

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E
ELETRÔNICA**

Gabriel Manoel da Silva

**SISTEMA CNC DE POSICIONAMENTO APLICADO À
CARACTERIZAÇÃO DE ACOPLAMENTO INDUTIVO**

Florianópolis

2015

Gabriel Manoel da Silva

**SISTEMA CNC DE POSICIONAMENTO APLICADO À
CARACTERIZAÇÃO DE ACOPLAMENTO INDUTIVO**

TCC submetido ao Curso de Engenharia Eletrônica para a obtenção do Grau de Engenheiro em Eletrônica.
Orientador: Prof. Dr. Fernando Rangel de Sousa

Florianópolis

2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

da Silva, Gabriel Manoel

Sistema CNC de posicionamento aplicado à caracterização
de acoplamento indutivo / Gabriel Manoel da Silva ;
orientador, Fernando Rangel de Sousa - Florianópolis, SC,
2015.

89 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Graduação em Engenharia Eletrônica.

Inclui referências

1. Engenharia Eletrônica. 2. posicionadora CNC. 3.
acoplamento indutivo. 4. código G. I. de Sousa, Fernando
Rangel. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia Eletrônica. III. Título.

Gabriel Manoel da Silva

**SISTEMA CNC DE POSICIONAMENTO APLICADO À
CARACTERIZAÇÃO DE ACOPLAMENTO INDUTIVO**

Este TCC foi julgado aprovado para a obtenção do Título de “Engenheiro em Eletrônica”, e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Eletrônica.

Florianópolis, 04 de Dezembro 2014.



Prof. Dr. Fernando Rangel de Sousa

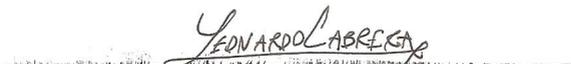
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Eduardo Augusto Bezerra
EEL-UFSC



Prof. Dr. Marcelo Ricardo Stemmer
DAS-UFSC



Me. Fabiani Leonardo Cabrera
PPGEEL-UFSC

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e familiares presentes em todos os momentos desta caminhada.

Ao professor Dr. Fernando Rangel de Sousa por acreditar no meu trabalho e incentivar a conclusão deste trabalho de forma paciente e cooperativa.

Ao doutorando Fabian Cabrera por auxiliar nas decisões realizadas durante este trabalho.

Aos professores do departamento de Engenharia Eletrônica durante a realização deste curso e pelos ensinamentos compartilhados.

Aos colegas de curso pelas amizades criadas e fortalecidas durante a realização da graduação

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma máquina posicionadora via controle numérico computadorizado (CNC). Essa máquina visa ter baixo custo em relação às soluções disponíveis no mercado. A posicionadora é aplicada como auxiliar nas medidas de eficiência de transmissão de energia sem fio. O acoplamento indutivo projetado no grupo de pesquisas em rádio frequência da UFSC é utilizado nas medidas realizadas. A estrutura da máquina foi construída com madeira, as guias de movimento linear são cilíndricas e as peças movem-se sobre rolamentos lineares através de trabalho gerado por motores de passo e transmitido por correia dentada e fuso. A placa controladora utiliza microcontrolador de oito bits de baixo custo e é capaz de interpretar um conjunto de códigos numéricos no padrão RS274 e executar os comandos. Os comandos são enviados através da interface homem-máquina do microcomputador via porta USB. Foi utilizada a posicionadora em conjunto com equipamentos de medidas em rádio-frequência, de forma a automatizar o processo de caracterização da eficiência no acoplamento indutivo. A eficiência de transmissão de energia sem fio foi verificada para diferentes posições relativas do indutor transmissor e receptor, resultando em gráficos de eficiência em função das posições dos indutores.

Palavras-chave: CNC. Máquina Posicionadora. acoplamento indutivo.

ABSTRACT

This study presents the development of a positioning machine of computer numerical control (CNC). Which aims to have lower fabrication costs than other solutions currently available in the marketplace. The positioning machine is implemented to assist in the measuring of wireless energy transmission efficiency. A inductive link, developed by the radio frequency research group (GRF) at UFSC, was utilized in the performed measures. The structure of the machine was built on wood, the linear motion guides are cylindrical and the parts move upon linear bearings through the work generated by stepper motors and transmitted by a timing belt and a pulley . Its control board utilizes a low cost 8-bit microcontroler which is capable of reading a set of numerical codes in the RS274 standard and execute the commands. The commands are sent through the human-machine interface of the microcomputer via USB port. The positioning machine was used along with radio frequency measuring equipments, intending to automate the process of characterizing the efficiency of a inductive coupler. The wireless energy transmission efficiency was verified for different positions of the transmitter and receptor coil, such analyses resulted in efficiency graphs traced as function of the coils position.

Keywords: CNC. Inductive link. Positioning machine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Movimentos possíveis em um corpo livre.....	23
Figura 2	Fuso e castanha, Fonte: Mectrol.....	24
Figura 3	Eixos lineares, Fonte: Mectrol.....	25
Figura 4	Motores DC com encoders. Fonte: Brastronic.....	26
Figura 5	Esquemático de motor de passo unipolar.....	27
Figura 6	Esquemático de motor de passo bipolar.....	28
Figura 7	Esquemático do circuito de acionamento do motor de passo unipolar.....	30
Figura 8	Esquemático do circuito de acionamento do motor de passo unipolar.....	31
Figura 9	Formas de onda do torque inercial.....	31
Figura 10	Componentes de um sistema CNC, adaptado de Suh et al. (2008).....	33
Figura 11	Perfis de velocidade, Velocidade (V_0) em função de períodos de tempo discreto (k).....	36
Figura 12	Diagrama de blocos do Núcleo de Controle Numérico, adaptado de Suh et al. (2008).....	38
Figura 13	Diagrama do bloco Interpretador, adaptado de Suh et al. (2008).....	39
Figura 14	Diagrama do CLP, adaptado de Suh et al. (2008).....	41
Figura 15	Máquina com movimento horizontal na mesa. (SLOCUM, 1992).....	44
Figura 16	Modelo 3D da estrutura mecânica.....	45
Figura 17	Correia dentada GT2, Fonte: Adafruit.....	46
Figura 18	Polia dentada GT2, Fonte: Adafruit.....	46
Figura 19	Transmissão por barra roscada.....	47
Figura 20	Sugestão de circuito do circuito integrado A4988.Fonte: Allegro Microsystems.....	48
Figura 21	Forma de onda para acionamento do servo-motor.....	49
Figura 22	Sensor de barreira óptico SX199.....	50
Figura 23	Circuito de polarização do sensor óptico.....	50
Figura 24	Módulo conversor USB/RS232 utilizando CI FT232RL, fonte: FTDI.....	52

Figura 25	Esquemático da placa controladora.....	53
Figura 26	Esquemático da placa controladora.....	54
Figura 27	Fluxograma do método “RetornaN”.....	58
Figura 28	Máquina de estados finita simplificada do método “Analisador”.....	60
Figura 29	Algoritmo do método “moveEixos”.....	62
Figura 30	Algoritmo do programa principal.....	64
Figura 31	Painel de controle da interface homem-máquina.....	65
Figura 32	Perfil trapezoidal aplicado à posicionadora.....	67
Figura 33	Painel de controle da IHM utilizada para testar máquina.....	68
Figura 34	Bancada de testes da máquina posicionadora e acoplamento indutivo.....	69
Figura 35	Layout do circuito integrado projetado por Cabrera e Sousa (2014b).....	70
Figura 36	Diagrama de funcionamento do circuito integrado.....	70
Figura 37	Fluxograma da automação das medidas.....	71
Figura 38	Algoritmo de medidas automatizadas.....	71
Figura 39	Eficiência do acoplamento indutivo variando a separação no eixo “Z” entre indutores.....	72
Figura 40	Eficiência do acoplamento indutivo para o plano “XY” com $Z=4$ mm.....	73
Figura 41	Curvas de nível da eficiência do acoplamento indutivo para o plano “XY” com $Z=4$ mm.....	73
Figura 42	Eficiência do acoplamento indutivo para o plano “XZ”.....	74
Figura 43	Curvas de nível da eficiência do acoplamento indutivo para o plano “XZ”.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Tabela de acionamento do motor de passo unipolar	27
Tabela 2	Tabela de acionamento do motor de passo bipolar	28
Tabela 3	Características de um motor de passo de alta performace	29
Tabela 4	Exemplos de códigos G	34
Tabela 5	Resolução do Drive de motor de passo	56
Tabela 6	Lista de códigos interpretados pela classe “Intérprete” .	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	INTRODUÇÃO	19
1.2	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	19
1.3	OBJETIVOS	20
1.4	METODOLOGIA	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	INTRODUÇÃO A MÁQUINAS CONTROLADAS POR COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO(CNC)	23
2.2	MOVIMENTO DOS EIXOS	24
2.3	MOTORES.....	24
2.3.1	Servo-Motor	25
2.3.2	Motor de Passo	25
2.3.2.1	Motor de passo unipolar.....	26
2.3.2.2	Motor de passo Bipolar	27
2.3.2.3	Especificações de um motor de passo	28
2.3.2.4	Circuito de controle para motor unipolar	29
2.3.2.5	Circuito de controle para motor bipolar	30
2.3.2.6	Controle de motor utilizando micropasso	30
2.4	SISTEMAS CNC.....	33
2.4.1	Estrutura de um programa CNC	33
2.4.2	Principais funções de um sistema CNC	34
2.4.3	Interface homem máquina (IHM)	36
2.4.4	Núcleo de controle numérico (NCK)	37
2.4.4.1	Interpretador	39
2.4.5	Controlador lógico programável (CLP)	40
2.5	CONCLUSÃO	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	ESTRUTURA MECÂNICA	43
3.2	HARDWARE	47
3.2.1	Drive dos motores de passo	48
3.2.2	Servo-motor	49
3.2.3	Sensores de fim de curso	49
3.2.4	Conversor USB-serial	51
3.2.5	CPU da controladora	51
3.2.6	Placa Controladora	53
3.3	FIRMWARE DA CONTROLADORA	54
3.3.1	Classe Serial	55

3.3.2	Classe Micropasso	55
3.3.3	Classe ServoMotor	56
3.3.4	Classe Interrupção	57
3.3.5	Classe EEPROM	57
3.3.6	Classe Funções auxiliares	57
3.3.7	Classe Intérprete	59
3.3.8	Classe Posicionador	61
3.3.9	Programa Principal	63
3.4	INTERFACE HOMEM-MÁQUINA	63
4	TESTES E RESULTADOS	67
5	CONCLUSÕES	75
	REFERÊNCIAS	77
	APÊNDICE A - Declaração de classes e métodos utilizados	81
	APÊNDICE B - Código-fonte do programa da controladora CNC	85

1 INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais estamos cercados de dispositivos que se comunicam sem fio, por exemplo, telefones celulares, computadores e notebooks, receptores de televisão e de rádio desde o final do século XIX (MARCONI, 1922). Porém, ainda se tem a limitação destes dispositivos precisarem da conexão com fio com a fonte de energia.

As equações de Maxwell (1864) definem os pressupostos teóricos para transmissão de energia sem fios (SHINOHARA, 2014), que foram verificados experimentalmente ainda no século XIX por Hertz. Mas, foi Nicola Tesla quem vislumbrou a possibilidade de transmissão de energia sem fios em 1899, embora seus demonstradores tenham então falhado.

Atualmente essa tecnologia está sendo inserida em diversas áreas, tais como para carga de baterias de carros elétricos (SALLÁN et al., 2009) e fornecimento de energia para sensores e dispositivos biomédicos implantáveis. Um exemplo do estudo de acoplamento indutivo para dispositivos biomédicos implantados foi publicado por Cabrera e Sousa (2014a).

Cada sistema citado anteriormente tem suas características particulares da aplicação, por exemplo, a potência transferida à carga e as dimensões do indutor transmissor e receptor. Nas aplicações de energia sem fio se têm em comum um fator que é essencial para o funcionamento destes sistemas, a eficiência de transmissão de energia, que é função entre outras coisas da distância entre indutores.

As pesquisas atuais em transmissão de energia sem fio buscam a maximização da eficiência energética do sistema, para tal, procura-se obter o casamento de impedâncias ótimo entre o indutor emissor e receptor, assim como encontrar a frequência adequada da onda transmissora de energia e as distâncias relativas entre os indutores no qual o sistema possa operar, como mostrado por Yilmaz e Dehollaini (2012).

1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Uma dificuldade na caracterização dos acoplamentos indutivos reside no posicionamento preciso entre os indutores transmissor e receptor. Em Lee et al. (2014) utiliza-se uma estrutura em acrílico para

separar manualmente os indutores a cada medida, inserindo erros na medida em torno da distância desejada.

Yilmaz e Dehollaini (2012) fazem uso de uma caixa com ranhuras dispostas a cada 5 milímetros de distância na qual são encaixadas as placas de circuito impresso com os indutores para caracterização da eficiência de transmissão de energia. Esta solução reduz o erro aleatório, porém tem resolução limitada.

Desta forma, observam-se limitações nos sistemas de caracterização dos acoplamentos indutivos no que diz respeito ao posicionamento relativo dos indutores.

1.3 OBJETIVOS

Com o intuito de otimizar a caracterização de acoplamentos indutivos em relação ao posicionamento relativo dos indutores testados, este trabalho pretende introduzir um mecanismo de comando numérico computadorizado (CNC) que auxilie no posicionamento dos indutores, sendo capaz de movimentar o indutor transmissor dentro de um volume com resolução constante entre pontos. Além disso, o indutor deve ser capaz de girar em torno do próprio eixo para incluir outro grau de liberdade ao posicionamento.

Através de códigos G será possível fazer a automação das medidas realizadas no acoplamento indutivo sob teste. Isso será possível ao se escrever um programa que envie comandos para que a máquina faça uma varredura em determinada região.

A resolução desejada para o sistema de posicionamento foi definida como 0,1 mm por deslocamento linear, a área útil desejada para posicionamento no plano “XY” é de 100 mm x 100 mm, enquanto a variação possível no eixo “Z” é 50 mm. Esses valores de área útil foram definidos para a caracterização do acoplamento indutivo projetado por Cabrera e Sousa (2014b)

A estrutura será projetada de forma que se possa inserir um dielétrico diferente do ar entre os indutores durante as medições, por exemplo, uma solução líquida com dielétrico equivalente ao da pele humana (DJEMOUAI et al., 1997) para simular a eficiência de transmissão de energia em dispositivos implantáveis.

1.4 METODOLOGIA

O desenvolvimento do sistema de posicionamento deste trabalho será dividido em quatro partes principais:

- Estrutura mecânica.
- Hardware eletrônico.
- Firmware da controladora CNC.
- Interface homem-máquina

Será projetada em software de desenho assistido por computador (CAD, do inglês *Computer Aided Design*) uma estrutura mecânica que movimentará a bobina transmissora em três eixos cartesianos. O movimento será aplicado através do uso de motores de passo. Além disso, será adicionado outro grau de liberdade, o qual vai rotacionar o indutor transmissor em torno do próprio eixo, para esse movimento será utilizado servo-motor. A estrutura será projetada para que se obtenha a maior resolução entre posições, utilizando movimentos mecânicos com redução e divisão dos passos dos motores. Como serão feitas medidas de rádio frequência, é preciso evitar que metais estejam próximos do volume útil para minimizar interferências.

Para comandar os motores será projetada uma placa controladora, que deve conter os drives dos motores de passo, assim como o processador que irá interpretar códigos numéricos e fornecer comandos aos drives de motores.

O processador contido na placa controladora deverá ser capaz, através de conexão USB e firmware embarcado, de receber do computador comandos em código G, interpretar os códigos e executar os comandos necessários, por exemplo, posicionar o indutor. A placa controladora receberá comandos do computador via código G, que utiliza o padrão RS-274 (KRAMER; PROCTOR; MESSINA, 2000).

Com a programação de uma rotina no computador através da interface homem-máquina será feita uma varredura dentro do volume de trabalho da mesma, para em que cada ponto seja realizada uma medida da eficiência de transmissão de energia e ao final exibir em gráfico esta eficiência em função das distâncias. Medidas manuais também poderão ser feitas ao utilizar o painel de controle da máquina de acordo com a necessidade do usuário.

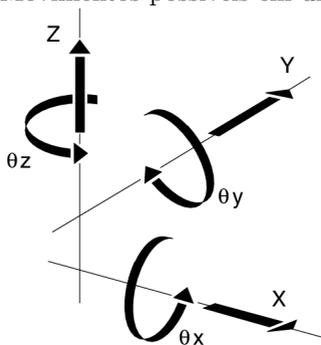
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO A MÁQUINAS CONTROLADAS POR COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO(CNC)

Máquinas CNC são sistemas capazes de movimentar de forma precisa uma ferramenta através da atuação nos diferentes eixos. Os comandos são enviados ao sistema através de código numérico padronizado, sendo mais utilizado o código G (padrão RS274). Quando máquinas CNC foram desenvolvidas o propósito das mesmas era produzir peças com formato complexo de maneira precisa, contudo o controle numérico foi utilizado primeiramente em máquinas de perfuração. Hoje em dia as máquinas CNC são utilizadas para diversas aplicações, tais como, máquinas de torção, de posicionamento de componentes eletrônicos, máquinas de solda e de corte a laser, etc.

Máquinas CNC podem ser classificadas de acordo com o número de direções dos movimentos que é capaz de realizar sobre um corpo rígido. Cada corpo livre tem seis graus de liberdade, três positivos ou negativos através dos eixos cartesianos (x, y e z) e três rotações em torno dos eixos (θ_x , θ_y e θ_z). A Figura 1 ilustra os movimentos. Máquinas CNC comerciais são capazes de controlar simultaneamente dois, dois e meio, três, quatro e cinco graus de liberdade, sendo as máquinas com três movimentos lineares e um de rotação (ferramenta de trabalho) as mais comuns(SUH et al., 2008).

Figura 1 – Movimentos possíveis em um corpo livre



2.2 MOVIMENTO DOS EIXOS

Para converter os comandos numéricos de posicionamento em movimento é preciso atuar em algum dispositivo que gere trabalho, que pode ser feito com a liberação de ar comprimido ou utilizando motores elétricos, sendo estes últimos mais utilizados. O trabalho realizado deve ser capaz de transmitir o movimento apenas no eixo desejado e para garantir isso são utilizadas guias de movimento.

Um componente utilizado como guia de movimento linear é o fuso acompanhado de castanha, que ao girar em torno do próprio eixo, transforma o movimento circular em linear. A vantagem de se utilizar fusos combinados com castanhas de esferas é o aumento da resolução aliado ao aumento da carga suportada, com baixo ruído(THYER, 1988). A Figura 2 apresenta o conjunto.

Figura 2 – Fuso e castanha, Fonte: Mectrol.



Outro tipo de mecanismo são as guias lineares. Neste caso há uma guia fixa na qual se movimenta uma peça com rolamentos. Para se movimentar, essa peça deve receber força no sentido do eixo, o que pode ser feito com uso de sistema de transmissão de movimento com correias e polias acopladas ao motor.

2.3 MOTORES

Para cada eixo solicitando movimento é necessário trabalho para deslocar a massa associada. Para tal, costuma-se usar motores como geradores de trabalho. Como se deseja saber o deslocamento produzido pelos motores, costuma-se usar sistemas de controle para posicionamento, por exemplo os servo-motores com controle feito por hardware ou motores de passo que trabalham em malha aberta com controle via software (KENJO; SUGAWARA, 1985).

Figura 3 – Eixos lineares, Fonte: Mectrol.



2.3.1 Servo-Motor

Ao se adicionar um detector de velocidade de rotação ao eixo de rotação de um motor, este se denomina um servo-motor. O sensor de velocidade de rotação em geral é um sensor ótico de passagem ou um taco gerador. Com a realimentação feita através do detector pode-se controlar o movimento do eixo do motor, o que significa poder controlar o deslocamento realizado no eixo de interesse (SUH et al., 2008).

Outro tipo de servo motor de corrente contínua consiste em um motor DC com um resistor variável acoplado ao eixo de rotação, servindo como realimentação ao sistema de controle, desta forma este motor trabalha em malha fechada. Com o sistema trabalhando em malha fechada, o servo motor é uma solução de alta precisão para aplicações nas quais os motores de passo não atendem suas necessidades. Este tipo de motor é largamente utilizado em robótica e nos aeromodelos rádio-controlados. Na maioria dos servos, o eixo pode girar de 90° a 180° , não servindo para rotação contínua. A Figura 4 ilustra servo-motores típicos.

2.3.2 Motor de Passo

A principal característica do motor de passo é a discretização do movimento, o que faz com que não seja necessária realimentação. Através do acionamento sequencial de duas ou quatro bobinas pode-se controlar o motor de passo quanto a seu movimento (passo) e sentido. Um fator limitante do uso dos motores de passo é a carga que pode

Figura 4 – Motores DC com encoders. Fonte: Brastronic.



suportar, ficando limitado a baixas potências(CONDIT; JONES, 2004).

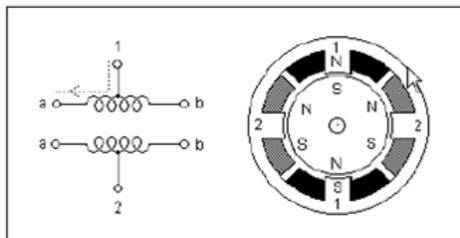
O motor de passo tem a vantagem de não possuir escovas de comutação, que costumam apresentar problemas com o tempo. Outra característica é o motor manter a mesma velocidade independentemente da carga colocada no eixo, desde que esta não seja superior à máxima permitida para o motor (torque máximo). Com o acionamento correto é possível manter o eixo estático, e suportando um torque até o valor máximo permitido de acordo com as características do motor.

Os motores de passo podem ser classificados de acordo com o número de indutores, sendo eles os motores unipolares e os motores bipolares(CONDIT; JONES, 2004). Os motores de passo podem ser divididos ainda de acordo com a natureza do rotor, podendo ser feito com ímã permanente ou por material de relutância variável. Os motores analisados nesta seção são com rotores de ímã permanente.

2.3.2.1 Motor de passo unipolar

Os motores unipolares são compostos de dois enrolamentos, cada um com uma ligação central. Como resultado, os motores unipolares tem normalmente cinco ou seis fios. Cinco fios é devido à união das duas ligações centrais à fonte de alimentação. Com a derivação central ligada à fonte de tensão positiva, os dois terminais restantes podem ser ligados à terra, alterando o pólo magnético gerado nas extremidades. Através da corrente passando pelo indutor é gerado campo magnético que atrai os pólos opostos do rotor, assim cada metade de uma bobina irá gerar um campo magnético que irá atrair ou afastar o ímã permanente do rotor. Se o acionamento na ordem correta for executado o eixo rotor irá executar uma volta de 360° . A Figura 5 mostra um motor com ímã permanente que gira o eixo trinta graus por passo.

Figura 5 – Esquemático de motor de passo unipolar.



O acionamento correto dos enrolamentos “1” e “2” é mostrado na tabela 1:

Tabela 1 – Tabela de acionamento do motor de passo unipolar

Enrolamento 1a:	1	0	0	0	1	0
Enrolamento 1b:	0	0	0	1	0	0
Enrolamento 2a:	0	1	0	0	0	1
Enrolamento 2b:	0	0	1	0	0	0

A Figura 5 ilustra o mais básico dos motores unipolares, para altas resoluções o rotor deve ter mais pólos. Rotores com ímãs permanentes com 100 pólos têm sido fabricados. Os pólos do estator são sempre dentados de modo que os enrolamentos do estator trabalhem contra um número grande de pólos do rotor.

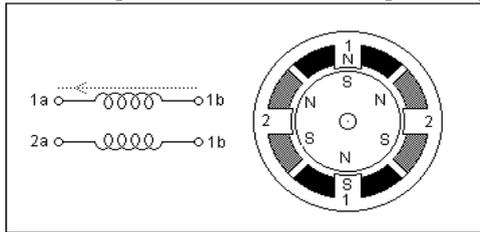
2.3.2.2 Motor de passo Bipolar

Motores de passo bipolares são compostos de dois enrolamentos e têm quatro fios de saída. Diferente dos motores unipolares estes não tem derivação central. A vantagem de não ter derivação central é que este energiza uma bobina inteiramente, ao invés da metade como no caso do motor unipolar. Como resultado, motores bipolares geram maior torque do que motores unipolares com o mesmo tamanho. A desvantagem é a complexidade envolvida no circuito de controle destes enrolamentos.

O fluxo de corrente nos enrolamentos de um motor bipolar é bi-

direcional, ou seja, deve-se inverter a polaridade das extremidades de cada bobina. Como mostra na Figura 6, a corrente que flui no enrolamento “1” irá ir para a esquerda caso no fio 1b seja aplicado uma tensão maior que o fio 1a, e a corrente irá para a direita caso as polaridades sejam invertidas. O circuito de controle conhecido como ponte “H” é usado para trocar as polaridades das bobinas, logo é necessário dois destes para cada motor.

Figura 6 – Esquemático de motor de passo bipolar.



Assim como o motor unipolar, o bipolar precisa de uma correta seqüência de acionamentos para girar completamente o eixo rotor. Utilizando a polaridade positiva (+), negativa (-) e “0” para não conexão, a seqüência necessária é mostrada na tabela 2.

Tabela 2 – Tabela de acionamento do motor de passo bipolar

Enrolamento 1a:	+	0	-	0	+	0
Enrolamento 1b:	-	0	+	0	-	0
Enrolamento 2a:	0	+	0	-	0	+
Enrolamento 2b:	0	-	0	+	0	-

2.3.2.3 Especificações de um motor de passo

Motores de passo de baixa performance são construídos com resistência interna alta, de forma que possam ser alimentados com a tensão nominal, geralmente 5 ou 12 Volts. Estes motores não produzem muito torque nem giram muito rápido, assim podem ser acionados sem limitação de corrente. Contudo motores de alta performance (velocidade e torque) podem ser obtidos quando usados com tensões mais elevadas. Motores de alto torque são diferentes, pois têm uma pequena resistência interna e trabalham com alta corrente. Um exemplo de ca-

racterística de um motor de alta performance é mostrado na tabela 3.

Tabela 3 – Características de um motor de passo de alta performance

Angulo por passo	Tensão	Corrente	Resistência	Indutância	Torque inercial	Inercia do rotor	Número de fios	Peso
Graus	Volts	A/fase	Ohm/fase	mH/fase	Kg-cm	g-cm	Fio	Kg
1,8	1,8	4,5	0,4	0,96	16	570	6	1,4

O valor do torque inercial é típico de muitos fabricantes de motores, sendo a unidade de quilogramas usualmente adotada para indicar a força. Nota-se que a tensão nominal é 1,8 Volts, caso seja alimentado com tensões maiores, se faz necessário a utilização de um circuito de limitação de corrente. Os enrolamentos tem resistência interna(R), a qual é função do número de voltas, da resistividade e do diâmetro do fio. Esta resistência é o que determina a corrente máxima a qual um enrolamento pode estar sujeito. A potência perdida por dissipação em um enrolamento é dada pela equação 2.1:

$$P_{perda} = R.I_{Max}^2 \quad (2.1)$$

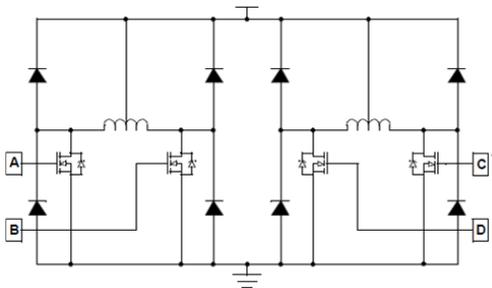
A corrente máxima permitida em um motor não deve superaquecê-lo, não deve saturar o circuito de atuação e não pode produzir campos magnéticos suficientes para desmagnetizar o rotor do motor. A tensão nominal de um motor que consta na sua folha de dados do mesmo nada mais é do que a tensão necessária para que com a resistência interna especificada produza a corrente máxima, isto é notado na tabela 3.

2.3.2.4 Circuito de controle para motor unipolar

O circuito básico de controle para o motor unipolar é apresentado na Figura 7 a seguir. Os diodos em paralelo com as bobinas e transistores MOSFETs são necessários para proteger de sobretensões geradas nas bobinas ao se interromper a corrente que passa por elas. Alguns MOSFETs já têm incorporados na sua estrutura um diodo em paralelo, o que pode fazer com que não seja necessária a inclusão dos diodos externamente, porém deve-se saber qual a corrente máxima suportada pelos diodos internos. A resposta do diodo deve ser rápida o suficiente para acompanhar a velocidade de chaveamento dos MOSFETs. Como se observa na Figura 7, o controle é feito através da tensão de controle aplicada as portas dos transistores (A, B, C, D). Ao se ativar o MOSFET, este terá o comportamento semelhante a uma

chave e irá permitir a passagem de corrente na bobina correspondente.

Figura 7 – Esquemático do circuito de acionamento do motor de passo unipolar.



2.3.2.5 Circuito de controle para motor bipolar

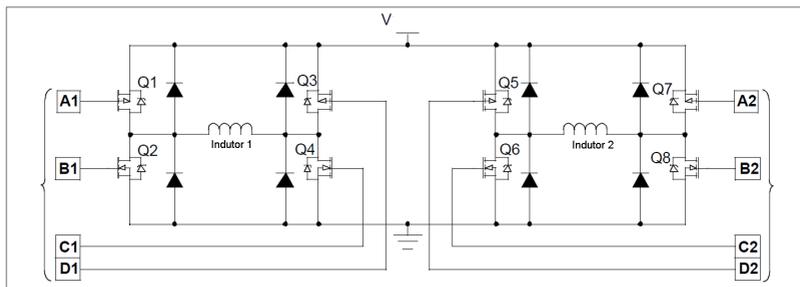
O circuito básico de controle de um motor de passo bipolar é a ponte H, mostrada na Figura 8. Uma ponte H é configurada de forma a permitir a passagem de corrente nas duas direções da bobina. Observando a Figura 8, nota-se que a corrente na bobina 1 irá da direita para a esquerda quando os transistores Q3 e Q2 estiverem configurados como chave fechada, e os transistores Q1 e Q4 estiverem desligados. Ao inverter-se a polarização dos transistores se inverte o sentido da corrente.

Pontes H devem ser corretamente controladas, pois ao se chavear dois transistores tal como Q1 e Q2 ao mesmo tempo, haverá um curto circuito através dos transistores, danificando-os. Assim como no caso do circuito de controle do motor unipolar, as pontes H também incorporam diodos em paralelo com os transistores, para sua proteção.

2.3.2.6 Controle de motor utilizando micropasso

Passos inteiros resultam em movimentos bruscos no motor de passo, especialmente em baixas velocidades. O circuito de acionamento utilizando micropasso é usado para aumentar a resolução por passo e suavizar as transições entre passos. Na maioria das aplicações, o controle com micropasso aumenta a performance do sistema, ao mesmo tempo

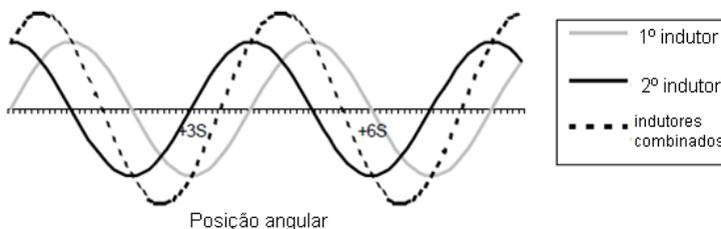
Figura 8 – Esquemático do circuito de acionamento do motor de passo unipolar.



em que reduz ruído e problemas de ressonância. Controle através de micropasso trabalha no princípio de transferir a corrente gradualmente entre uma bobina e outra. Isto é alcançado através do uso de modulação por largura de pulso (PWM- pulse width modulation) em cada bobina, a largura do pulso do sinal em uma bobina é diminuída enquanto na outra bobina é aumentada (CONDIT; JONES, 2004).

Para entender o funcionamento da técnica do micropasso é necessário observar o torque exercido pelo motor de passo em uma volta. A Figura 9 mostra um gráfico de torque versus posição do rotor para um motor de passo ideal de dois enrolamentos. Note o formato senoidal da forma de onda. Em motores reais estas formas de onda serão apenas aproximadamente senoidais e a soma do torque das duas bobinas não será a soma aritmética dos torques.

Figura 9 – Formas de onda do torque inercial.



O movimento desejado de um motor de passo é linear, isto significa que os passos devam ser de iguais tamanhos, sem notáveis acelerações e decelerações do eixo enquanto gira. Boas implementações da técnica de micropasso se aproximam muito do movimento linear. A curva de torque para um enrolamento de um motor de passo ideal de duas bobinas da Figura 9 pode ser expresso como:

$$T_1 = H.\text{sen}(((\pi/2)/P)\theta) \quad (2.2)$$

onde:

H =torque inercial

T_1 =torque do primeiro enrolamento

P =passo por ângulo, em radianos

θ =ângulo do eixo, em radianos.

O torque da segunda bobina pode ser expresso como:

$$T_2 = H.\text{cos}(((\pi/2)/P)\theta) \quad (2.3)$$

A técnica conhecida como micropasso seno-cosseno ajusta a corrente em cada bobina tal que o torque seja constante. Em um motor ideal, o torque produzido em cada enrolamento é proporcional à corrente no enrolamento e o torque aumenta linearmente. Saturação e efeitos de campo nas bordas fazem os motores não ideais, mas na prática eles são suficientemente próximos do ideal para que esses efeitos possam ser ignorados. Como resultado, as equações 2.4 e 2.5 definem a corrente em cada bobina para uma desejada posição θ .

$$I_1 = I_{max}.\text{cos}(((\pi/2)/P)\theta) \quad (2.4)$$

$$I_2 = I_{max}.\text{sen}(((\pi/2)/P)\theta) \quad (2.5)$$

Essas equações assumem que as correntes I_{max} não serão excedidas. Em um motor ideal, o micropasso pode ser usado para alcançar resolução angular mínima, mas na prática devido ao atrito e efeito de relutância variável, é impossível obter altíssimas resoluções (KENJO; SUGAWARA, 1985). Na prática, vale a pena dividir cada passo em até trinta e duas vezes (CONDIT; JONES, 2004).

Usando 32 micropassos por passo é possível um movimento de 0,23 graus utilizando um motor comum de 7,5 graus por passo. Pode-se alcançar a mesma resolução de 1:32 utilizando engrenagens redutoras, porém, isto introduz erro de “backlash” e reduz a velocidade máxima de rotação.

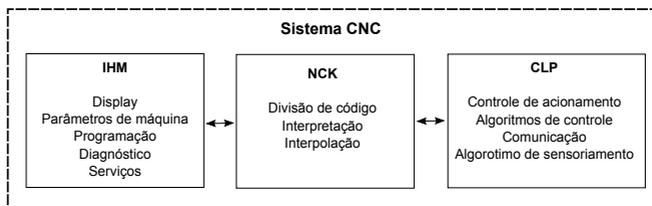
2.4 SISTEMAS CNC

Sistemas CNC (Controle Numérico Computadorizado), são equipamentos tipicamente mecatrônicos, esses compreendem as máquinas que tem componentes mecânicos e os sistemas de controle numérico que é eletrônico. Através do envio de uma série de números e símbolos (código numérico) é possível comunicar-se com a máquina, permitindo repetibilidade, precisão e eficiência no uso de máquinas.

Do ponto de vista funcional o sistema CNC consiste da interface homem-máquina (IHM ou MMI, do inglês *Man-Machine Interface*), núcleo de controle numérico (NCK, do inglês *Numeric control Kernel*) e unidade do controlador lógico programável (CLP). A unidade IHM oferece a interface entre o código numérico e o usuário, executa as operações de comando, mostra o estado atual da máquina, oferece edição da programação e comunicação. O NCK é o núcleo do sistema CNC, pois interpreta o comando enviado pelo código numérico, executa interpolação e controle de posição. O CLP recebe e envia códigos numéricos, controla a sequência de operações a serem realizadas, tal como curva de aceleração dos motores e velocidade de rotação da ferramenta de corte(SUH et al., 2008).

A Figura 10 a seguir mostra o diagrama da arquitetura de uma máquina CNC simplificada

Figura 10 – Componentes de um sistema CNC, adaptado de Suh et al. (2008).



2.4.1 Estrutura de um programa CNC

Um programa CNC contém comandos separados por blocos, sendo que cada bloco pode ser definido como:

- Comandos G,M,S,T,H,D,F;

- Chamadas de subprogramas e mensagens;
- Ajuste de variáveis e chamadas condicionais;

Um programa consiste de uma sequência de blocos CNC, cada bloco consiste de diversas palavras, e uma palavra é composta de um endereço e um número.

Um bloco consiste de um número do bloco, ao menos uma palavra e o sinalizador de fim de bloco (EOB, do inglês end of block). Uma palavra é a unidade mínima para processamento e comando da máquina para uma determinada ação e possui um endereço e um subsequente número, como abaixo:

“X-20”

O endereço é construído de um caracter alfanumérico ou uma combinação deles. O número logo após fornece o dado para execução da tarefa. Neste exemplo acima, trata-se do eixo na direção “X” e um deslocamento de 20 unidades no sentido negativo. A tabela 4 mostra um conjunto de códigos de endereço e o seu significado.

Tabela 4 – Exemplos de códigos G

Função	Endereço	Significado
Número do programa	P	Identidade do programa ex: P123
Número do bloco	N	Número da linha ex: N24
Função preparatória	G	Comando G01
Coordenada	X,Y,Z,A,B,C	Eixos A30
Taxa de alimentação	F	Velocidade F200
Funções auxiliares	M	Comandos de máquina M32
Número de repetições de um subprograma	L	Número de interações L5

2.4.2 Principais funções de um sistema CNC

As funções principais de um sistema CNC podem ser classificadas em uma variedade de grupos. Funções de coordenadas, inter-

polações, funções velocidade, compensações, funções de segurança e auxiliares. Um sistema CNC pode definir diferentes sistemas de coordenadas e ponto de origem. Códigos como G54 e G55 definem novas origens. Através de programação pode-se usar coordenadas absolutas ou incrementais, com os códigos G90 e G91, respectivamente. Através do sistema de coordenadas pode-se escalonar o caminho da ferramenta utilizando o código G51. Pode-se fazer rotacionar o sistema de coordenadas utilizando o código G68.

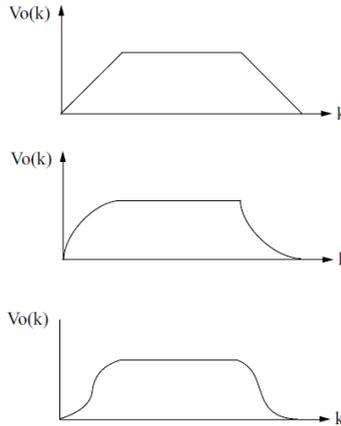
Há varias funções de interpolações que permite o movimento da ferramenta através de um determinado caminho, podendo este ser linear, circular, helicoidal, entre outros. O comando G00 liga o ponto atual a uma nova posição determinada fazendo uma trajetória em linha reta com a velocidade máxima permitida pela máquina, enquanto o comando G01 faz o mesmo movimento, porém com limitação de velocidade fornecida pelo argumento F#, onde “#” representa a velocidade em unidades de distância por segundo. A trajetória circular é feita pelo comando G02 e G03, sendo uma em sentido horário e a outra em sentido inverso.

Funções de velocidade são usadas para controlar a velocidade de alimentação do movimento dos eixos, da velocidade de rotação da ferramenta, velocidade de trajetória, entre outras necessárias para o sistema CNC. A taxa de movimentos é informada através dos códigos “F”, no qual os argumentos podem ser em unidade de distância por unidade de tempo (mm/min ou mm/s) ou distância por revoluções (mm/rev). Para prevenir choque mecânico, controle de aceleração e desaceleração são automaticamente aplicados quando os movimentos iniciam e terminam. Perfis de velocidade podem ser lineares, exponenciais ou em formato de “S”, como mostrado na Figura 11. Em geral, o perfil linear de aceleração/desaceleração tem sido largamente utilizado e permite o eixo atingir a velocidade máxima rapidamente de uma maneira simples. Contudo, o perfil “S” faz um movimento suave que é aplicado no controle de eixos de alta rotação (LI et al., 2006).

Os códigos T são utilizados para selecionar a ferramenta de trabalho da máquina CNC. Com a definição da ferramenta é possível compensar o raio de corte no cálculo de trajetórias corte, por exemplo. Através dos códigos G40, G41 e G42 pode-se gerar um caminho com compensação do raio da ferramenta. As funções do fuso (códigos S) são específicas para controle de velocidade da ferramenta de corte, sendo que estes códigos definem a velocidade máxima, ligam e desligam o fuso.

Funções de interrupção também são possíveis no sistema CNC,

Figura 11 – Perfis de velocidade, Velocidade (V_0) em função de períodos de tempo discreto (k).



essas de acordo com alguma variável de entrada podem interromper a seqüência de comandos que está sendo executada. O código G31 é usado para interromper uma seqüência de comandos, como por exemplo, quando se está medindo a dimensão de uma peça. Existem ainda outras funções avançadas, tal como verificação do programa ou as funções que utilizam o método “look-ahead” para otimizar o desempenho evitando pausas entre movimentos, e o método “feedforward” que maneja o erro devido ao sistema de posicionamento(SUH et al., 2008).

2.4.3 Interface homem máquina (IHM)

Esta interface oferece ao usuário os dados necessários para operação da máquina desejada, através de informações mostradas em uma tela, por exemplo. A IHM oferece também a possibilidade de ajustes de parâmetros da máquina antes do funcionamento da mesma. Há diversas formas de apresentação desta interface, cada qual baseada no tipo de máquina que está sendo controlada. Algumas das funções do usuário são:

- Funções de operação: mostra o estado da máquina enquanto funcionando, permite comandos de controle, início de operação e parada de emergência.

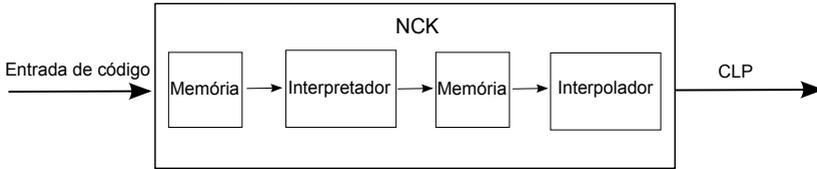
- Funções de ajustes de parâmetros: no sistema CNC pode-se ajustar diversos parâmetros, tal como, velocidade de rotação da ferramenta de corte, unidade das coordenadas, margem de segurança, etc.
- Funções de edição do programa: estas funções são capazes de editar e modificar partes do programa, que é o código-G baseado no padrão RS274. Para edição é necessário que o usuário saiba o que significa cada comando do código-G e faça cálculos para modificações, o que pode ser complicado. Devido a esta dificuldade, muitas interfaces já oferecem uma interface gráfica que facilita a edição sem entrar no nível de código-G.
- Funções de alarme e monitoramento: o sistema CNC deve informar ao usuário o estado da máquina através de monitoramento e se necessário executar tarefas necessárias para informar ao usuário o resultado. Estas funções são necessárias quando a máquina estiver trabalhando com ferramenta de corte em alta velocidade por exemplo.
- Outros serviços e utilidades: mostrar as linhas de códigos sendo executados, erros de comunicação, tempo de uso do equipamento e duração das operações.

2.4.4 Núcleo de controle numérico (NCK)

Em geral o NCK interpreta os dados de entrada, que são mantidos na memória, envia o código de comando aos atuadores e é capaz de detectar sinais de realimentação do sistema de atuação. O sistema NCK também toma decisões lógicas, tais como, quando é necessário líquido de refrigeração para o corte, cálculos para controle de aceleração, linhas e círculos de interpolação. O diagrama da Figura 12 mostra os blocos funcionais.

O bloco interpretador faz a leitura do programa em código-G, interpretando os blocos de caracteres ASCII do programa e salvando em memória o código interpretado. Em geral, um sistema CNC envia ordens relacionadas ao código interpretado para os atuadores enquanto faz a leitura da próxima linha do programa. Contudo, se o tempo para interpretação do código é maior do que o tempo de execução da linha anterior, a máquina deve esperar que o interpretador termine a tarefa antes do próximo comando. Para aperfeiçoar o tempo de trabalho, utilizam-se buffers que armazenam um número suficiente de dados

Figura 12 – Diagrama de blocos do Núcleo de Controle Numérico, adaptado de Suh et al. (2008).



interpretados. Estes dados serão utilizados para executar as tarefas correspondentes (SUH et al., 2008).

O interpolador mostrado no diagrama de blocos da Figura 12 faz a leitura sequencial dos dados armazenados na memória interna e calcula a posição e a velocidade por unidade de tempo em cada eixo, guardando os resultados em outra memória que será utilizada no controle de aceleração e desaceleração. Um interpolador linear e circular é típico de sistemas CNC. O interpolador gera um pulso correspondente ao caminho do movimento dependendo do tipo de caminho (linear, circular, parabólico). O número de pulsos é baseado no comprimento do caminho e a frequência dos pulsos em função da velocidade desejada. Em um sistema CNC o tamanho de um pulso determina a resolução do equipamento, por exemplo, se um eixo pode mover 0,002 mm por pulso, a resolução é 0,002 mm. Além disso, um sistema CNC pode gerar 25000 pulsos para mover 50 mm e 8333 pulsos por segundo para mover a uma velocidade de 1 m/s.

Se o controle de posição é executado usando dados gerados pelo interpolador, grande vibração mecânica e choques podem ocorrer quando o movimento inicia e termina. Para prevenir isto, utiliza-se controle de aceleração/desaceleração antes dos dados do interpolador serem enviados ao controlador de posição. Pode-se ainda fazer controle de aceleração/desaceleração antes da interpolação. Os dados do controlador de aceleração/desaceleração são enviados ao controlador de posição caso este atue em malha fechada, normalmente em um período fixo de tempo. Caso o atuador trabalhe em malha aberta, o controle de posição é feito via software utilizando variáveis contendo valores de posição em memória.

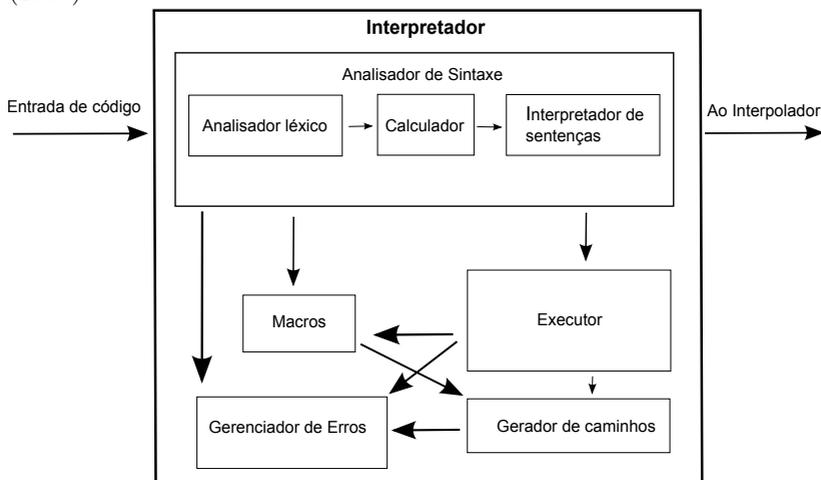
2.4.4.1 Interpretador

O NCK é a unidade chave do sistema CNC. Dentre os seus módulos, um deles é o interpretador, o qual é feito via software e traduz parte do programa recebido em comandos internos para movimentos dos eixos e outros comandos auxiliares.

Entre os estágios citados, o interpretador pode ser considerado como uma simples tarefa de converter código G para linguagem de dados que o CNC entenda. Porém, o projeto e a execução do interpretador é abrangente, pois regras do programa, sintaxe e modos de operação da máquina descrita nos manuais devem ser levados em conta no desenvolvimento. Assim, o interpretador é uma parte significativa do sistema CNC, e geralmente consome 50% do tempo de projeto do sistema completo(SUH et al., 2008).

Como mencionado acima, o interpretador de um sistema CNC é um módulo em software do NCK que interpreta parte de um programa em código G e endereços relacionados, tais como, M, S, T e F. O interpretador consiste de um analisador de sintaxe (parser do inglês), um executor, um gerador de caminho, um executor de macros e um gerenciador de erros, como mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Diagrama do bloco Interpretador, adaptado de Suh et al. (2008).



O analisador de sintaxe interpreta o programa bloco a bloco,

o analisador léxico lê caractere a caractere e decodifica o significado de cada palavra. O computador executa as operações numéricas e o interpretador de sentença recupera o comando e os dados do código G baseado nas palavras vindas do analisador léxico.

O executor é o bloco que realiza a função interpretada pela sentença lida pelo analisador de sintaxe e salva o resultado em memória.

O gerador de caminhos fornece os dados de posição baseado nas coordenadas programadas. Neste módulo, os cálculos para mapeamento entre coordenadas da peça ou máquina, compensação de ferramenta e limites dos eixos são feitos.

O executor de macros é uma unidade que permite que o usuário defina funções específicas que não são fornecidas pelo fabricante do sistema CNC.

O gerenciador de erros é um programa que faz as notificações dos erros obtidos no processo de interpretação das funções, como por exemplo, o caminho da ferramenta calculado estar fora da área de trabalho da máquina.

2.4.5 Controlador lógico programável (CLP)

O controlador lógico é usado para executar seqüência de controle em uma máquina. No passado o controle lógico era feito usando relés, contadores, temporizadores e circuitos analógicos. Atualmente os CLPs consistem de poucos dispositivos elétricos, tal como microprocessadores e memórias, capazes de fazer operações lógicas, contadores, etc. O sistema CLP pode ser definido como um controlador baseado em software, com isso as vantagens são: a flexibilidade de mudança no software, a escalabilidade que permite a expansão do sistema ao se adicionar módulos, a economia de recursos físicos, miniaturização em comparação aos antigos sistemas, a confiabilidade devido à baixa probabilidade de mau contato, além disso o desempenho aumenta com a possibilidade de cálculos rápidos(SUH et al., 2008).

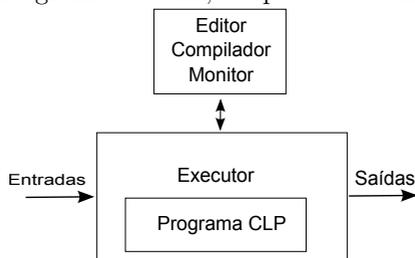
A arquitetura do hardware da unidade CLP de um sistema CNC compreende um microprocessador, uma memória do sistema, uma memória de programa, os módulos de entrada e saída. Assim que a alimentação é ligada, a memória do sistema prepara o ambiente do CLP, gerencia as entradas e saídas, salva o programa do usuário e os dados para serem interpretados pelo microprocessador.

As funções que são executadas no CLP podem ser definidas como mostradas na Figura 14 e são sumarizadas em seguida. Inicialmente, o

usuário cria uma aplicação usada no CLP através de um editor externo e um programador, o usuário carrega a aplicação no programa CLP. O programador consiste de um editor que cria o programa e o compilador converte o programa em uma linguagem que é interpretada pelo CLP. O programa CLP é transmitido ao módulo CPU. Além disso, o estado em que o CLP está sendo executado no módulo CPU é enviado ao usuário para monitorar as atividades.

O módulo que lê o programa editado pelo compilador e executa seqüência lógica de operações é o executor, que é o núcleo do CLP. O executor faz a leitura de sinais de entrada, executa as operações lógicas e envia os resultados à saída repetidamente.

Figura 14 – Diagrama do CLP, adaptado de Suh et al. (2008).



2.5 CONCLUSÃO

Foi apresentado neste capítulo o embasamento teórico necessário que auxiliará no desenvolvimento deste trabalho. Os componentes do sistema CNC desde a parte mecânica até a parte eletrônica foram apresentados. Do ponto de vista mecânico, foram apresentados os sistemas de acionamento, de transmissão de movimento, de posicionamento e reduções. Enquanto isso, do ponto de vista eletrônico, foram apresentados os componentes necessários para interpretar, para executar os códigos numéricos e para controlar a lógica de acionamento dos motores. Assim, será possível planejar a abordagem utilizada para realizar este trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de projetar um instrumento capaz de posicionar um objeto em três dimensões e mais um grau de liberdade, para fins de caracterização do acoplamento indutivo estudado por Cabrera e Sousa (2014b) no grupo de pesquisas em rádio-frequência da UFSC, iniciou-se este trabalho e as etapas necessárias para desenvolvê-la foram divididas em quatro partes e serão apresentadas nas seções seguintes.

3.1 ESTRUTURA MECÂNICA

Para construir uma máquina CNC com posicionamento em três dimensões é possível utilizar diferentes sistemas de coordenadas, tal como retangular, cilíndrico, delta por Clavel (1990), etc. O sistema de coordenadas mais utilizado é o cartesiano, no qual três eixos perpendiculares entre si permitem movimento linear sobre cada eixo. Nesta implementação optou-se pelo sistema mais simples, utilizando coordenadas cartesianas.

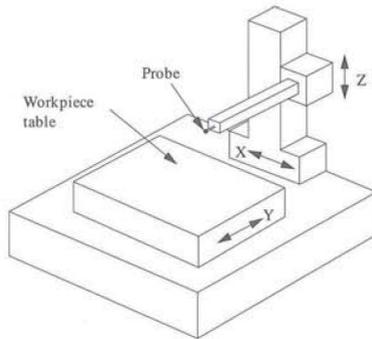
Uma vez escolhido o sistema de coordenadas cartesianas, deve-se definir como será utilizado cada grau de liberdade dos eixos “X”, “Y” e “Z”. A análise é feita levando em consideração que o sistema possui uma mesa de trabalho onde está o indutor receptor e uma haste que posiciona o indutor transmissor em relação ao anterior.

Desta forma pode-se utilizar diferentes combinações, por exemplo utilizando a mesa fixa e a haste movimentando nos eixos “X”, “Y” e “Z”, ou a mesa movimentando-se nos eixos “X” e “Y” e a haste no eixo “Z”. Dentre as combinações possíveis, escolheu-se aquela que permite apenas um movimento na mesa de trabalho, neste caso no sentido “Y”. A haste de posicionamento tem o eixo “X” fixo na estrutura com o eixo “Z” acoplado à mesma. A Figura 15 ilustra os movimentos possíveis.

Dentre as vantagens deste sistema de coordenadas apontadas por Slocum (1992) estão: grande área de trabalho com o tamanho da máquina relativamente pequena, pois apenas na direção Y o espaço necessário para a mesa mover deve ser maior do que a dimensão da mesa nesta direção. Entre as desvantagens, uma delas é a acessibilidade à mesa pela parte de baixo e lateral, e outra é que a haste de prova está sujeita a vibrações horizontais (comuns através da excitação da superfície de apoio).

O movimento de cada eixo deve ser suave, retilíneo e sem atri-

Figura 15 – Máquina com movimento horizontal na mesa. (SLOCUM, 1992).



tos com a superfície guia, para isso utilizaram-se rolamentos lineares envoltos em guias lineares de aço cromado. Utilizando software de desenho assistido por computador (CAD, do inglês *Computer Assisted Design*) foi desenhada a estrutura mecânica, que possui os eixos com duas guias lineares de 6 mm de diâmetro cada, com quatro rolamento lineares LM6UU para os eixos “X” e “Y” e com dois para o eixo “Z”.

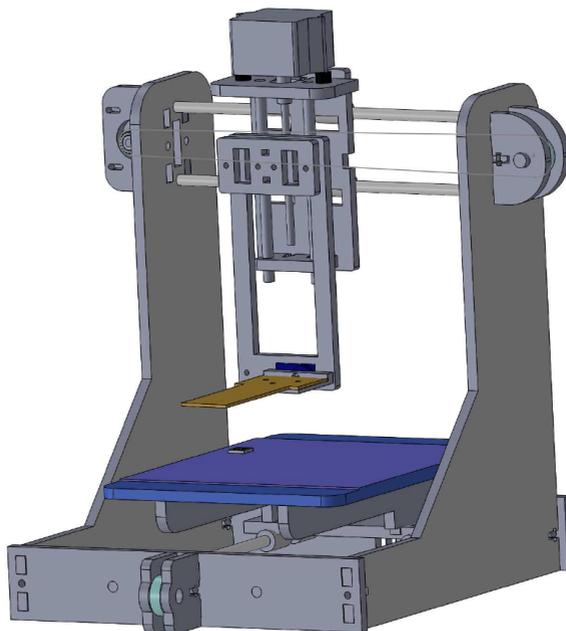
Levou-se em consideração durante o desenho da estrutura que esta deveria ser livre de metais na área de trabalho devido ao fato destes poderem causar interferências nas medidas. Desta forma, a mesa de trabalho foi distanciada dos rolamentos e guias lineares que são de metal. Além disso, a fixação da mesa foi feita utilizando encaixes mecânicos e cola ao invés de parafusos. Ao se utilizar haste de prova como mostrado na Figura 15, esta por construção já tem distância suficiente da área de trabalho.

A estrutura foi desenhada de forma a utilizar madeira de baixo custo (MDF, do inglês *Medium-Density Fiberboard*) de 6 mm de espessura, o que garante rigidez mecânica ao projeto, uma vez que a ponta de prova não tem contato com a mesa e que não há ferramenta de corte, o que ocasionaria vibração à estrutura. Nessa aplicação optou-se por usar MDF uma vez que é um material de baixo-custo e não metal, poderia ser utilizado ainda alguma estrutura plastica que garanta a rigidez mecânica.

Como resultado obteve-se a estrutura apresentada na Figura 16, onde cada peça apresentada na montagem foi cortada na fresadora MDX40A da marca Roland e montada seguindo os encaixes projetados. Pode-se observar os pontos de encaixe dos motores, o espaço para

a passagem da correia de transmissão dos movimentos, os encaixes para os rolamentos lineares.

Figura 16 – Modelo 3D da estrutura mecânica.



Para transformar o movimento circular do motor em movimento linear foram utilizadas correias e polias dentadas no padrão GT2 (Figura 17) nos eixos “X” e “Y”. Este tipo de polia tem a característica de suportar cargas leves e apresenta pouca folga, o que evita o erro de “backlash”. A polia utilizada tem 20 dentes (Figura 18), enquanto a distância entre dentes da correia é 2 mm, o que resulta em 40 mm de deslocamento linear por volta completa da polia.

No eixo “Z” o sistema de transmissão de movimento mecânico é diferente. Neste caso utilizou-se um eixo roscado acoplado axialmente ao motor. Duas porcas transformam o movimento circular do eixo em linear, da mesma forma que acontece no conjunto fuso de esferas e castanha. A escolha do uso do eixo roscado foi motivada pelo baixo custo deste material. A vantagem desta forma de transmissão em relação às correias sincronizadas é o aumento da resolução, porém a desvantagem é a folga, que é função da qualidade do material utilizado.

Figura 17 – Correia dentada GT2, Fonte: Adafruit.

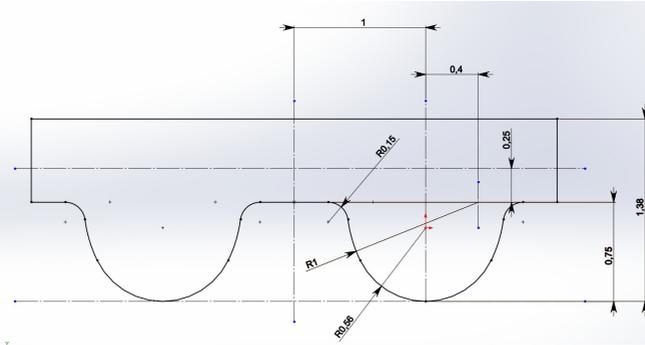


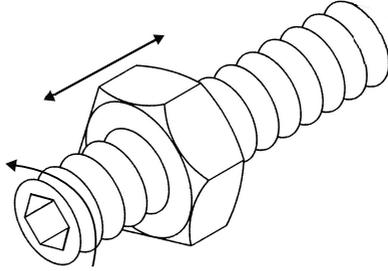
Figura 18 – Polia dentada GT2, Fonte: Adafruit.



O eixo roscado utilizado é de aço inox e tem 6 mm de diâmetro, enquanto o passo é de 0,8 mm, o que transforma uma volta completa do motor em um movimento linear de 0,8 mm. Nota-se o aumento da resolução em comparação com a correia sincronizada utilizada nos outros eixos.

A transmissão do movimento através de correia e polias é acionada por motores de passo. O motor de passo utilizado é do padrão NEMA17 (ANSI/NEMA MG 1-2011). Nos eixos “X” e “Y” o motor tem a resolução de 1,8 graus por passo, o que exige 200 passos para

Figura 19 – Transmissão por barra roscada.



uma volta completa. Desta forma, pode-se calcular a distância de deslocamento nestes eixos por passo do motor:

$$\Delta X/Y = \frac{40 \text{ mm}}{\text{volta}} \cdot \left(\frac{200 \text{ passos}}{\text{volta}} \right)^{-1} = 0,2 \text{ mm/passos} \quad (3.1)$$

No eixo “Z” o motor de passo utilizado tem a resolução de 7,5 graus por passo, o que exige 48 passos a cada volta completa do motor. Assim o cálculo do deslocamento é dado pela equação 3.2

$$\Delta Z = \frac{0,8 \text{ mm}}{\text{volta}} \cdot \left(\frac{48 \text{ passos}}{\text{volta}} \right)^{-1} = 0,0166 \text{ mm/passos} \quad (3.2)$$

Para adicionar outro grau de liberdade ao sistema foi inserido um servo motor com o indutor transmissor fixo no eixo do mesmo, desta forma o movimento de 90° do servo motor faz o indutor inclinar de -45° a 45°.

3.2 HARDWARE

A partir da estrutura mecânica descrita anteriormente é necessário escolher o hardware para controlar os movimentos. Para tal, se faz preciso uma controladora que receba os códigos numéricos enviados via computador, interprete estes dados e execute os movimentos. Esta controladora deve possuir uma unidade central de processamento (CPU), os sensores e atuadores e os drives dos motores.

3.2.1 Drive dos motores de passo

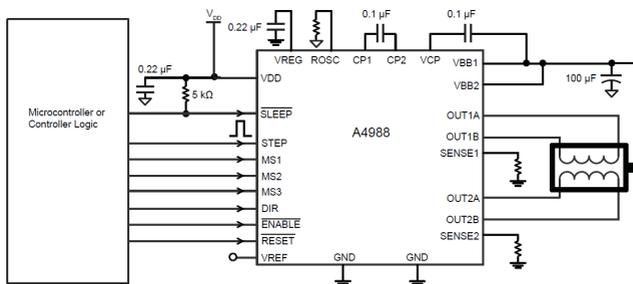
O motor de passo utilizado é do tipo bipolar, para acionamento se fazem necessários duas pontes “H”. Para facilitar o controle optou-se por utilizar um drive comercial, tendo se destacado pela facilidade de encontrar no mercado e preço acessível o drive baseado no circuito integrado A4988.

O circuito integrado A4988 da marca Allegro Microsystems é um drive de motor de passo com a opção de utilizar micropassos, as características principais são:

- Cinco modos selecionáveis do passo: completo, meio, quarto , oitavo e dezesseis avos.
- Tensão lógica de 3,3 V ou 5 V.
- Proteção contra sobrecorrente.
- Capacidade de até 2 A de corrente no motor com 35 V.
- Circuito de proteção contra sobreaquecimento

A interface do drive com a controladora é simplificada devido às características do circuito integrado A4988. Este precisa apenas do sinal de passo e do sinal de direção, além dos sinais que configuram o micropasso, que habilita e reseta o circuito integrado e o da função “sleep”. Uma sugestão de aplicação do circuito é mostrada na Figura 20.

Figura 20 – Sugestão de circuito do circuito integrado A4988.Fonte: Allegro Microsystems

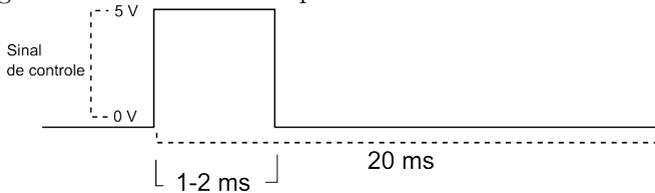


Devido ao aumento do número de projetos de código aberto na área de impressoras 3D, este drive de motor de passo se popularizou e é vendido como um módulo para ser colocado nas controladoras das impressoras, estes módulos facilitam ainda mais o uso do drive pois já tem na sua placa de circuito impresso os componentes externos ao circuito integrado que são necessários, tal como os capacitores e resistores.

3.2.2 Servo-motor

O servo-motor que adiciona um grau de liberdade ao indutor transmissor deve ser colocado na ponta de prova do eixo “Z”. Assim, uma característica interessante é que este seja leve, com isso foi escolhido o servo-motor que pesa 9 g. O servo-motor utilizado foi o SG90 que é comum em aeromodelos. O protocolo de acionamento do motor é mostrado na Figura 21, onde a largura do pulso de tensão positiva é proporcional ao valor de referência para o posicionamento do mesmo dado pela equação 3.3:

Figura 21 – Forma de onda para acionamento do servo-motor.



$$\theta_A(\Delta T) = \frac{\Delta T \cdot \pi \text{ rad}}{2 \text{ ms}} - \frac{3\pi}{4} \text{ rad} \quad \forall \quad 1 \text{ ms} \leq \Delta T \leq 2 \text{ ms} \quad (3.3)$$

Observa-se na equação 3.3 que com um pulso de largura de 1,5 ms a posição angular do eixo do servo-motor será 0° , assim como com 1 e 2 ms a posição angular é $-\frac{\pi}{4}$ rad e $+\frac{\pi}{4}$ rad, respectivamente.

3.2.3 Sensores de fim de curso

A fim de obter uma posição de referência inicial nos eixos cartesianos, se faz necessário um sensor que indique tais posições. Para isso foram utilizados sensores de barreira ópticos. Através do corte do

feixe de luz entre emissor e receptor pode-se obter uma sinalização da posição. O sensor utilizado foi o EE-SX1137, similar ao mostrado na Figura 22, que tem sua montagem mecânica com ranhura de 5 mm para montagem em placa de circuito impresso. O circuito apresentado na Figura 23 mostra a polarização necessária para o funcionamento do sensor como chave.

Figura 22 – Sensor de barreira óptica SX199.

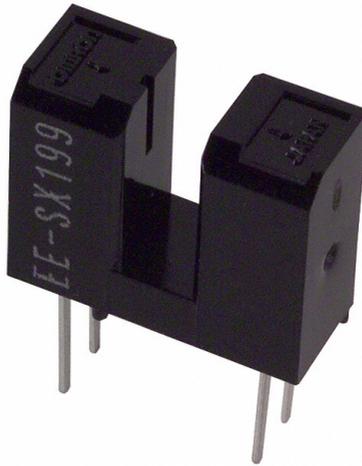
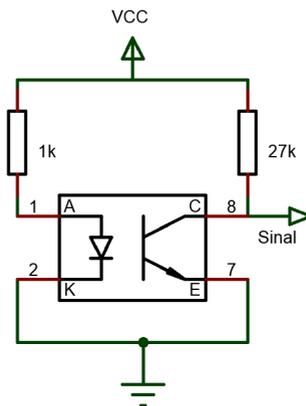


Figura 23 – Circuito de polarização do sensor óptico.



Enquanto não houver barreira interrompendo a luz emitida pelo diodo emissor de luz (LED, do inglês Light Emitter Diode), o nó do circuito da Figura 23 denominado “Sinal” terá tensão próxima de zero devido ao fototransistor estar com a base recebendo luz, no momento em que for barrada a luz recebida pelo fototransistor, este atuará como uma chave aberta e o “Sinal” estará com tensão “VCC”.

3.2.4 Conversor USB-serial

Para fazer a interface de comunicação entre a controladora da máquina e o computador foi escolhido utilizar um circuito integrado que faz a conversão do padrão USB para RS232, no qual para efeito do usuário a comunicação é feita pela porta serial RS232. O circuito integrado utilizado é o FT232RL da empresa FTDI, sendo este facilmente encontrado no mercado nacional.

O circuito integrado FT232RL proporciona em único chip a conversão USB/Serial através da simulação no computador de uma porta serial através do uso de uma porta USB. O funcionamento deste chip uma vez conectado a uma porta USB é da mesma forma que uma porta serial comum, tendo a possibilidade de ajuste do número de bits, ajuste de paridade e bits de parada. Para facilitar a utilização neste projeto, foi utilizado um módulo que já possui o circuito integrado FT232RL e conector USB soldados à placa de circuito impresso como mostra a Figura 24.

3.2.5 CPU da controladora

A escolha da unidade de processamento da máquina deve seguir certas especificações referentes às características dos periféricos, tal como:

- Precisão na largura de pulso do sinal enviado ao servo-motor.
- Número de pinos com interrupção para uso dos sensores ópticos.
- Interface de comunicação serial.
- Número de portas de saída para controle dos Drive de motores de passo.

A partir das especificações citadas foi escolhido utilizar o micro-controlador da família AVR, modelos ATmega48/88/168/328 da marca

Figura 24 – Módulo conversor USB/RS232 utilizando CI FT232RL, fonte: FTDI.



ATMEL que tem as seguintes características:

- 4/8/16/32K bytes de memória FLASH de programa.
- 256/512/512/1K Bytes de memória EEPROM
- Contador/temporizador de 16 bits com modo de comparação, pode ser usado como gerador PWM.
- Porta serial USART programável.
- Oscilador interno de até 8MHz.
- 23 pinos de entrada e saída programáveis.
- 2 pinos de interrupção externa e mais 3 pinos de interrupção interna, sendo uma por porta.
- Alimentação com 5 Volts.

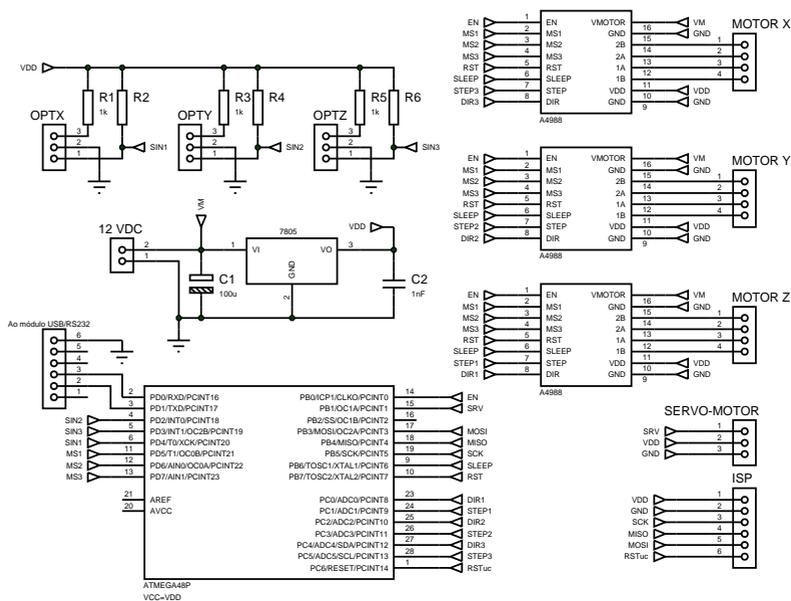
Este microcontrolador é capaz de atender as especificações da controladora da máquina, uma vez que possui um temporizador de 16 bits que pode gerar sinal PWM para controlar o servo-motor, possui o hardware de interface serial para comunicar-se com o módulo do conversor USB/RS232, possui a possibilidade de utilização dos pinos

de interrupção e contém pinos suficientes para utilizar como saídas de controle dos drives dos motores de passo.

3.2.6 Placa Controladora

Com a escolha do microcontrolador e periféricos, foi possível criar uma placa de circuito impresso contendo estes componentes e os demais necessários. O circuito da Figura 25 mostra o diagrama esquemático com os periféricos e a unidade de processamento.

Figura 25 – Esquemático da placa controladora.



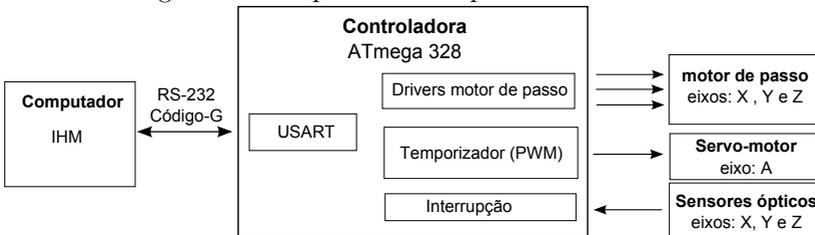
Pode-se observar no diagrama a inclusão de três drives dos motores de passo, um para cada eixo cartesiano. Além disso foram distribuídos os pinos para cada função de controle dos drives. Os pinos de

interrupções externas foram conectados ao circuito de polarização dos três sensores ópticos; foi alocado um pino de saída de comparação do temporizador de 16 bits para utilização no controle do servo-motor, foi inserido o regulador de tensão de 5 Volts para alimentação de energia do microcontrolador. Outros conectores presentes são de gravação do microcontrolador no sistema(ISP, do inglês In-System Programming) e de conexão com o módulo conversor USB/RS232.

3.3 FIRMWARE DA CONTROLADORA

Uma vez escolhidos os componentes que compõem o sistema de controle da máquina, deve-se fazer o programa responsável por receber os códigos G do computador e executar as tarefas correspondentes na máquina. O diagrama mostrado na Figura 26 mostra o sistema CNC no qual a controladora está inserida.

Figura 26 – Esquemático da placa controladora.



Nesta implementação, o sistema CNC inclui o núcleo de controle numérico (NCK) e o controlador lógico programável (CLP) na placa controladora através do firmware implementado. O firmware deve ser capaz de receber através de comunicação serial RS232 os códigos “G” enviados pelo computador no qual está a interface homem-máquina (IHM), interpretar e executar as ações nos motores de passo dos eixos cartesianos e no servo-motor, além de ser capaz de fazer leitura dos sensores ópticos.

Como plataforma de programação do microcontrolador foi utilizado o Atmel Studio, utilizando compilador para a linguagem “C/C++” (HORSTMANN, 2008), no qual foram criadas as classe necessárias para as tarefas do NCK e CLP.

3.3.1 Classe Serial

O Transmissor/Receptor Universal Síncrono e Assíncrono (USART, do inglês *Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*) é o hardware presente no microcontrolador capaz de fazer a interface de comunicação do mesmo com o computador que envia os códigos numéricos. No microcontrolador ATmega 328 o USART0 pode ser configurado de diversas maneiras, nesta aplicação foi utilizado da forma a seguir:

- 8 bits de dados.
- 1 bit de parada.
- Sem paridade.
- Comunicação assíncrona.
- Taxa de transmissão de 9600 pacotes/segundos.

Foi criada uma classe denominada “Serial” com: o método responsável por configurar inicialmente o USART0, os métodos que enviam caracteres e conjunto de caracteres de oito bits, o método que recebe caracter de oito bits e os métodos que enviam e recebem código numérico. O código da classe “Serial” está no apêndice A, com os métodos criados.

3.3.2 Classe Micropasso

Para controlar o drive de micropasso A4988 foram utilizados doze pinos de saída do microcontrolador, sendo que os sinais de habilitação(EN), MS1, MS2, MS3, reset e sleep são comuns aos três drives, e os seis restantes são sinais de direção e comando de passo para cada drive. Caso o controle da velocidade nos motores de passo fosse crítico, o algoritmo apresentado por Austin (2005) seria mais apropriado e exigiria o uso de três contadores/temporizadores do microcontrolador.

Foi criada uma classe denominada “Micropasso” com o método responsável por inicializar as portas e pinos de comando dos drives e configurar a divisão de passo através dos sinais MS1,MS2 e MS3 de acordo com a tabela 5.

Outro método criado tem função de executar apenas um micropasso, tomando como argumento o eixo e o sentido de rotação. O

algoritmo utilizado para se executar um passo é simples, apenas coloca o sinal de direção(DIR) no nível lógico correspondente ao sentido desejado e após isto ativa-se o sinal de passo(STEP) durante um microsegundo em nível lógico alto, como sugere a folha de dados do circuito integrado A4988. A classe criada e seus métodos estão no apêndice A.

Tabela 5 – Resolução do Drive de motor de passo

MS1	MS2	MS3	Resolução(Passo)
0	0	0	completo
1	0	0	meio
0	1	0	quarto
1	1	0	oitavo
1	1	1	dezesesseis avos

3.3.3 Classe ServoMotor

Como mostrado anteriormente na Figura 21, o servo-motor utilizado necessita de um sinal com largura de pulso entre 1 e 2 ms com período fixo de 20 ms. A maneira de se criar um sinal PWM no microcontrolador é utilizando um dos temporizadores disponíveis. Neste caso foi utilizado o contador de 16 bits por este oferecer maior resolução em comparação com os outros de 8 bits.

O temporizador TNTC1 do atmega328 foi configurado no modo CTC (do inglês, *Clear Timer On Compare Match*) em que o contador é resetado por hardware no valor determinado na comparação com o registrador ICR1, que nesta aplicação mantém o valor 20.000 para se ter o período de 20 milissegundos, com o temporizador incrementando com o clock de 1MHz. O valor do clock é ajustado como 1/8 do clock do processador, que neste caso é 8MHz.

Para ajustar a largura de pulso do sinal de controle do servo-motor é utilizado a comparação do registrador OCR1A com o contador TCNT1, quando estes valores são iguais o nível lógico no pino OC1A é ajustado para ir para nível baixo, este valor retorna para nível alto novamente ao reiniciar a contagem.

A classe “ServoMotor” foi criada com o método responsável por inicializar os registradores de configuração do temporizador e com o método que muda o valor de comparação recebendo como argumento o valor do ângulo desejado. Utilizou-se a eq. 3.3 para determinar o valor de OCR1A em 3.8:

$$OCR1A(\theta^\circ) = \left(\frac{\theta}{90^\circ} + 1,5 \right) \cdot 1000 \quad \forall \quad -45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ \quad (3.4)$$

3.3.4 Classe Interrupção

Para utilizar os sensores ópticos como sensores de fim de curso foi escolhido o recurso de interrupções do microcontrolador para controlar tal tarefa. Duas interrupções externas e uma por troca de nível em pino foi utilizada, desta forma o programa que está sendo executado é interrompido no momento em que há alteração de nível lógico. Como a característica do sinal proveniente do sensor óptico é de nível baixo quando não há barreira entre o fotoemissor e receptor as interrupções foram configuradas para acontecer na subida de nível lógico. Dentro do código responsável por cada interrupção foi utilizada uma variável que informa a ocorrência da interrupção, ou seja, funcionando como semáforo. A classe “Interrupcao” tem apenas o método responsável por configurar os registradores de uso de interrupção, pois as funções efetuadas na interrupção estão no programa principal(main).

3.3.5 Classe EEPROM

A memória que utiliza a tecnologia EEPROM (do inglês, *Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*) do microcontrolador utilizado tem capacidade de até 1K bytes. Esta memória não-volátil é utilizada nesta aplicação para salvar os valores das coordenadas de usuário, neste caso são 18 bytes. Assim, foi criada a classe EEPROM com os métodos que salvam e recuperam da memória os valores das coordenadas de usuário.

3.3.6 Classe Funções auxiliares

A classe “Funcoes” foi criada com o intuito de auxiliar no desenvolvimento de classes específicas da controladora CNC, tal como o intérprete de código G e da posicionadora. Esta classe auxiliar recebe como herança a classe “Micropasso” pois irá utilizar seu método.

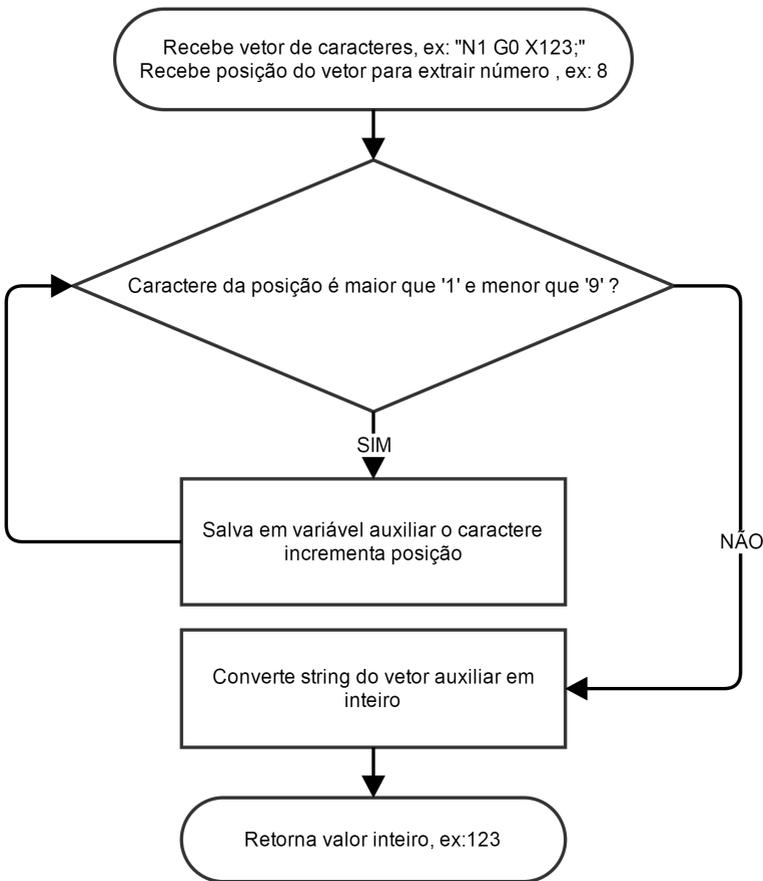
São implementados dois métodos responsáveis por criar um atraso no programa, os métodos “atraso1ms” e “atraso10us” que recebem

como argumento o número de atrasos nas unidades de 1 milissegundo e 10 microsegundo, respectivamente.

O método “zeraCodigo” é responsável por colocar o valor zero em cada posição de memória do vetor recebido como argumento.

O método “retornaN” recebe como argumento um vetor com caracteres, e um inteiro informando a posição do primeiro caractere no vetor a ser convertido para número inteiro que é retornado pelo método. O fluxograma da Figura 27 mostra o algoritmo usado para esta função.

Figura 27 – Fluxograma do método “RetornaN”.



O método “moveXYZ” é responsável por atuar nos drives de

motor de passo através do envio de comando de direção e número de pulsos, este método recebe como argumento a distância para mover em cada eixo, a unidade da distância é 0,1 mm. O algoritmo calcula o número de passos de acordo com a resolução de cada eixo, após o cálculo é enviado o comando de passo. A velocidade com que o movimento será executado é definida neste método por:

$$V = \Delta S / \Delta t \quad (3.5)$$

onde ΔS é deslocamento constante por passo e calculado por 3.1 e 3.2, assim o valor de Δt é o argumento do método que realiza atraso:

$$\Delta t = \Delta S / V \quad (3.6)$$

Para efeito de suavizar os movimentos na atuação dos motores foi implementado perfil de velocidade trapezoidal para aceleração e desaceleração dos motores através dos métodos “aceleraLinear” e “desaceleraLinear”. Este perfil é criado ao se modificar o valor do atraso entre passos (Δt), para o perfil trapezoidal, o valor de aceleração é constante então:

$$A = \Delta V / \Delta t \quad (3.7)$$

logo

$$\Delta t = \Delta V / A \quad (3.8)$$

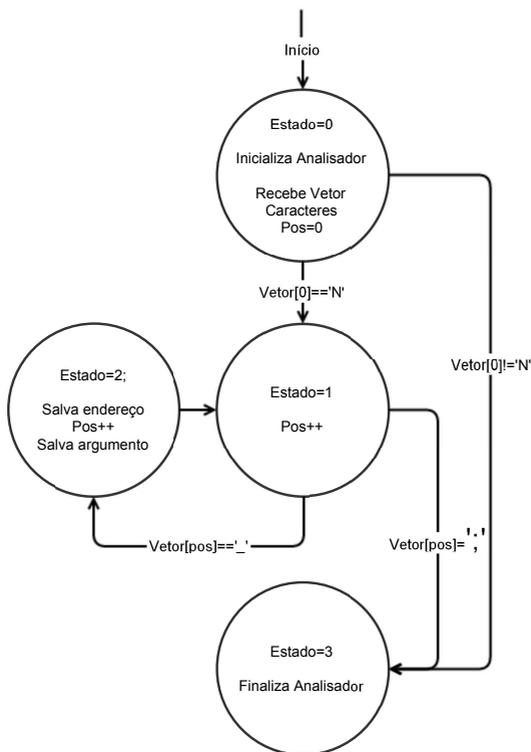
Como meio de encontrar o ponto de referência inicial de cada eixo foi criado o método “achaZero”, este faz a busca iniciando o movimento no sentido do sensor óptico até que o deslocamento cause uma interrupção devido ao bloqueio de luz no sensor. Para aumentar a precisão do ponto de referência e velocidade de execução da tarefa, a rotina acima é feita inicialmente com velocidade máxima suportada pelo eixo, após encontrar a referência, o eixo é deslocado poucos milímetros no sentido contrário do sensor e a busca é refeita com velocidade mínima.

3.3.7 Classe Intérprete

A seguir será apresentada a classe “Interprete” que é responsável por fazer o tratamento do código numérico computadorizado recebido pela interface serial, segundo Suh et al. (2008) esta parte do firmware é a mais complexa.

O método “analisador” recebe como argumento um vetor de caracteres correspondentes a uma linha de código numérico, este faz a análise léxica e caso apresente erro este será retornado ao usuário posteriormente. A análise léxica é feita através da leitura de cada caractere do vetor e comparado com os valores possíveis. A máquina de estados simplificada da Figura 28 mostra o algoritmo utilizado neste método.

Figura 28 – Máquina de estados finita simplificada do método “Analisador”.



Após a análise léxica, os valores numéricos correspondentes aos argumentos de cada bloco são calculados e salvos em variáveis auxiliares, com isso é feito finalmente a interpretação da sentença (código G) através da comparação com a sequência esperada pelo padrão RS274 e novamente salvo em variáveis auxiliares os comandos solicitados, como por exemplo de posicionamento.

Neste método são programados os valores esperados de código numérico, como se trata de uma aplicação específica, o conjunto de instruções utilizadas são uteis apenas para esta máquina e englobam um pequeno conjunto do padrão RS274D.

O método “executor” carrega os valores dos argumentos calculados pelo método anterior às funções correspondentes ou variáveis. Outros dois métodos auxiliam o executor na passagem e validação de argumentos dos blocos, são eles “carregaposicoes” e “forneposicoes”.

A tabela 6 mostra a lista de códigos programados no qual a classe “Intérprete” é capaz de executar. Por padrão é necessário que cada linha do código G recebido pela controladora comece com o caractere “N” , o argumento que o acompanha não precisa estar necessariamente em ordem crescente para ser executado, se não estiver irá gerar uma advertência através do código de erro enviado como realimentação para o computador.

Tabela 6 – Lista de códigos interpretados pela classe “Intérprete”

Código RS274D	Ação	Argumentos	Exemplo
G00	movimento rápido	X#, Y#, Z# e A#, # distância em 0,1mm	N1 G0 X100;
G04	atraso de tempo	P#, em milisegundos	N2 G4 P500;
G10	modifica valor de coordenada de trabalho(1-3) para valor definido ou atual	L2 P(1-3) X# Y# Z# , L20 P(1-3) , valor atual	N3 G10 L20 P1;
G28	Home - acha posição inicial de referência	-	N4 G28;
G53	Sistema de coordenadas da máquina	-	N5 G53;
G54-56	Sistema de coordenadas do usuário 1-3	-	N6 G55;
G90	Sistema de coordenadas absolutas	-	N7 G90;
G91	Sistema de coordenadas incrementais	-	N8 G91;
M101	Grava valores dos sistemas de coordenadas do usuário	-	N9 M101;
M102	Carrega valores dos sistemas de coordenadas do usuário	-	N10 M102;

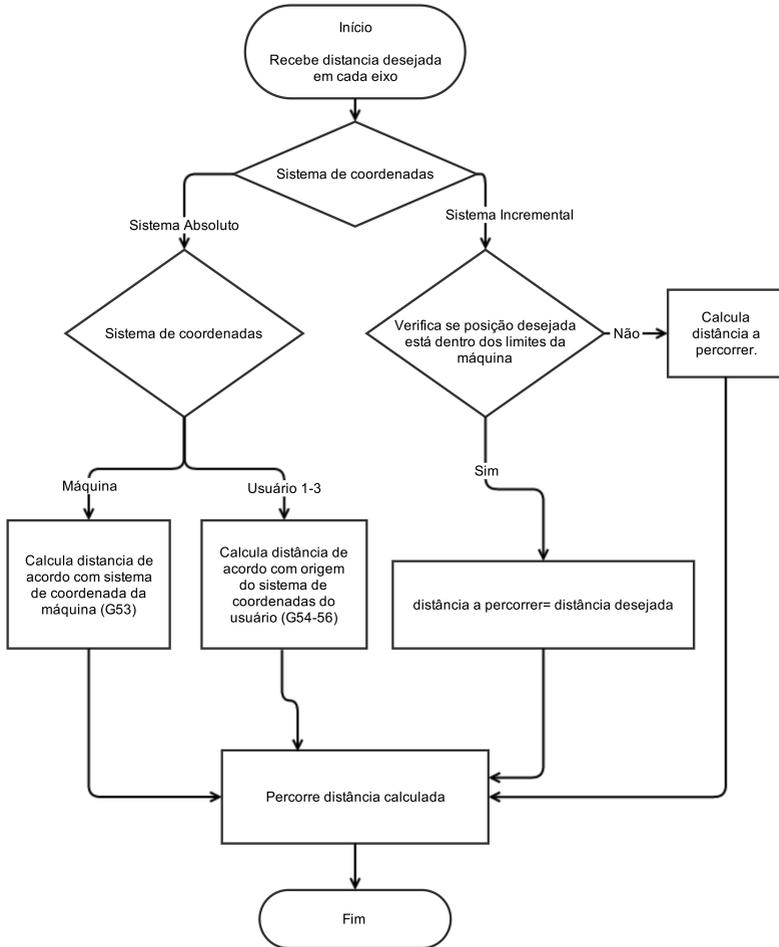
3.3.8 Classe Posicionador

A classe “posicionador” é responsável pelos métodos que executam os movimentos nos eixos da máquina posicionadora, esta classe possui o método “moveEixos” e “Home”.

O método “moveEixos” quando executado executa o número de passos necessários para atingir determinada posição a partir dos valores desejados em cada eixo, para isso o método calcula a distância a percorrer em cada eixo de acordo com o sistema de coordenada atual(incremental ou absoluto) e sistemas de coordenadas do usuário ou máquina. O algoritmo responsável pelo método descrito é apresentado na Figura 29. Este método também atualiza o valor de referência

para o eixo “A”, no qual o controle de posição é feito pelo próprio mecanismo de realimentação do servo-motor.

Figura 29 – Algoritmo do método “moveEixos” .



O método “Home” utiliza da classe “Funcoes” o método “acha-Zero” para os eixos X, Y e Z, desta forma consegue encontrar a posição inicial a partir dos três sensores ópticos utilizados como chave, posição denominada “Zero-Máquina” .

3.3.9 Programa Principal

A partir das classes mencionadas anteriormente é possível criar o programa principal da controladora CNC, este programa está incluso no apêndice B. O programa inicializa as bibliotecas das classes criadas e as variáveis necessárias, após isto executa os métodos de inicialização dos objetos, neste momento entra em um laço que espera uma linha de código G pela porta serial, faz a análise e execução da linha, e de acordo com a necessidade faz o posicionamento solicitado. A Figura 30 mostra o algoritmo utilizado.

O programa compilado pelo AtmelStudio tem 7016 bytes de memória de programa, 47 bytes de memória de dados e 18 bytes de memória EEPROM. Este programa pôde ser gravado no microcontrolador Atmega8 devido aos 8kBytes de memória de programa disponíveis.

3.4 INTERFACE HOMEM-MÁQUINA

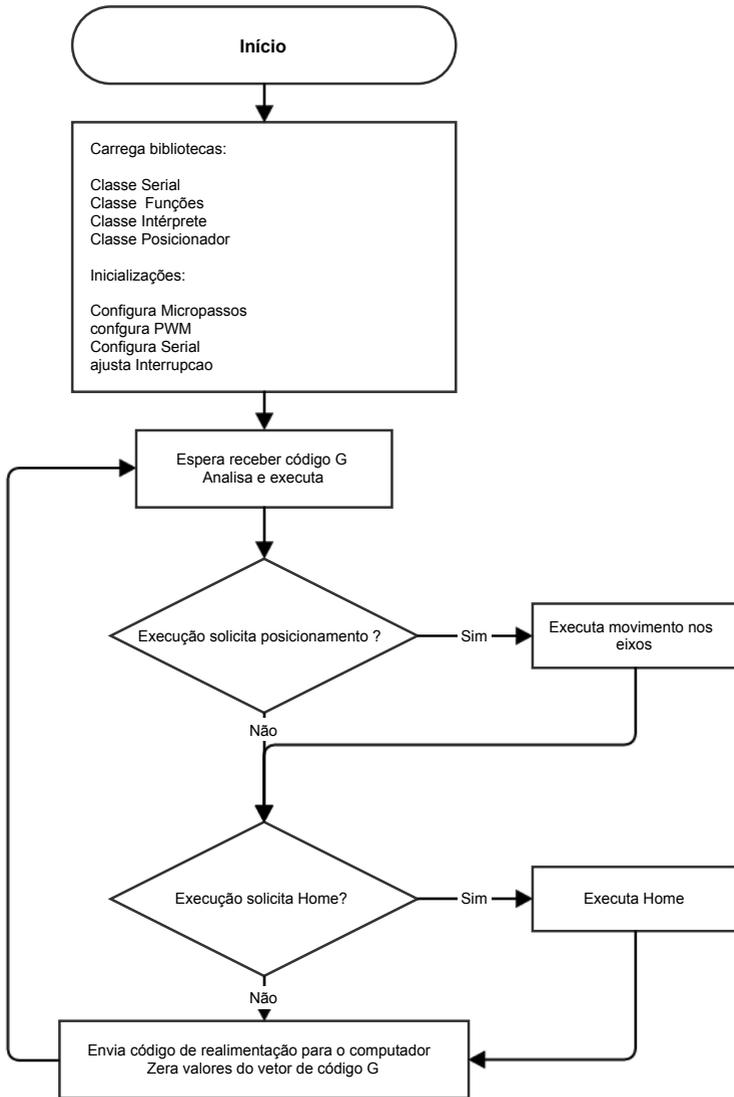
Uma parte do sistema CNC em que o usuário pode interagir com a máquina é a Interface Homem-Máquina, onde é possível enviar comandos à máquina, ajustar parâmetros, transmitir e receber dados.

A IHM esta deve ser desenhada pensando na sua facilidade de utilização de acordo com a máquina, em outras palavras o painel de controle deve ser desenhado do ponto de vista ergonômico, prevenindo erros, agrupando comandos semelhantes, entre outras características.

Neste trabalho a IHM foi projetada para ser utilizada em um computador, o que permite que seja feita uma interface gráfica facilmente, para isto foi utilizado a linguagem de programação orientada a objetos “C#” utilizando o software “SharpDevelop”. Este software é capaz de criar uma interface gráfica no sistema operacional Windows a partir das bibliotecas de classes do Framework.NET fornecido pela empresa “Microsoft” (PETZOLD, 2001).

O painel de controle da máquina posicionadora foi projetado de forma a poder conectar e desconectar a porta serial à máquina com as configurações estabelecidas anteriormente, foi inserido duas áreas de texto para mostrar os caracteres enviados e recebidos, outra área tem disponibilizado os botões de comando dos eixos cartesianos e do eixo “A” com a distância selecionável através do multiplicador, botões que alternam o sistema de coordenadas entre incremental e absoluto também estão presentes no painel, assim como o botão de “Home”. O painel de controle da IHM é mostrado na Figura 31.

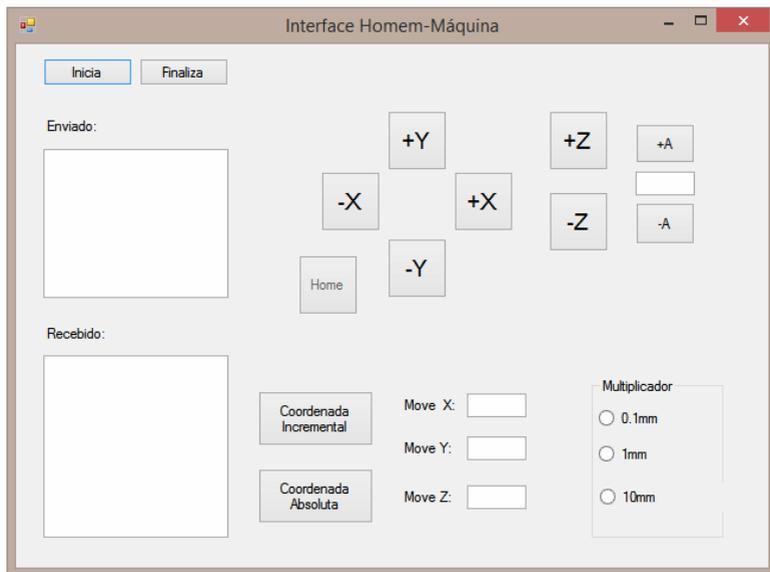
Figura 30 – Algoritmo do programa principal.



Os botões do painel de controle ao serem pressionados executam uma função responsável por enviar através da porta serial o código

número correspondente. A leitura dos dados recebidos pela porta serial é feita através de interrupção causada pelo hardware do computador e mostrado na área de texto, desta forma o usuário pode ter um histórico dos comandos executados, além de ser capaz de saber se houve algum erro.

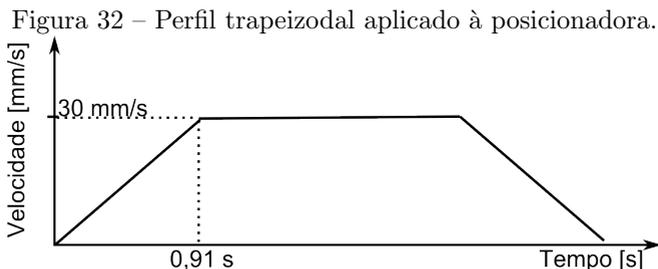
Figura 31 – Painel de controle da interface homem-máquina.



4 TESTES E RESULTADOS

A partir da montagem da estrutura mecânica projetada em CAD, os motores de passo em conjunto com as correias dentadas e polias foram inseridas na estrutura. Assim os movimentos lineares dos eixos puderam ser testados em primeiro momento manualmente. Logo após, os movimentos foram realizados utilizando motores de passo acionados pelos drives. A próxima etapa foi inserir os sensores de “zero-máquina” no início de cada eixo.

Com a montagem da placa de circuito impresso com os periféricos e drives, foi possível fazer a conexão entre o computador e a máquina posicionadora. Dessa forma iniciaram-se os testes do firmware da controladora CNC. Primeiramente definida a velocidade de acionamento dos eixos de forma a ter movimentos suaves nas partidas e paradas. O movimento suave foi possível através do perfil de velocidade trapezoidal (aceleração constante). O valor de velocidade máxima foi definido como sendo 30 mm/s, enquanto a mínima é 3 mm/s. O perfil de aceleração constante utilizado é ilustrado na Figura 32. Com valor de 29,6 mm/s² de aceleração, a velocidade máxima é atingida em 0,9 segundos.



Outra etapa realizada foi a verificação da distância movida em determinado eixo através do comando CNC e posterior calibração no firmware. A calibração é feita alterando o número de micropassos para deslocar uma unidade de distância (0,1 mm). Esta calibração foi realizada enviando comando de deslocamento com o valor da distância máxima que cada eixo permite. Com o instrumento de medida (paquímetro) foi verificado se a distância corresponde à desejada, de acordo com a variação o ajuste foi feito via software alterando-se o número de passos por unidade de deslocamento.

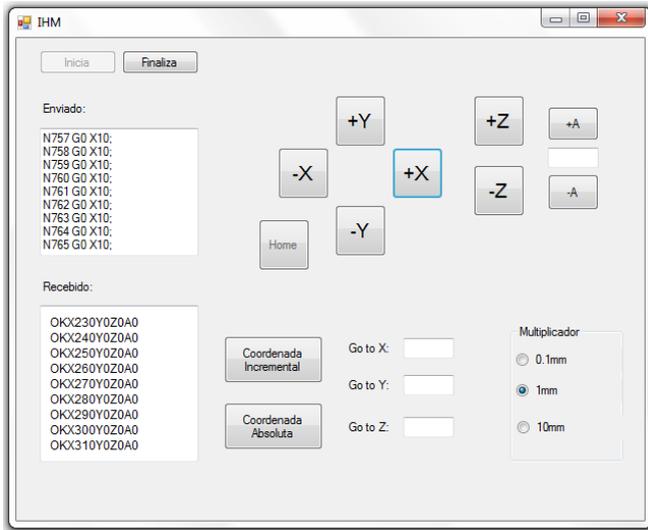
Os sensores ópticos responsáveis pelo “zero-máquina” foram tes-

tados de forma a garantir a repetibilidade na referência de posição inicial, dentro do grau de resolução do instrumento de medida ($\pm 0,05$ mm) o sistema se mostrou confiável.

Como auxiliar na fase de testes foi utilizada a interface homem-máquina através do painel de controle, com isso foi possível enviar os comandos de posicionamentos, testar os sistemas de coordenadas do usuário, receber os dados de erro da máquina, etc. O painel de controle auxiliou na correção de erros no firmware da controladora, tais como a falta da definição dos limites máximo e mínimo em cada eixo. A Figura 33 mostra a tela da IHM sendo utilizada.

A interface homem-máquina com painel de controle foi programada para ser usada no sistema operacional Windows. Para automatizar as medidas a seguir, foi utilizado um computador com o sistema operacional “CentOS” baseado no Linux. Foi criado um programa em linguagem “C” para entrada de códigos G para envio e recebimento através da porta USB. O programa em C pode ser executado no terminal de comandos onde o usuário escreve o código G e envia para a máquina.

Figura 33 – Painel de controle da IHM utilizada para testar máquina.

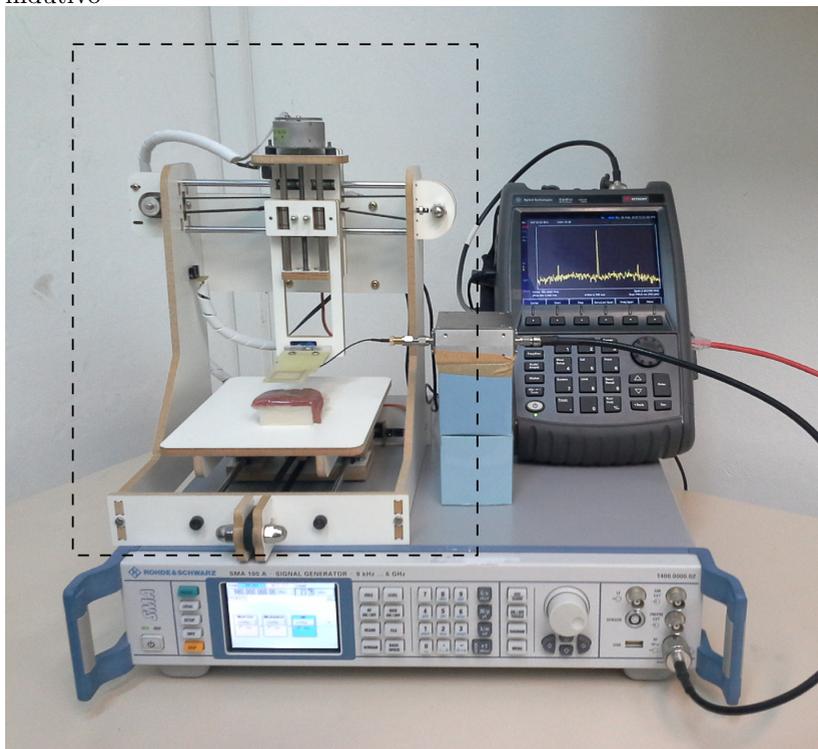


Como forma de validar a máquina posicionadora aplicada às medidas no acoplamento indutivo estudado por Cabrera e Sousa (2014b) foi montada a bancada de testes com os instrumentos necessários. A

bancada consiste da máquina posicionadora com a placa de circuito com o indutor transmissor acoplado à ponta de prova e o circuito integrado com o indutor receptor na mesa de trabalho da posicionadora.

A bancada de testes tem além dos indutores e circuito integrado, os equipamentos necessários para as medidas. O gerador de sinais em rádio-frequência é utilizado para enviar potência ao indutor transmissor, enquanto o analisador de espectros mede a frequência de chaveamento do oscilador em anel do circuito integrado. Os equipamentos utilizados foram o gerador de sinais em rádio-frequência “SMA100” e o analisador de espectro “N9913A” da marca Keysight Technologies como mostra a Figura 34, a qual destaca a posicionadora.

Figura 34 – Bancada de testes da máquina posicionadora e acoplamento indutivo



O circuito integrado projetado por Cabrera e Sousa (2014b) tem 1,5 mm por 1,5 mm com o indutor receptor em suas extremidades, como mostra a Figura 35. O indutor foi projetado para receber onda

de rádio na frequência de 1 GHz, com um capacitor é feito o casamento de impedâncias. O sinal de rádio-frequência é retificado e alimenta um oscilador em anel que atua como carga variável. A frequência deste oscilador é função da tensão DC retificada. A saída do oscilador serve como sinal de controle para uma chave, que curto circuita o sinal de rádio-frequência, modulando o sinal enviado à antena. Assim pode-se estimar a potência recebida no circuito integrado sem a necessidade de fios para conexão. O diagrama da Figura 36 ilustra o funcionamento do circuito integrado.

Figura 35 – Layout do circuito integrado projetado por Cabrera e Sousa (2014b).

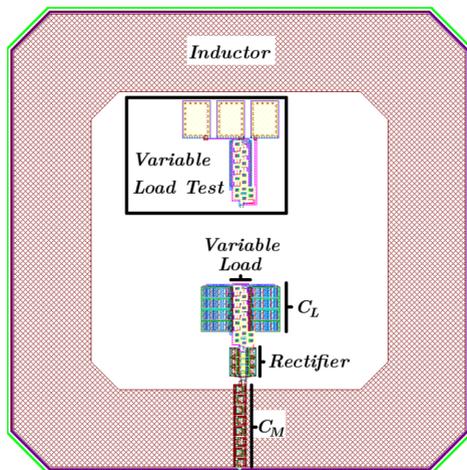
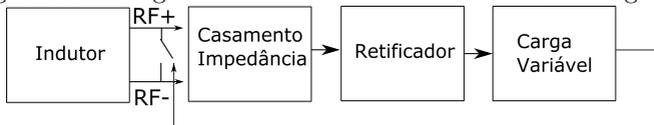


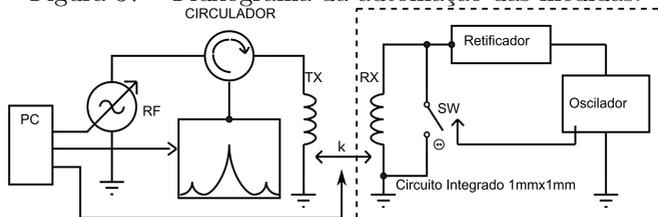
Figura 36 – Diagrama de funcionamento do circuito integrado.



Com o gerador de sinais de rádio-frequência transmitindo em 998MHz, foram feitos testes fixando-se a potência recebida pelo circuito integrado e variando-se a potência transmitida para diferentes posições relativas dos indutores. A Figura 37 representa o esquema utilizado na automação das medidas, o computador (PC) comanda o gerador de sinais para variação de potência enviada, o computador é

responsável por ler os valores de frequência do analisador de espectro e comandar a posicionadora via código G. Isso permite a obtenção de curvas de eficiência na transmissão de energia em função das posições dos indutores.

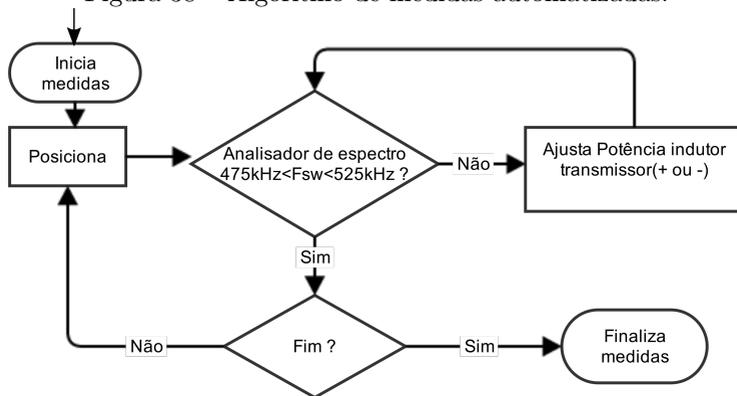
Figura 37 – Fluxograma da automação das medidas.



O algoritmo utilizado para realizar as medidas é apresentado na Figura 38. Esse algoritmo é genérico e foi utilizado para diferentes posicionamentos do indutor transmissor. A frequência do oscilador foi fixada em 500 kHz, que corresponde à potência fornecida ao oscilador de -19,64 dBm. A eficiência do acoplamento indutivo é definida na equação 4.1, na qual a eficiência é a potência na carga (oscilador) sobre a potência no indutor emissor. Os resultados apresentados levam em conta as perdas dos cabos de transmissão e circulador, que são de 2dB.

$$\eta = P_L/P_E \quad (4.1)$$

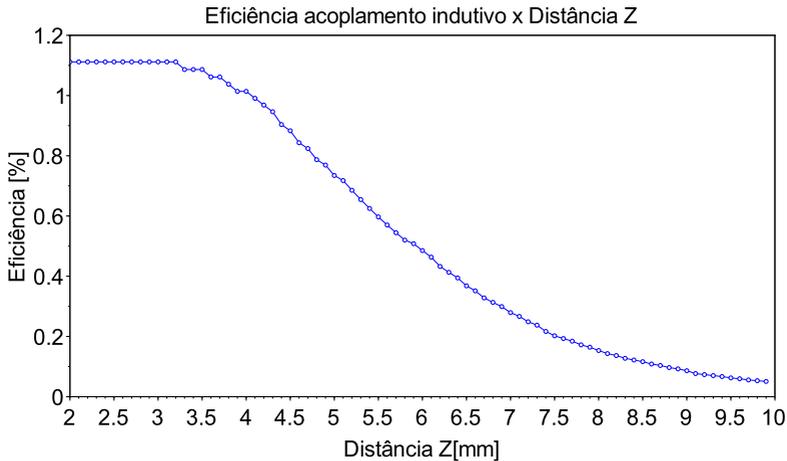
Figura 38 – Algoritmo de medidas automatizadas.



Foi feito um ensaio com a variação da distância de separação en-

tre o indutor transmissor e circuito integrado entre 2 e 10 mm variando-se a coordenada “Z” em passos de 0,1 mm. O resultado deste ensaio é o gráfico da Figura 39 que mostra a eficiência, definida em 4.1, do acoplamento indutivo ao se variar a distância de separação dos indutores considerando os centros alinhados.

Figura 39 – Eficiência do acoplamento indutivo variando a separação no eixo “Z” entre indutores.



Outra medida realizada foi variando a distância entre os centros dos indutores considerando-os paralelos e com distância de separação fixa em “Z” de 4 mm. Esta medida foi automatizada através de um algoritmo de varredura do plano XY. O programa faz a varredura no plano XY com resolução de 0,5 mm, em cada ponto do plano é feita a medida da potência necessária no indutor emissor para manter fixa a potência recebida pelo circuito integrado.

O resultado do mapeamento da eficiência no plano XY pode ser visualizado como uma superfície de contornos, mostrado nas Figura 40 e 41.

Além das medidas no plano XY, foram feitas medidas no plano XZ com resolução de 0,2 mm. Com os dados obtidos nessa medida foi possível graficar a eficiência do acoplamento indutivo no plano XZ, como mostra as Figuras 42 e 43.

Figura 40 – Eficiência do acoplamento indutivo para o plano “XY” com Z=4 mm

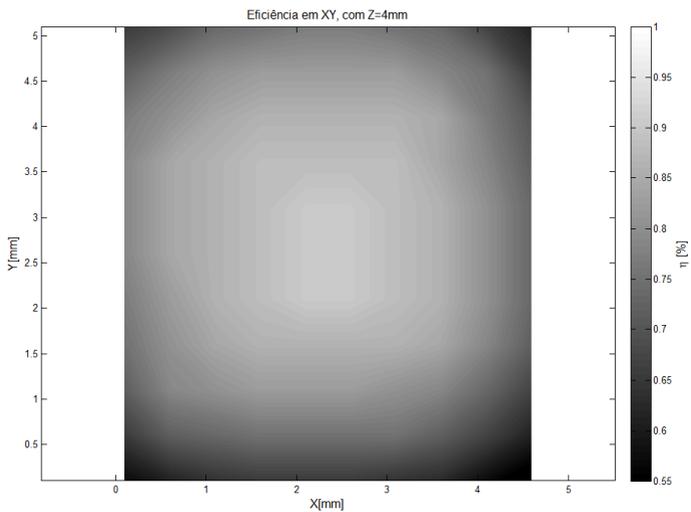


Figura 41 – Curvas de nível da eficiência do acoplamento indutivo para o plano “XY” com Z=4 mm

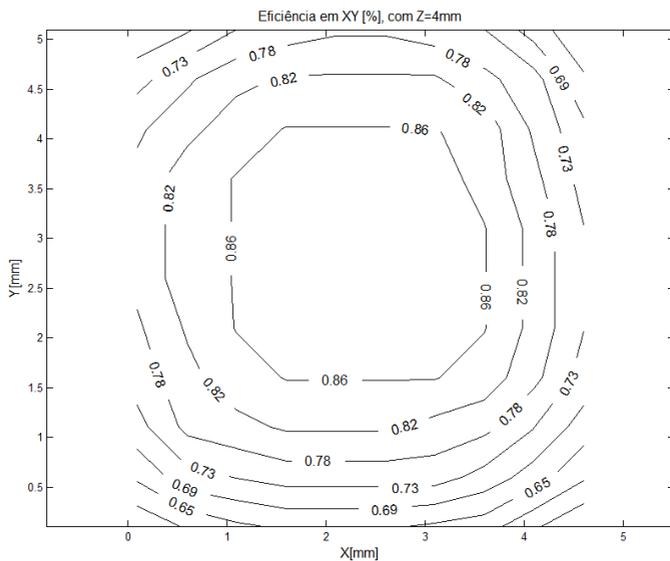


Figura 42 – Eficiência do acoplamento indutivo para o plano “XZ”.

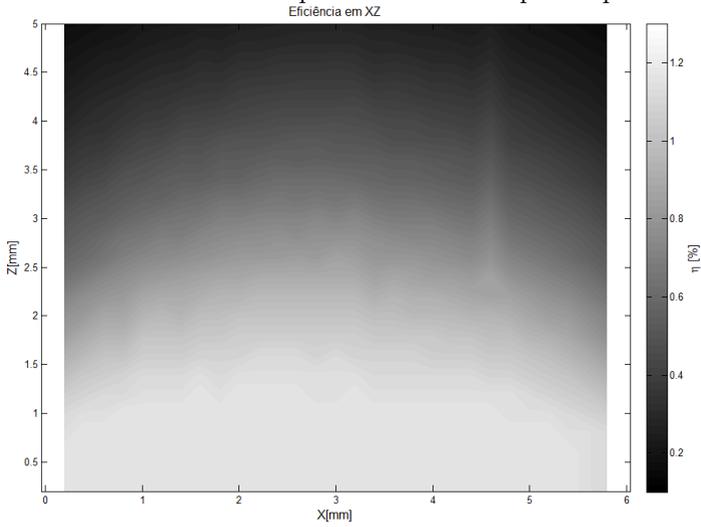
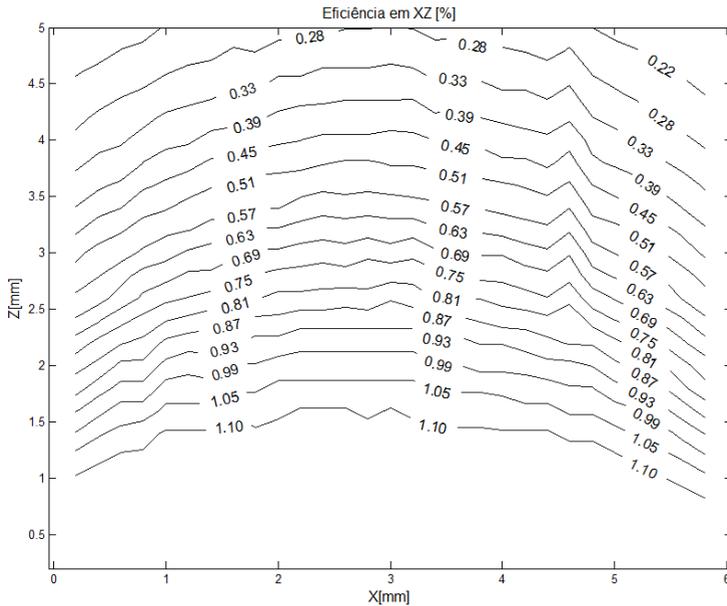


Figura 43 – Curvas de nível da eficiência do acoplamento indutivo para o plano “XZ”.



5 CONCLUSÕES

A máquina de posicionamento CNC desenvolvida neste trabalho tinha como objetivo ser capaz de realizar com grau de confiabilidade, repetibilidade e precisão necessária, medidas no acoplamento indutivo desenvolvido por Cabrera e Sousa (2014b).

Através do projeto mecânico da estrutura, com os respectivos movimentos nos eixos cartesianos, foi alcançado o grau de resolução no movimento dos eixos “X” e “Y” de 0,0125 mm e no eixo “Z” de 0,001 mm sem considerar os erros de não idealidades dos drives e motores de passo, como o objetivo era alcançar uma resolução de 0,1 mm, foi definido este valor como o passo mínimo para cada movimento, o que faz os erros serem minimizados.

A máquina desenvolvida tinha como objetivo ter alto grau de repetibilidade nas medidas, o que foi possível alcançar ao se utilizar os sensores ópticos para determinar um ponto inicial de referência (“zero-máquina”), a partir deste ponto assumindo movimento gerado pelos motores de passo sem erro de backlash e perda de passo, se tem um posicionamento que pode ser repetido.

O software embarcado responsável por interpretar os códigos G e executar as tarefas solicitadas se mostrou confiável durante os testes, pois fornecia a realimentação ao computador, ou seja, informava se o código G enviado havia erros ou se foi corretamente executado. A interface homem-máquina se mostrou de grande importância durante os primeiros testes do firmware da controladora, pois com a mesma os códigos CNC eram facilmente enviados e recebidos pela porta USB. Além disso o painel de controle se mostrou de fácil uso por parte do usuário, pois o mesmo não precisa escrever os códigos G e apenas selecionar a função desejada através dos botões da interface gráfica.

As medidas realizadas com a máquina posicionadora em bancada com os demais equipamentos de medidas foi a última etapa realizada, e com isto se provou a utilidade da posicionadora para medidas em função da distância relativa entre indutores. O formato das curvas nas Figuras 39, 40 e 42 estimam a eficiência na transmissão de energia sem fio em função dos posicionamentos relativos, tais medidas foram facilitadas pela automação do processo, a notar pelo número de pontos medidos.

Através dos testes realizados e dos gráficos gerados nas medidas com o acoplamento indutivo pode-se concluir que a máquina se mostrou confiável dentro dos limites da construção e materiais utilizados,

servindo como uma alternativa de baixo custo para medidas envolvendo posicionamento relativo onde as peças a serem movidas sejam leves em comparação com a mesa móvel, por exemplo.

Futuros testes pretendem adicionar um substrato entre as separações dos indutores a fim de caracterizar a transmissão de energia através desse meio, por exemplo, ao se utilizar um dielétrico que simule a pele humana (GABRIEL; LAU; GABRIEL, 1996) será possível obter a eficiência para dispositivos biomédicos implantáveis, que é o objetivo da aplicação do circuito integrado projetado por Cabrera e Sousa (2014b).

Observou-se nas medidas que o fato dos motores de passo e servomotor estarem constantemente energizados levam a um erro nas medidas da frequência modulante, este erro aparentemente é constante durante as medidas, porém fica como sugestão para trabalhos futuros o estudo de um meio de anular este erro ao se desligar os motores ou o estudo aprofundado do comportamento do erro gerado.

Conclui-se que a máquina resultante deste trabalho foi importante ao facilitar a caracterização do acoplamento indutivo em função dos posicionamentos relativos, pois o instrumento mostrou ser capaz de fazer posicionamentos de forma precisa, com repetibilidade e confiável.

REFERÊNCIAS

- AUSTIN, D. Generate stepper-motor speed profiles in real time. **Article in Embedded Systems Programming, January, 2005.**
- CABRERA, F. L.; SOUSA, F. R. de. Optimal design of energy efficient inductive links for powering implanted devices. In: IEEE. **Biomedical Wireless Technologies, Networks, and Sensing Systems (BioWireleSS), 2014 IEEE Topical Conference on.** [S.l.], 2014. p. 37–39.
- CABRERA, F. L.; SOUSA, F. Rangel de. A cmos fully-integrated wireless power receiver for autonomous implanted devices. In: IEEE. **Circuits and Systems (ISCAS), 2014 IEEE International Symposium on.** [S.l.], 2014. p. 1408–1411.
- CLAVEL, R. **Device for the Movement and Positioning of an Element in Space.** [S.l.]: Google Patents, dez. 11 1990. US Patent 4,976,582.
- CONDIT, R.; JONES, D. W. Stepping motors fundamentals. **Microchip Application Note: AN907,[Online]. Available: www.microchip.com, 2004.**
- DJEMOUAI, A. et al. Performance optimization of a radio-frequency coupling technique. In: **Proc. IFESS Conf.** [S.l.: s.n.], 1997.
- GABRIEL, S.; LAU, R.; GABRIEL, C. The dielectric properties of biological tissues: II. measurements in the frequency range 10 hz to 20 ghz. **Physics in medicine and biology**, IOP Publishing, v. 41, n. 11, p. 2251, 1996.
- HORSTMANN, C. **Conceitos de computação com o essencial de C++.** [S.l.]: Bookman, 2008.
- KENJO, T.; SUGAWARA, A. **Stepping Motors and Their Microprocessor Controls: Monographs in Electrical and Electronic Engineering 16.** [S.l.]: Clarendon, 1985.
- KRAMER, T. R.; PROCTOR, F. M.; MESSINA, E. The nist rs274/ngc interpreter-version 3. **ISD of NIST, Gaithersburg, MD, 2000.**

LEE, J. et al. Wireless power transfer system adaptive to change in coil separation. IEEE, 2014.

LI, X.-F. et al. An acceleration and deceleration algorithm of stepper motor [j]. **Development & Innovation of Machinery & Electrical Products**, v. 1, p. 049, 2006.

MARCONI, G. Radio telegraphy. **American Institute of Electrical Engineers, Journal of the**, IEEE, v. 41, n. 8, p. 561–570, 1922.

PETZOLD, C. **Programming Windows with C# (Core Reference)**. [S.l.]: Microsoft Press, 2001.

SALLÁN, J. et al. Optimal design of icpt systems applied to electric vehicle battery charge. **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 56, n. 6, p. 2140–2149, 2009.

SHINOHARA, N. **Wireless Power Transfer Via Radiowaves**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014.

SLOCUM, A. H. **Precision machine design**. [S.l.]: Society of Manufacturing Engineers, 1992.

SUH, S.-H. et al. **Theory and design of CNC systems**. [S.l.]: Springer, 2008.

THYER, G. **Computer numerical control of machine tools**. [S.l.]: Industrial Press, 1988.

YILMAZ, G.; DEHOLLAINI, C. An efficient wireless power link for implanted biomedical devices via resonant inductive coupling. In: IEEE. **Radio and Wireless Symposium (RWS), 2012 IEEE**. [S.l.], 2012. p. 235–238.

APÊNDICE A – Declaração de classes e métodos utilizados


```
class Serial
{
public:
    void configuraSerial(void);
    void enviaChar(unsigned char dado);
    unsigned char recebeChar(void);
    void enviaString( char *str);
    void recebeCodigo(char* Linha);
    void enviaCodigo();
};

class Micropasso
{
public:
    void executaPasso(int eixo,bool direcao);
    void configuraMicropassos(int divisor);
};

class ServoMotor
{
public:
    void configuraPWM(void);
    void atuaServo(float angulo);
};

class Interrupcao
{
public:
    void ajustaInterrupcao(void);
};

class EEPROM
{
public:
    void salvaEEPROM(void);
    void carregaEEPROM(void);
};

class Funcoes : Micropasso
{
```

```

public:
    unsigned int retornaN(char linha,int& pos);
    void atraso1ms(unsigned int ms) ;
    void atraso10us(unsigned int us);
    void achaZero(char eixo);
    void zeraCodigo(char* Cod);
    void moveXYZ(int X, int Y, int Z);
    void aceleraLinear(char eixo, bool sentido);
    void desaceleraLinear(char eixo, bool sentido);
};

class Interpretador: public Funcoes, EEPROM
{
public:
    void analisador(char linha);
    void executor();
    void carregaposicoes();
    void fornecePosicoes();
};

class Posicionador: Funcoes, ServoMotor
{
public:
    void moveEixos(void);
    void home(void);
};

```

**APÊNDICE B - Código-fonte do programa da controladora
CNC**


```

//Firmware da Controladora CNC

//inclui bibliotecas:
#include "Config.h"
#include <avr/eeprom.h>
#include <stdlib.h>
#include <util/delay.h>
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <string.h>
#include <math.h>

bool COORD=INC;
int X[5],Y[5],Z[5];
int A_fut=0;
unsigned char sist_coord=0;

bool mover=0;
bool home=0;
bool flag_inter[3]={0,0,0};

char erro;
unsigned int nlinha=0;
bool move_val_x, move_val_y, move_val_z;
char CodigoG[MaxNCharCod];

//inclui código das classe criadas
#include "EEPROM.cpp"
#include "Micropasso.cpp"
#include "ServoMotor.cpp"
#include "Serial.cpp"
#include "Funcoes.cpp"
#include "Interpretador.cpp"
#include "Posicionador.cpp"
#include "Interrupcao.h"

//—————Interrupções dos sensores ópticos—————

ISR(INT0_vect) //sensor X
{
flag_inter[0]=1;

```

```

_delay_ms(100);
}
ISR(INT1_vect) //sensor Y
{
flag_inter[1]=1;
_delay_ms(100);
}
ISR(PCINT2_vect) //sensor Z
{
if(bit_is_set(PIND,4))
flag_inter[2]=1;
}
//—————Início da função Principal—————
int main(void)
{
    //—————inicia objetos—————

    Micropasso Steps;
    Serial serial1;
    ServoMotor eixoA;
    Funcoes funcoes_auxiliares;
    Interpretador interprete;
    Posicionador posicionador;
    Interrupcao inter;

    //—————Configuração de PORTAS—————

    DDRB=255;
    DDRC=0b01111111;
    DDRD=0b111100010;
    PORTC=0;

    //valores iniciais:
    PORTD&=~(1<<PIND3);
    PORTD&=~(1<<PIND2);
    PORTD&=~(1<<PIND4);
    PORTB=(1<<SLEEP)|(1<<RST);

    //—————Inicialização—————

    Steps.configuraMicropassos(N_micropassos);

```

```
eixoA.configuraPWM();
eixoA.atuaServo(0);
serial1.configuraSerial();
inter.ajustaInterrupcao();

//—————Laço principal—————

while(1)
{
    serial1.recebeCodigo(CodigoG);
    interprete.analisador(CodigoG);
    interprete.executor();
    if(mover)
        posicionador.moveEixos();
    if(home)
        posicionador.home();
    serial1.enviaCodigo();
    funcoes_auxiliares.zeraCodigo(CodigoG);
}
}
```