Endereço eletrônico: marcelohkf@gmail.com

³ Endereço eletrônico: raniely.dasilvamiranda@gmail.com

⁴ Endereço eletrônico: lima0383@gmail.com

⁵ Endereço eletrônico: ricardo_pires@ifsp.edu.br

Introdução

Existe um constante processo de evolução encontrada na indústria, onde cada vez mais se procuram métodos e ferramentas que possam otimizar processos e reduzir custos. No início do século XX, diferentes sistemas visavam aproveitar da melhor forma a mão de obra e dos equipamentos para atingir o máximo possível de produção, sendo apontados como grandes fatores de mudança, os sistemas de Frederick Winslow Taylor, Henry Ford e Taiichi Ohno (CHIAVENATO, 2003).

O chamado Taylorismo ou Administração Científica deu-se pela criação de um método focado nas tarefas, onde a empresa é tratada cientificamente, sendo que cada funcionário não deveria deter conhecimento do todo e sim da especialização e realização de sua tarefa ou ocupação no menor tempo possível. O conhecimento (amplo) da linha de produção seria exclusividade do responsável que também deveria controlar o tempo de cada atividade (LITTLER, 1978).

Já o Fordismo estava focado na organização do trabalho, onde se priorizava a criação de linhas de produção, em que cada operário teria sua posição, realizando apenas um tipo de trabalho, enquanto o produto final se deslocava através desta linha pela fábrica, sendo o ritmo ditado mais pela velocidade com que as máquinas conduziam os processos, do que a mão de obra. Assim como no Taylorismo, o operário detinha apenas conhecimento de uma etapa do processo, realizando repetidas vezes a mesma tarefa (GRAMSCI, 1950).

Por volta de 1960, despontou-se o Toyotismo, criado no Japão, e que tinha como foco a produção de mercadorias. Diferente do encontrado anteriormente, o Toyotismo tem como fundamento a mão de obra qualificada, onde o trabalhador tem capacitação para trabalhar em diversos processos da produção através de constantes treinamentos, além de ter como objetivo maximizar lucros, evitar desperdícios e se ajustar de acordo com a demanda, utilizando-se de pesquisas de mercado, atualmente, ciência de dados para adaptar o produto às necessidades do mercado (KNUTH; JURGENS; NIALSCH, 1985).

Portanto, produzir só o que for preciso, no tempo em que for preciso e na quantidade precisa (*Just in Time*), mas ainda assim manter um alto padrão de qualidade do produto. É possível traçar uma analogia com os maiores programas de *trainee*

difundidos atualmente, onde existe o *Job Rotation* proporcionando o conhecimento do empregado sobre todos os processos de produção, permitindo que atue em qualquer um deles (PERIARD, 2012).

Todos estes métodos contribuíram com suas partes para o sistema industrial que podemos observar hoje, que carece de inovações constantes para atender demandas nunca antes esperadas em um ambiente imediatista e da forma mais lucrativa possível.

Aponta-se então como futuro a chegada de novas tecnologias como o 5G, que enfrenta barreiras políticas e burocráticas, somada as cada vez mais utilizadas inteligência artificial e *big data*, que poderão levar a uma nova revolução industrial, em que tudo está conectado e a posse de dados comportamentais será cada vez mais importante.

Com base nos conceitos básicos de administração, é possível entender melhor a técnica de *Pipelining*. O *Pipelining* consiste em um método muito utilizado na programação para aumentar desempenho do *software*, levado à indústria, ele tem a função de maximizar a produção em linhas sequenciais, sendo assim, consiste em pegar uma tarefa que seria executada sequencialmente e dividi-la em tarefas que podem ser executadas individualmente e simultaneamente (PIPELINING, 2020).

Como exemplo, podemos pensar em uma indústria simplificada, que produz parafusos de alumínio. Ela executa a função normalmente da seguinte forma: primeiro a fábrica produz o tarugo alumínio, na sequência, com o tarugo é feito o processo de usinagem da peça de forma que esta fique no formato de um parafuso e por fim é dado um banho na peça com resinas que a protegem.

Sem o processo de *pipelining*:

- Produção do tarugo de alumínio: 1h
- Usinagem da peça: 1h
- Banho da peça: 1h

Ou seja, para que um lote de parafusos fique pronto através deste processo, a empresa leva 3h. Para que dois lotes fiquem prontos, levaria 6h.

Para realizar o processo de *pipelining*, seria adequada a criação de um ambiente que dividisse as etapas a serem realizadas individualmente. Sendo assim, enquanto o tarugo de alumínio estivesse sendo preparado, outro lote estaria sendo usinado, e ao

mesmo tempo um terceiro já estaria recebendo o banho para finalização, conforme o exemplo na Figura 1.

Figura 1: Comparação de processos utilizando o *Pipelining*

Sem Pipelining:

Peças (unidades)			1			2			3
Produção Tarugo									
Usinagem da peça									
Banho da peça									
Tempo (h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Com Pipelining:

Peças (unidades)		1	2	3	
Produção Tarugo					
Usinagem da peça					
Banho da peça					
Tempo (h)	1	2	3	4	5

Fonte: Autores

Ou seja, em vez de o processo levar 3 em 3h, teríamos a partir da terceira hora, uma capacidade de um lote de parafusos de alumínio sendo produzidos a cada 1h. Representando um ganho muito grande, pegando a 24^a hora da fábrica, onde pelo processo comum haveria oito lotes de parafusos enquanto que utilizando o método de *pipelining* teríamos 22 lotes, 275% a mais que a produção comum, com um crescimento maior a cada hora/trabalho da fábrica.

É importante balancear os estágios do *pipeline*, nesse exemplo, todas as etapas tinham 1h, caso os estágios tivessem durações diferentes os ganhos poderiam ser menores.

Objetivo

Este trabalho tem como objetivo a aplicação de conceitos da administração geral para a otimização da produtividade aplicada a uma planta industrial reduzida, utilizando-se de técnicas como o *pipelining* com um controlador que possua as ferramentas necessárias para a execução, bem como a construção de placas didáticas que possibilitem uma interface de conexão com a planta.

Fundamentação teórica

Controladores Lógicos Programáveis

CLPs (Controladores Lógicos Programáveis) são dispositivos eletrônico-digitais amplamente utilizados em processos industriais para realização de tarefas de controle, projetados de modo a ter várias entradas e saídas, suportar níveis altos de temperatura, proteção contra ruídos elétricos, vibração e impacto (PETRUZELLA, 2017).

Ladder foi a primeira linguagem de programação a ser utilizada em CLPs. Surgiu com a ideia de substituir o modo de controle dos sistemas com relés lógicos. Um diagrama é composto por duas linhas dispostas verticalmente que correspondem aos polos negativos e positivos de uma bateria, em que são desenhados ramais horizontais com chaves, que podem ser normalmente abertas ou fechadas e que representam os estados das entradas dos CLPs, caracterizando-o como um sistema sequencial, pois a ação tomada depende do estado atual e da entrada naquele instante. É importante frisarmos que enquanto cada estado do ciclo é executado, os demais ficam inativados (SILVA, 2010).

Arranjo de Portas Programáveis em Campo (*Field Programmable Gate Array*)

É um dispositivo eletrônico lógico programável encapsulado num único chip, que possui um enorme arranjo de células lógicas ou blocos que podem ser programados e configurados para simulação e comportamento de qualquer circuito eletrônico digital. É composto por três elementos: CLBs, IOBs e Switch Matrix (COSTA, 2014).

IOBs (Blocos de Entradas e Saídas) realizam a interface entre os blocos internos da FPGA e pinagens externas. Os CLBs (blocos de lógicas configuráveis) são formados por elementos combinacionais LUT (*look-up tables*) que servem para implementar função de portas lógicas. Uma célula possui capacidade de armazenamento de apenas um valor lógico 0 ou 1, atuando assim, como uma memória pré - programada. As linhas de endereço são as entradas do bloco e a saída fornece o valor da função lógica. Os CLBs também são compostos de *flip-flops* que podem ser configurados por programação. Switch Matrix (Matriz de chaveamento) bidimensional é um conjunto de chaves que são responsáveis pela interconexão, são dispostas como canais que roteiam

horizontalmente e verticalmente as linhas e colunas dos arranjos. (OLIVEIRA, AZEVEDO, GALVÃO, 2011, p.10; COSTA, 2004, p.7).

O FPGA é um dispositivo amplamente empregado na indústria, pois apresenta um bom desempenho e possibilita a execução de etapas de modo paralelo. (PRADO, 2014).

VHDL ou VHSIC (Linguagem de Descrição de Hardware de Circuitos Integrados de Alta Velocidade) foi criada pelo Departamento de Defesa dos EUA e padronizada pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE). É utilizada para realizar descrição e simulação de sistemas digitais, incluindo os FPGAs, com vários níveis de complexidade, detalhando comportamento, fluxo de dados e estrutura. Os dispositivos de Hardware têm sua operação baseada em sistemas paralelos, o que impossibilita uma linguagem de programação comum modelar uma operação de Hardware, pois seguem uma lógica sequencial (CODÁ, 2013).

Sensores

Sensores são dispositivos amplamente empregados na indústria, pois apresentam a capacidade de detectar grandezas físicas e transformá-las em sinais elétricos, por exemplo, são projetados para suportar ambientes hostis encontrados em chão de fábrica.

Existem sensores de proximidade que são acionados de acordo com a presença de algum objeto, podem ser do tipo indutivo ou capacitivo. Indutivos são acionados com a presença de objetos metálicos, ignorando outros tipos de materiais. Capacitivos são utilizados para detectar peças isolantes. Eles são similares aos indutivos, a diferença está relacionada ao tipo de campo produzido de acordo com a proximidade da peça. Capacitivos geram campo eletrostático e indutivos produzem campo eletromagnético (MAZZAROPPI, 2007).

Um sensor fotoelétrico faz a detecção de objetos através de feixes de luz que são emitidos e que retornam para um receptor. Existem três tipos: transmissível, retroreflexivo e retrodifuso (SILVEIRA, 2017).

Um sensor magnético identifica a presença de um objeto ferroso de acordo com a corrente induzida gerada na bobina do enrolamento (WENDLING, 2010).

Motor DC

O motor DC (Corrente Contínua) realiza a conversão de energia elétrica em mecânica para aplicação como motor ou converte energia mecânica em elétrica quando atua como gerador. É composto por dois elementos: estator e rotor. O rotor corresponde à parte móvel do motor, é feito de material ferromagnético e armadura de alta potência, possui também um anel comutador que é responsável pela inversão do sentido da corrente, formado por um material condutor e material isolante localizados entre as bobinas do rotor e escovas. O estator é a parte estática, feito de material ferromagnético e armadura de baixa potência (HONDA, 2016).

Sistema de Pesagem

São utilizadas células de carga compostas de quatro extensômetros, que são capazes de medir deformações de corpos através da alteração da resistência elétrica. Eles estão interligados por meio da ponte de Wheatstone. O desbalanceamento da ponte é proporcional à força aplicada sobre a célula, a deformação gera uma saída de tensão em microvolts (CARER, CARRARO, 2010).

Sistema Pneumático

Utiliza-se o ar comprimido para acionamento e comando devido as suas características físicas de compressibilidade, difusibilidade, elasticidade e expansibilidade (MEIXNER, KOBLER, 1977).

O sistema de ar comprimido possui algumas etapas: filtragem, compressão, refrigeração, armazenamento, secagem, distribuição e ponto de uso.

Os elementos de sinais atuam diretamente no controle do sistema, são eles: botões, sensores de fim de curso, sensores de proximidade (*Reed Switch*) e válvulas solenoides (Ação Simples ou Dupla Ação). Válvulas pneumáticas servem para realizar o controle das intensidades de vazão ou pressão, impor bloqueios ou orientar fluxos de ar (GOMES, 2020).

Os atuadores são instrumentos que realizam a conversão de um comando elétrico em um posicionamento mecânico, podem ser do tipo linear ou rotativo (CYRINO, 2018).

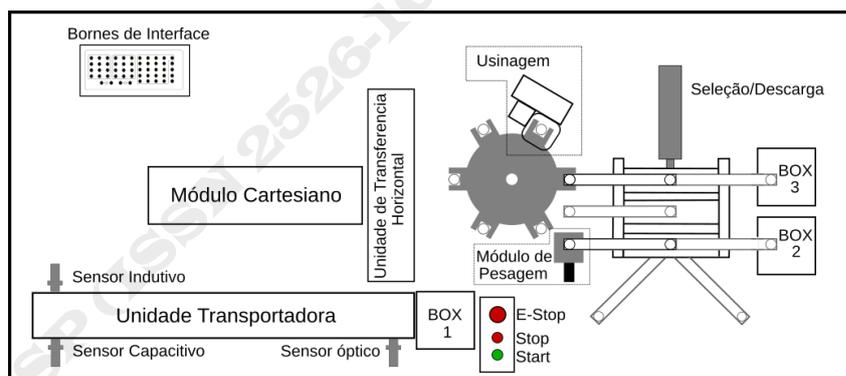
Descrição da planta CIM B

A planta didática fabricada pela De Lorenzo e SchoolTech foi disponibilizada pelo IFSP-SP para utilização no Laboratório de Controlador Lógico Programável.

O sistema CIM (Manufatura Integrada por computador) está relacionado à comunicação entre vários departamentos com o uso de Tecnologias da Informação (AZEVEDO, 2013).

A planta, conforme ilustrado na figura 2, é composta por unidades de transporte, transferência horizontal e manipulador cartesiano, mesa rotativa, módulos de usinagem, seleção e pesagem, braço para descarga e interruptores.

Figura 2: Arquitetura CIM B



Fonte: Manual CIM-B p.29

A unidade transportadora possui módulos criados para movimentação de materiais entre as estações da linha de produção. A esteira é um mecanismo de transferência linear que realiza o deslocamento da peça de uma extremidade à outra. A rolagem é feita sobre duas polias, o acionamento é feito por um motor 24VDC e há três sensores, um indutivo que detecta objetos metálicos, um capacitivo que identifica objetos em andamento e óptico que verifica objetos parados. Caso o material transportado seja plástico, este é depositado na primeira caixa localizada ao final da esteira.

A unidade de transferência horizontal é eletropneumática. Seu controle é feito por um atuador que retira a peça da esteira e a transporta até o módulo cartesiano.

O módulo cartesiano é controlado por um sistema eletropneumático, composto por um braço vertical, braço horizontal e garra que realiza a retirada da peça da unidade de transferência (esteira) para ser depositada na mesa giratória.

A mesa giratória com seis estações é movimentada por um motor DC acoplado a uma caixa de engrenagens que reduz a velocidade. Cada posição tem a mesma área, ângulo de 60 ° e pino indicador que ativa o sensor indutivo acoplado à base, além de enviar um sinal para o controlador que conta o número de indexações e faz o comando dos movimentos angulares até a etapa de perfuração.

Na etapa de usinagem (perfuração), utiliza-se uma furadeira a ar comprimido. Após o posicionamento da peça na mesa rotativa, o controlador a movimenta até a posição da furadeira, dá o comando para fixação do objeto e motor, realiza o movimento vertical do dispositivo de perfuração que executa a sua função e retorna à posição inicial ao finalizar. A mesa giratória rotaciona a peça até a posição do braço para descarga.

O braço é composto por atuador linear de dupla ação (levanta o braço), atuador rotativo (rotaciona o braço) e uma garra de dupla ação (segura a peça), dois sensores de fim de curso que detectam se a posição está estendida ou retraída e dois sensores de indução que verificam se a garra está na mesa giratória ou balança. A peça após a perfuração é retirada da mesa giratória e levada até o módulo de pesagem.

A etapa de pesagem é composta por células de carga e interface. Um valor de resistência é gerado de acordo com o peso da peça. A interface do circuito recebe o valor, faz o processamento e o envia para o controlador, que determina o peso do objeto. Com essa informação, é possível definir se a peça é reprovada ou não.

A seleção é constituída de um atuador linear que leva a peça para a caixa de aprovação ou reprovação, de acordo com o resultado da pesagem.

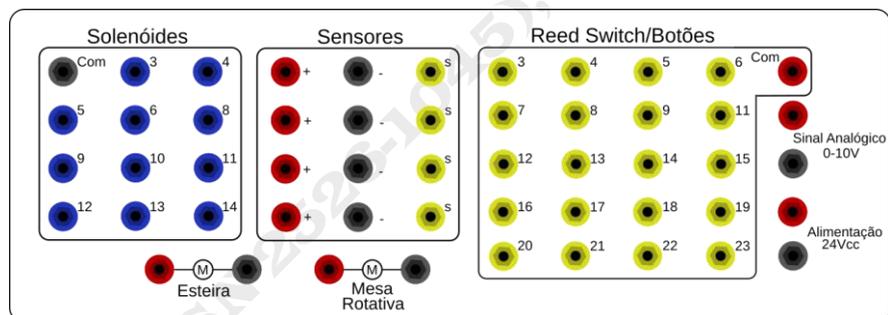
O sistema de interruptores é composto por quatro chaves: Início do Ciclo (verde), Fim do Ciclo (vermelho), E-Stop (Elétrico) e E-Stop (Pneumático). A chave verde é configurada como início da execução do programa e a vermelha como interrupção. O E-Stop (Elétrico) quando acionado, faz o bloqueio e corte da entrada de energia ao painel de controle, o botão E-Stop (Pneumático) quando pressionado, realiza o bloqueio do fluxo de ar que alimenta os atuadores.

Projeto e construção do hardware

A pesquisa para elaboração do projeto foi orientada no sentido de tornar a experiência com a planta didática a mais simples possível, de modo que o aluno que vier a usá-la não se preocupe com a interligação entre seus diversos componentes e o controlador, permitindo que o foco seja transmitir conceitos básicos de programação em FPGA's para além do acionamento de led's dos kits de desenvolvimento tradicionais.

Para oferecer essa simplicidade, a solução encontrada foi elaborar uma placa de interface que se conecta diretamente com o conjunto de bornes disponíveis na planta (Figura 3), tornando a ligação planta/controlador basicamente “*Plug and Play*”. Em relação às adaptações para que os encaixes da placa fossem perfeitos, foram necessárias várias medições, devido a não padronização do distanciamento dos contatos.

Figura 3: Bornes Planta



Fonte: Autores

Para condicionar os sinais de entrada relativos aos sensores indutivos, capacitivos, *reed switches* e botões, a solução encontrada foi um digital input receiver (ISO1211) que tem a vantagem de oferecer as características necessárias para a interface de entrada dos dados de modo integrado, ao contrário do arranjo tradicional com optoacoplador. No caso do sinal analógico da célula de carga, apenas um comparador foi necessário para diferenciar os dois tipos de materiais processados pela planta. Vale ressaltar que estas soluções têm como vantagem adicional ocupar pouco espaço na placa, uma vez que serão dezenas de sinais de entrada. Na saída de potência, no caso do solenoide, foi utilizado um circuito integrado (DRV120) que proporciona a parametrização da corrente de saída, tornando o circuito mais eficiente (já que permite a diminuição da corrente após a movimentação do êmbolo) e também diminuindo a área

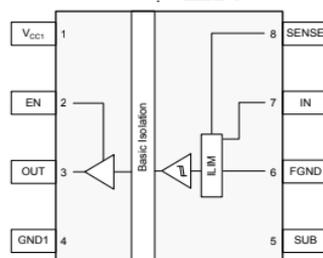
ocupada. Já para a saída de acionamento dos motores, o sinal vai para o optoacoplador que, por sua vez, aciona o transistor de potência que fornece a corrente necessária para o motor.

Para o desenvolvimento do projeto foi utilizado o aplicativo EasyEDA que é uma plataforma online e gratuita utilizada para desenhos de diagramas esquemáticos e placas de circuito impresso (SILVEIRA, 2019).

Sinais de entrada

O circuito integrado ISO1211, fabricado pela Texas Instruments, tem como características a isolação entre os elementos externos e as entradas, a ampla faixa de valores (9V - 300V) de entrada, saída de 3,3V (que também permite a ligação de um led de sinalização) e proteção contra efeito *bouncing*.

Figura 4: Diagrama funcional ISO1211



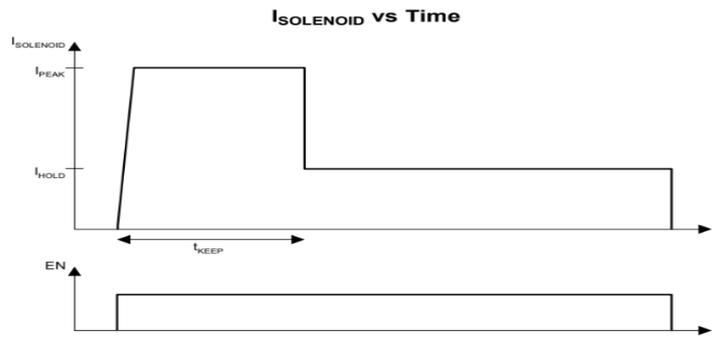
Fonte: *Datasheet* ISO1211 p.4

A figura 4 representa o diagrama funcional do ISO1211, onde a tensão de alimentação (V_{cc1}) determina a tensão de saída (OUT). Os resistores ligados aos pinos 7 e 8 irão limitar a corrente drenada do sensor e determinar os valores limite da entrada para que ocorra uma transição na saída, que também pode ser colocada em um estado de alta impedância, necessário quando a saída está conectada a um barramento, através do pino *enable* (EN).

Acionamento Solenoides

O driver para acionamento da solenoide (DRV120 Texas Instruments) permite a parametrização dos valores de corrente de pico (I_{peak}), do tempo em que a corrente permanecerá neste valor (t_{keep}) e da corrente quando o êmbolo termina a movimentação (I_{hold}) como mostra a figura 5.

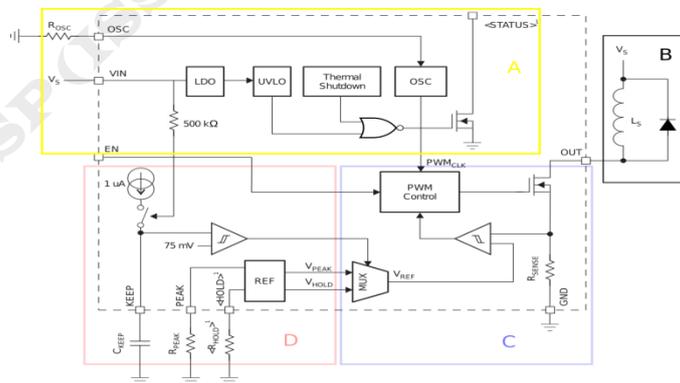
Figura 5: Curva de funcionamento parametrizada



Fonte: Datasheet DRV120 p.8

A corrente é regulada através da modulação por largura de pulso (PWM) integrada a um transistor (MOSFET), onde o PWM irá determinar o nível de saturação do MOSFET e com isso a corrente na solenoide.

Figura 6: Diagrama funcional DRV120



Fonte: Datasheet DRV120 p.7

A figura 6 apresenta o diagrama funcional do circuito integrado, onde na região A estão a tensão de alimentação (V_s de 6V a 28V), as proteções contra sub-tensão ou térmica que permitem a identificação de eventuais falhas através do pino STATUS e o

oscilador para o sinal de clock do PWM cuja frequência de oscilação é determinada pelo resistor ligado ao pino OSC (frequências de 15 a 25 kHz).

Na região B, estão a solenoide e o diodo de proteção. Vale ressaltar que a solenoide é ligada diretamente a tensão de alimentação, portanto o chaveamento executado pelo driver é feito entre a ligação do solenoide e o terra (*Low-side driver*).

Na região C, é feito o controle da corrente através da modulação da largura de pulso possibilitada pela comparação entre tensão de referência (V_{ref}) e a do resistor R_{sense} (tensão de realimentação). Com isso, à medida que a tensão de realimentação ultrapassa o valor de referência a tensão no PWM vai pra zero e a tensão *Gate Source* (VGS) do MOSFET começa a diminuir junto com a corrente dreno *Source* I_{DS} , ou seja, a corrente na solenoide quando fica abaixo do valor de referência, ocorre o processo inverso (PWM vai pra um, VGS e I_{DS} aumentam), sendo assim, possibilita o controle da corrente na solenoide em função das tensões de referência.

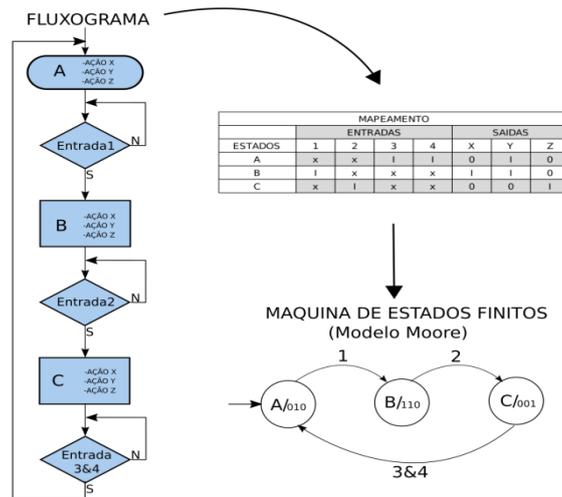
Na região D, são definidos os valores de referência das correntes na solenoide através de resistores (R_{PEAK} e R_{HOLD}) e o tempo em que a corrente permanecerá no pico definido através do tempo de carga do capacitor (CKEEP) alimentado por uma fonte de corrente ($1 \mu A$), portanto, em função do tempo que a tensão demora para ultrapassar o valor de 75 mV o comparador muda a seleção do multiplexador (MUX) da tensão de pico (V_{PEAK}) para a tensão do fim da movimentação do êmbolo (V_{HOLD}).

Programação

Para o carregamento e programação do software, foi utilizado o Quartus, um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) utilizado para projetos de sistemas digitais para FPGA da linha Altera, da Intel (LIMA, 2015).

Através dos fluxogramas que descrevem as etapas de funcionamento da planta, disponíveis no material didático, foi possível realizar o mapeamento dos processos com o objetivo de programar em máquina de estados finitos (MEF) no “*state machine editor*” do software Quartus. A Figura 7 exemplifica a conversão de fluxograma para MEF.

Figura 7: Exemplo genérico do procedimento inicial de programação

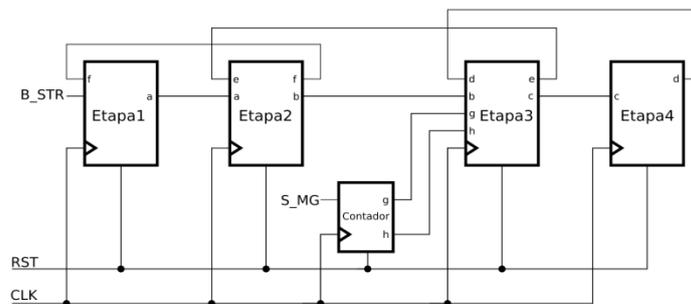


Fonte: Autores

Na figura 7, temos o fluxograma onde os processos (A, B e C) são análogos aos estados, assim como suas respectivas ações (x, y e z) às saídas acionadas em cada estado. Nas entradas (1, 2, 3 e 4) dos blocos de decisão do fluxograma estão as entradas necessárias para acessar ao próximo estado da MEF correspondente.

Uma vez feita a conversão para MEF das quatro etapas descritas, no material didático, a finalização da programação consistiu em integrá-las, tendo em mente, que cada uma será executada de modo sequencial e com a possibilidade de execução simultânea de mais de uma etapa a cada pulso de *clock*. A figura 8 ilustra como se deu a integração.

Figura 8: Integração das etapas



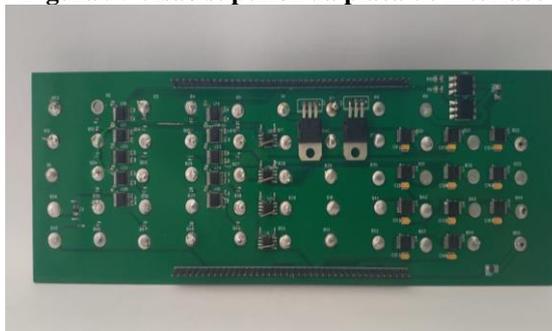
Fonte: Autores

Na figura 8, é possível observar um diagrama simplificado onde variáveis internas (a, b, c) são setadas com a presença de peça para a etapa posterior, quando não há conflito entre as etapas (d, e, f) e em função do estado do contador (g, h).

Resultados e discussões

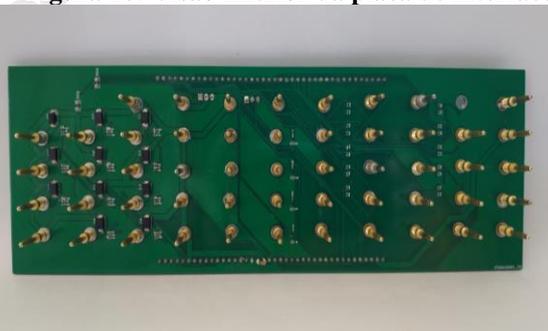
Obtivemos, após o desenvolvimento deste projeto, duas placas de circuito impresso, uma delas é responsável pela interface de conexão entre a planta industrial e o controlador. O método de conexão foi elaborado para ser simples, sendo dado apenas pelo encaixe das entradas e saídas da planta industrial (Figura 3) com a placa de interface (Figura 9, 10), com estas conectadas a placa de interface que permite inserir em sua superfície, também através de encaixe simples, o controlador desejado, sendo neste caso a segunda placa confeccionada no projeto, a do controlador FPGA Cyclone V (Figura 11, 12).

Figura 9: Visão superior da placa de interface



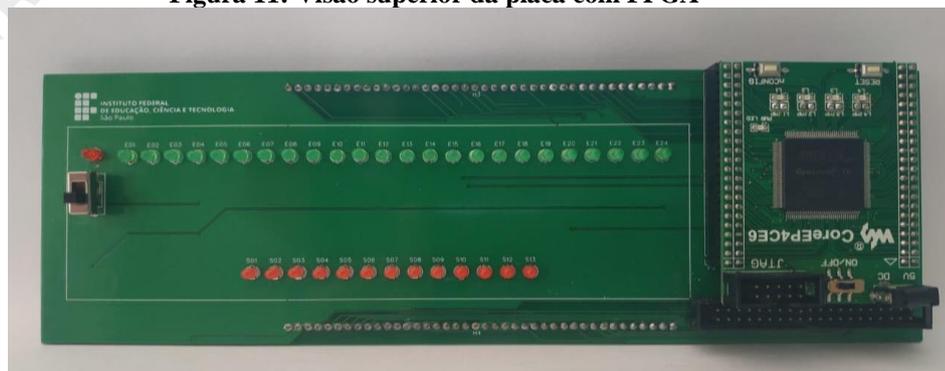
Fonte: Autores

Figura 10: Visão inferior da placa de interface



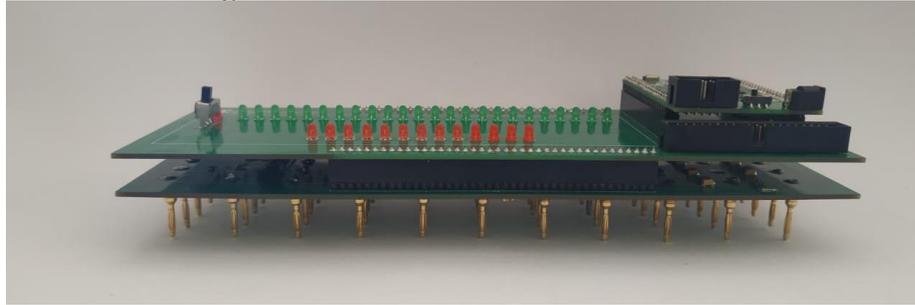
Fonte: Autores

Figura 11: Visão superior da placa com FPGA



Fonte: Autores

Figura 12: Placas de interface e FPGA



Fonte: Autores

Foi desenvolvido um software na linguagem VHDL no estilo de máquina de estados (Figura 7) para a realização dos testes de comparação de tempos.

Os resultados obtidos nestes testes foram os demonstrados nas Figuras 13 e 14.

Este gráfico demonstra os tempos médios para realização de cada tarefa, sendo cada ciclo de peça demonstrada por uma cor única. A primeira linha se dá pelo teste realizado utilizando o Controlador Lógico Programável, através de uma linha de códigos sequencial desenvolvida em *Ladder*. Já as linhas abaixo demonstram as peças sendo fabricadas em processos simultâneos com nosso código VHDL, o qual foi dividido em quatro etapas distintas de produção, onde:

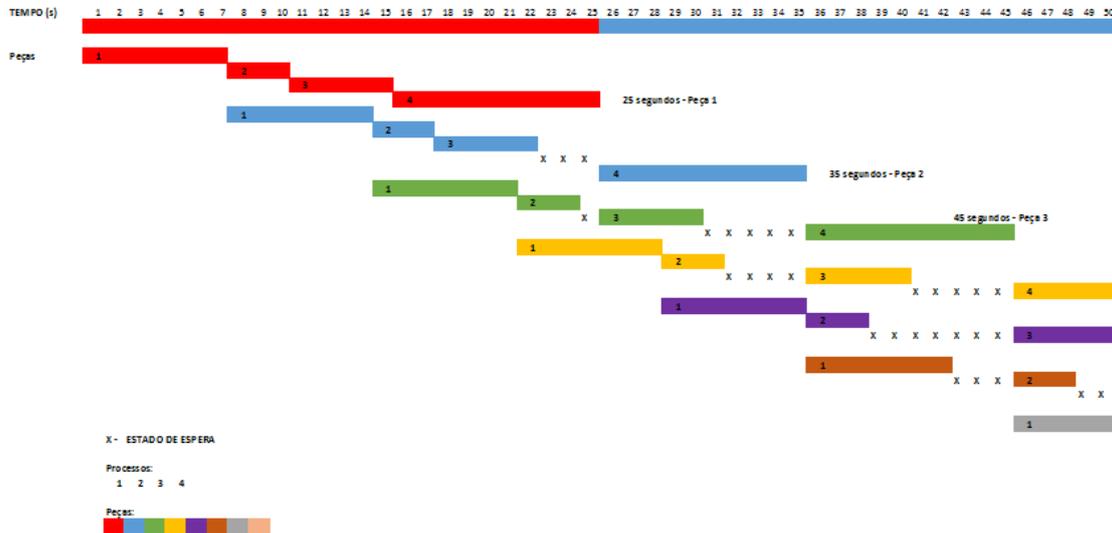
- 1- Alimentação da peça na esteira, até o momento de a peça chegar ao primeiro braço vertical.
- 2- Primeiro braço vertical pegando a peça até levá-la para a mesa giratória.
- 3- Recebendo a peça e realizando a fixação e furação até a posição em que o segundo braço vertical possa coletar a peça.
- 4- O segundo braço coleta e leva a peça até a pesagem e seleção de onde depositá-la.

Os períodos demarcados com a letra X são momentos em que é necessário aguardar a finalização de uma das quatro etapas para que se possa dar seguimento sem que um mesmo processo seja utilizado por peças distintas causando um travamento. Ou seja, momentos em que um dos processos acaba ficando ocioso na espera.

Assim é possível observar a entrega da primeira peça vermelha no mesmo período para ambos controladores, e já na comparação para segunda peça, temos duas peças para a primeira linha do CLP, enquanto com processos simultâneos três peças.

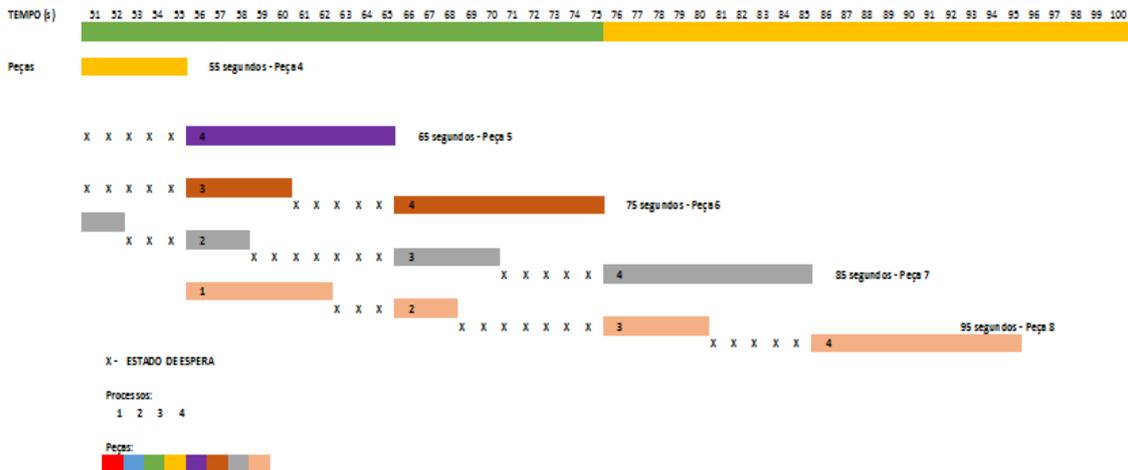
Ao término do teste, o processo sequencial feito pelo CLP entregou quatro peças em 100 segundos, ao passo que utilizando-se do FPGA foi possível concluir a realização de oito peças em 95 segundos.

Figura 13: Gráfico de comparação de tempos parte 1



Fonte: Autores

Figura 14: Gráfico de comparação de tempos parte 2



Fonte: Autores

Conclusão

Neste trabalho, avaliou-se o ganho de produção de uma planta industrial, modificando-se o controle tradicional pelo FPGA, utilizando-se de sua característica

que permite a aplicação do *pipeline*, além do desenvolvimento de uma interface que possibilita a conexão imediata da planta com o controlador, podendo, após de carregado o código via computador, trabalhar de forma embarcada.

O objetivo foi alcançado com sucesso. Observou-se um ganho significativo de velocidade na produção de peças de acordo com o tempo. Para quatro peças produzidas de forma sequencial pelo controlador lógico programável em 100 segundos, foram entregues oito em 95 segundos pelo FPGA. Este resultado demonstra um excelente aumento de produção, de aproximadamente 110%, que tende a aumentar de acordo com a quantidade de peças produzidas, aproveitando o tempo em que a planta fica ociosa e diminuir para uma quantidade pequena, representando um enorme aumento na capacidade de produção de uma indústria, podendo adequar-se à demanda necessária e tendo sua compensação financeira.

Para a continuação deste projeto, propõe-se trabalhar mais tempo na otimização do software, melhorando a programação do código. Conforme visto nos resultados, existem diversos momentos em que a planta fica ociosa e que poderiam ser implantadas melhorias, como no aproveitamento da mesa giratória, alimentando-a com peças em sua capacidade máxima, bem como testar alterações no hardware da planta, obtendo velocidades diferentes nos atuadores pneumáticos, na esteira e motores. Ou seja, o ganho em produção ainda que já bem alto, pode atingir valores ainda melhores, justificando ainda mais o uso do controle por FPGA. Outro ponto de melhoria é estimar os ganhos em valores financeiros, bem como a sua viabilidade de custo, ainda que este projeto tenha se provado de baixo custo se comparado aos controladores comumente utilizados.

Esta placa didática *plug-n-play* desenvolvida poderá ser utilizada por professores e alunos, contribuindo para o ensino de programação em VHDL e tornando assim o conteúdo mais palpável e compreensível para as futuras turmas dos cursos relacionados. Atingindo assim nosso objetivo principal, permitindo também que estes utilizem suas ideias de melhoria e conhecimentos para aprimorar o projeto, ficando os códigos e layouts abertos, disponibilizados para todos os interessados.

Referências

AZEVEDO, Domingos. **Computer Integrated Manufacturing(CIM)**. [S.l.]: Domingos de Azevedo, 2013. Disponível em: <<http://www.domingosdeazevedo.com/cam>>. Acesso em: 11 nov. 2019.

CARER, M.; CARRARO, E. **Célula de carga**. Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2010. Disponível em: <<http://hermes.ucs.br/ccet/demc/vjbrusam/inst/cel61>>. PDF. Acesso em: 04 jul. 2020.

CHIAVENATO, Idalberto. **Introdução à teoria geral da administração**. Rio de Janeiro: Editora Elsevier Brasil, 2003.

COSTA, César. **Projetos de Circuitos Digitais com FPGA**. São Paulo: Editora Érica, 2014.

COSTA, César. **Implementação de Controlador Lógico Baseado em Lógica Programável Estruturada (FPGA)**. In: IV Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação. São Paulo, 2004. Disponível em: <http://professorcesarcosta.com.br/upload/imagens_upload/nac_08_4.o%20Congresso_ISA>. PDF. Acesso em: 11 nov.2019.

CODÁ, Luiza M.R. **Apostila de Introdução a VHDL**. Edisciplinas, 2014. Disponível em:<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4227690/mod_resource/content/1/Apostila%20de%20Introdu%3%A7%C3%A3o%20a%20VHDL_2014>. PDF. Acesso em: 07 nov.2020.

CYRINO, Luis. **Atuadores de Máquinas e Equipamentos**. Manutenção em foco, 2018. Disponível em: <<https://www.manutencaoemfoco.com.br/atuadores-de-maquinas-e-equipamentos/>>. Acesso em: 07 jul.2020.

DOHSE, Knuth; JÜRGENS, Ulrich; NIALSCH Thomas. **From “Fordism” to “Toyotism”? The social organization of the labor process in the Japanese automobile industry**. Politics & Society, v. 14, n. 2, p. 115-146, 1985.

GRAMSCI, Antonio. **Americanismo e fordismo**. Universale economica, 1950.

HONDA, Flávio. **Motores de Corrente Contínua: Guia rápido para uma especificação precisa**. Siemens, 2006. Disponível em: <https://cdn.hackaday.io/files/9127390489568/Motores_CC_ind1>. PDF. Acesso em: 04 jul.2020.

LITTLER, Craig R. **Understanding taylorism**. British Journal of Sociology, p. 185-202, 1978.

MAZZAROPPI, Marcelo. **Sensores de Movimento e Presença**. Monografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em:

<<http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001369>>. PDF. Acesso em: 04 jul.2020.

MORIMOTO, Carlos E. **FPGA**. Hardware, 2007. Disponível em: <<https://www.hardware.com.br/termos/fpga>>. Acesso em: 08 nov.2019.

PRADO, Andre C. **FPGA**. Embarcados, 2014. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/fpga-quartus-prime-da-altera/>>. Acesso em: 07 nov.2020.

PETRUZELLA, Frank D. **Controladores Lógicos Programáveis**. Rio Grande Do Sul: Editora AMGH, 2014.

PERIARD, Gustavo. **Job Rotation – O que é e como funciona**. Sobre a Administração, 2012. Disponível em: <<http://www.sobreadministracao.com/job-rotation-o-que-e-como-funciona/>>. Acesso em: 11 nov.2019.

SCHWAB, Klaus. **A quarta revolução industrial**. São Paulo: Edipro, 2019.

SILVA, Msc Marcelo Eurípedes. **Controladores Lógico Programáveis – Ladder**. Grupmaxi, 2007. Disponível em: <<http://groupmaxi.com.br/parker/produtos-omrom-plc>>. PDF. Acesso em: 11 nov.2019.

SILVEIRA, Cristiano Bertulucci. **Sensores Ópticos**. Citisystems, 2017. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/sensores-opticos/>>. Acesso em: nov. 2019

SILVEIRA, João A. **Easy EDA**. Aprenda Eletrônica, 2019. Disponível em: <<https://aprendaeletronica.paulobrites.com.br/wp-content/uploads/2019/09/EASY-EDA-PRIMEIROS-PASSOS>>. PDF. Acesso em: 05 jul. 2020.

SINÉSIO, Gomes. **Elementos de Sinais e Comando Pneumático**. Eletropneumática e Eletrohidráulica, 2020. Disponível em: <<http://eletropneumaticaeleetrohidraulica.blogspot.com/2016/02/aula-09-elementos-de-sinais-e-comando.html>>. PDF. Acesso em: 06 jul.2020.

SOBRAL, João Bosco Mangueira. **Estratégias de Programação Multicore: Pipelining**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2017. Disponível em: <http://www.inf.ufsc.br/~bosco.sobral/ensino/ine5645/Pipelining_Estrategia_de_Programacao_Multicore>. PDF. Acesso em: 11 nov.2019.

WENDLING, Marcelo. **Sensores**. Universidade Estadual Paulista. São Paulo, v. 2010, p. 20, 2010.

WENDLING, Marcelo. **Dispositivos Lógicos Programáveis**. Universidade Estadual Paulista, 2011. Disponível em: <<https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/logica-programavel>>. Acesso em: 17 out.2019.

Manufatura Integrada por CIM-B. SchoolTec – Soluções didáticas. São Caetano do Sul.

**TEACHING CARD CONTROL WITH SIMULTANEITY
OF PROCESSES USING FPGA**

ABSTRACT

This article discusses the development through a collaborative online platform of a didactic board that makes the connection between an industrial plant and an FPGA Cyclone V controller also made. This work presents the comparison of times necessary for the realization of an industrial process by traditional sequential methods using a programmable logic controller and the control by means of FPGA with pipelining techniques performing processes simultaneously, therefore, demonstrating a great gain in time optimization by adopting simultaneous processes, in addition to the project's advantages for teaching related subjects.

Keywords: *FPGA, VHDL; Pipelining; Control; Industrial Plant.*

Envio: julho/2020

Aceito para publicação: setembro/2020