

Construção de Controlador Lógico Programável de Baixo Custo para Fins Didáticos

Construction of Low-Cost Programmable Logic Controller for Educational Purposes

Yuri Barros de Miranda Neves¹  orcid.org/0000-0002-8722-3498

Diogo Roberto Raposo de Freitas¹  orcid.org/0000-0002-5023-699X

¹Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil.

E-mail do autor principal: Yuri Barros de Miranda Neves yuribmneves@gmail.com

RESUMO

Montar laboratórios de automação industrial com aparatos de práticas com controladores lógicos programáveis comerciais são custosos para Universidades Públicas de Ensino. A proposta deste trabalho é criar um controlador lógico programável de baixo custo para aplicações didáticas. Foi feito o circuito eletrônico e utilizado softwares de uso livre *Ladder Maker* e *Arduino*. O circuito eletrônico foi planejado com componentes de baixo valor de compra no mercado. A confiabilidade dos componentes eletrônicos utilizados não foi de análise criteriosa para que o custo de fabricação não elevasse. Foi realizada uma comparação do custo total do projeto do CLP de baixo custo com o custo de aquisição de CLPs à venda no mercado e foi possível comprovar que o custo fica em torno de 15% comparado aos equipamentos de empresas tradicionais. A vantagem do valor de confecção deste CLP se sobressai mesmo com menor confiabilidade, visto que a ideia é para fins didáticos.

PALAVRAS-CHAVE: Controlador lógico programável; Ensino de Engenharias; Aplicações Didáticas.

ABSTRACT

*Assembling industrial automation laboratories with practical apparatus with commercial Programmable Logical Controllers (PLC) is costly for Brazilian public universities. The proposal of this paper is to create a programmable logic controller for didactic applications. It was made the electronic circuit and used free-software *Ladder Maker* and *Arduino*. The electronic circuit was designed with low-cost components in the market. The reliability of the electronic components used was not of careful analysis so that the cost of manufacture did not rise. A cost comparison was made between the proposed PLC project and purchasing PLCs sold in the market and it was possible to show that the cost is around 15%. The advantage of the manufacturing value of this PLC stands out even with less reliability since the idea is for didactic purposes.*

KEY-WORDS: Programmable Logic Controller; Engineering Education; Didactic Applications.

1 INTRODUÇÃO

Controladores lógicos programáveis (CLPs) estão presentes no controle de processos industriais há décadas [1]. Indústrias que querem automatizar sua produção utilizam os controladores lógicos programáveis para comandar os atuadores do processo. Os CLPs foram os grandes responsáveis pela revolução da indústria 3.0 [1]. Dessa forma, para os alunos de cursos de formação técnica que contemplem área de atuação em indústrias, por exemplo, Engenharia de Automação e Controle, precisam estar familiarizados com estes equipamentos já que atuarão com estes em seus futuros locais de trabalho.

Entretanto, a situação das universidades públicas com cortes de verbas acaba dificultando as melhorias de laboratórios [2]. Em específico, laboratórios de automação industrial, o aproveitamento do aprendizado por cada aluno seria maior se houvessem CLPs suficientes para todos. Com quantidades destes equipamentos insuficientes para a turma de alunos há maior esforço por parte dos docentes e discentes para que haja um aproveitamento do aprendizado sobre os controladores lógicos programáveis. Somente a teoria não é suficiente para a formação neste assunto.

Dois outros trabalhos em português foram encontrados na plataforma Periódicos da Capes, após pesquisa usando as palavras-chave “CLP” e “educacional”. O trabalho de Castilho et al. [3] aborda o desenvolvimento de uma plataforma de produção automatizada, e usa um CLP comercial em parte do sistema. Um kit educacional para controle de nível foi produzido por Pereira et al. [4], que também utiliza um CLP comercial. Portanto, percebe-se na literatura a necessidade de construção de um CLP de baixo custo para aplicações educacionais.

Diante deste cenário, propõe-se uma medida para mitigar a falta de CLPs em laboratórios de Universidades: o desenvolvimento de um CLP de baixo custo. Inspirada na onda do “faça você mesmo” (DIY – *Do It Yourself*), a ideia é montar um CLP de baixo custo de modo que os alunos possam comprar os materiais e fabricar os seus próprios CLPs para as aulas ou ainda fazer com que o orçamento da instituição consiga adquirir CLPs pelo baixo custo de cada unidade comparado aos vendidos no mercado. Espera-se que com esta medida as aulas que precisem de CLPs para

parte prática fiquem mais proveitosas para os alunos. De forma que o aluno poderá até praticar em sua casa, já que ele terá o seu próprio CLP.

Este artigo está organizado em cinco seções. A Seção 2 descreve o dimensionamento dos circuitos que compõem o CLP proposto e o *software* utilizado para programação na linguagem *Ladder*. Na Seção 3 são apresentadas a placa de circuito impresso do CLP proposto e a interface do *Ladder Maker* para escrita da programação pelo usuário. A análise de custos entre o protótipo e três CLPs comerciais é feita na Seção 4. A Seção 5 apresenta as conclusões.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a construção de um controlador lógico programável, pode-se dividir o processo em duas vertentes: uma é a construção do *hardware* que engloba toda a estrutura física do equipamento, e a outra é a elaboração do *software* que corresponde ao sistema de programação que vai manipular o equipamento acionando e desligando suas entradas e saídas. Os detalhes de cada elaboração do *software* e *hardware* são apresentados a seguir.

2.1 Hardware

Analisando os CLPs mais utilizados na indústria e conferindo seus respectivos catálogos dos fabricantes, nota-se que eles possuem a seguinte configuração mínima: circuitos de entradas e saídas digitais (discretas) e analógicas, processador digital (CPU), memórias de programa (ROM) e de dados (RAM), canal de comunicação com um PC e fonte de alimentação elétrica [5]. Baseado nessa configuração mínima dos CLPs de mercado, foi planejada a configuração do *hardware* do CLP de baixo custo. Ele conterá:

- Tensão de operação em $24V_{CC}$;
- 4 entradas de $24V_{CC}$;
- 4 saídas por contato seco;
- 2 entradas de 4 a 20mA;
- 2 saídas de 4 a 20mA.

Estas duas entradas e duas saídas de 4 a 20mA foram concebidas devido ao padrão industrial de sensores e atuadores que trabalham nesta faixa de operação de corrente [6]. Para a

integração destas entradas e saídas se faz necessário haver um controlador, que recebe as informações da programação do *software* de controle e atua na leitura ou escrita das portas de entrada e saída. Como a ideia é baratear o produto, foi escolhida uma plataforma de *hardware* que fosse *open hardware* e *open software* de forma que não haja custos com pagamento de licenças de uso. A plataforma escolhida foi o Arduino®, pela sua disponibilidade no mercado local e fácil utilização, pois se baseia no sistema *plug and play*, mas especificamente o ArduinoNano® que é uma das placas da plataforma [7].

Alimentação do CLP

A escolha da alimentação de 24 V_{CC} foi feita por ser um padrão industrial comum para sistemas de controle de extra baixa tensão [8]. Dessa forma, este CLP poderia ser incluído em algum teste de controle de processo industrial. Contudo, internamente há uma redução desta tensão para uma tensão de operação de 12 V_{CC} e de 9 V_{CC}. A tensão de 12 V_{CC} é utilizada para a operação das entradas e saídas de 4 a 20 mA. A tensão de 9 V_{CC} é utilizada para alimentar a unidade de controle central e alimentar o circuito de saída a contato seco utilizando relés eletromecânicos.

A redução desta tensão de 24 V_{CC} para 12 V_{CC} e 9 V_{CC} é realizada a partir de dois circuitos integrados (CI) reguladores de tensão, o CI 7812 e 7809. Estes CIs convertem a tensão de entrada em uma tensão de saída reduzida e regulada [9]. O problema destes CIs é o baixo rendimento, pois a diferença de tensão de entrada com a tensão de saída gera uma queda de potencial elétrico que é transformado em calor no circuito integrado, fazendo com que eles esquentem por seu próprio funcionamento. Poderia ter-se escolhido outra forma de reduzir a tensão de 24 V_{CC} para 12 V_{CC} e 9 V_{CC}, mas devido ao baixo custo de aquisição destes CIs eles foram as melhores opções de projeto. O circuito de entrada da alimentação pode ser visto na Figura 1.

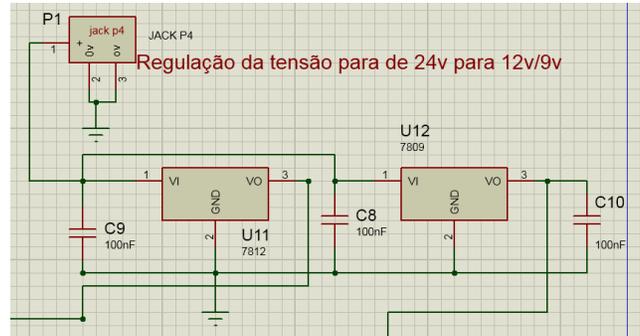


Figura 1: Circuito de alimentação do CLP.

Fonte: O autor.

Entradas de tensão 24 V_{CC}

O circuito de leitura de entrada de 24 V_{CC} é apresentado na Figura 2.

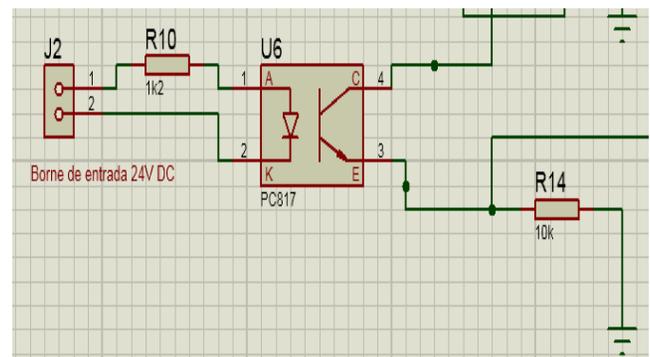


Figura 2: Circuito de leitura de tensão 24 V_{CC}.

Fonte: O autor.

O circuito é baseado na ideia da percepção de corrente elétrica por parte do controlador quando houver 24 V_{CC} conectado à entrada do CLP. Há várias maneiras de montagem de um circuito eletrônico para este objetivo. Contudo, foi escolhida a utilização de um optoacoplador para esta interface. A escolha se deu de forma a garantir maior segurança ao circuito eletrônico do CLP, visto que o optoacoplador não possui contato elétrico entre seus circuitos de entrada e saída, de forma que há uma isolação óptica entre seus terminais.

Nos terminais de entrada do optoacoplador coloca-se um resistor para limitar a corrente oriunda da entrada 24 V_{CC}. Há diversos optoacopladores no mercado, pelo menor custo e fácil aquisição foi escolhida a utilização do EL817 que atende aos requisitos do projeto e possui queda de tensão de funcionamento no LED interno de 1,2 V_{CC}[10]. Com entrada de 24 V_{CC}, corrente de entrada do optoacoplador de 20 mA e

queda de tensão no LED interno ao optoacoplador de $1,2 V_{CC}$ o cálculo do resistor ($R10$) a ser utilizado se dá pela Equação (1):

$$R10 = \frac{24 V - 1,2 V}{0,02 A} = 1140 \Omega. \quad (1)$$

Para valores de tensão maiores e menores de $24 V_{CC}$ o circuito também irá funcionar, pois haverá uma passagem de corrente entre os terminais de entrada do optoacoplador. O EL817 possui uma corrente máxima de operação para o LED interno de 60 mA, desta forma, na Equação (2) temos o valor máximo de tensão (V) que pode-se colocar na entrada do CLP para que não haja queima do optoacoplador:

$$V_{m\acute{a}x} + 1,2 V = (1140 \Omega \cdot 0,06 A) \Rightarrow V_{m\acute{a}x} = 68,8 V. \quad (2)$$

Para valores de entrada que não forneçam corrente suficiente para acionar o LED interno do optoacoplador, o controlador principal não irá detectar que há alguma tensão na entrada. Isto ocorrerá para uma corrente de entrada de 5mA [8]. Pela Equação (3) encontramos o valor relativo da tensão em que o controlador não detectará leitura na entrada do CLP.

$$V_{m\acute{i}n} + 1,2 V = (1140 \Omega \cdot 0,005 A) \Rightarrow V_{m\acute{i}n} = 4,5 V. \quad (3)$$

Nos terminais do fototransistor do EL817 temos conectado ao coletor uma tensão de $5 V_{CC}$ oriunda do controlador e um resistor de *pull-down* ligado ao referencial do sistema. Por padrão, foi utilizado um resistor de *pull-down* de $1 k\Omega$.

Ainda no terminal do emissor do fototransistor está ligado a uma entrada digital do circuito do microcontrolador do CLP. Assim que o fototransistor saturar, ou seja, o LED interno do optoacoplador estiver acionado, haverá uma passagem de corrente entre o coletor e emissor do fototransistor que por sequência também haverá uma corrente atravessando os terminais do resistor de *pull-down*, criando uma diferença de potencial em cima do resistor. Esta diferença de potencial será detectada pelo controlador, devido que uma das entradas do controlador está conectada ao resistor de *pull-down*. Com isto, o microcontrolador do CLP detecta se há ou não tensão na entrada do sistema pela leitura de nível lógico de tensão no resistor de *pull-down* do circuito de interface da entrada.

Saídas a contato seco

O circuito de saída à contato seco é apresentado na Figura 3.

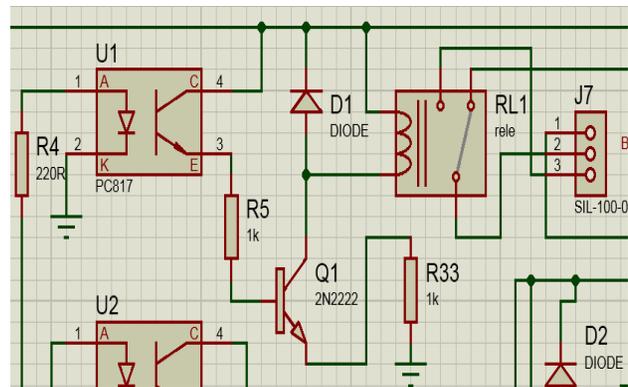


Figura 03: Circuito de saída de contato à relé.

Fonte: O autor.

O princípio do circuito é o chaveamento da corrente que atravessa a bobina dos relés pela corrente oriunda do controlador principal para o LED do optoacoplador. Se o optoacoplador for acionado então o relé também é acionado, comutando seus contatos normalmente fechado (NF) e normalmente aberto (NA). Pelo motivo do circuito de leitura das entradas do CLP já utilizarem o optoacoplador EL817 então foi escolhido o mesmo para compor o circuito de acionamento das saídas.

Para fazer esta interface de chaveamento de controle utiliza-se de um transistor bipolar de junção NPN com terminal de base ligado ao terminal emissor do optoacoplador chaveado pela unidade central de controle. O uso deste transistor se fazer necessário, pois os optoacopladores não possuem uma grande capacidade de condução de corrente [10]. Há uma gama de transistores que podem ser utilizados nesta aplicação. A família de transistores BCXXX consegue suprir esta necessidade. Desta forma, o transistor escolhido foi o BC337 pelo preço e facilidade de encontrar no comércio local [11]. O diodo colocado entre os terminais da bobina do relé é para a proteção do circuito quando ocorre a rápida comutação de corrente que atravessa a bobina originando uma tensão muito alta [12].

Para a fonte de alimentação deste circuito de saída foi utilizada a saída do CI 7809 que corresponde à $9 V_{CC}$. A escolha foi baseada no uso de menor potência para o CLP.

Como uma corrente de 5mA é suficiente para saturar o transistor Q1 (vide Fig. 3) [11] e o valor fornecido pelo microcontrolador é de $5 V_{CC}$, então o valor mínimo do resistor R5 é dado pela Equação (4):

$$R5 \geq \frac{5V - 0,7V}{0,005A} \geq 860 \Omega. \quad (4)$$

Consultando os manuais de fabricante de relés, percebe-se que correntes de 30 mA são suficientes para acioná-los [12]. Assim o valor deste resistor R33 é mostrado na Equação (5).

$$R33 \leq \frac{9V - 5V}{0,03A} \leq 133,3\Omega. \quad (5)$$

Também há um resistor R4 ligado ao terminal anodo do LED do optoacoplador. Este resistor limita a corrente fornecida pelo controlador central, impedindo que o LED do optoacoplador entre em falha. O controlador fornece uma tensão de $5 V_{CC}$ e o LED do optoacoplador opera com corrente de 20 mA, pela Equação (6) vemos o valor para este resistor.

$$R4 \geq \frac{5V - 1,2V}{0,02A} \geq 190\Omega. \quad (6)$$

Este circuito possui formato de saída padrão de CLPs comerciais, usando contatos de um relé eletromecânico que podem ser usados em circuitos de corrente alternada. Desta forma, é possível controlar o acionamento de vários circuitos e equipamentos de maior potência como: circuitos de comando de motores elétricos, sessões de iluminação, máquinas industriais, autoclaves, dentre outros.

Entradas analógicas de corrente de 4 mA a 20 mA

Como é um padrão industrial para sensores e atuadores [8], foram incluídas entradas e saídas de corrente de 4mA a 20 mA. O circuito básico está esquematizado na Figura 4, e possui como elemento central o CI LM324.

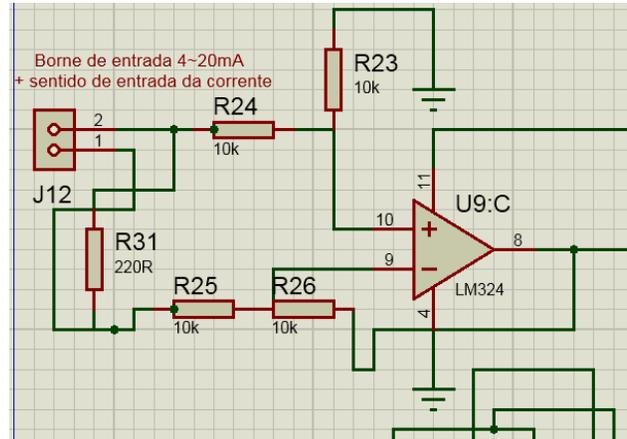


Figura 4: Circuito de entrada de 4mA a 20 mA. Fonte: O autor.

O princípio deste circuito da Figura 4 é o conceito de que uma corrente atravessando uma resistência elétrica gera uma diferença de potencial elétrico. Diante disto, pode-se saber a respectiva tensão elétrica gerada pela corrente de 4mA a 20 mA nos terminais de entrada do CLP.

Um circuito com um resistor entre os terminais de entrada do CLP seria suficiente para captar a leitura de tensão nos terminais de entrada. Entretanto, o circuito de leitura do controlador lógico principal acaba que por interferindo na aferição da diferença de potencial, pois a corrente, que antes só atravessaria o resistor, também passaria a atravessar o controlador central por meio de seu circuito de leitura interno, algo que não é desejado visto que a leitura da tensão entre os terminais do resistor seria divergente da real corrente fornecida na entrada.

Desta forma, precisa-se colocar uma interface de isolamento entre os terminais de entrada que recebem a corrente elétrica de 4mA a 20 mA para os terminais de leitura internos do controlador central. Um circuito que consegue suprir esta necessidade é um amplificador operacional na configuração amplificador diferencial de ganho unitário, replicando na saída a diferença de potencial elétrico nos terminais de entrada [13].

A configuração dos resistores R23, R24, R25 e R26 na Fig. 4 conectados aos terminais positivo e negativo do amplificador operacional formam um circuito de ganho unitário. Desta forma, a diferença de potencial elétrico no resistor R31 será replicada no terminal de saída do amplificador operacional. A isolamento deste tipo de circuito é

dada pela elevada impedância entre os terminais de entrada do amplificador operacional [13].

Este circuito possui um detalhe técnico sobre o sentido de corrente na entrada do CLP. A tensão nos terminais do amplificador operacional deve estar de uma forma que o maior potencial esteja no terminal da entrada não-inversora do amplificador operacional e o menor potencial no terminal da entrada inversora, para que a tensão de saída seja positiva. Há a necessidade de que a tensão de saída do amplificador operacional seja positiva em relação ao referencial do circuito, pois o controlador central possui a especificação de leitura de tensões de 0 a 5 V_{CC} . Uma tensão negativa, oriunda da inversão do sentido da corrente acabaria por fornecer uma leitura errônea ao controlador central, já que o amplificador operacional saturaria em 0 [11]. Analisando a Fig. 4, nota-se que o sentido da corrente elétrica colocada na entrada do CLP precisa seguir o fluxo do Terminal 2 para o Terminal 1.

O resistor R31 conectado aos terminais de entrada de 4 mA a 20 mA do CLP tem valor calculado na Equação (7), visto que a corrente especificada máxima fica em 20 mA e a tensão máxima de leitura é de 5 V_{CC} :

$$R31 = \frac{5V}{0,02 A} = 250\Omega. \quad (7)$$

Os resistores do circuito de ganho unitário do amplificador operacional foram escolhidos para que haja a menor dissipação de potência com uma alta impedância. Para formar o ganho unitário basta que todos os quatro resistores sejam de mesmo valor. Há uma pequena diferença entre os valores dos resistores devido à faixa de tolerância, entretanto alta confiabilidade não é o foco do CLP de modo que este um problema da faixa de tolerância é aceitável ao projeto. O valor escolhido foi de 10 k Ω .

Como o controlador central só permite leituras de 0 a 5 V_{CC} em seus terminais, foi colocado um diodo zener de 5 V_{CC} na saída do amplificador operacional para evitar que ocorra algum dano do circuito interno de leitura por algum eventual aumento da corrente de entrada do CLP.

O amplificador operacional escolhido foi o CI LM324 [14]. Este CI possui quatro amplificadores operacionais internos e não necessita de alimentação simétrica de forma que se encaixa na

especificação da necessidade do circuito de leitura de entrada de 4mA a 20 mA. Do CI foram utilizados dois amplificadores operacionais para a entrada e dois foram utilizados para a saída de analógica, conforme será apresentado a seguir. Como a alimentação do CI é a mesma, a alimentação dos amplificadores operacionais é de 12 V_{CC} .

Saídas analógicas de corrente de 4mA a 20 mA

Assim como as entradas de leitura de corrente de 4mA a 20 mA permitem que o CLP se comunique com sensores industriais, estas saídas permitem o controle de atuadores industriais. A Figura 5 mostra o circuito para as saídas analógicas.

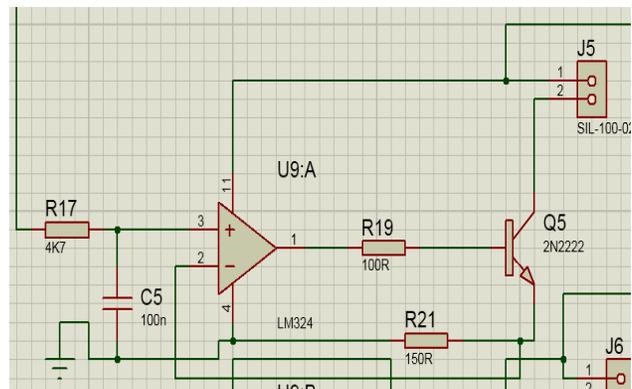


Figura 5: Circuito de saída de corrente.

Fonte: próprio autor.

Neste circuito, utiliza-se o conceito de seguidor de tensão utilizando amplificadores operacionais junto com um transistor de bipolar de junção. A tensão de saída ($V_{saída}$) de um amplificador operacional é dada pela Equação (8), onde A simboliza o ganho.

$$V_{saída} = A(V_+ - V_-). \quad (8)$$

Como os ganhos dos amplificadores operacionais são extremamente elevados [13], vê-se pela Equação (11) a tensão de entrada no terminal positivo é a mesma da entrada no terminal negativo.

$$\frac{V_{saída}}{A} = (V_+ - V_-) \cong 0; \quad (9)$$

$$(V_+ - V_-) \cong 0; \quad (10)$$

$$V_+ \cong V_- \quad (11)$$

Diante desta particularidade, usa-se o artifício de colocar um resistor ligado à entrada do terminal negativo que também está ligado em realimentação negativa para que haja uma corrente constante fluindo pelo resistor R21. Esta corrente será dada seguindo a Lei de Ohm e será calculada para resultar em uma corrente de 4mA a 20mA de acordo com a entrada do terminal positivo do amplificador operacional pela Equação 12.

$$I_{R21} = \frac{V_-}{R21} \quad (12)$$

Diante destas informações, percebe-se que uma carga colocada nos terminais de saída analógica do CLP não vai modificar a corrente que flui do coletor ao emissor do transistor Q5, pois o amplificador operacional estabiliza a corrente no resistor R21 pela tensão do terminal positivo mantendo uma corrente constante.

Para fazer o controle da tensão colocada sobre o terminal não-inversor do amplificador operacional, o controlador central usa uma modulação de pulsos (PWM - *Pulse Width Modulation*), visto que a diferença de potencial fornecida pelo controlador assume dois estados 0 ou 5V_{CC}. Um circuito RC é utilizado para converter os pulsos oriundos do controlador central para um nível de tensão mais estável em uma faixa de valores de 0 a 5V_{CC}. Pelas Equações (13) a (18), percebe-se que as tensões de entrada do amplificador operacional precisam variar entre os valores 0,6V e 3V, para que a corrente de saída tenha valores de 4mA a 20mA.

$$I_{R21(máx)} = \frac{V_-(máx)}{R21}; \quad (13)$$

$$20 \text{ mA} = \frac{V_-}{150 \Omega}; \quad (14)$$

$$V_-(máx) = 3 \text{ V}; \quad (15)$$

$$I_{R21(mín)} = \frac{V_-(mín)}{R21}; \quad (16)$$

$$4 \text{ mA} = \frac{V_-}{150 \Omega}; \quad (17)$$

$$V_-(mín) = 0,6 \text{ V}. \quad (18)$$

O cálculo do circuito RC para essa faixa de valores é visto na Equação (19), analisando a impedância do capacitor.

$$Z_{cap} = \frac{1}{2\pi f C}; \quad (19)$$

$$Z_{cap} \cdot I + R_{17} \cdot I = 5 \text{ V}. \quad (20)$$

Para 3V máximo na entrada não inversora temos:

$$3 \text{ V} = \frac{Z_{cap}}{Z_{cap} + R_{17}} \cdot 5 \text{ V}; \quad (21)$$

$$0,6 \text{ V} = \frac{Z_{cap}}{Z_{cap} + 4,7 \text{ k}\Omega}; \quad (22)$$

$$0,4(Z_{cap}) = 2820 \Omega; \quad (23)$$

$$Z_{cap} = 7050 \Omega; \quad (24)$$

$$7050 \Omega = \frac{1}{2\pi f C}. \quad (25)$$

A frequência de 490Hz é a frequência no terminal digital 9 do controlador central [15]. Porém, calcular um filtro para uma frequência muito próxima à frequência que se deseja atenuar faz com que o filtro não seja tão eficaz [15], assim foi escolhida a frequência de 300Hz. Tem-se:

$$7050 \Omega = \frac{1}{300 \cdot 2\pi \cdot C}; \quad (26)$$

$$C = 75 \text{ nF}. \quad (27)$$

Desta forma, a partir de uma modulação PWM do controlador central consegue-se controlar a corrente de saída do CLP.

Controlador Central

O controlador central é a "inteligência" do CLP. É similar como o CPU de um computador. É por meio do controlador central que é possível programar o CLP proposto.

Para o controlador central do CLP de baixo custo foi utilizado o microcontrolador ATMEGA328P, mais especificamente o microcontrolador na placa da plataforma *open hardware* Arduino Nano© [7]. A escolha do uso da plataforma foi pela sua disponibilidade de integração a projetos de controladores e pelo seu baixo custo no mercado comparado a outras

plataformas, além de sua interatividade com o *software* de programação *LadderMaker* [17].

2.2 Software

Existe uma norma internacional chamada IEC 61131-3 que normatiza as linguagens de programação para os CLPs [16]. Como o intuito é a construção de um CLP mesmo que de baixo custo devemos seguir esta norma para que a assimilação do conteúdo por parte do aluno não seja deficitária em relação ao que o mercado de trabalho solicita.

A elaboração de um *software* de programação para um CLP envolve uma gama de dificuldades que não tem valor agregador ao projeto, visto que este aprendizado ficaria apenas para o programador do *software*. Além de que há um custo de pagamento de horas de programação a um programador para que o *software* fosse elaborado. Para diminuir o custo e facilitar a utilização do CLP por quaisquer aluno, foi-se buscado na internet o *software* chamado *LadderMaker* [17].

O *LadderMaker* é um *software* de uso livre (*open software*). Não necessitando pagamento de licenças de uso. O *software* permite que o usuário programe o CI ATMEGA328P da placa Arduino Nano por meio da linguagem de programação *Ladder* [18, 19]. Dessa forma, o CLP desenvolvido está em conformidade com a IEC 61131-3 no que se refere à linguagem de programação *Ladder*.

3 IMPLEMENTANDO O CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL

A Figura 6 apresenta o circuito total do CLP desenhado no CAD Isis Proteus®. A definição dos pinos de entrada e saída do controlador central foi baseada pela especificação de escolha do *software* *LadderMaker*, pois o *software* vem com uma pré-configuração de funcionamento com os pinos de entrada e saída do Arduino Nano®, conforme Figura 7.

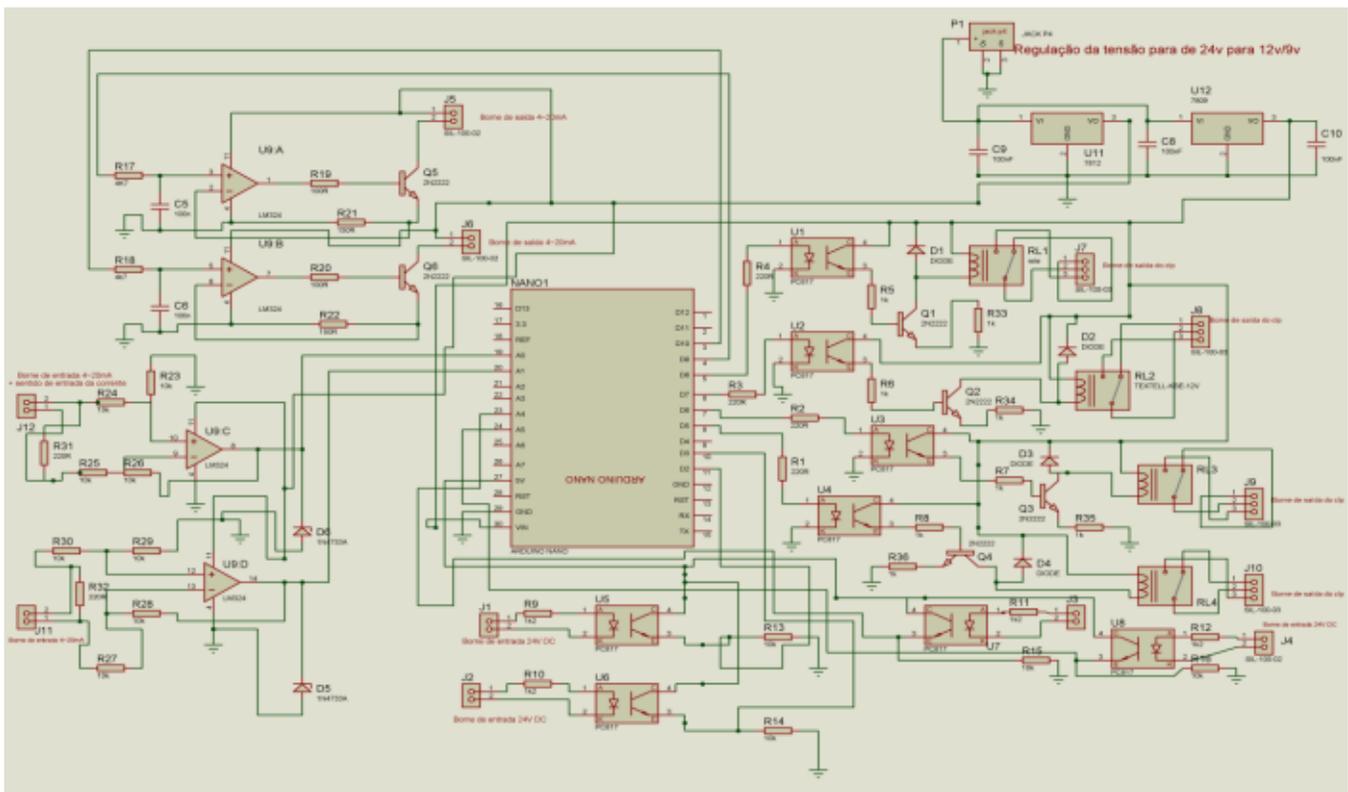


Figura 6: Circuito completo em CAD do CLP de baixo custo.
Fonte: Oautor.

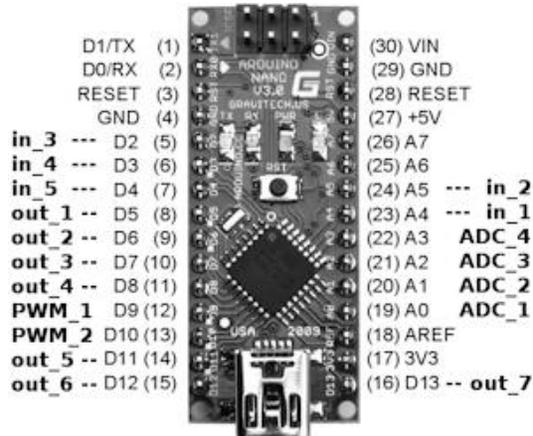


Figura 7: Pinos dedicados ao controlador pelo *LadderMaker*.
Fonte: [15].

3.1 Diagrama esquemático para placa de circuito impresso

Utilizando o *software* de desenho auxiliado por computador ISIS PROTHEUS© foi feito o desenho da placa de circuito impresso para o controlador lógico programável de baixo custo. O desenho do circuito impresso foi realizado para permitir que os alunos pudessem ter a possibilidade de fabricar o seu próprio CLP de baixo custo.

A Figura 8 apresenta o desenho da placa de circuito impresso. Para a conexão do CLP com o mundo externo, seja por entrada ou por saídas foram utilizados, no desenho, bornes de conexão colocados em um mesmo lado da placa à ser confeccionada de modo que haja facilidade na conexão do cabeamento no CLP já que todos os bornes estão em um mesmo lado.

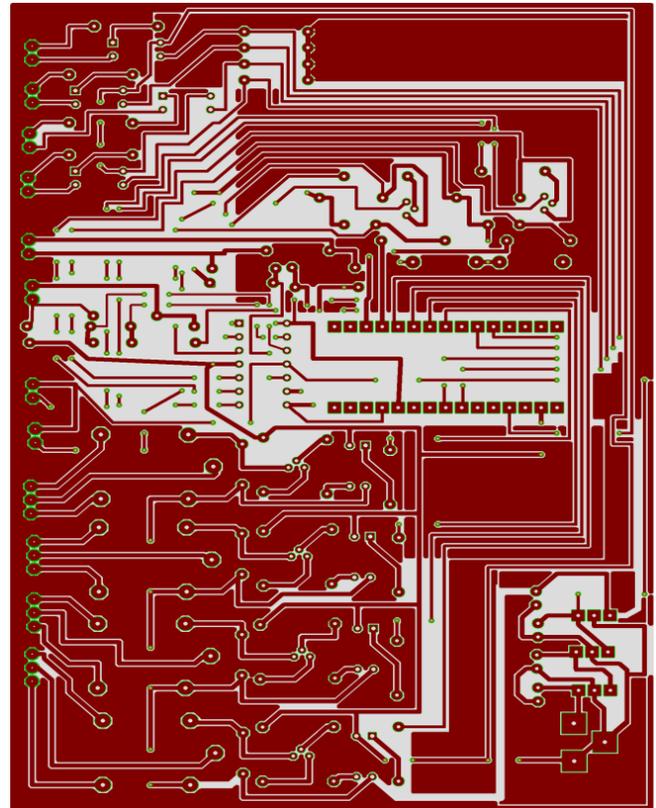


Figura 8: Desenho da placa de circuito impresso.
Fonte: próprio autor.

3.2 Manipulação do *software LadderMaker*

O programa *LadderMaker* é distribuído gratuitamente na internet sob a licença GPL 3.0 [18]. Não é necessário fazer sua instalação. Contudo, até a data de elaboração deste documento, o *software* só estava disponível para sistemas operacionais Linux e Windows 7. Na Figura 9 é mostrada a tela inicial do *LadderMaker* para a versão do sistema operacional Windows 7.

Construção de Controlador Lógico Programável de Baixo Custo para Fins Didáticos

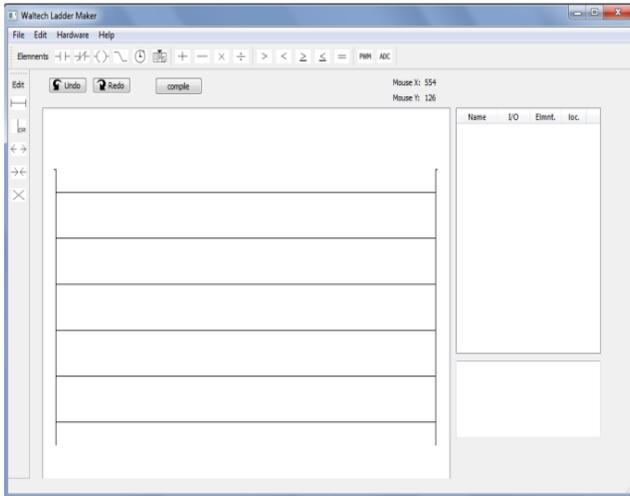


Figura 9: Tela inicial do LadderMake.

Fonte: O autor.

O programa permite utilizar as funções da linguagem de programação Ladder para programar as placas da plataforma Arduino (Uno, Nano e Mega). É possível utilizar as funções de contato aberto, contato fechado, contador, timer, operações aritméticas e lógicas, sinal em rampa, entrada e saída analógica, como também saída em pulso de onda modulada, tornando o uso do *software* bastante eficaz para uso didático. A Figura 10 apresenta algumas funções de entradas e saídas no LadderMaker.

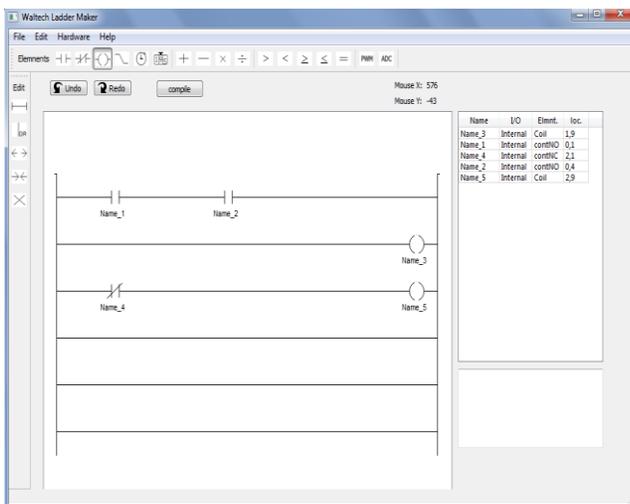


Figura 10: Exemplo de funções implementadas no *software* LadderMaker.

Fonte: O autor.

A simplicidade da interface de usuário do LadderMaker o torna uma boa escolha para compor a solução de um CLP de baixo custo para

fins didáticos, onde o intuito é acelerar a curva de aprendizado dos estudantes.

4 COMPARATIVO DE CUSTOS

Na Tabela 1 encontra-se o quantitativo e o custo total dos materiais do projeto de construção do CLP didático proposto. Custando um valor médio menor do que R\$100,00 é possível montar um CLP para acompanhar as aulas práticas teóricas de disciplinas de estudos de automações industriais.

Tabela 1:Quantitativo de itens para confecção do CLP.

| ITEM | Quantidade | Preço unitário(médio) | Preço total |
|------------------------|------------|-----------------------|------------------|
| Placa Arduino NANO | 1 | R\$ 30,00 | R\$ 30,00 |
| Capacitores 100nF | 6 | R\$ 0,10 | R\$ 0,60 |
| Resistores | 36 | R\$ 0,10 | R\$ 3,60 |
| EL817 | 8 | R\$ 2,00 | R\$ 16,00 |
| LM324 | 1 | R\$ 3,00 | R\$ 3,00 |
| LM7816 | 1 | R\$ 1,50 | R\$ 1,50 |
| LM7812 | 1 | R\$ 1,50 | R\$ 1,50 |
| LM7809 | 1 | R\$ 1,50 | R\$ 1,50 |
| Transistores BC337 | 6 | R\$ 1,00 | R\$ 6,00 |
| ln4007 | 4 | R\$ 1,00 | R\$ 4,00 |
| ln4733 | 2 | R\$ 2,00 | R\$ 4,00 |
| Jack P4 | 1 | R\$ 1,50 | R\$ 1,50 |
| Borne 2 vias | 8 | R\$ 0,60 | R\$ 4,80 |
| Bornes 3 vias | 4 | R\$ 0,80 | R\$ 3,20 |
| Placa fenolite 10x15cm | 1 | R\$ 6,00 | R\$ 6,00 |
| Relé 5VDC | 4 | R\$ 2,00 | R\$ 8,00 |
| | | SOMA TOTAL | R\$ 95,20 |

Fonte: O autor.

Para efeito de comparação, a Tabela 2exibe o valor de alguns modelos de CLP compactos de marcas atuantes no mercado [5], que são de porte comparado ao CLP didático. Percebe-se que há uma vantagem inicial financeira devido ao baixo custo do CLP aqui proposto. Salientando que o custo do projeto citado inclui somente os materiais para confecção, não incluindo custo de mão de obra e encargos financeiros.

Tabela 2: Preços de compra de CLPs de modelo básico.

| Controlador Lógico Programável | Custo do modelo de entrada |
|--------------------------------|----------------------------|
| Siemens | R\$ 800,00 |
| WEG | R\$ 850,00 |
| Rockwell | R\$ 650,00 |

Fonte: O autor.

Ressalva-se que os custos foram listados para a construção de um protótipo funcional, que permite ao aluno realizar as práticas da aula de CLP. Na Figura 11, tem-se a foto do circuito montado em *protoboard*. A imagem apresenta o protótipo montado com uma placa Arduino Uno, por indisponibilidade de um Arduino Nano no momento da fotografia. Porém, esse fato não interfere na concepção do projeto, pois o Uno possui maior quantidade de terminais de entrada e saídas que apenas não foram utilizadas.

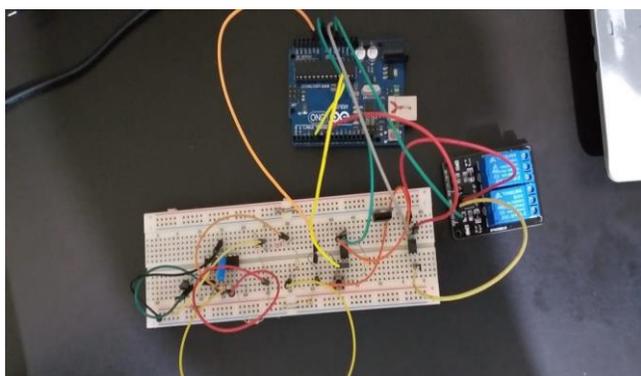


Figura 11: Circuito protótipo montado em *protoboard*.
Fonte: O autor.

5 CONCLUSÕES

Nota-se uma diferença em entre o custo de confecção do CLP proposto neste trabalho e os preços de venda dos controladores mais básicos oferecidos pelas principais empresas de mercado.

As configurações de número de entradas e saídas e tipos de entrada e saída do CLP de baixo custo são similares aos equipamentos de mercado. Desta forma, as principais práticas de laboratório CLP poderão ser realizadas. A experiência dos alunos será mais interativa, pois os próprios alunos podem confeccionar seus CLPs, possibilitando que eles entendam mais profundamente as características de *hardware*, e consigam realizar diagnósticos sobre o

equipamento e projetem novos componentes, habilidades que não são desenvolvidas quando existem CLPs prontos nos laboratórios. E a instituição de ensino também poderá adquirir mais CLPs permitindo práticas individuais e de melhor qualidade, aliadas com a teoria.

No tocante aos materiais utilizados, são materiais de fácil disponibilidade para compra no mercado local e sem necessidade de licença de uso de fabricantes. O *software* também segue essa linha de não necessidade de licença, o que facilita a obtenção e uso do mesmo pelos alunos. Assim, pode-se afirmar que o objetivo de confeccionar um CLP para laboratórios de práticas de automação industrial de baixo custo foi alcançado.

Nota-se, porém, que este CLP de baixo custo dificilmente será uma solução definitiva para o mercado. Em processos industriais, a confiabilidade dos equipamentos deve ser alta e um CLP deve acompanhar este mesmo critério, tanto por seus componentes quanto por sua confecção.

Os próximos passos serão dedicados a tornar a solução mais completa, montando a placa em um gabinete apropriado e colocando adesivos de identificação das entradas e saídas e um canal de comunicação via rede RS-485, tornando um produto mais profissional para as exigências do mercado educacional.

REFERÊNCIAS

- [1] SILVA, R. R. da. HISTÓRIA DO CLP. *In*: SILVA, R. R. da. **Blog Automação Industrial**, 21 nov. 2012. Disponível em: <https://goo.gl/msdGvd>. Acesso em: 10 out. 2018.
- [2] OLIVEIRA, C. Universidades Federais fecham laboratórios de cursos. *In*: PRAGMATISMO POLÍTICO, 31 ago. 2017. Disponível em: <https://goo.gl/yLhxni>. Acesso em: 10 out. 2018.
- [3] CASTILHO, R. A. et al. Apresentação de métodos para implementação de plataformas colaborativas de Sistemas Automatizados de Produção. **Revista Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Bauru, Ano 7, n. 2, p. 81-95, 2012. DOI: <https://doi.org/10.15675/gepros.v0i2.561>. Disponível em: <https://revista.feb.unesp.br/index.php/gepros/article/view/561>.

[4] PEREIRA, J. P. P.; VALENTIM, R. A. M.; CASTRO, B. P. S. Kit Educacional para Controle e Supervisão Aplicado a Nível. **Holos**, Ano 25, v. 2, p.68-72, 2009.

[5] GOOGLE SHOPPING. CLPs básicos. Disponível em: <https://goo.gl/seMDy3>. Acesso em: 11 out. 2018.

[6] FREITAS, C. M. Controladores Lógico Programáveis – CLP - Parte 3. *In: EMBARCADOS*. 11 fev. 2014. Disponível em: <https://goo.gl/KXnD3r>. Acesso em: 11 out. 2018.

[7] GUIA ARDUINO NANO. *In: ARDUINO*. Disponível em: <https://goo.gl/Kz9STc>. Acesso em: 11 out. 2018.

[8] CASSIOLATO, C. Redes Industriais. *In: SMAR TECHNOLOGY COMPANY*, c2019. Disponível em: <https://goo.gl/PnQJcv>. Acesso em: 11 out. 2018.

[9] KEC. **Datasheet CI 7805**. Coréia. Revisão 1. 2010. 20p.

[10] EVERLIGHT. **EL817**. Disponível em: <https://goo.gl/oGZLWK>. Acesso em: 11 out. 2018.

[11] ONSEMI. **Datasheet BC337**. Colorado, EUA. Revisão 8. Nov. 2013. 5p.

[12] BRAGA, N. C. **Como funcionam os relés**. Instituto NCB. Disponível em: <https://goo.gl/qdUANz>. Acesso em: 18 out. 2018.

[13] SACCO, F. **Buffers e Seguidores de tensão**. Disponível em: <https://goo.gl/a4eaVv>. Acesso em: 18 out. 2018.

[14] TEXAS INSTRUMENTS. **Datasheet LM324**. Texas, EUA, 2015.

[15] FRITZEN, C. **Criando uma saída analógica de 0 a 5V com arduino**. Disponível em: <https://goo.gl/Bu6aTw>. Acesso em: 18 out. 2018.

[16] HEINZ, J.; TIEGELKAMP, M. **IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems**. Alemanha: Springer-Verlag, 2001. 240p.

[17] LADDERMAKER. Laboratório de Garagem. Disponível em: <https://goo.gl/LeMsX8>. Acesso em: 18 out. 2018.

[18] PETRUZELLA, F. D. **Fundamentos do desenvolvimento de diagramas e programas em lógica ladder para o CLP, em**

Controladores Lógico Programáveis, 4. ed. Mc Graw Hill Education, 2014.

[19] BOLTON, B. **Programmable Logic Controllers**, 4. ed. Newnes, 2006. (Capítulo 4 - Ladder and functional block programming)