

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FREDY VIEIRA

PROTÓTIPO DE UM TRANSPORTADOR  
INDUSTRIAL UTILIZANDO UM SISTEMA  
ANALÓGICO DE CONTROLE DE VELOCIDADE  
PROGRAMADO EM UM CLP DA  $\mu$ DX

VIÇOSA  
2010

**FREDY VIEIRA**

**PROTÓTIPO DE UM TRANSPORTADOR  
INDUSTRIAL UTILIZANDO UM SISTEMA  
ANALÓGICO DE CONTROLE DE VELOCIDADE  
PROGRAMADO EM UM CLP DA  $\mu$ DX**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 - Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. M.Sc. Alexandre S. Brandão.

VIÇOSA  
2010

**FREDY VIEIRA**

**PROTÓTIPO DE UM TRANSPORTADOR INDUSTRIAL  
UTILIZANDO UM SISTEMA ANALÓGICO DE CONTROLE DE  
VELOCIDADE PROGRAMADO EM UM CLP DA  $\mu$ DX**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 - Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 02 de dezembro de 2010.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Prof. M.Sc. Alexandre Santos Brandão - Orientador  
Universidade Federal de Viçosa

---

Prof. Dr. Tarcísio de Assunção Pizziolo - Membro  
Universidade Federal de Viçosa

---

Prof. Dr. André Gomes Torres - Membro  
Universidade Federal de Viçosa

*Dedico está monografia ao Meus pais, Sidney e Fatima.*

# *Agradecimentos*

Agradeço a Deus por essa conquista, que me iluminou durante toda minha jornada, a minha família, aos meus pais, que em todos os momentos de minha vida nunca deixaram de me apoiar e acreditar em mim. Graças aos ensinamentos do meu pai e palavras de carinho da minha mãe, hoje consegui realizar esse sonho, amo vocês. Dedico essa conquista também aos meus avós, Macário, Martha, Benedito e Anésia que não estão mais presentes, mas estão muito felizes por mim. Agradeço também a Carla, a melhor namorada do mundo, que sempre esteve ao meu lado me dando carinho e atenção. O meu orientador Alexandre que com muita atenção e dedicação me orientou nesse projeto. Os meus professores pelo seus ensinamentos. Os meus amigos da república Deck que foram irmãos durante todo esse tempo, e parceiros de tantas festas. Enfim, agradeço a todos que participaram desta conquista.

*"E sem saber que era impossível, ele foi lá e fez"*  
**(Jean Cocteau)**

# *Resumo*

Este trabalho apresenta a montagem de um protótipo de uma planta de transporte industrial atuada por um controlador lógico programável (CLP) da Dexter através de suas entradas analógicas e digitais. A planta desenvolvida possui um conjunto motor-gerador de corrente contínua, responsáveis por movimentar a esteira transportadora e por fornecer a tensão de referência para o controle de velocidade do sistema. Além dos motores, três sensores de presença auxiliam na tarefa de transporte e seleção. O primeiro, situado no início do transporte, serve de referência ao controlador de velocidade. Sua função é enviar ao CLP o tempo entre as caixas que entram na esteira. Tal informação é utilizada pelo CLP para aumentar ou diminuir a velocidade do transporte. Os demais sensores são responsáveis pela detecção da altura das caixas presentes na esteira. Para a seleção física, um motor de seleção conectado a uma haste que destina as caixas para a direita ou na direção do fluxo corrente. O CLP utilizado apresenta quatro entradas e quatro saídas digitais, além de quatro entradas analógicas. Duas saídas digitais serão utilizadas para determinação de quatro níveis discretos de velocidade, enquanto as outras duas serão utilizadas para a habilitação do motor de seleção em ambos os sentidos. Os dados de setpoint e de referência de velocidades são obtidos através das entradas analógicas do CLP. As entradas digitais são usadas para ligar ou desligar a planta e para identificar as caixas presentes na esteira. O desenvolvimento de todo o projeto é apresentado no decorrer desta monografia, assim como os testes, experimentos, discussões e conclusões pertinentes ao trabalho.

# *Abstract*

This paper presents the design of a prototype of an industrial plant transport actuated by a programmable logic controller (PLC) of Dexter through its analog and digital inputs. The plant developed has a direct current motor-generator, responsible for moving the conveyor and for providing a voltage reference for the speed control system. Besides the engines, three presence sensors in the task of shipping and selection. The first, out located at the beginning of the carriage, is used in the reference to the speed controller. Its function is to send to the PLC the time between the boxes that come in the conveyor. This information is used by the PLC to increase or decrease the transport speed. The other sensors are responsible for detecting the height of the boxes present on the mat. For the physical selection, selection of a motor connected to a rod, which destined the boxes to the right or in the direction of current flow. The PLC used has four inputs and four digital outputs and four analog inputs. Two digital outputs are used to determine four discrete levels of speed, while the other two is used for the clearance of motor selection in both directions. Data reference setpoint and velocity are obtained through the analog inputs of the PLC. The digital inputs are used to turn the plant and to identify the boxes present on the conveyor. The development of the entire project is presented in the course of this monograph, as well as tests, experiments, discussions and conclusions pertaining to the work.

# *Sumário*

## **Lista de Figuras**

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>10</b>
1.1	Motores de Corrente Contínua . . . . .	11
1.1.1	Controle de velocidade nos motores de corrente contínua . . . . .	11
1.1.2	Tipos de excitações. . . . .	14
1.1.3	Vantagens e desvantagens dos acionamentos em CC . . . . .	15
1.2	O controlador $\mu$ DX . . . . .	16
1.2.1	Visão Geral do Controlador $\mu$ DX . . . . .	16
1.2.2	Diferenças entre o Controlador $\mu$ DX e os demais CLPs . . . . .	16
1.3	Objetivos Gerais e Específicos. . . . .	18
<b>2</b>	<b>Visão Geral do Protótipo</b>	<b>19</b>
2.1	O Controle de Velocidade Proposto . . . . .	19
2.2	O projeto de hardware do protótipo . . . . .	23
2.3	O sistema sensorial utilizado . . . . .	24
2.4	Os conversores A/D e D/A utilizados . . . . .	24
2.5	O Circuito Ponte H e sua aplicação no protótipo . . . . .	25
2.6	O projeto de software desenvolvido . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>Conclusões</b>	<b>31</b>



# *Lista de Figuras*

1	Modelo do circuito elétrico do motor CC. . . . .	11
2	Curvas características de um motor CC. . . . .	13
3	Representação de um circuito de motor CC com excitação serie. . . . .	14
4	Representação de um circuito de motor CC com excitação paralelo ou shunt. . . . .	15
5	Representação de um circuito de motor CC com excitação independente. . . . .	15
6	Controlador $\mu$ DX. . . . .	17
7	Sistema de Controle de Velocidade. . . . .	19
8	Modelo do controlador de velocidade. . . . .	20
9	Circuito Conversor Digital Analógico tipo R2R. . . . .	21
10	Foto do protótipo desenvolvido. . . . .	22
11	Passíveis sentidos para produtos na esteira. . . . .	23
12	Passíveis sentidos para produtos na esteira. . . . .	24
13	Esquema de funcionamento do circuito Ponte H. . . . .	25
14	Programa ladder desenvolvido. . . . .	27
15	Programa ladder desenvolvido (continuação). . . . .	28

# 1 *Introdução*

Em ambientes industriais, o controle de velocidade de motores apresenta sua importância, quando o processo em questão está sujeito a variações de carga no eixo do motor, necessitando conseqüentemente de um controle de torque. Como um exemplo típico destes processos, pode-se citar a esteira industrial, a qual necessita de um torque variável dependendo do tipo e da quantidade de material que é colocado sobre a mesma, além de uma velocidade variável devido às operações realizadas sobre ela.

Na literatura especializada, sabe-se que máquinas de corrente contínua (CC) podem ser empregadas na função de motores e de geradores, dependendo da aplicação e de sua instalação.[1]

Apesar de difusão de outros tipos de motores, agregadas ao desenvolvimento de técnicas de controle, os motores de corrente contínua ainda se destacam no quesito empregabilidade em inúmeras aplicações, uma vez que o controle de velocidade destes motores pode ser realizado variando sua tensão de alimentação entrada, quando instalados na configuração shunt (tensão de alimentação é diretamente proporcional a velocidade e o torque desenvolvido).

Dentre as plantas que utilizam controle de velocidade estão as usinas de produção de papel, chapas de aço e materiais trefilados, onde o produto final deve ser bobinado. Nestas aplicações, à medida que a bobina cresce, o torque necessário aumenta, então é necessário um sistema de controle capaz de sentir este aumento de carga e atuar mantendo a velocidade constante. [2]

Ainda no contexto de aplicações que necessitam de um controle de velocidade, encontram-se as esteiras transportadoras, responsáveis por descolar os produtos de uma etapa de produção para a etapa seguinte. Se durante um processo, há um acúmulo de produtos, é necessário que a esteira reduza sua velocidade, para que os produtos que estão por chegar até este ponto sofram certo atraso. Tal efeito é executado mediante uma redução de velocidade do transporte. Por outro lado, pode haver situações onde haja carência de

produtos da próxima etapa de produção, daí surge a necessidade de acelerar o processo, para sanar esta falta e fazer com que o processo seguinte siga normalmente.

## 1.1 Motores de Corrente Contínua

### 1.1.1 Controle de velocidade nos motores de corrente contínua

A Figura 1, mostra o modelo do circuito elétrico de um motor CC.

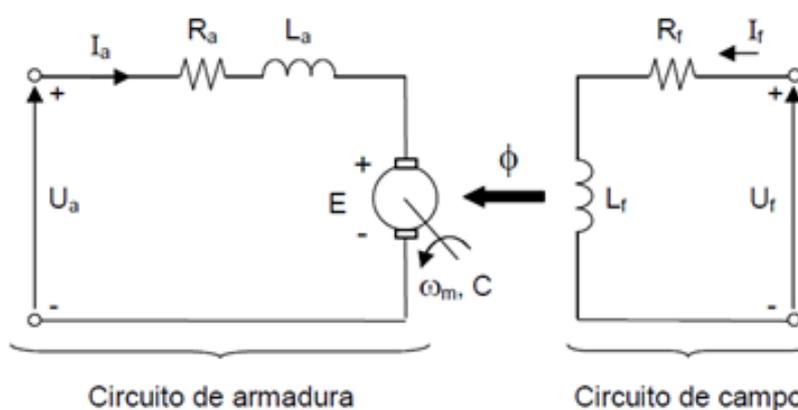


Figura 1: Modelo do circuito elétrico do motor CC.

Pelas leis de Kirchoff aplicadas ao circuito da armadura, tem-se:

$$U_a = R_a I_a + E, \quad (1.1)$$

onde  $U_a$ ,  $R_a$  e  $I_a$  são a tensão, a resistência e a corrente de armadura, respectivamente, e  $E$  é a força eletromotriz induzida (ou força contra-eletromotriz da armadura).

De acordo com a Lei da Indução de Faraday, a força eletromotriz induzida é diretamente proporcional ao fluxo e à rotação, ou seja,

$$E = k_1 \phi n, \quad (1.2)$$

Utilizando (1.1) e (1.2), tem-se que a velocidade do motor CC é dada por

$$n = k_1 \frac{(U_a - R_a \cdot I_a)}{\phi}, \quad (1.3)$$

onde  $n$  é a velocidade de rotação,  $\phi$  é fluxo no entreferro e  $k_1$  é constante que depende do tamanho do rotor, do número de polos do rotor, e de como estes polos são interconectados.

Supondo uma pequena queda de tensão na armadura, ou seja,  $R_a \cdot I_a = 0$ , a equação (1.1) se reduz a

$$n = k_1 \frac{(U_a)}{\phi}, \quad (1.4)$$

Portanto, pode-se notar que a velocidade é diretamente proporcional à tensão de armadura, e inversamente proporcional ao fluxo no entreferro. [2]

Neste contexto, o controle da velocidade (até a velocidade nominal) pode ser feito através da variação da tensão de armadura do motor, mantendo-se o fluxo constante. Vale comentar que é possível conseguir velocidades acima da nominal mantendo a tensão na armadura constante e reduzindo o fluxo aplicado. Sabendo que este fluxo é proporcional à corrente de campo, tem-se

$$\phi = k_2 I_f, \quad (1.5)$$

onde  $k_2$  é uma constante de proporcionalidade e  $I_f$  é a corrente de campo.

No que diz respeito ao conjugado do motor, tem-se que

$$C = k_3 I_a \phi, \quad (1.6)$$

onde  $C$  é o conjugado eletromagnético do motor e  $k_3$  é uma constante da força eletromotriz (fem) no motor.

Como explicado anteriormente, com variação da tensão da armadura, mantendo o fluxo constante, consegue-se o controle de velocidade até a rotação nominal. De forma equivalente, observando a equação (1.6), a corrente de armadura aumenta durante essa transição de uma forma considerável, produzindo o conjugado total requerido pela carga, mais o conjugado necessário para a aceleração do motor (o qual é responsável pela variação da velocidade da máquina e, conseqüentemente, pela modificação do valor da força eletromotriz induzida).

Sabe-se que a corrente transitória diminui até um ponto de equilíbrio, definido pelo valor da tensão de armadura aplicado e pela queda de tensão na resistência de armadura, mantendo o torque exigido pela carga. Se o conjugado requerido pela carga é constante, a corrente drenada pelo motor, matematicamente, é constante. No período transitório, a corrente oscila em um sobrepasso, a fim de provocar a aceleração da máquina.

Em regime permanente, o motor CC opera a corrente de armadura constante, cujo módulo é determinado pela carga impressa no eixo. Desta forma, quando varia-se a tensão de armadura, até a rotação nominal, o motor consegue acionar a carga exercendo

um torque constante em qualquer rotação de regime estabelecido.

A Figura 2 representa as curvas características dos motores CC, onde o torque está normalizado dentro dos limites de seu valor nominal de operação, que corresponde a uma corrente de armadura nominal, definida por aspectos térmicos de dimensionamento do motor.

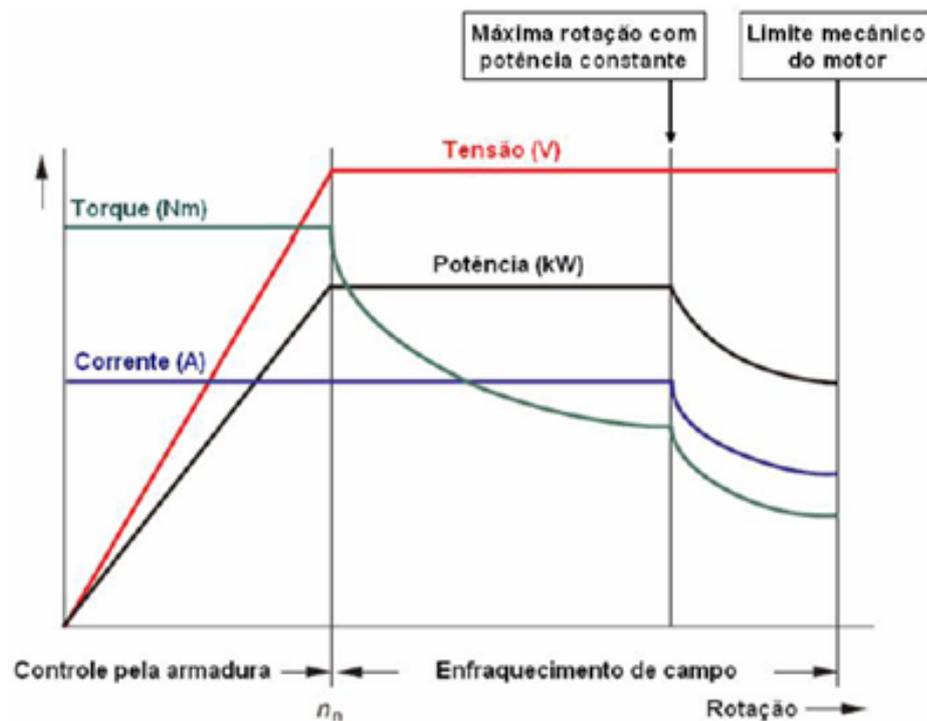


Figura 2: Curvas características de um motor CC.

Mantendo a tensão de armadura constante e variando o fluxo conseguimos o controle da velocidade após a rotação nominal, observa-se a zona de enfraquecimento de campo, responsável pelo aumento de velocidade. A equação (4) mostra que para se aumentar a velocidade deve-se reduzir o fluxo e pela 2 nota-se a relação hiperbólica entre ambos. Ainda, substituindo (4) em (6), tem-se

$$C = (k_4 U_a I_a) / n, \quad (1.7)$$

Ou seja, o conjugado é inversamente proporcional à rotação, uma vez que a tensão e corrente de armadura sejam constantes.

### 1.1.2 Tipos de excitações.

As características dos motores de corrente contínua são profundamente afetadas pelo tipo de excitação prevista. Texto adaptado de [2].

Excitação Série: A Figura 3 mostra a representação de um circuito de motor CC com excitação série:

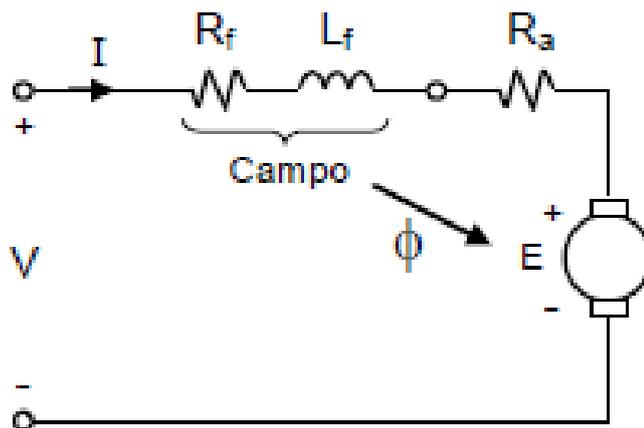


Figura 3: Representação de um circuito de motor CC com excitação série.

Características da excitação série: Bobinas de campo estão em série com o enrolamento da armadura; Só há fluxo no entreferro da máquina quando a corrente da armadura for diferente de zero (máquina carregada); O conjugado é função quadrática da corrente, uma vez que o fluxo é praticamente proporcional à corrente de armadura; Conjugado elevado em baixa rotação. Potência constante. Velocidade extremamente elevada quando o motor é descarregado, por isso não se recomenda utilizar transmissões por meio de polias e correias.

Excitação Paralelo ou Shunt: A Figura 4 mostra a representação de um circuito de motor CC com excitação em paralelo ou shunt.

Características da excitação paralelo ou shunt: Velocidade praticamente constante. Velocidade ajustável por variação da tensão de armadura.

Excitação independente: A Figura 5 mostra a representação de um circuito de motor CC com excitação independente.

Características da excitação independente: Motor excitado externamente pelo circuito de campo; Velocidade praticamente constante; Velocidade ajustável por variação da tensão de armadura e também por enfraquecimento de campo; São os motores mais

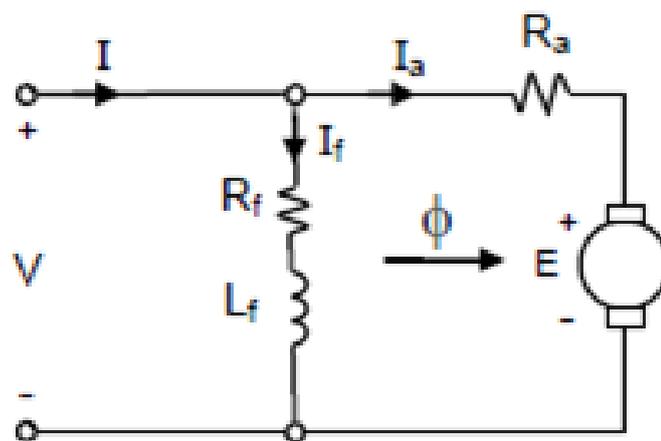


Figura 4: Representação de um circuito de motor CC com excitação paralelo ou shunt.

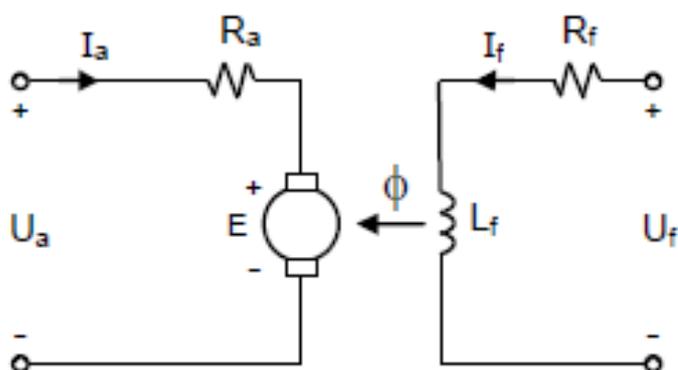


Figura 5: Representação de um circuito de motor CC com excitação independente.

aplicados com conversores CA/CC na indústria; Aplicações mais comuns: máquinas de papel, laminadores, extrusoras, fornos de cimento, etc.

### 1.1.3 Vantagens e desvantagens dos acionamentos em CC

Os acionamentos em corrente contínua são geralmente os que apresentam os maiores benefícios, dependendo da aplicação, em termos de confiabilidade, facilidade de operação dinâmica e de controle, porém podem apresentar algumas desvantagens. Dentre os pontos positivos têm-se a operação em quatro quadrantes com custos relativamente mais baixos, o ciclo contínuo mesmo em baixas rotações, o alto torque na partida e em baixas rotações, uma ampla variação de velocidade, a facilidade em controlar a velocidade, a flexibilidade quanto à excitação, dentre outros. Por outro lado, os motores de corrente contínua são maiores e mais caros que os motores de indução (para uma mesma potência), exigem

uma maior necessidade de manutenção (devido aos comutadores), apresentam arcos e faíscas devido à comutação de corrente por elemento mecânico (não pode ser aplicado em ambientes perigosos), exigem que a tensão entre lâminas não exceda a 20V (ou seja, não podem ser alimentados com tensão superior a 900V, enquanto que motores de corrente alternada podem ter milhares de volts aplicados aos seus terminais) e necessitam medidas especiais de partida, mesmo em máquinas pequenas. [2]

## 1.2 O controlador $\mu$ DX

### 1.2.1 Visão Geral do Controlador $\mu$ DX

Os controladores lógicos programáveis (CLP) foram criados com o intuito de substituir painéis de controle a relé, sendo que sua grande vantagem é a possibilidade de reprogramação de forma mais fácil, uma vez que a reprogramação de painéis a relé, necessitavam de grandes mudanças na estrutura. À medida que se aumentou a utilização e aceitação dos CLPs estes se tornaram mais baratos e com maior número de funções. [3] A tendência atual é a utilização de pequenos CLPs controlando processos locais e comunicando-se com outros controladores e com o controle supervisão. Assim sendo, é possível que uma pane não interrompa todo um processo de uma planta. Vale comentar que muitas máquinas já possuem pequenos CLPs dedicados a controlá-las, tornando seu controle mais fácil e preciso. [3] O controlador  $\mu$ DX é um pequeno CLP que possui quatro entradas e saídas digitais, além de módulos adicionais, tais como expansão digital de entradas e saídas, modem, conversor analógico/digital, dentre outros. Em particular, o conversor analógico/digital um conversor analógico/digital recebe um sinal analógico do ambiente e produz um sinal binário correspondente para ser tratado no CLP. [3]

A Figura 6 ilustra o CLP da Dexter e o módulo de expansão de entradas e saídas analógicas utilizados neste trabalho.

### 1.2.2 Diferenças entre o Controlador $\mu$ DX e os demais CLPs

Para a programação efetiva no Controlador  $\mu$ DX existem algumas dificuldades devido as diferenças entre esse CLP da Dexter e os demais CLPs. Uma das principais diferenças é que nos CLPs convencionais a execução do programa, ou seja a leitura das linhas do programa implementado, é feita de forma ordenada, sendo lida de cima para baixo e da esquerda para a direita, dando preferência para os comandos que se antecipam nessa

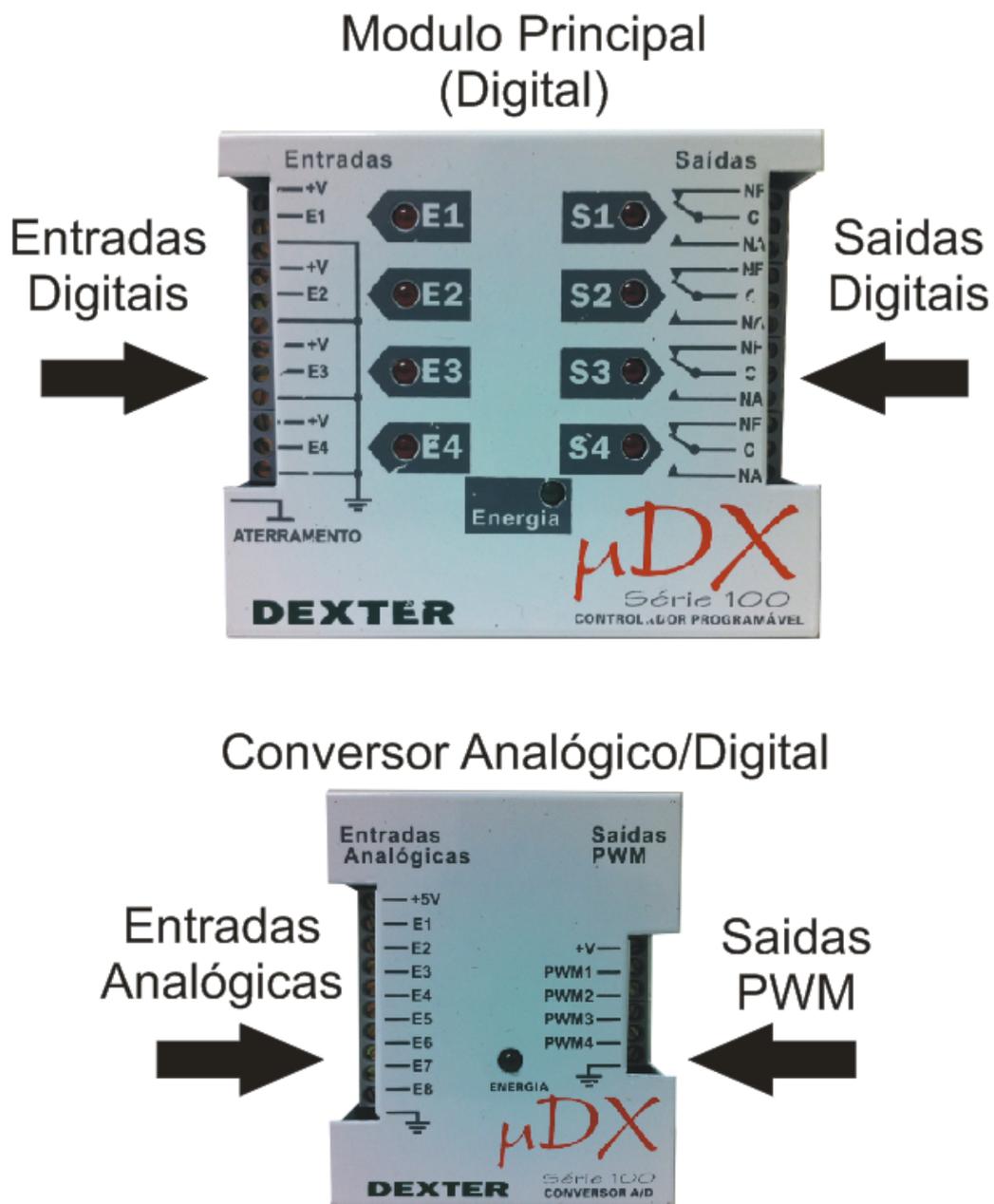


Figura 6: Controlador  $\mu$ DX.

seqüência. No caso do controlador  $\mu$ DX essa leitura é feita de forma paralela, ou seja todas as entradas são lidas e atualizadas simultaneamente.

Outra diferença é que no Controlador  $\mu$ DX não temos a opção de utilizar contadores, que são utilizados para contar o tempo entre um pulso e outro de sensores ou atuadores utilizados no sistema.[3]

No caso dos temporizadores, existem 3 principais tipos que são:

Temporizadores com retardo no ligamento (Toff), que necessita de um sinal de nível

alto em sua entrada durante todo o tempo de contagem para o acionamento da saída depois do tempo programado para seu atraso, caso esse sinal de nível alto na sua entrada for interrompido, a contagem é zerada e recomeçada logo após o sinal de nível alto for recolocado em sua entrada.[4]

Temporizadores com retardo no desligamento (Ton), precisa de um sinal de nível alto em sua entrada durante todo o tempo de contagem para o desligamento da saída depois do tempo programado para continuar ligado, caso esse sinal de nível alto na sua entrada for interrompido, a contagem é zerada e recomeçada logo após o sinal de nível alto for recolocado em sua entrada.[4]

Temporizadores de pulso (Tp), precisa apenas de um pulso de nível alto em sua entrada para ligar e manter a saída em estado de nível alto até o tempo programado para que seja desligada a saída que irá para um nível lógico baixo. Pode haver vários pulsos durante a contagem que o que vale é o primeiro pulso, onde é definido o início da contagem, após o desligamento se houver mais pulsos é reiniciado o processo.[4]

No caso do Controlador  $\mu$ DX temos disponível apenas os tipos Toff e o Tp, diferentemente dos outros CLPs que estão disponíveis os 3 tipos.[3]

### **1.3 Objetivos Gerais e Específicos.**

Este trabalho tem o objetivo de desenvolver um protótipo de um transporte industrial para uso acadêmico em aulas práticas de automação industrial. Com esse protótipo poderá ser simulado algumas situações onde se utilizam transportes dentro das indústrias para que os alunos tenham uma melhor visão de programação de CLP e uma melhor noção de como realmente funciona esse tipo de equipamento dentro de uma indústria.

## 2 *Visão Geral do Protótipo*

### 2.1 O Controle de Velocidade Proposto

Dada a necessidade de pequenos CLPs serem dedicados ao controle de determinadas máquinas com os objetivos de melhorar a qualidade do produto, agilizar o processo de produção, dentre outros.

O presente capítulo apresenta o sistema de controle de velocidade desenvolvido para um motor cc. A figura 7 ilustra a malha de controle do processo, tendo como entrada um nível de tensão desejado (setpoint - SP), proporcional à velocidade desejada, e como saída a velocidade de motor cc.

O motor CC utilizado neste trabalho é alimentado com 5V e apresenta excitação tipo shunt.

Um segundo motor CC é inserido no sistema com a finalidade de determinar a velocidade de rotação do motor, uma vez que ele está montado na configuração de taco-gerador.

Para o controle de velocidade, tomando como entrada o valor de SP, foi implementado no  $\mu$ DX um controlador proporcional, devido às restrições de lógica do CLP para tarefas de controla mais aprimoradas.

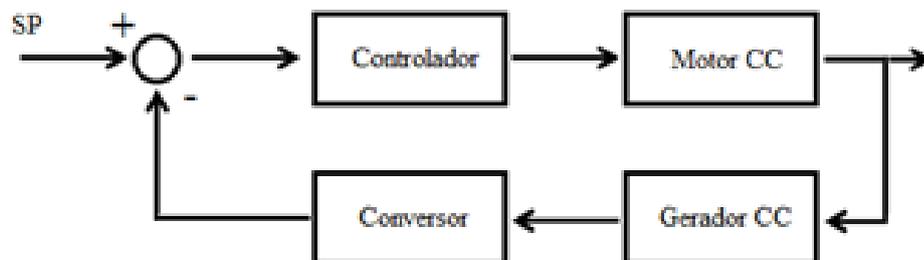


Figura 7: Sistema de Controle de Velocidade.

Detalhando o sistema de controle da figura 7, tem-se que um nível de tensão de entrada

é comparado com um nível de tensão proveniente do taco-gerador acoplado ao motor CC. Esta comparação produz no erro de controle, o qual é aplicado na entrada do controlador. Na sequência, o controlador implementado produz uma saída binária proporcional ao erro. A tensão de saída do controlador é enviada ao motor CC, para que seja realizado o controle de velocidade.

Para o controlador mostrado na figura 8 a modelagem do controle de velocidade terá a seguinte função de transferência:

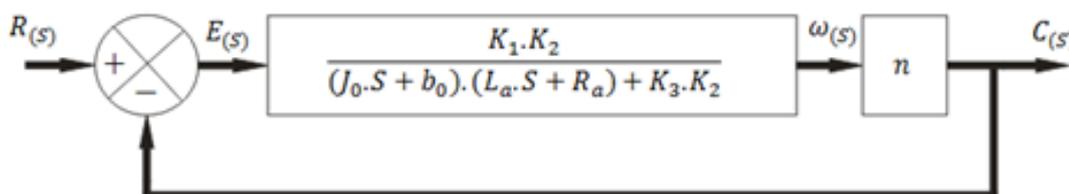


Figura 8: Modelo do controlador de velocidade.

A equação diferencial do circuito da armadura é:

$$L_a(dI_a)/dt + R_a i_a + k_3 \omega = k_1 e, \quad (2.1)$$

onde  $L_a$  representa a indutância de armadura,  $R_a$ , a resistência de armadura,  $i_a$ , a corrente de armadura,  $k_3$  a constante da fem do motor,  $k_1$  a constante de ganho,  $\omega$  a velocidade angular do motor e  $e$  o erro de tensão

A equação de equilíbrio do conjugado é dada por:

$$J_0 d\omega/dt + b_0 \omega = k_2 i_a, \quad (2.2)$$

onde  $J_0$  representa o momento de inércia da combinação, motor, carga e conjunto de engrenagens do redutor do motor,  $b_0$  o coeficiente de atrito viscoso do conjunto, motor, carga e conjunto de engrenagens do redutor do motor e  $k_2$  a constante do conjugado do motor.

Passando as equações (2.2) e (2.1) para o domínio de 'S' temos: A equação do circuito da armadura:

$$L_a S I_a + R_a I_a + K_3 \omega = k_1 E, \quad (2.3)$$

Colocando  $I_a$  em evidência temos:

$$I_a \cdot (L_a S + R_a) + K_3 \omega = k_1 E, \quad (2.4)$$

A equação de equilíbrio do conjugado resulta em:

$$(J_0 S \omega + b_0 \omega) / K_2 = I_a, \quad (2.5)$$

Colocando  $\omega$  em evidência temos:

$$((\omega(J_0 S + b_0)) / K_2 = I_a, \quad (2.6)$$

Substituindo a equação (2.6) em (2.4) temos:

$$\omega(J_0 S + b_0)(L_a S + R_a) + K_3 K_2 = K_1 K_2 E, \quad (2.7)$$

Onde temos:

$$\omega_c(S) / E_c(S) = (K_1 K_2) / ((J_0 S + b_0) \cdot (L_a S + R_a) + K_3 K_2), \quad (2.8)$$

Sabendo que:

$$C_c(S) = n \cdot \omega_c(S), \quad (2.9)$$

Temos que :

$$C_c(S) / E_c(S) = (K_1 K_2 n) / ((J_0 S + b_0) \cdot (L_a S + R_a) + K_3 K_2), \quad (2.10)$$

Note que a Equação (2.10) mostra a equação de transferência do controlador desenvolvido. [4]

Vale comentar que a saída binária do controlador é constituída de quatro níveis digitais de tensão, que são convertidos ao formato analógico mediante o circuito R2R mostrado na figura 9. Isto indica, portanto, que o sistema desenvolvido proporciona de quatro níveis de velocidade para esteira transportadora.

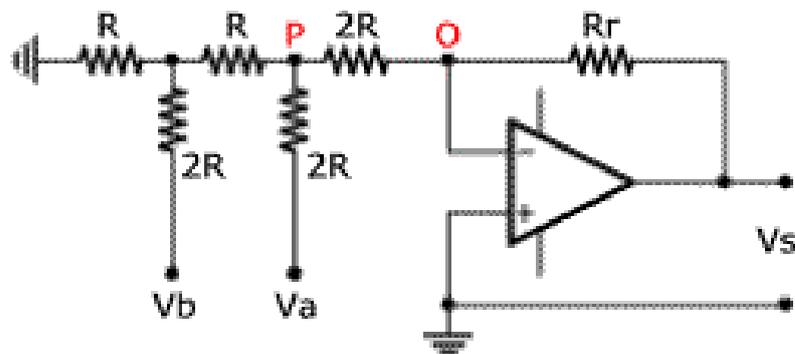


Figura 9: Circuito Conversor Digital Analógico tipo R2R.

Em adição ao controle de velocidade, o projeto desenvolvido consta com um selecionador de produtos, que determina a destinação deste através de sua altura.

Dois sensores, que nesse projeto foram utilizados chaves manuais (interruptores), as quais simulam sensores de presença funcionam em conjunto e alinhados. O sensor 2 situado em nível inferior ao sensor 3 verifica a passagem da caixa antes de entrar no selecionador, e o sensor 3 propriamente dito verifica o nível da caixa. Se a caixa for alta, ele será atuado, porém se a caixa for baixa ele não será atuado. Esse sensor 3 é o que definirá o caminho da caixa dentro do transportador. Nota: Os produtos foram definidos como alto e baixo em função das limitações de entradas digitais no  $\mu$ DX utilizado.

A figura 10 ilustra o sistema desenvolvido e apresenta as partes correspondentes.

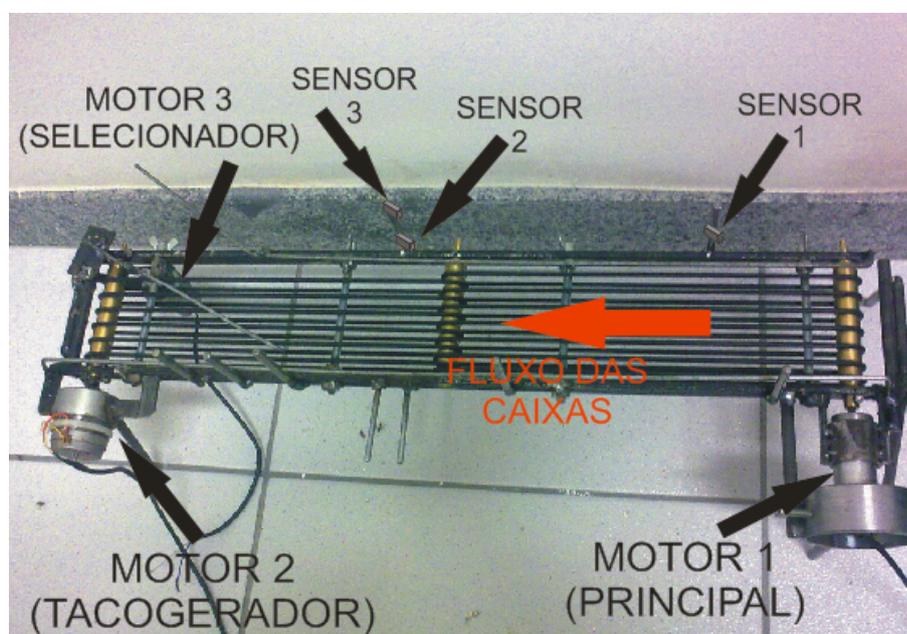


Figura 10: Foto do protótipo desenvolvido.

Uma vez identificada a altura das caixas a serem transportadas, o selecionador (vide figura 10) destina as caixas para caminhos distintos conforme mostrado na figura 11.

Conforme mencionado anteriormente, o sistema desenvolvido se aplica em situações em que a carga é variável, como, por exemplo, em usinas de produção de papel, onde o produto final deve ser enrolado em bobinas e, à medida que a bobina cresce, o torque necessário aumenta, então é necessário um sistema de controle que a medida que a carga aumenta, o sistema aumente o torque e mantenha a velocidade constante.

Em adição, tal sistema pode ser implementado em situações quaisquer onde haja a necessidade de variação de velocidade, como, por exemplo, nas indústrias que utilizam

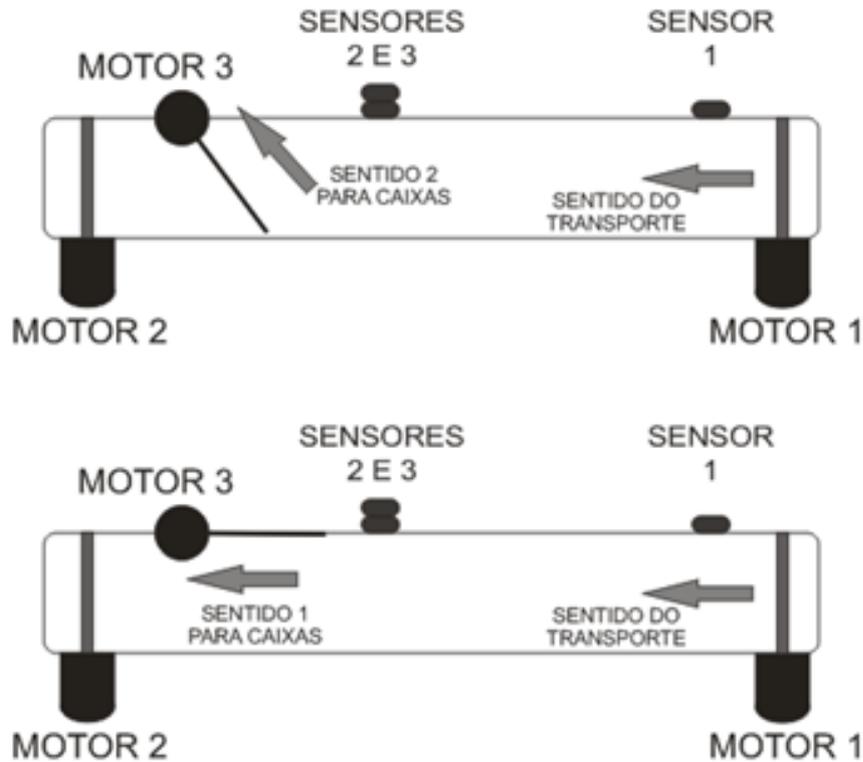


Figura 11: Passíveis sentidos para produtos na esteira.

esteiras para transportar seus produtos para que possam chegar à próxima etapa do processo. Se durante esse processo há um acúmulo de produtos, é necessário reduzir a velocidade da esteira transportadora, para que os produtos subsequentes cheguem com certo atraso. Em situações contrárias, onde há uma carência de produtos, a esteira deve acelerar sua velocidade, para que os produtos possam chegar mais rapidamente à etapa seguinte, suprimindo, portanto, a necessidade do novo processo.

## 2.2 O projeto de hardware do protótipo

Para o desenvolvimento do sistema mostrado na figura 11, utilizou-se um controlador lógico programável ( $\mu$ DX), uma expansão de conversão analógico/digital do  $\mu$ DX, um computador para programação, três motores CC, um circuito amplificador de sinal, potenciômetros de ajuste, e outros insumos.

Os motores foram utilizados para o movimento principal da esteira, para a geração de uma tensão para a realimentação do CLP (quando instalado na função de taco-gerador) e, finalmente, para o direcionamento das caixas selecionadas de acordo com a programação

em software. Tais motores são denominados, respectivamente, por M1, M2 e M3.

## 2.3 O sistema sensorial utilizado

Considerando a figura 12, o sensor S1 é utilizado para a identificação de objetos na entrada da esteira e para a contagem de tempo de entrada entre uma caixa e outra. Este tempo é utilizado como sinal de realimentação do CLP, a fim de indicar a necessidade de aumentar ou diminuir a velocidade da esteira. Os sensores S2 e S3 são posicionados de um sobre o outro para a seleção de caixas através da altura das mesmas. Vale lembrar que o sistema desenvolvido somente é capaz de identificar dois níveis distintos de altura de caixas.

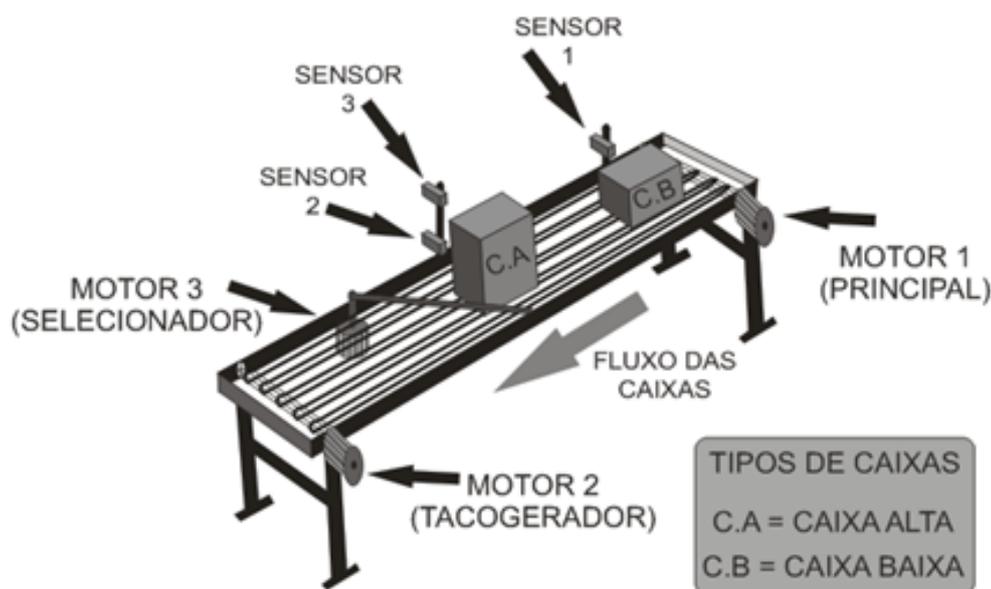


Figura 12: Passíveis sentidos para produtos na esteira.

Para determinar o sinal de setpoint, isto é, o valor inicial de velocidade desejada, utilizou-se divisor de tensão através de um potenciômetro. O valor de tensão equivalente é então convertido em um sinal digital através do módulo de entrada analógica do  $\mu$ DX e do diagrama de blocos implementado. A subseção 13 detalha o software desenvolvido.

## 2.4 Os conversores A/D e D/A utilizados

O circuito apresentado anteriormente na figura 9 é um conversor digital/análogo responsável por converter um sinal discreto de entrada em um nível de tensão proporcional

e contínuo na saída. Tal circuito é conhecido como circuito R2R, cujas entradas digitais são aplicadas em  $V_a$  e  $V_b$ , de acordo com a codificação binária do sinal de entrada. Este valor binário é então convertido em um valor de tensão em  $V_s$  amplificado pelo resistor de ganho  $R_r$ . [5]

Neste conversor, cada chave ligada ( $V_a$  ou  $V_b$ ) produz uma contribuição de corrente fornecida ao amplificador operacional, as quais possuem pesos ponderados de acordo com sua posição binária. A tensão de saída fornecida pelo conversor D/A é aplicada a M1.

## 2.5 O Circuito Ponte H e sua aplicação no protótipo

A ponte H é um circuito eletrônico capaz de inverter o sentido de rotação do motor, polarizando o mesmo no sentido contrário ao anterior. A figura 13 apresenta um esquemático do funcionamento deste sistema através de chaves. Estes circuitos são geralmente utilizados em robótica e estão disponíveis em circuitos integrados (LM293D) ou podem ser construídos por componentes analógicos, tais com transistores e mosfets operando na região de saturação, e digitais, tais como relés e contadores. [6]

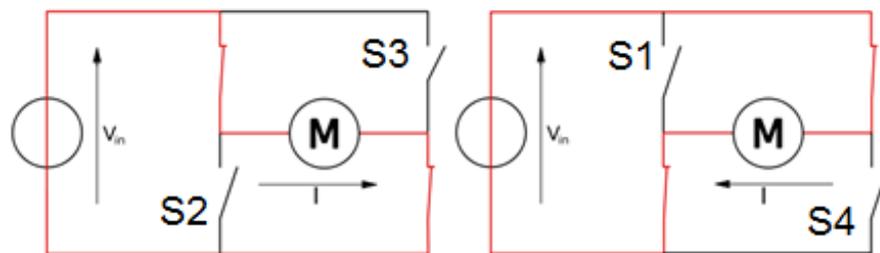


Figura 13: Esquema de funcionamento do circuito Ponte H.

O nome ponte H é dado pela forma que assume o circuito quando montado, vide figura 13. O circuito é construído com quatro "chaves" (S1, S2, S3 e S4) que são acionadas de forma alternada (S1 e S4 ou S2 e S3), proporcionando, no entanto, que o motor gire em um sentido ou em outro. Vale comentar que as chaves S1 e S2, assim como S3 e S4 não devem ser acionadas simultaneamente, pois implicaria em um curto-circuito. Comumente, utiliza-se lógica exclusiva para o acionamento de S1 e S2, como também de S3 e S4. O circuito integrado LM293D correspondente a um conjunto Ponte H é utilizado nesse trabalho para o acionamento bidirecional de M3, o qual é responsável pela seleção do caminho que as caixas transportadas irão seguir. A definição da direção de giro é determinada pelo software implementado no CLP e descrito em detalhes na Seção 2.6.

## 2.6 O projeto de software desenvolvido

Note que na primeira parte do programa (linhas 1 a 6 da figura 14) , realizamos a programação da entrada analógica, onde referenciamos os 4 níveis de saída. Logo após, nas linhas de 6 a 8, comparamos com o valor da realimentação proveniente do motor 2 (gerador) que gera uma tensão e é colocada na entrada analógica do nosso CLP, para que possamos realizar as operações descritas no programa Ladder mostrado anteriormente. Nesse caso subtraímos o valor lógico da entrada do nosso set point (V10) com o valor realimentado pelo motor 2 (V11), que fica armazenado na variável V10, logo após movemos esse resultado para uma outra variável V6 e em seguida tornamos o valor da variável V0, o valor dessa diferença onde faremos que caso esse valor seja diferente de 0, o sistema receba um acréscimo de velocidade.

Nas linhas 9 a 11 da figura 14 e 12 a 18 da figura 15, implementamos o sistema de controle de velocidade do Sensor 1, para que a velocidade do transporte possa ser variado conforme o fluxo de caixa seja variado, fluxo que será verificado através do Sensor 1. Note que por motivos de não existir contador na programação do CLP da dexter, utilizamos um sistema de temporizadores, onde nesse programa, por uma questão didática, teremos um acréscimo de velocidade a cada 2 segundos, porém esse tempo pode ser facilmente modificado no programa, como mostrado nos temporizadores da linha 12, 13 e 14. Podemos notar também, que a velocidade sempre começa a aumentar do valor do set point inserido.

O sistema de identificação de caixas está desenvolvido nas linhas 19 a 25 da figura 15. Note que para conseguirmos dar prioridade a uma entrada, já que o sistema do Controlador  $\mu$ DX não temos uma leitura tradicional feita de cima para baixo e da esquerda para a direita, e para sanar esse problema, utilizamos na linha 19, um temporizador para tirar a prioridade do sensor 2, já que precisamos dar a prioridade para o sensor que controla a altura (Sensor 3), pois se esse sensor for acionado o fluxo deve seguir o caminho determinado para as caixas altas, nesse caso específico direcionamos as caixas altas para o fluxo corrente do transporte e as caixas baixas para o fluxo lateral. Também utilizamos dois temporizadores nas linhas 24 e 25 para garantir que o motor 3, ficará ligado por no máximo 1 segundo, tempo suficiente para a transição do selecionador tomar sua posição desejada.

A seguir, mostrado nas figuras 14 e 15, temos o código utilizado no CLP para o desenvolvimento do projeto.

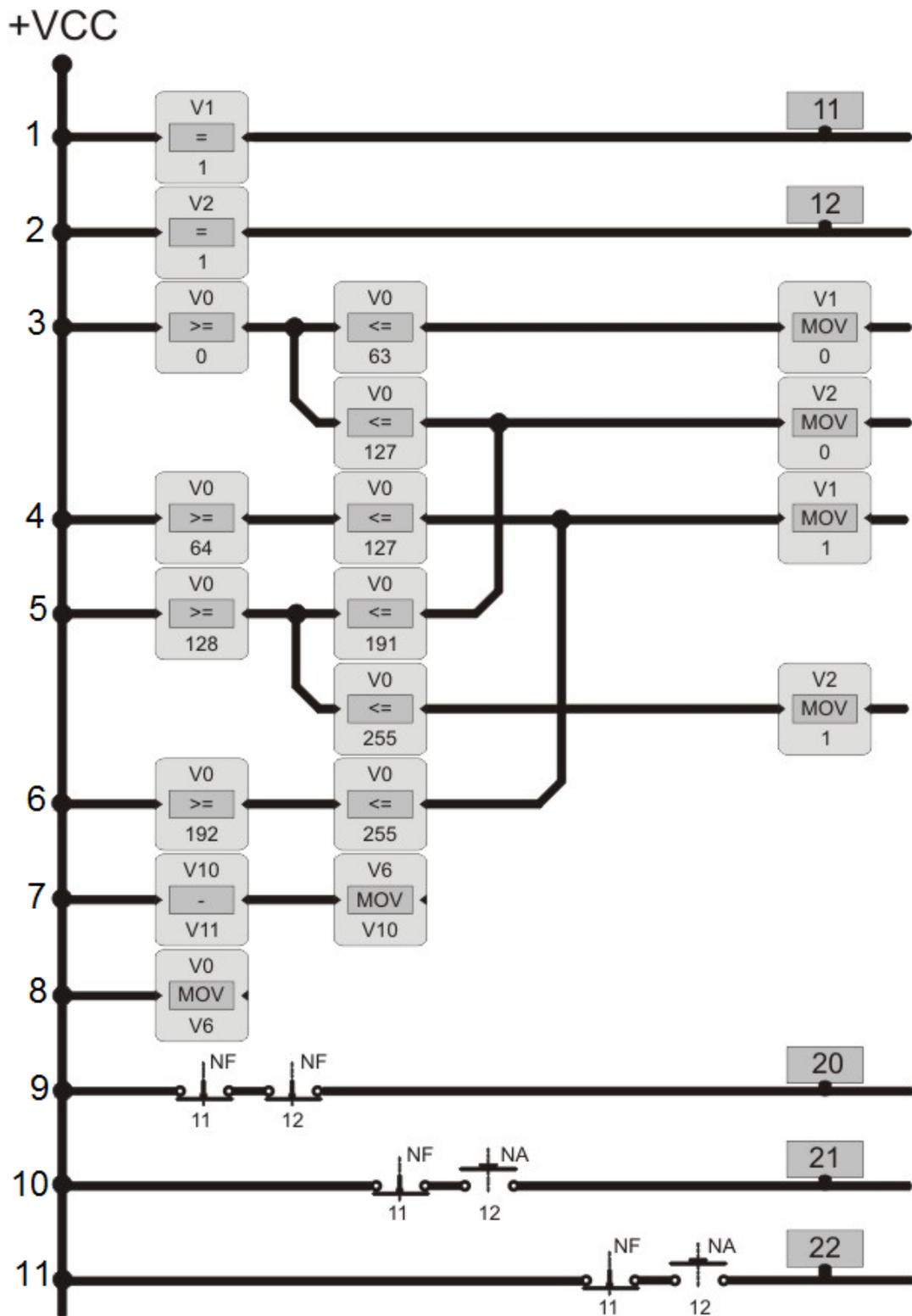


Figura 14: Programa ladder desenvolvido.

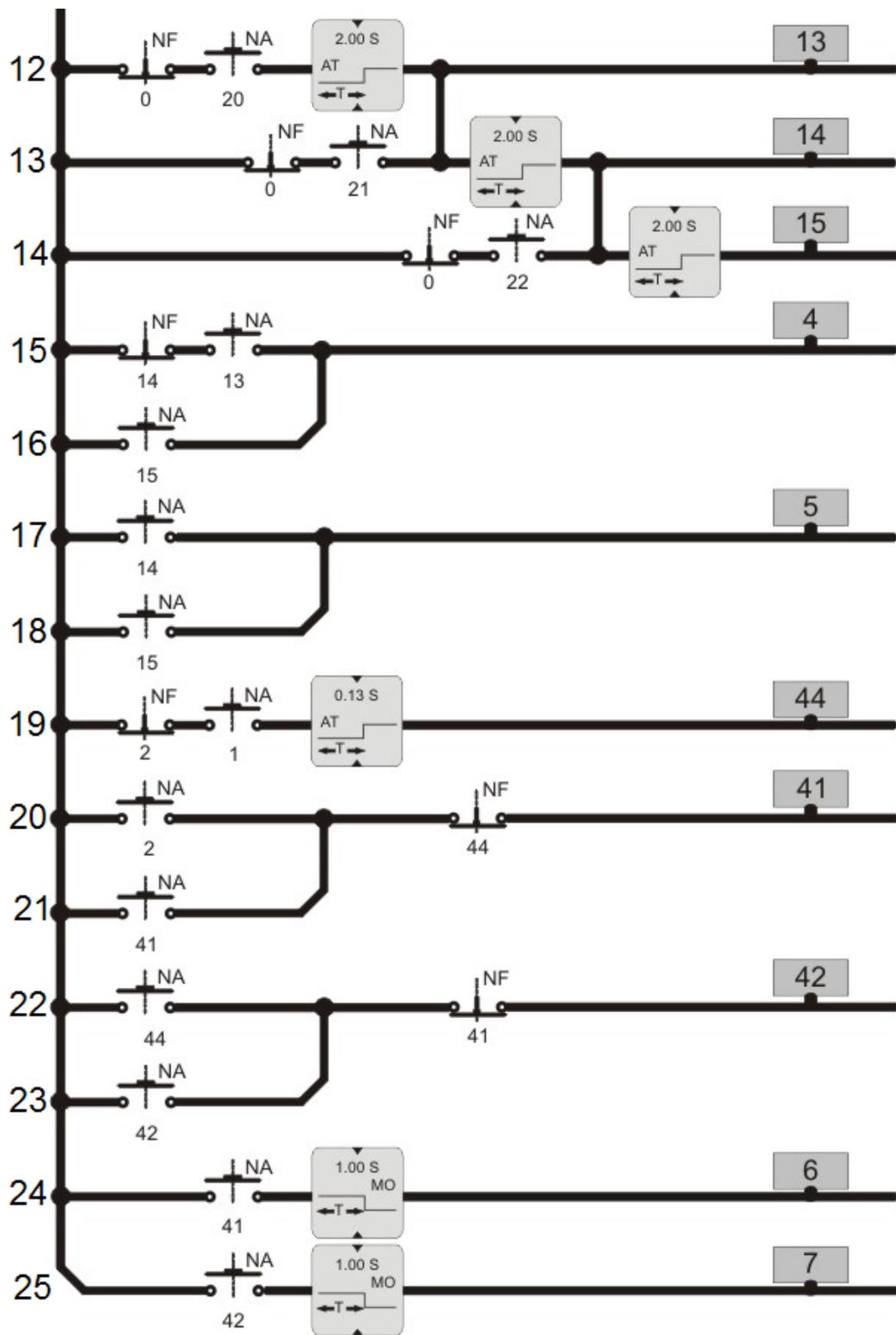


Figura 15: Programa ladder desenvolvido (continuação).

### *3 Resultados e Discussões*

Para validação do sistema proposto, foi realizada uma sequência de testes:

Primeiramente, foram testados os motores para a verificação de seu funcionamento, em seguida foi ligado o sistema e dado início ao teste de funcionamento a vazio.

Nesse teste, foi verificado o comportamento do transporte sem que houvesse nenhuma caixa na esteira e notou-se que a velocidade do transporte se manteve constante como esperado.

Em seguida variamos o SP e verificamos a mudança de velocidade da esteira de acordo com os 4 níveis de velocidade pré determinada no transportador.

Logo após terminado os testes a vazio, testamos o funcionamento dos sensores que fazem a seleção do caminho a ser percorrido pelas caixas, juntamente com o motor 3 que seleciona o caminho.

Podemos notar que quando uma caixa alta é colocada na esteira, o sensor 2 que verifica a chegada da caixa ao selecionador foi acionado junto com o sensor 3, indicando que a caixa atingiu o nível de altura para ser considerado alta, assim de acordo com o programa implementado a caixa seguiu o caminho lateral do transporte.

Foi verificado também que quando colocamos uma caixa baixa no transportador, o sensor 2 foi acionado, enviando o sinal para o CLP de que a caixa está próxima ao selecionador porem o sensor 3 não foi acionado, pois a caixa não atingiu a altura necessária, com isso a caixa seguiu o fluxo continuo do transporte como era esperado.

Esses sentidos que as caixas tomam podem ser alterados com uma simples mudança no programa Ladder desenvolvido, fazendo com que as caixas altas sigam o fluxo do transportador e as caixas baixas tomem o caminho lateral do transporte.

Terminado os testes com os sensores 2 e 3 e com o motor 3, iniciamos os testes com o sensor 1, onde foi verificado seu funcionamento.

Quando colocamos uma caixa na esteira ele identificava a entrada da caixa no transportador e iniciava a contagem até a próxima caixa que entrasse no transporte e acionasse novamente esse sensor. Quando o tempo entre uma caixa e outra ultrapassasse o tempo de 2 segundos o transporte aumentava sua velocidade em um nível, após 4 segundos o transporte aumentava sua velocidade em mais um nível, ou seja, dois níveis a mais que o inicial, e se ultrapassasse 6 segundos aumentava de velocidade para o seu último nível. Para que o transporte possa sofrer 3 incrementos de velocidade temos que manter o SP na velocidade mínima, para que pudéssemos ter 3 incrementos de velocidade superior a do início. Caso o SP estivesse em uma posição intermediária, por exemplo no nível 2 de velocidade, somente seremos dois níveis de incrementação pois foi imposto para o CLP, o nível 2 como nível de velocidade mínima de trabalho.

Em seguida, colocou-se um valor de tensão de referência como set point na malha de controle através de um potenciômetro, essa tensão é comparada com a tensão vinda do gerador e o erro é aplicada no controlador, o controlador então aplica uma tensão proporcional ao erro no motor cc, o gerador que está acoplado ao motor gera uma tensão que realimenta o controlador.

Ao aumentar a carga no eixo do motor, a velocidade tende a diminuir e com uma velocidade menor, o gerador acoplado ao eixo gera uma tensão menor, que realimenta o controlador, produzindo então um erro maior.

Com o erro maior o controlador aplicará uma tensão maior na entrada do motor cc, que conseguirá então manter a velocidade e o torque. Ao aumentar a velocidade, o gerador passa a gerar uma tensão maior que realimentará o controlador fechando então a malha de controle.

## 4 *Conclusões*

Conclui-se que sistemas de controle utilizado CLPs são importantes para alguns processos pois dispensa a intervenção humana, eliminando possíveis erros e imprevistos e mantém a velocidade constante de motores em processos que necessitam de velocidade constante, ou alteram a sua velocidade de acordo com sua necessidade como mostrado nesse projeto.

A utilização de controladores é eficiente e barata, uma vez que microprocessadores, que são a base dos controladores, se tornam cada vez mais baratos e com o desenvolvimento da tecnologia esses equipamentos se mostram cada vez mais seguros e acessíveis.[3]

Algumas sugestões para a continuidade nesse projeto e uma modelagem precisa, afirmando os valores de constantes citadas anteriormente, para que se possa ter os dados para uma modelagem precisa e detalhada.

## *Referências*

- [1] KOSOW, I. I. *Maquinas Elétricas e Transformadores*. [S.l.]: 8 edição, Globo, 1989.
- [2] MOTORES de Corrente Contínua: Guia Rápido para Especificação Precisa. [S.l.], Acesso em 11/2010. Disponível em: <[www.asfa.com](http://www.asfa.com)>.
- [3] CONTROLADOR Programável  $\mu$ DX série 100. [S.l.], Acesso em 11/2010. Disponível em: <[www.dexter.ind.br](http://www.dexter.ind.br)>.
- [4] OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. [S.l.]: 4 edição, Prentice Hall, 2003.
- [5] CONVERSOR digital-analógico. [S.l.], Acesso em 11/2010. Disponível em: <[www.mspc.eng.br](http://www.mspc.eng.br)>.
- [6] TUTORIAL de Montagem da Ponte H. [S.l.], Acesso em 11/2010. Disponível em: <[www.maxwellbohr.com.br](http://www.maxwellbohr.com.br)>.