



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação
Departamento de Microonda e Óptica

**Desenvolvimento de um Posicionador Eletrônico para
Estruturas Micrométricas**

Autor: Gustavo Moreira Calixto

Orientador: Prof. Dr. Hugo Enrique Hernández Figueroa

Trabalho apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Comissão Examinadora

Hugo Enrique Hernandez Figueroa – DMO/FEEC/UNICAMP – Presidente

Silvio Ernesto Barbin – EPUSP/USP

Francisco José Arnold – CESET/UNICAMP

Campinas, 12 de dezembro de 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

C129d	Calixto, Gustavo Moreira Desenvolvimento de um posicionador eletrônico para estruturas micrométricas / Gustavo Moreira Calixto. -- Campinas, SP: [s.n.], 2008. Orientador: Hugo Enrique Hernandez Figueroa. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. 1. Telecomunicações. 2. Automação. 3. Ótica de Fibras. 4. Programas de Computador - Precisão. I. Figueroa, Hugo Enrique Hernandez. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.
-------	---

Título em Inglês: Development of a electronic positioner for micrometric structures

Palavras-chave em Inglês: Telecommunications, Automation, Fiber Optics, Computer Software - Precision

Área de concentração: Telecomunicações, Telemática

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Silvio Ernesto Barbin, Francisco José Arnold

Data da defesa: 12/12/2008

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Gustavo Moreira Calixto

Data da Defesa: 12 de dezembro de 2008

Título da Tese: "Desenvolvimento de um Posicionador Eletrônico para Estruturas Micrométricas"

Prof. Dr. Hugo Enrique Hernandez Figueroa (Presidente):

Prof. Dr. Silvio Ernesto Barbin:

Prof. Dr. Francisco José Arnold:

Agradecimentos

“Agradeço primeiramente a Deus por ter me fornecido força e sabedoria para alcançar os objetivos.

Agradeço a minha esposa, Mariana, e meus pais, Armando e Sarita, por acreditar em meu trabalho e levar orientação para superar os momentos difíceis.

Agradeço aos amigos do Departamento de Microonda e Óptica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP, com quais eu pude compartilhar muitas experiências.

Agradeço aos amigos do Centro Superior de Educação Tecnológica da UNICAMP, onde recebi a base educacional para desenvolver este trabalho.

Agradeço ao Prof. Hugo Enrique Hernández Figueroa e a Prof^a. Marli de Freitas Gomes Hernández, por sempre confiar em meu trabalho e oferecer oportunidades.

“Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, por apoiar este trabalho e fornecer condições do mesmo ser concretizado.”

Dedico este trabalho
a Deus;
a todos que desejam o meu bem e o meu mal;

Resumo

Este trabalho tem por objetivo apresentar o desenvolvimento de um posicionador eletrônico para estruturas micrométricas e controlado através da porta paralela de um computador. O equipamento desenvolvido é controlado por um *software*, onde o usuário pode posicionar objetos com passos tridimensionais e micrométricos. Os resultados obtidos foram satisfatórios, visto que o equipamento pode ser aplicado em experimentos onde o posicionamento fino é necessário.

Palavras-chave: posicionador, *software*, automação, porta paralela, precisão.

Abstract

This work has the goal to present the development of an electronic positioned for micrometric structures, controlled with a parallel port. The developed equipment is controlled by a software who the user can adjust objects with tridimensional and micrometric steps. The obtained results have been satisfactory, where the equipment might be applied in precise positioning experiments.

Keywords: *positioning, software, automation, parallel port, precision.*

Sumário

Lista de Figuras	2
Lista de Tabelas	4
Introdução.....	5
1. Estudo dos conceitos e técnicas utilizadas	8
1.1. Linguagem de Programação Gráfica.....	8
1.2. Acopladores ópticos	9
1.2.1. Características básicas.....	10
1.2.2. Características de desempenho.....	11
1.2.3. Tecnologias para o desenvolvimento de acopladores baseados em fibra	13
2. Desenvolvimento do Hardware	15
2.1. Arquitetura da Solução.....	15
2.2. Equipamento de posicionamento mecânico	16
2.3. Funcionamento da porta paralela	19
2.4. Apresentação dos instrumentos para medições de resultados	21
2.5. Técnicas de Movimentação do motor de passo.....	23
2.6. Circuito de Comunicação	26
2.7. Acionador do Motor de Passo	34
2.8. Integração dos circuitos de controle e acionamento.....	41
3. Desenvolvimento do <i>software</i> de controle	42
3.1. Ambiente de desenvolvimento	42
3.2. Lógica de envio de comandos	44
3.3. Interface de operação do software.....	49
4. Verificação e validação	51
5. Propostas de experimentos	54
5.1. Experimento do acoplamento lateral.....	54
5.1.1. Especificação e disposição dos periféricos	55
5.1.2. Equipamento de acoplamento	56
5.1.3. Procedimentos do experimento	58
5.2. Experimento através de técnicas end-fire.....	61
6. Resultados obtidos e conclusões	63
Referências Bibliográficas	65

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Representação básica de um programa baseado em fluxo de dados.....	8
Figura 1.2 – Divisor de sinal luminoso.	10
Figura 1.3 – Misturador de sinal luminoso.	10
Figura 1.4 – Acoplador direcional.....	11
Figura 1.5 – Acoplador baseado em <i>end-fire</i>	14
Figura 1.6 – Acoplador através de polimento e aproximação dos núcleos.	14
Figura 2.1 – Arquitetura física.	16
Figura 2.2 - Posicionador mecânico NanoMax.	17
Figura 2.3 – Motor de passo bipolar utilizado no posicionador mecânico	17
Figura 2.4 – Distribuição dos pinos da porta de comunicação com o motor de passo.	18
Figura 2.5 – Instrumento virtual “ <i>In Port</i> ”	20
Figura 2.6– Instrumento virtual “ <i>Out Port</i> ”	20
Figura 2.7 – Analisador de espectro óptico.....	21
Figura 2.8 – Medidor de potência óptico.	22
Figura 2.9 – Interface de comunicação GPIB-USB-HS.....	22
Figura 2.10 – Primeiro solenóide do motor é energizado	23
Figura 2.11 – Segundo solenóide é energizado e o primeiro é desativado.	24
Figura 2.12 – Terceiro solenóide é ativado e o segundo é desativado.	24
Figura 2.13– O quarto solenóide é ativado e o terceiro é desativado, rotacionando em um “dente” o eixo do motor.	24
Figura 2.14– Motor de passo unipolar.	25
Figura 2.15 – Motor de passo bipolar.	25
Figura 2.16 – Forma dos sinais para passo completo do motor.	26
Figura 2.17 – Ajuste da corrente dos motores de passo em micropasso.....	26
Figura 2.18 – Funcionamento do circuito de comunicação.	27
Figura 2.19 – Digrama Esquemático para o seletor de <i>buffers</i> para envio de dados no Circuito de Comunicação.....	28
Figura 2.20 – Diagrama esquemático dos <i>latches</i> de expansão das saídas digitais do Circuito de Comunicação.....	29
Figura 2.21 – Trilhas da placa de circuito impresso do Circuito de Comunicação.....	32
Figura 2.22 – Disposição dos componentes da placa de circuito impresso do Circuito de Comunicação.....	33
Figura 2.23 – Fotografia do Circuito de Comunicação desenvolvido.....	34
Figura 2.24 – Diagrama de funcionamento do Acionador de Motor de Passo.	35
Figura 2.25 – Diagrama esquemático do conversor digital-analógico.....	35
Figura 2.26 – Diagrama esquemático do <i>driver</i> para acionar os motores de passo.	37
Figura 2.27 – Seqüência de estados enviados ao Acionador de Motor de Passo em passo simples.	37
Figura 2.28 – Projeto da placa de circuito impresso do Acionador do Motor de Passo.	39
Figura 2.29 – Posicionamento dos componentes do Acionador de Motor de Passo.....	40
Figura 2.30 – Fotografia do Acionador de Motor de Passo desenvolvido.....	40
Figura 2.31 – Fotografia da Integração dos circuitos de controle e acionamento.....	41

Figura 3.1 – Painel de desenvolvimento em blocos do LabVIEW.	43
Figura 3.2 – Painel de desenvolvimento de interface do LabVIEW.	43
Figura 3.3 – Exemplo de controle remoto de aplicação em LabVIEW.	44
Figura 3.4 – Fluxograma de funcionamento de atualização de <i>buffer</i>	45
Figura 3.5 – Fluxograma de funcionamento do procedimento de inicialização.	47
Figura 3.6 – Fluxograma de movimentação do motor de passo.....	49
Figura 3.7 – Interface com o usuário do movimentador micrométrico.....	50
Figura 4.1 – Paquímetro digital utilizado nos teste.....	51
Figura 5.1 – Acoplamento por campo evanescente.....	54
Figura 5.2 – Disposição dos equipamentos para o experimento com campo evanescente.	55
Figura 5.3 – Perfil transversal do equipamento de acoplamento.	56
Figura 5.4 – Detalhes da acomodação da fibra polida para acoplamento.	57
Figura 5.5 – Detalhes da curvatura de acomodamento da fibra.	58
Figura 5.6 – Fibra de cristais fotônicos.	59
Figura 5.7 – Fibra óptica com polimento.	59
Figura 5.8 – Corte transversal com as fibras acopladas.	59
Figura 5.9 – Fluxograma de operações para o experimento com o acoplador direcional.....	60
Figura 5.10 – Ilustração do experimento para auxílio em técnicas de <i>end-fire</i>	62

Lista de Tabelas

Tabela 2.1– Especificações do motor de passo.	17
Tabela 2.2 – Limites de controle da engrenagem de redução.	18
Tabela 2.3 – Funcionalidades dos registradores da porta paralela em relação ao modo de operação.	20
Tabela 2.4 – Distribuição das conexões das entradas dos CIs 74HC573 com o registrador de dados da porta paralela.	30
Tabela 2.5 – Descrição dos pinos de saída do Circuito de Comunicação.	31
Tabela 2.6 – Seqüência de envio de sinais de dois micropassos por passo.	38
Tabela 3.1 – Relação dos pinos dos <i>buffers</i> com o controle dos acionadores de motor de passo.	46
Tabela 3.2 – Estado final dos <i>buffers</i> quando o posicionador é inicializado.	46
Tabela 3.3 – Fluxograma de funcionamento do procedimento de inicialização.	48
Tabela 4.1 – Medidas realizadas durante os testes.	52
Tabela 4.2 – Offset médio encontrado em relação ao número de passos executados.	53
Tabela 5.1 – Relação entre a espessura e o raio de curvatura da cavidade.	58

Introdução

Nos dias atuais, a computação vem sendo aplicada nas mais diversas áreas do conhecimento. Essa ciência apresenta como objetivo principal encontrar formas inteligentes de realizar soluções que resultam no conforto e satisfação de seus usuários [1,2]. Profissionais da área de engenharia utilizam as ferramentas da informática científica para desenvolver modelos matemáticos, os quais interpretam situações próximas, ou exatamente, ideais, dos fenômenos físicos apreciados pelo homem.

Há séculos o ser humano busca soluções para descrever e simular acontecimentos. Procriação de células, movimento de objetos, conservação da energia, previsões climáticas, circuitos elétricos, características de materiais da natureza, propagação de ondas, enfim, são muitas as situações que podem ser descritas através de modelos [4-7]

Muitos destes modelos, aliados aos algoritmos numéricos eficientes, permitem simular sistemas físicos (dispositivos e fenômenos) de forma realística e confiável precisa [8-10]. Desde o início dos anos 50, tecnologias na área de computação e eletrônica foram exploradas visando o processamento de informações. Com a criação de metodologias de programação computacional, novos campos de pesquisa foram abertos nas áreas da física, mecânica e biologia. [11,12].

Para validar estes modelos segundo a realidade, equipamentos são projetados e construídos a fim de colaborar na produção dos resultados semelhantes aos descritos nos modelos físicos. Um conjunto destes equipamentos, aliados a técnicas de utilização, para um fim comum, forma-se um laboratório. Em um ambiente com estas ferramentas, podem ser realizados ensaios experimentais (métodos para observar resultados e comparar com conceitos modelados) e ensaios de testes (conjunto de procedimentos e observações baseados em modelos teóricos para validar algo produzido) [13].

Ao longo do tempo, estas técnicas laboratoriais evoluíram e, atualmente, muitas áreas do conhecimento necessitam descobrir e validar informações utilizando automações. Laboratórios educacionais, nas áreas de exatas e biológicas, fazem com que alunos descubram conceitos da educação básica e aliem às situações do dia-a-dia, assim, certificando a relevância da informação que recebem de seus educadores [14-16]. Nos dias de hoje, centros de diagnósticos médicos utilizam conceitos físicos, químicos e biológicos para avaliar o corpo

humano na maioria de seus aspectos e, em algumas vezes, encontrar alterações precocemente [17,18]. A maioria dos produtos comercializados pela humanidade passa por rigorosos ensaios para certificar a segurança e garantir a funcionalidade [19,20].

Ao que se diz respeito a experimentos envolvendo grande índice de precisão, os atuais elementos de atuação e medição tentam se aproximar, cada vez mais, do ideal. Procedimentos envolvendo dimensões micrométricas e nanométricas necessitam de tecnologia emergente. Áreas do conhecimento voltadas para o estudo da fotônica, ajuste fino de telescópios, movimentação de substratos, tomógrafos, digitalizadores, microferramentas e outros, são apoiados com técnicas de automação e controle que envolve ferramentas mecânicas, elétricas e informatizadas [21,22].

Esta proposta tem por objetivo apresentar o desenvolvimento de um posicionador micrométrico atuado a motores de passo e controlado através de um circuito eletrônico projetado e construído. Esta interface é operada através da porta paralela de um computador pessoal, o qual controla o equipamento através uma programação dedicada. Esta solução pode ser utilizada com elementos de medição e atuação. A motivação deste trabalho está fundamentada em colaborar com o aperfeiçoamento de técnicas para controlar experimentos na escala micrométrica nos laboratórios de ensino e pesquisa do DMO (Departamento de Microonda e Óptica) e do CePOF (Centro de Pesquisa em Óptica e Fotônica). Além disso, o desenvolvimento do posicionador busca motivar estudantes da área de engenharia elétrica a desenvolver soluções dedicadas para auxiliar experimentos.

O Primeiro Capítulo apresenta uma visão geral sobre os conhecimentos envolvidos neste trabalho. O Segundo Capítulo aborda a arquitetura da solução desenvolvida, os elementos que constituem o posicionador e uma visão geral de funcionamento. O Terceiro Capítulo, por sua vez, aprofunda a descrição relacionada ao desenvolvimento do circuito eletrônico de interface entre o computador pessoal e o posicionador, mostrando e justificando em detalhes o projeto, montagem e validações envolvidas. O Quarto Capítulo trata o desenvolvimento do programa de controle e a interface de interação com a solução. O Quinto Capítulo, então, apresenta os testes realizados com o equipamento para verificar e validar o funcionamento segundo as expectativas. O Sexto Capítulo apresenta alguns projetos de utilização do posicionador, aplicados a experimentos do grupo de pesquisa do CePOF (Centro de Pesquisa em Óptica e Fotônica). O

Sétimo Capítulo discute os resultados obtidos e abre vertentes para as conclusões sobre este trabalho, sua contribuição e motivação para trabalhos futuros.

1. Estudo dos conceitos e técnicas utilizadas

Para o entendimento e bom desenvolvimento da proposta, um estudo dos principais assuntos relacionados foi realizado com o objetivo de colaborar com a fundamentação prática e teórica. Primeiramente, serão abordados conceitos relacionados com a programação através de interfaces visuais em blocos. Em seguida, serão apresentados conceitos sobre o acoplamento de fibras ópticas e as técnicas utilizadas nos experimentos propostos.

1.1. Linguagem de Programação Gráfica

A programação através de linguagens visuais é baseada na metodologia da *dataflow*. Esta metodologia apresenta ferramentas de execução de instruções em blocos visuais de programação interligados por fluxos de dados e informações [23]. Um programa elaborado em uma linguagem visual deverá conter basicamente um fluxo de entrada de dados, um bloco de processamento da informação e fluxo de saída de dados. Um ou mais blocos de processamento podem ser interligados por fluxos de dados para produzir os resultados desejados pelo desenvolvedor. A Figura 1.1 ilustra um programa em fluxo de dados com os elementos básicos de entrada, processamento e saída.

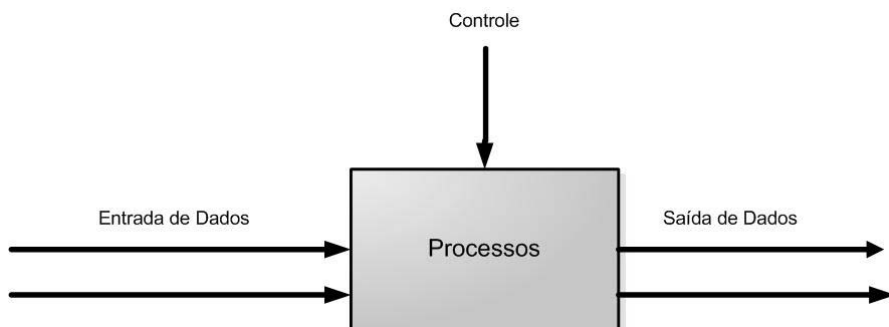


Figura 1.1 – Representação básica de um programa baseado em fluxo de dados.

As primeiras pesquisas de sistemas computacionais baseados em *dataflow* foram iniciadas em meados da década de 1970. Esta técnica de programação foi uma primeira motivação na solução aos sistemas massivamente paralelos. A conhecida e pioneira máquina de Von Neumann, que representa um sistema de computação básico, não aceitavam execuções de instruções simultâneas, dado que a mesma contém atualizadores de memórias e contadores globais. Os recursos computacionais neste período limitavam alguns dos experimentos com a programação baseada em fluxo de dados [23].

No final da década de 80, com o avanço das máquinas de processamento, armazenamento secundário, periféricos e interfaces, os primeiros experimentos com linguagens visuais foram realizados obtendo resultados satisfatórios em relação às programações dedicadas a máquinas híbridas de Von Neumann [23].

A década de 90 apresentou avanços nas técnicas de programação por fluxo de dados. As primeiras linguagens visuais comerciais começaram a ser desenvolvidas, tais como o LabVIEW e o Prograph, ambas voltadas para aplicações comerciais. No entanto, existe também a linguagem de programação NL, voltada à pesquisa [24].

Atualmente, a programação através de fluxo de dados é comumente utilizada no meio comercial e acadêmico em alternativa às principais linguagens de programação existentes (C/C++, Java, Pascal e outras). Profissionais das diversas áreas do conhecimento utilizam ferramentas comerciais para executar suas tarefas de programação com pouco conhecimento teórico e prático relacionados à programação estruturada e orientada a objetos. Desenvolvedores sem a formação na cadeira de informática e computação apresentam facilidades através de técnicas de *dataflow* [24].

1.2. Acopladores ópticos

Os acopladores ópticos podem ser considerados dispositivos com mais de três portas que possibilitam a combinação ou separação de sinais luminosos. Os acopladores atuam através de um guia de onda luminoso que permite a reflexão e refração da luz [25,26].

Os meios de divulgação científica apresentam a grande importância do estudo das técnicas de acoplamento óptico. O estudo da separação de um sinal luminoso pela divisão de sua

potência óptica ou comprimento de onda estimula o desenvolvimento de dispositivos voltados à óptica. As aplicações dos acopladores vão desde transmissores bidirecionais e alternados em uma fibra de único modo, além de comunicação em sistemas WDM e distribuição de sinais de rede em sistemas locais.

1.2.1. Características básicas

Conforme apresentado na definição anterior, os acopladores são caracterizados por duas funções básicas: combinar sinais luminosos e separar sinais luminosos. No primeiro caso, o dispositivo é chamado de misturador e, no segundo, é chamado de separador [25]. As Figuras 1.2 e 1.3 mostram, respectivamente, as ilustrações de um divisor e de um misturador.

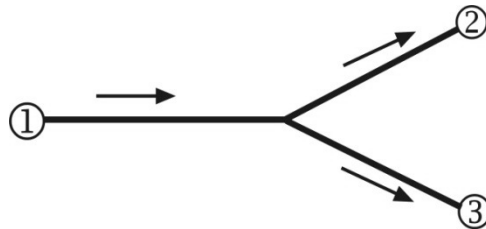


Figura 1.2 – Divisor de sinal luminoso.

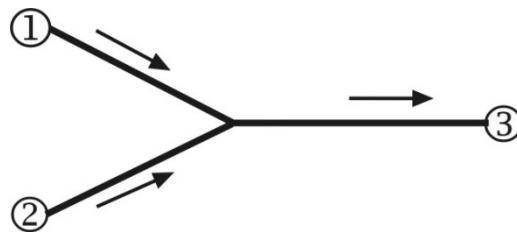


Figura 1.3 – Misturador de sinal luminoso.

Além dos acopladores elementares, existem outros que possuem funções específicas. O acoplador direcional, por exemplo, permitem direcionar o desvio ou injeção de potência óptica exclusivamente a uma porta de saída [25]. Este desvio pode ser realizado através de dispositivos de chaveamento. A Figura 1.4 mostra um exemplo de acoplamento direcional.

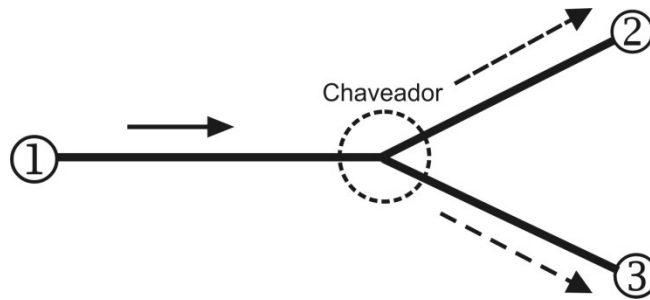


Figura 1.4 – Acoplador direcional.

O acoplamento distributivo é uma extensão do divisor elementar 1x2, podendo conter N portas de entrada e M portas de saída [25]. Esta funcionalidade pode ser útil para a implementação de mecanismos de difusão de sinais em redes locais. Além disso, existem acopladores ópticos sensíveis ao comprimento de onda para multiplexação e demultiplexação WDM. Os separadores de polarização, uma aplicação especial aos acopladores, é usada em sistemas de comunicação coerente com fibras monomodo e diversos sistemas sensores.

1.2.2. Características de desempenho

O desempenho de um dispositivo de acoplamento óptico é baseado nos seguintes critérios: perdas de inserção, diretividade, retroespalhamento, características de transmissão da fibra, temperatura, etc. A maneira física que envolve a combinação ou separação de sinais pode necessitar de mais critérios de avaliação [25,26].

1.2.2.1. Perdas de inserção

As perdas de inserção consistem na razão entre o somatório das potências dos sinais de saída do acoplador e a potência do sinal de entrada. É importante analisar as perdas existentes devido à atenuação nas portas e nos componentes ópticos. A seguir é apresentada a equação 1.1 que permite calcular as perdas:

$$P_{ac} = 10 \log \frac{\sum_1^M P_j}{P_{ent}} \quad (1.1)$$

onde P_{ac} são as perdas do acoplador. P_{ent} é a potência luminosa na porta de entrada e P_j é a potência luminosa na saída do acoplador. No cálculo das perdas, devem ser somadas as M potências de saída.

1.2.2.2. Diretividade

A Diretividade de um acoplador leva em consideração os espalhamentos de potência existentes nas portas adjacentes à porta de entrada. No caso do acoplador direcional mostrado na Figura 1.4 a diretividade pode ser calculada através da equação 1.2

$$D_{ac} = 10 \log \frac{P_2}{P_1} \quad (1.2)$$

onde D_{ac} é perda de diretividade, P_1 é a potência na porta de entrada 1 e P_2 é a potência desviada para a porta 2. Em experimentos de acopladores com fibras monomodo existem perdas de aproximadamente -60dB.

1.2.2.3. Retroespalhamento

O retroespalhamento consiste em uma potência óptica refletida na porta de entrada do acoplador através de problemas causados por fontes laser. Em alguns casos, o retroespalhamento pode chegar a valores de aproximadamente -50dB.

1.2.2.4. Características de transmissão e estabilidade

As características físicas da fibra, que implicam também nas características de

transmissão de sinal luminoso, são importantes e devem ser levadas em consideração no acoplamento através de técnicas utilizando lentes e espelhos ou campo evanescente. Além disso, um condicionamento apropriado do acoplador garante uma estabilidade satisfatória das características da fibra. No caso de acopladores desenvolvidos com uma geometria bicônica, sensibilidades na região cônica e mudanças no índice de refração do material podem ser detectadas.

1.2.3. Tecnologias para o desenvolvimento de acopladores baseados em fibra

Tecnologias voltadas à construção de dispositivos passivos em óptica, principalmente os acopladores ópticos, podem ser divididas em duas categorias: *end-fire* e campo evanescente.

A tecnologia *end-fire* é, atualmente, a mais utilizada. Ela é caracterizada pela propagação de um sinal luminoso que passa por componentes ópticos (microlentes, microprismas, espelhos, filtros). Os acopladores baseados em fibra se caracterizam pela passagem de sinal luminoso somente nas fibras e suas interfaces.

1.2.3.1. End-fire

Os acopladores *end-fire* são tipicamente utilizados em sistemas com fibras multimodo. O procedimento para realizar o acoplamento consiste em colimar ou expandir um sinal luminoso em uma fibra com uma abertura numérica satisfatória, proceder com as filtrações necessárias e reforçar o mesmo sinal em outras fibras [25-27]. A Figura 1.5 apresenta um exemplo de acoplador utilizando lentes e espelhos.

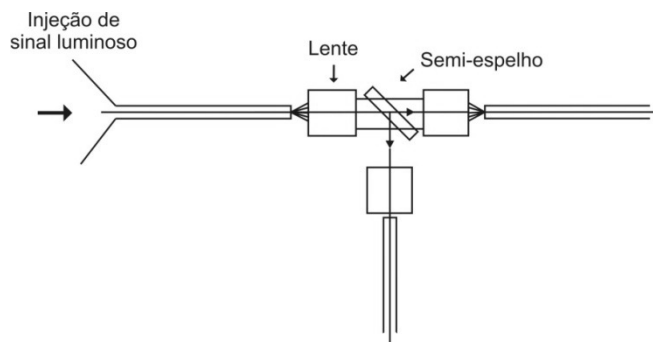


Figura 1.5 – Acoplador baseado em *end-fire*.

1.2.3.2. *Campo Evanescente*

As técnicas de acoplamento por campo evanescente, também chamado de acoplamento lateral, são empregadas na construção de componentes ópticos passivos, processando os sinais luminosos diretamente nas fibras e interfaces de fibras. Elas são utilizadas para o desenvolvimento de acopladores direcionais [25, 26, 28,29].

A montagem do acoplador envolve a corrosão ou polimento das fibras e a aproximação dos núcleos. Estes procedimentos são utilizados para a realização de acopladores para sistemas sensores. A Figura 1.6 mostra um exemplo de experimento envolvendo o polimento e aproximação dos núcleos de duas fibras monomodo.

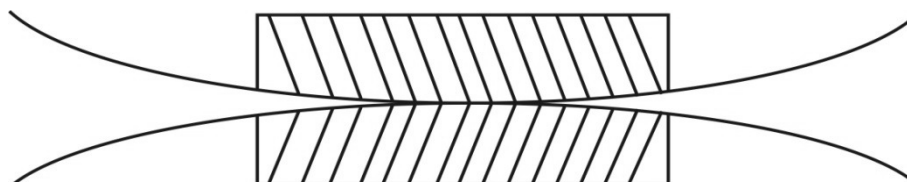


Figura 1.6 – Acoplador através de polimento e aproximação dos núcleos.

2. Desenvolvimento do Hardware

Depois de apresentada a arquitetura da solução e as técnicas utilizadas no desenvolvimento deste trabalho, este capítulo tem por objetivo apresentar com detalhes o desenvolvimento dos circuitos eletrônicos que realizam o interfaceamento e controle do posicionador eletrônico, além das ferramentas de apoio utilizadas. A Primeira Seção uma visão superficial da solução desenvolvida. A Segunda Seção apresenta o movimentador micrométrico. A Terceira Seção, por sua vez, mostra em detalhes o funcionamento dos registradores da porta paralela para o controle através de um programa de computador. A Quarta Seção mostra, superficialmente, os possíveis equipamentos de medição e interfaceamento que podem auxiliar experimentos. A Quinta Seção apresenta as técnicas de acionamento do motor de passo envolvidas. A Sexta Seção apresenta o desenvolvimento do circuito eletrônico de comunicação entre a porta paralela do computador e os acionadores de motor de passo. A Sétima Seção mostra o acionador do motor de passo, circuito que recebe os sinais digitais da placa de interface e resulta em movimentação. A Oitava Seção ilustra todas as partes integradas.

2.1. Arquitetura da Solução

A arquitetura física do equipamento é constituída por alguns elementos de *hardware*: computador pessoal, interface de comunicação, movimentador micrométrico e possíveis equipamentos de monitoramento que podem ser adicionados. A Figura 2.1 ilustra através de um diagrama de blocos a relação entre os elementos.

É possível observar através da Figura 2.1 que todos os dispositivos estão conectados a um computador através de interfaces de comunicação. Esta máquina, através de um ambiente de controle, exerce o papel de gerenciador de todos os eventos relacionados ao controle e aquisição, apresentação de resultados obtidos e comunicação direta com o usuário através de uma interface gráfica. A Placa de Comunicação, conectada à porta paralela do computador, é composta por um circuito eletrônico que possibilita que sinais digitais sejam enviados pelo computador e este, por sua vez, transmita aos acionadores de motor de passo do posicionador. Além disso, a mesma recebe sinais de fim de curso da engrenagem do movimentador, que são enviados ao computador

através da porta paralela.

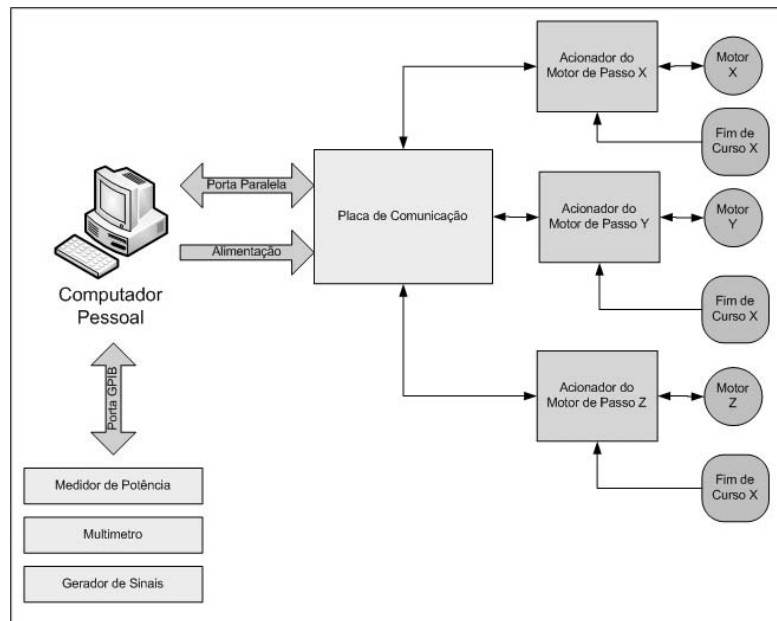


Figura 2.1 – Arquitetura física.

O Acionador do Motor de Passo é composto de componentes integrados específicos para gerenciar a polarização de corrente, assim, controlando o movimento e precisão do motor. Componentes integrados de conversão de sinal digital para analógico são utilizados para enviar um sinal de referência a um *driver*, que resulta na configuração do nível de precisão. Sinais digitais também são enviados ao *driver*, que controla a polarização da bobina do motor e, portanto, configura o sentido de giro do motor. Três motores são controlados por três Acionadores de Motor de Passo, nas direções X, Y e Z do movimentador, este controlado pela Placa de Comunicação, esta, por sua vez, controlada pela porta paralela do computador utilizando um programa de controle.

2.2. Equipamento de posicionamento mecânico

A Figura 2.2 mostra o equipamento de posicionamento mecânico *NanoMax*, fabricado pela Thorlabs e adquirido pelo CePOF. Através de seus motores de passo e engrenagens de redução, é possível movimentar objetos em três direções com precisão [30].

Na Figura 2.2 é possível observar a superfície de deslocamento, a engrenagem de redução e os motores de passo. O circuito eletrônico desenvolvido permite que o computador controle os motores de passo respeitando os limites das engrenagens de redução. Além disso, o controle dos movimentos resulta numa resolução aproximada às funcionalidades do posicionador.

Os motores de passo conectados ao redutor são compostos por duas bobinas separadas, ou comumente chamados de motor bipolar. A maneira como as bobinas são polarizadas determina as características de movimento. A variação de corrente entre as bobinas pode resultar em um ajuste fino da rotação do eixo. A Figura 2.3 mostra o motor de passo isoladamente. A Tabela 2.1 apresenta as especificações [31].

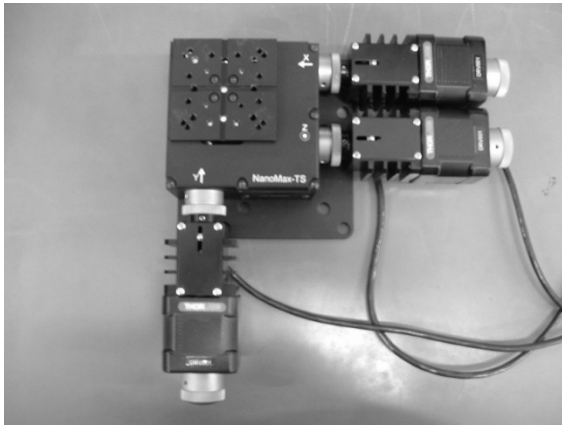


Figura 2.2 - Posicionador mecânico NanoMax.



Figura 2.3 – Motor de passo bipolar utilizado no posicionador mecânico

Tabela 2.1– Especificações do motor de passo.

Especificação	Valores
Ângulo de passo	1.8°
Precisão do motor	5 %
Corrente máxima por fase	1 A
Resistência de cada bobina	4.6 Ω
Indutância de cada bobina	0.6 mH
Torque do motor	23.1 N.cm

O conjunto de engrenagens para redução dos movimentos do motor de passo pode ser considerado uma das essências do posicionador. Através deste dispositivo é possível obter alta resolução de movimentação nas três direções. Entretanto, conforme descreve o manual, alguns

parâmetros e limites de controle devem ser respeitados. A atuação sobre o posicionador, sem o conhecimento prévio de seus limites, pode resultar em danificações na engrenagem. A Tabela 2.2 mostra com detalhes as principais especificações que devem ser seguidas para alcançar o máximo desempenho com segurança. A velocidade máxima, velocidade mínima e a aceleração definem o deslocamento de posição em relação ao tempo. A correção de *backlash* é a possível movimentação do motor durante o seu desligamento. O *offset* é a distância necessária para que o mecanismo se movimente para determinar ponto de origem do eixo. A posição máxima e mínima determina como o posicionador pode ser usado sem danos.

Tabela 2.2 – Limites de controle da engrenagem de redução.

Parâmetro	Valor
Velocidade Máxima	2.5 mm s ⁻¹
Velocidade Inicial	1 mm s ⁻¹
Aceleração	1 mm s ⁻²
Correção de <i>Backlash</i>	0.01
<i>Offset</i>	3.00 mm
Posição mínima	0.00 mm
Posição máxima	4.00 mm

Para os motores serem atuados através do circuito eletrônico controlado por computador, os mesmos devem ser conectados ao controlador através de portas do tipo DB-15. Os pinos da porta estão ligados às bobinas do motor de passo e a uma chave de fim de curso, que evita danos à engrenagem. A Figura 2.4 mostra a disposição dos pinos e suas conexões. O mapeamento dos pinos foi encontrado através de observações experimentais, pois o manual não fornece estas informações.

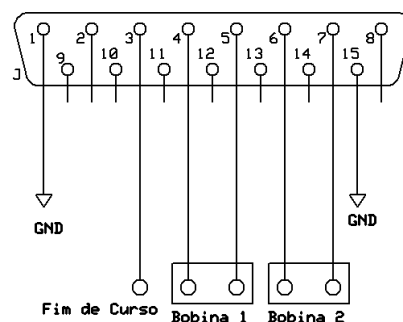


Figura 2.4 – Distribuição dos pinos da porta de comunicação com o motor de passo.

2.3. Funcionamento da porta paralela

A porta paralela do computador foi inicialmente desenvolvida para o controle de impressoras. A mesma segue o padrão IEEE 1284 e se comunica com dispositivos através de sinais digitais da lógica TTL (*transistor-transistor logic*). Apesar de a porta paralela ser uma interface obsoleta e de baixa taxa de transmissão de dados, a mesma pode ser eficaz em projetos voltados ao controle de dispositivos de atuação e sensores de monitoramento. Além disso, sua arquitetura torna o desenvolvimento didático e de fácil compreensão [32-36].

O envio e recebimento de dados são realizados através de três registradores de oito bits, chamados de “registrador de dados”, “registrador de *status*” e “registrador de controle”. O registrador de dados utiliza todos seus oito bits para enviar ou receber dados. O registrador de controle usa quatro dos primeiros bits para comunicação e outros quatro para controles adicionais. O registrador de *status* utiliza seus cinco primeiros bits para receber sinais do equipamento conectado.

Além disso, os registradores funcionam segundo um modo de operação. Existem três modos: SPP, EPP e ECP. O modo SPP (*Standard Parallel Port*) foi o primeiro, desenvolvido para se comunicar com as primeiras impressoras e se comunica usando *nibble* de dados (transmissão em pacotes de quatro bits). O modo EPP (*Enhanced Parallel Port*) foi um avanço do modo SPP voltado a equipamentos que necessitavam de uma maior taxa de transmissão e interatividade (*scanners*, impressoras atuais, etc.). Este modo permite comunicação bidirecional e com pacotes de oito bits. O modo ECP (*Extended Capabilities Port*) contém as mesmas funcionalidades do modo EPP, mas com extensão para acesso direto à memória (DMA).

A Tabela 2.3 mostra os modos de operação e as funcionalidades dos registradores. Para todos os modos de operação, os registradores de controle e status trabalham da mesma maneira. A diferença está no registrador de dados, onde, no modo SPP, o mesmo só pode enviar dados. Já nos modos EPP e ECP, os mesmo podem trabalhar de modo bidirecional, ou seja, podem enviar e receber dados pelo mesmo barramento. O sentido de transmissão do registrador de dados é controlado por um bit isolado no registrador de controle.

Tabela 2.3 – Funcionalidades dos registradores da porta paralela em relação ao modo de operação.

Modos de Operação	Registradores		
	Dados	Controle	Status
SPP	Envio 8 bits	Envio 4 bits	Recebimento 5 bits
EPP/ ECP	Bidirecional 8 bits	Envio 4 bits	Recebimento 5 bits

Os programas de computador utilizam os registradores da porta paralela através de acesso direto. Ao enviar um dado, o programa atualiza o conteúdo do registrador relacionado através de uma operação de escrita. Ao receber o estado de um conjunto de bits, o programa realiza a leitura do registrador relacionado. Na maioria dos computadores, o endereço base para acesso à porta paralela é “378” (número em hexadecimal). O registrador de dados é acessado pelo endereço base. Para acessar os registradores de status ou controle, basta somar, respectivamente, mais um e mais dois ao endereço base.

Em ambientes de desenvolvimento voltados à C/C++, o acesso aos registradores pode ser feito através de funções de leitura e escrita na memória. Por exemplo, ao utilizar o compilador “gcc”, a função *ioctl()* pode receber ou enviar bits a um registrador. No caso do ambiente de desenvolvimento LabVIEW, existem instrumentos virtuais chamados de “In Port” e “Out Port” que operam, respectivamente, na leitura e escrita em determinados registradores. As Figuras 2.5 e 2.6 apresentam, respectivamente, exemplos de programas em LabVIEW realizando operações de leitura e escrita. A operação de leitura recebe como argumento o endereço a ser acessado e devolve como resposta o conteúdo do registrador. A operação de escrita recebe como argumento o endereço a ser acessado e o dado a ser inserido.

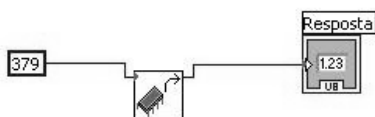


Figura 2.5 – Instrumento virtual “In Port”

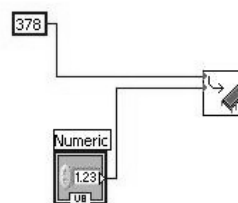


Figura 2.6– Instrumento virtual “Out Port”

2.4 Apresentação dos instrumentos para medições de resultados

Para o eficiente controle e gerenciamento de eventos de todo o caracterizador, é importante conhecer os instrumentos de medição e geração que serão utilizados. A seguir, são apresentados os equipamentos de apoio a medições dos resultados. Todos estes instrumentos pertencem ao LEMAC.

O analisador de espectro óptico a ser utilizado é mostrado na Figura 2.7. O modelo a ser utilizado é o Anritsu MS9710B que cobre uma faixa de largura de banda de $0,6\mu\text{m}$ a $1,75\mu\text{m}$ [37]. A partir deste equipamento é possível medir ruído, potência e largura de banda do sinal. Além disso, é possível observar como o modo de transmissão se comporta. O MS9710B pode enviar a aquisição de dados e configurar alguns parâmetros através da porta GPIB.



Figura 2.7 – Analisador de espectro óptico.

O medidor de potência é apresentado na Figura 2.8. O modelo a ser utilizado no experimento é o Anritsu ML9001A. O mesmo pode medir potências entre -100 dBm e $+20\text{ dBm}$ e possui uma alta precisão e velocidade nas medições [38]. Da mesma maneira que o analisador de espectro, o medidor de potência pode enviar informações e ser configurado através de uma porta GPIB.



Figura 2.8 – Medidor de potência óptico.

A Figura 2.9 mostra a interface de comunicação GPIB-USB-HS da National Instruments. Este equipamento, adquirido pelo CePOF, permite que até trinta instrumentos sejam conectados a um computador que tenha uma porta USB. Todo o controle de endereçamento, envio e recebimento de comandos pode ser feito através de instrumentos virtuais encontrados no LabVIEW [39].



Figura 2.9 – Interface de comunicação GPIB-USB-HS.

2.5. Técnicas de Movimentação do motor de passo

O motor de passo é aplicado em situações onde existe a necessidade de um posicionamento refinado, tais como leitores de discos (disquetes, mídias de CD e DVD, discos rígidos), impressoras, construção de máquinas de torneamento de peças, automação na fabricação de placas de circuito impresso e outros [40,41].

A estrutura física do motor de passo consiste em bobinas e ímãs muito fortes que produzem um número fixo de pólos magnéticos envolvidos a um solenóide [40,41]. As Figuras 2.10 a 2.13 representam o funcionamento básico do motor de passo. A Figura 2.10 ilustra a primeira etapa, onde um solenóide é ativado e atrai um conjunto de ímãs para seu eixo. O segundo passo, ilustrado na Figura 2.11, apresenta a energização do segundo solenóide e a desativação do primeiro solenóide, produzindo um movimento de rotação exato no eixo do motor. As Figuras 2.12 e 2.13 ilustram o mesmo passo anterior. Quando o primeiro solenóide for energizado novamente, um dente do eixo representado terá se deslocado.



Figura 2.10 – Primeiro solenóide do motor é energizado



Figura 2.11 – Segundo solenóide é energizado e o primeiro é desativado.

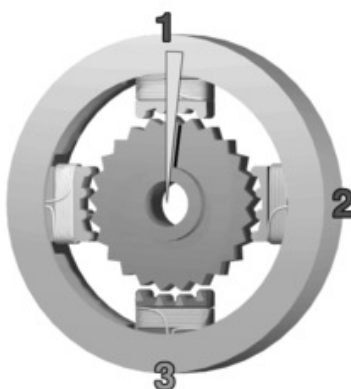


Figura 2.12 – Terceiro solenóide é ativado e o segundo é desativado.

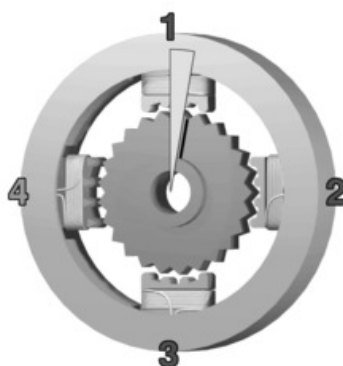


Figura 2.13– O quarto solenóide é ativado e o terceiro é desativado, rotacionando em um “dente” o eixo do motor.

Existem duas categorias básicas de motores de passo, os unipolares e os bipolares. Os unipolares possuem quatro bobinas e a energização das mesmas é realizada em um único sentido. A vantagem deste tipo de motor é a facilidade de controle e sua desvantagem está relacionada a aplicações onde o torque com precisão é importante. A Figura 2.14 mostra a distribuição das bobinas [40,41].

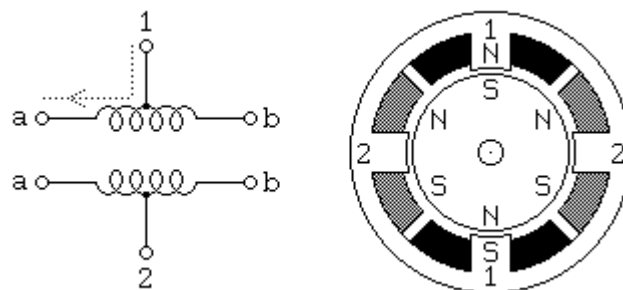


Figura 2.14– Motor de passo unipolar.

A outra categoria é o motor de passo bipolar, que possui duas bobinas, mas a polarização das mesmas deve ser realizada nos dois sentidos para obter o movimento de rotação no eixo. Nesta categoria, os circuitos eletrônicos que envolvem seu controle são complexos em relação aos motores unipolares. Entretanto, o torque e a precisão do motor bipolar são mais apurados, possibilitando a aplicação de técnicas de micropasso [40,41]. A Figura 2.15 mostra a distribuição das bobinas. Existem outras categorias mais específicas de motores, tais como de relutância variável e de multifases, mas que não são abordadas neste trabalho.

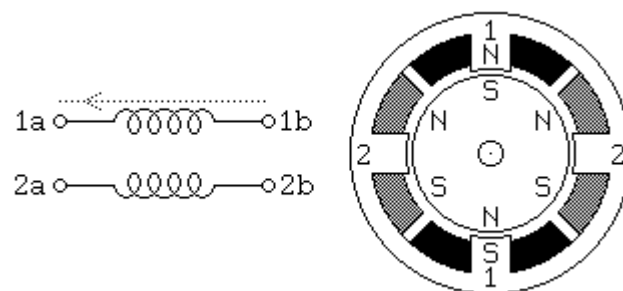


Figura 2.15 – Motor de passo bipolar.

Em relação às técnicas de movimentação, as mais comuns são as de passo completo e as que envolvem número de passos intermediários, chamados de micropassos. O passo completo é resultado da seqüência de energização das bobinas e fornece somente a precisão especificada na fabricação do motor. A mesma técnica de passos completos, mas com o controle da corrente produzida em cada bobina, resulta no refinamento da precisão especificada no motor, onde pode ser produzido o meio passo e outras divisões do mesmo passo, o que são chamados os micropassos. A Figura 2.16 apresenta a alimentação das bobinas em passo completo, girando no

sentido horário e anti-horário. A Figura 2.17 apresenta a alimentação das bobinas para a realização dos micropassos, neste caso, distribuído em oito micropassos por passo.

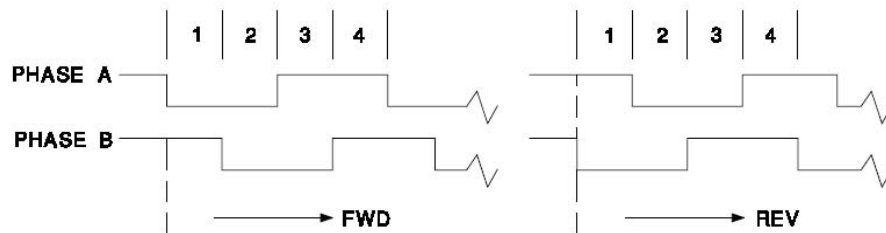


Figura 2.16 – Forma dos sinais para passo completo do motor.

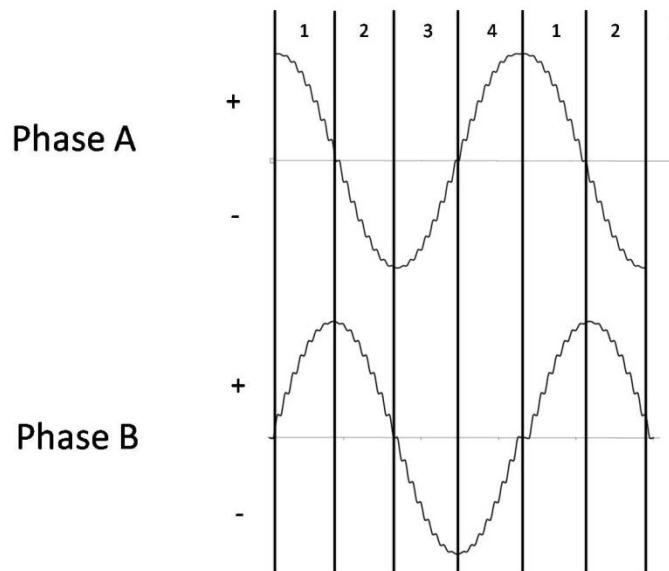


Figura 2.17 – Ajuste da corrente dos motores de passo em micropasso.

2.6. Circuito de Comunicação

Para que fosse possível uma comunicação entre o computador pessoal e os motores de passo do posicionador microeletrônico, um circuito eletrônico foi desenvolvido com o objetivo de expandir as saídas digitais do registrador de dados da porta paralela do computador. A Figura 2.18 apresenta um diagrama de blocos que mostra o funcionamento básico da placa. A mesma tem como entrada a porta paralela do computador e a alimentação do equipamento. Como saída, três portas do tipo DB-25 são conectados aos acionadores de motor de passo (que será detalhado na próxima Seção).

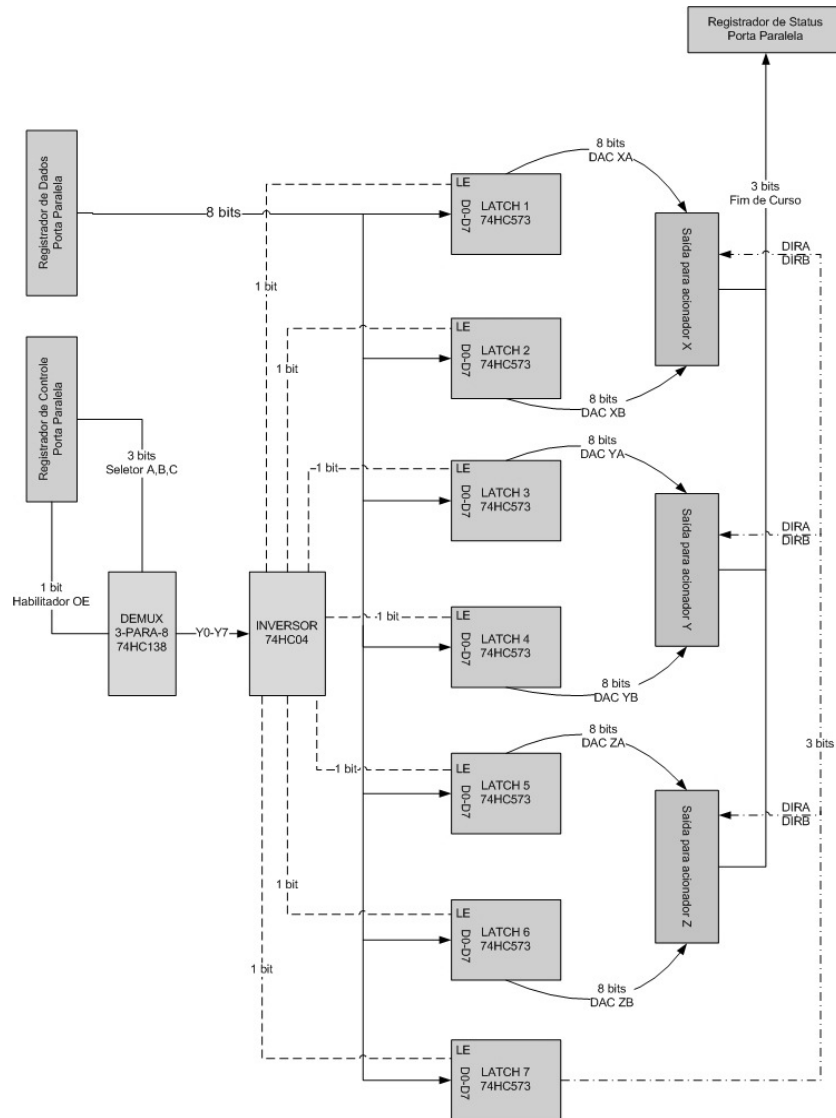


Figura 2.18 – Funcionamento do circuito de comunicação.

O registrador de dados da porta paralela é expandido em sete vezes através de técnicas baseada em estudos anteriores [34]. Este método consiste em transmitir blocos de oito bits por vez, através de seletores e *buffers*. No caso do Circuito de Comunicação, o registrador de controle da porta paralela envia sinais para um conjunto de circuitos que seleciona o *buffer* que se deseja transmitir oito bits. Durante esta transmissão, os outros *buffers* armazenam seu estado anterior. O registrador de *status* da porta paralela recebe sinais dos sensores de fim de curso do movimentador micrométrico.

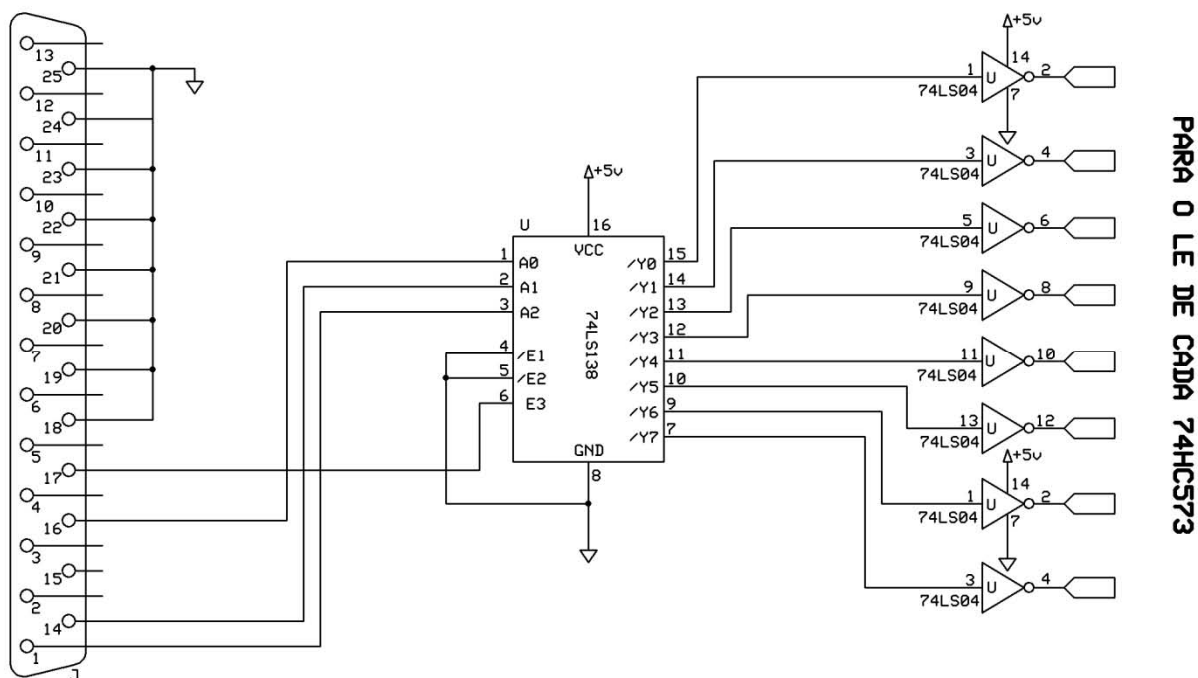


Figura 2.19 – Digrama Esquemático para o seletor de *buffers* para envio de dados no Circuito de Comunicação.

A técnica de seleção de *latches* para transmissão de dados através da porta paralela é composto dos circuitos integrados *74LS138* e *74LS04*, conforme está representado na Figura 2.20. O *74LS138* é um seletor de três bits de entrada (*A0* a *A2*) e oito bits de saída (*Y0* a *Y7*). Para cada possibilidade de entrada nos pino *A0* a *A2*, uma única saída permanece em estado baixo. Caso os pinos *E1* e *E2* estejam todos aterrados (estado baixo) e o pino *E3* em estado alto, todos os pinos de saída permanecem em estado alto. O *74LS04* é um inversor de sinal. O mesmo é utilizado nas saídas *Y0* a *Y7* do *74LS138* por necessitar de uma lógica invertida para o controle dos *buffers*. Desta maneira, pode ser controlado qual *buffer* se deseja atualizar os dados e, também manter os dados nos outros *buffers* enquanto outro é selecionado.

integrado, permanecem em estado baixo. Portanto, todos os circuitos integrados permanecem habilitados. Como os *latches* são sensíveis a ruídos, os mesmos estão protegidos com capacitores e resistores que atuam como um filtro.

Além disso, na Figura 2.20, é possível perceber que os pinos do registrador de dados da porta paralela são distribuídos aos pinos de entrada dos 74HC573 em paralelo e de maneira inversa a cada conjunto de pinos de entrada. A Tabela 2.4 apresenta a distribuição dos pinos de entrada de cada *latch*. O controle do envio de dados corretos para os Acionadores de Motor de Passo será controlado através de um programa a ser detalhado mais a frente.

Tabela 2.4 – Distribuição das conexões das entradas dos CIs 74HC573 com o registrador de dados da porta paralela.

Circuitos Integrados 74HC573	Pinos do registrador de dados da porta paralela							
	RD0	RD1	RD2	RD3	RD4	RD5	RD6	RD7
CI 1	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
CI 2	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
CI 3	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
CI 4	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
CI 5	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
CI 6	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
CI 7	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7

RDx = Pino “x” do registrador de dados da porta paralela.

Dx = Pino de entrada “x” do CI 74HC573.

Na Figura 2.20 também é ilustrado os pinos de monitoramento dos sensores de fim de curso do movimentador micrométrico, no conector “FIM_CURSO”. Estes pinos estão distribuídos a cada saída do Acionador de Motor de Passo.

A integração do seletor de *buffers* (Figura 2.19) com os *latches* de expansão de dados e a leitura dos sensores de fim de curso do Acionador de Motor de Passo (Figura 2.20) forma a solução proposta no Circuito de Comunicação. A Tabela 2.5 apresenta a descrição dos pinos de saída da porta DB-25, onde o Acionador de Motor de Passo será conectado. O conector, além de receber os pinos de controle digital, recebe, também, pinos de alimentação de +5V, +15V, -15V e GND, estes originados diretamente de qualquer fonte de alimentação conectado às entradas do Circuito de Comunicação. Os nomes relacionados às descrições dos pinos de saída serão detalhados na próxima Seção.

Tabela 2.5 – Descrição dos pinos de saída do Circuito de Comunicação.

Pino	Descrição
1	DA0 – Controle para DAC A
2	DA1 – Controle para DAC A
3	DA2 – Controle para DAC A
4	DA3 – Controle para DAC A
5	DA4 – Controle para DAC A
6	DA5 – Controle para DAC A
7	DA6 – Controle para DAC A
8	DA7 – Controle para DAC A
9	DB0 – Controle para DAC B
10	DB1 – Controle para DAC B
11	DB2 – Controle para DAC B
12	DB3 – Controle para DAC B
13	DB4 – Controle para DAC B
14	Sensor de Fim de Curso
15	-15V
16	GND
17	Não conectado
18	Não conectado
19	+15V
20	+5V
21	DIR A
22	DIR B
23	DB7 – Controle para DAC B
24	DB6 – Controle para DAC B
25	DB5 – Controle para DAC B

O projeto da placa de circuito impresso relacionada com o Circuito de Comunicação foi apoiada através da ferramenta de desenvolvimento Ultiboard. A placa foi projetada em face única e com alguns “*jumpers*” para não necessitar a adição de mais uma camada de trilhas. A Figura 2.21 ilustra as trilhas desenhadas na placa (tamanho ilustrativo) e a Figura 2.22 mostra a distribuição dos componentes sobre a placa.

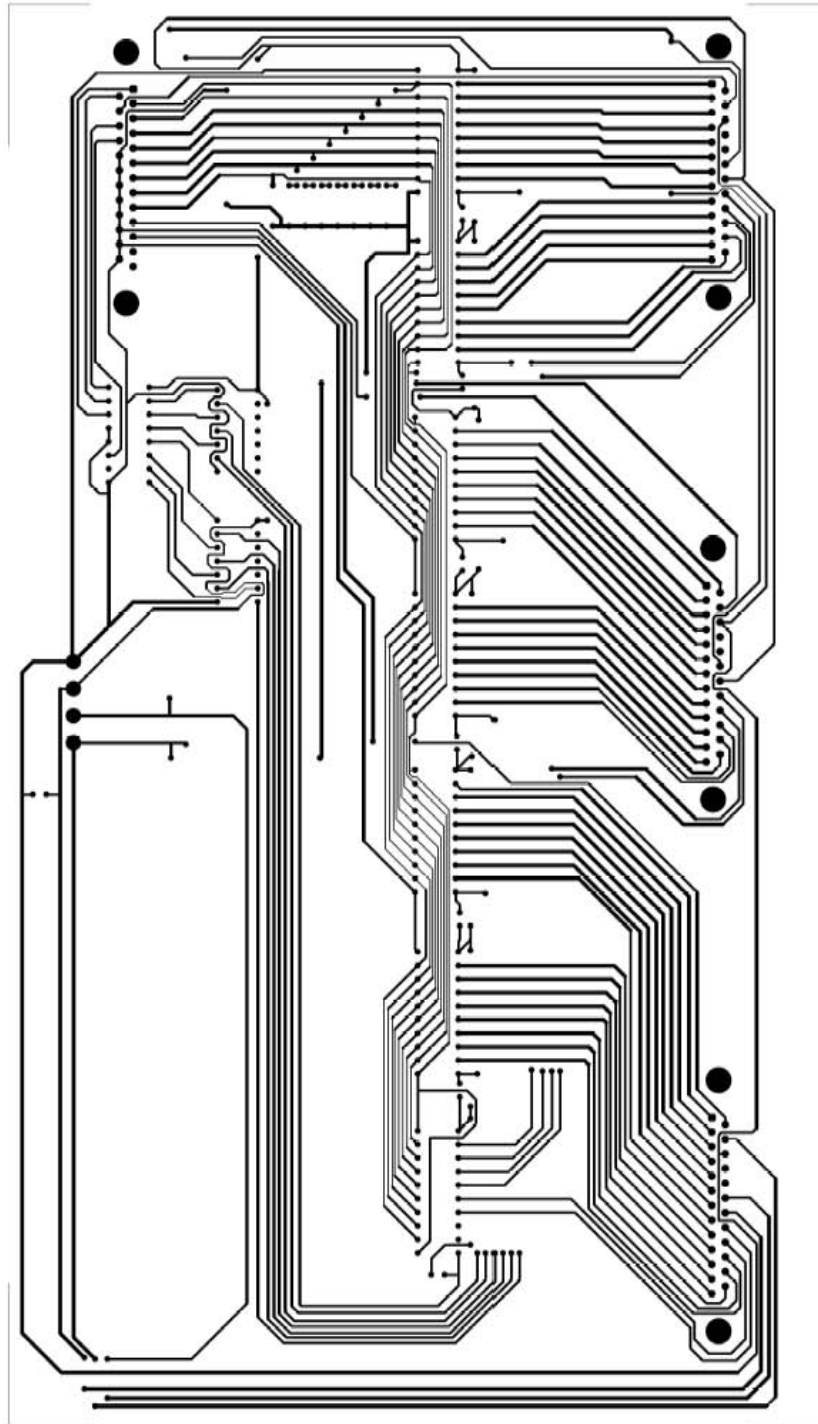


Figura 2.21 – Trilhas da placa de circuito impresso do Circuito de Comunicação.

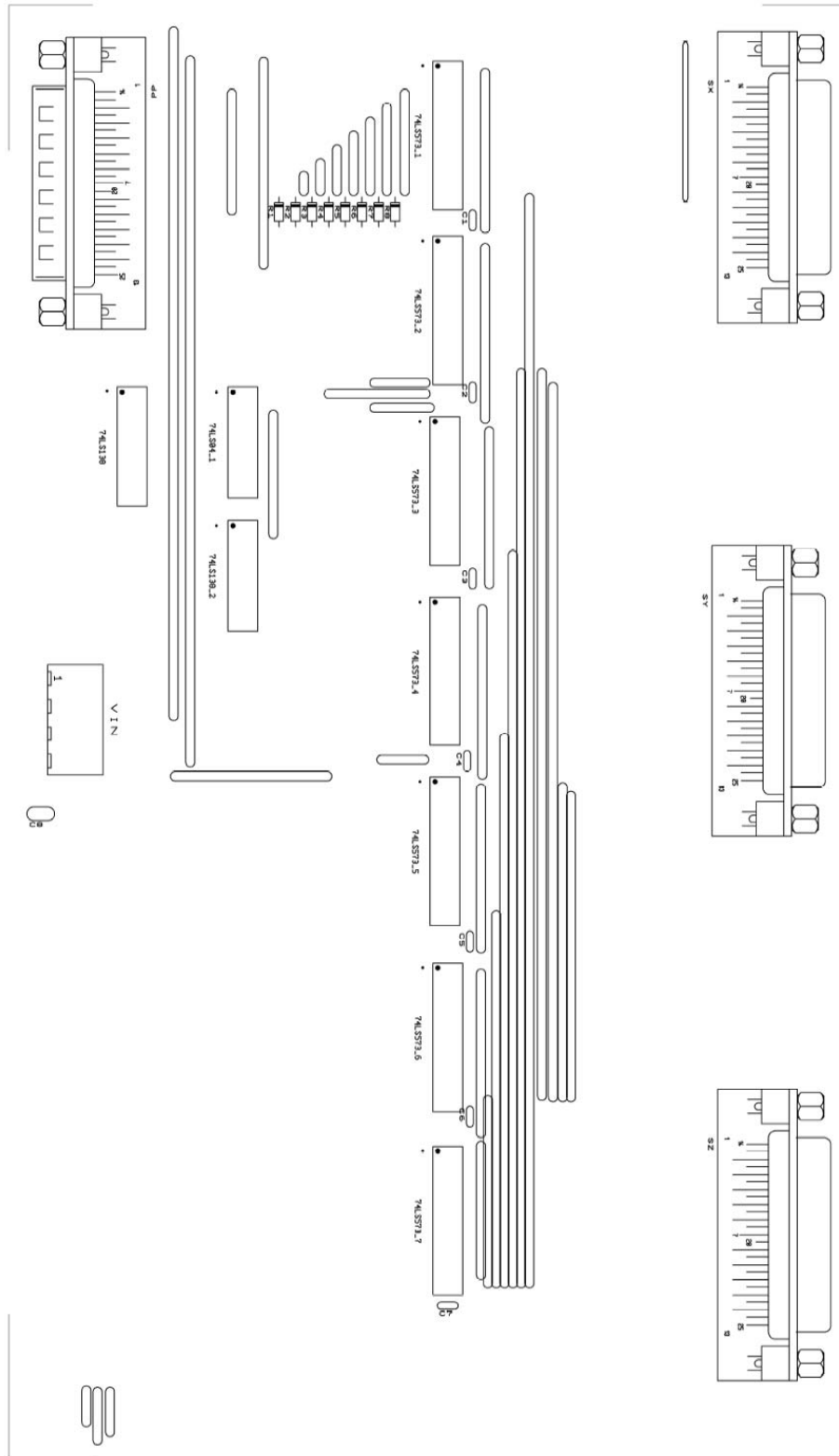


Figura 2.22 – Disposição dos componentes da placa de circuito impresso do Circuito de Comunicação.

A fabricação da placa de circuito impresso foi realizada através de um serviço especializado, que garante a boa produção da mesma com a menor possibilidade de defeitos. A Figura 2.23 apresenta uma fotografia da placa produzida.

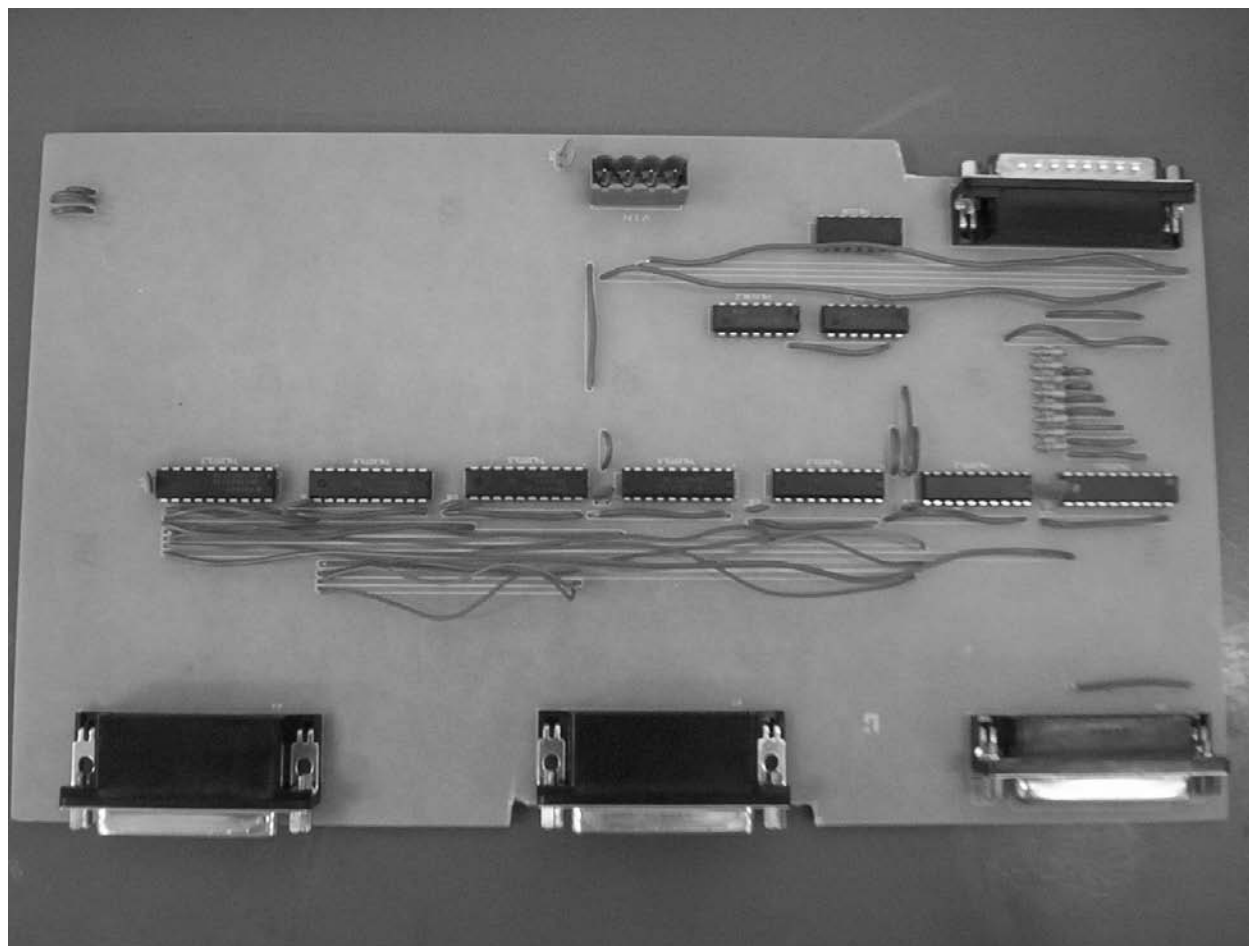


Figura 2.23 – Fotografia do Circuito de Comunicação desenvolvido.

2.7. Acionador do Motor de Passo

Depois de apresentada o Circuito de Comunicação, esta Seção mostra em detalhes o funcionamento, projeto e fabricação do Acionador de Motor de Passo. A Figura 2.24 ilustra, inicialmente, o funcionamento do Acionador.

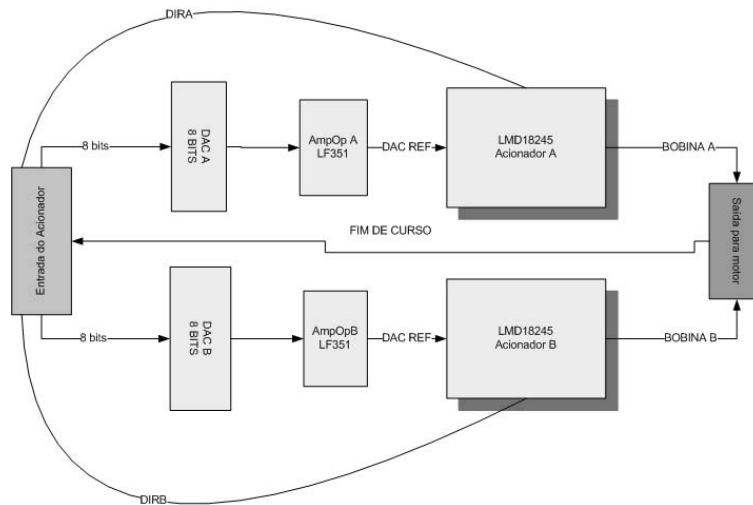


Figura 2.24 – Diagrama de funcionamento do Acionador de Motor de Passo.

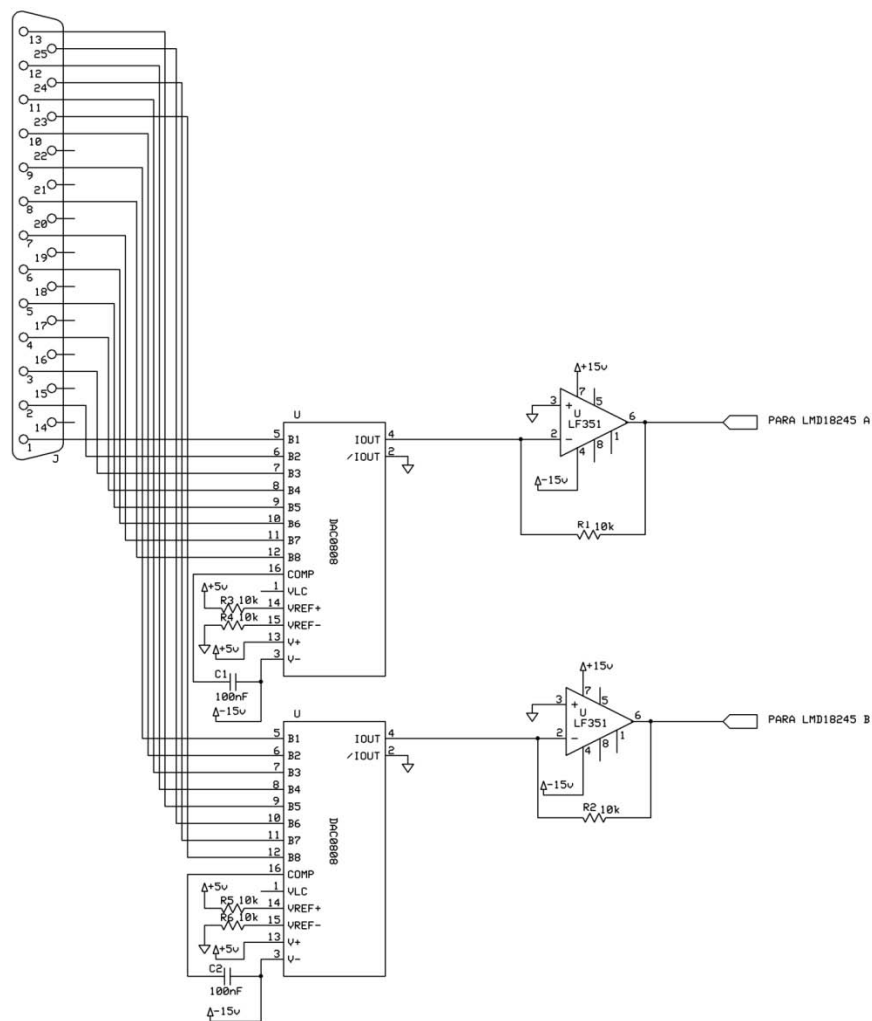


Figura 2.25 – Diagrama esquemático do conversor digital-analógico.

O funcionamento do Acionador é dividido em duas partes: conversor digital-analógico e *driver* do motor. A primeira parte é responsável por converter a palavra enviada pelo Circuito de Comunicação em uma tensão de referência para o controle de precisão de micropasso no *driver* do motor. A segunda parte é, efetivamente, o controle do *driver* do motor de passo.

A Figura 2.25 apresenta o diagrama esquemático do conversor digital-analógico. Como é necessário um *driver* de motor de passo para cada bobina, portanto, cada *driver* deve obter a referência do controle de precisão do micropasso. O circuito integrado que realiza a conversão da palavra de oito bits para uma saída em corrente é o *DAC0808*. Os pinos de entrada B1 a B8 recebem a palavra convertida e os pinos de saída *IOUT* transmitem a corrente correspondente. Os pinos de referência *+VREF* e *-VREF* estão alimentados, respectivamente com *+5V* e *GND*. Desta maneira, a menor palavra será representada pela tensão de 0V e a maior palavra com a tensão de 5V. A tensão de alimentação *V+* é de 5V e a tensão de alimentação *V-* é de -15V. Um amplificador operacional *LF351* é utilizado em cada saída *IOUT* para expressar a saída em tensão, que é dada pela equação 2.1.

$$V_o = +5V \left(\frac{B1}{2} + \frac{B2}{4} + \dots + \frac{B8}{256} \right) \quad (2.1)$$

onde *Vo* é a tensão de saída em volts e *B1-B8* são os bits de entrada da palavra a ser convertida.

A Figura 2.26 mostra o diagrama esquemático do *driver* do motor de passo e tem por objetivo acionar o motor através dos sinais recebidos pelos pinos *DIRA*, *DIRB* e tensão de referência do conversor digital-analógico. A essência para o controle é o circuito integrado *LMD18245*, um *driver* para motor de passo do tipo bipolar. O mesmo contém pinos de entrada para controle de corrente limite na bobina do motor (pinos *CSOUT* e *RC*), controle de direção da corrente na bobina (pino *DIR*), habilitação do movimento do motor (pino *BREAK*) e um conversor digital-analógico de quatro bits. Para esta aplicação, o pino *BREAK* está em estado baixo para o movimento de o motor estar habilitado e os pinos *M1* a *M4* estão em estado alto para que sempre a tensão recebida pelo pino *DAC REF* seja a lida pelo *LMD18245*.

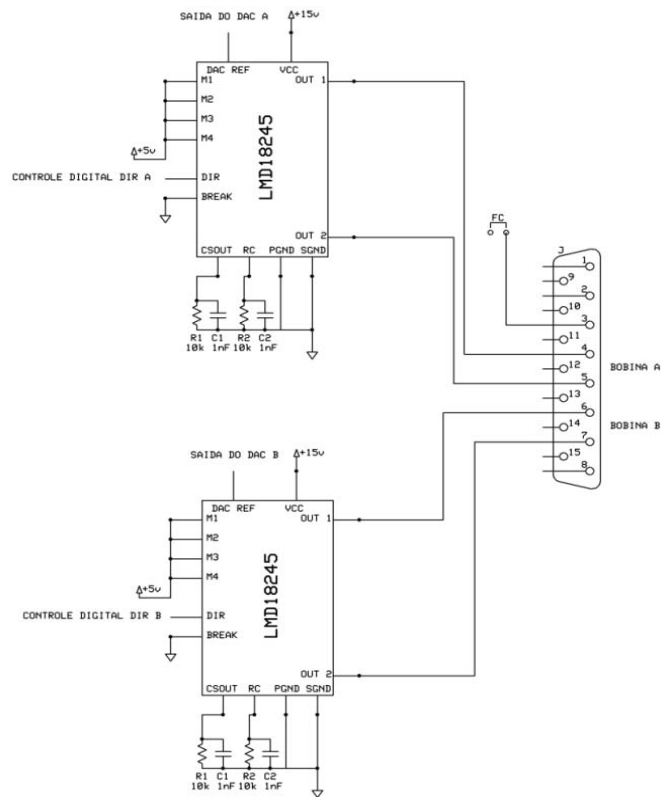


Figura 2.26 – Diagrama esquemático do *driver* para acionar os motores de passo.

O Acionador do Motor de Passo pode efetuar movimentos de passo normal e micropassos com a precisão desejada. A Figura 2.27 apresenta a seqüência de sinais enviados ao Acionador para o passo normal do motor. Nesta situação de acionamento, os conversores digital-analógico permanecem com todas suas entradas em estado alto, ou seja, não existe variação de corrente entre as bobinas, somente o controle da direção da corrente.

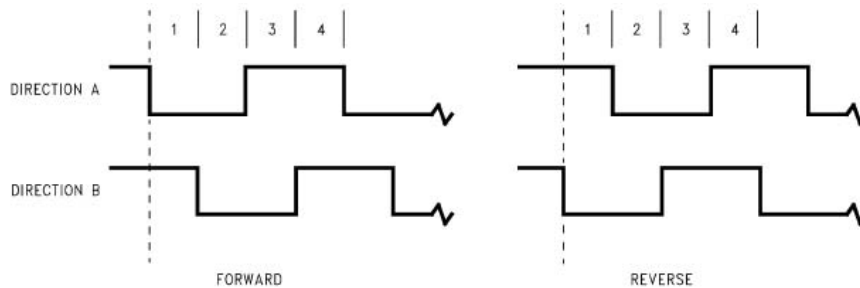


Figura 2.27 – Seqüência de estados enviados ao Acionador de Motor de Passo em passo simples.

No caso do acionamento do motor com técnicas de micropasso, a sequência de estados relacionados à direção da corrente nas bobinas é o mesmo, mas entre as sequências de sinais, a variação de corrente é controlada de maneira a prover um movimento fino entre os passos. Segundo a especificação do *LMD18245*, para cada passo completo, existe um deslocamento de corrente em 90 graus [42]. Para produzir os passos intermediários, basta dividir o deslocamento em potências de dois. Por exemplo, para gerar dois micropassos em um passo, cada micropasso é produzido no deslocamento de 45 graus em corrente. Para quatro micropassos por passo, cada micropasso é produzido no deslocamento de 22,5 graus em corrente, e assim por diante. A porcentagem de corrente a ser enviada a bobina, proporcional ao deslocamento, é calculada através de $|\cos(x)|$, onde x é o deslocamento em graus para o micropasso pretendido. Para a segunda bobina do motor, o cálculo da corrente proporcional é através de $|\sin(x)|$, onde x é o deslocamento em graus. Vale ressaltar que a corrente de uma bobina está em atraso de 90 graus em relação à outra.

A Tabela 2.6 apresenta um exemplo da sequência de envio de estados ao Acionador para resultar em dois micropassos por passo. Para cada micropasso, deve ser calculada a porcentagem de corrente na bobina e a referência digital de entrada que o conversor digital-analógico (DAC) deve enviar ao Acionador. A cada 90 graus deslocados, a direção das bobinas passa para o estado seguinte de passo completo, e assim por diante.

Tabela 2.6 – Sequência de envio de sinais de dois micropassos por passo.

<i>Deslocamento (α)</i>	<i>Porcentagem Corrente A ($\cos(\alpha)$)</i>	<i>Referencia entrada A DAC A</i>	<i>Sentido corrente A DIR A</i>	<i>Porcentagem Corrente B ($\sin(\alpha)$)</i>	<i>Referencia entrada B DAC B</i>	<i>Sentido corrente B DIR B</i>
0	1	255	1	0	0	1
45	0.707	180	1	0.707	180	1
90	0	0	0	1	255	1
135	0.707	180	0	0.707	180	1
180	1	255	0	0	0	0
225	0.707	180	0	0.707	180	0
270	0	0	1	1	255	0
315	0.707	180	1	0.707	180	0
REPETIR						

O projeto da placa de circuito impresso relacionada ao Acionador foi apoiada através da ferramenta de desenvolvimento Ultiboard. A placa foi projetada em face única e com alguns “jumpers” para não necessitar de uma nova camada de trilhas. A Figura 2.28 ilustra as trilhas desenhadas na placa (tamanho ilustrativo) e a Figura 2.29 mostra a distribuição dos componentes sobre a placa.

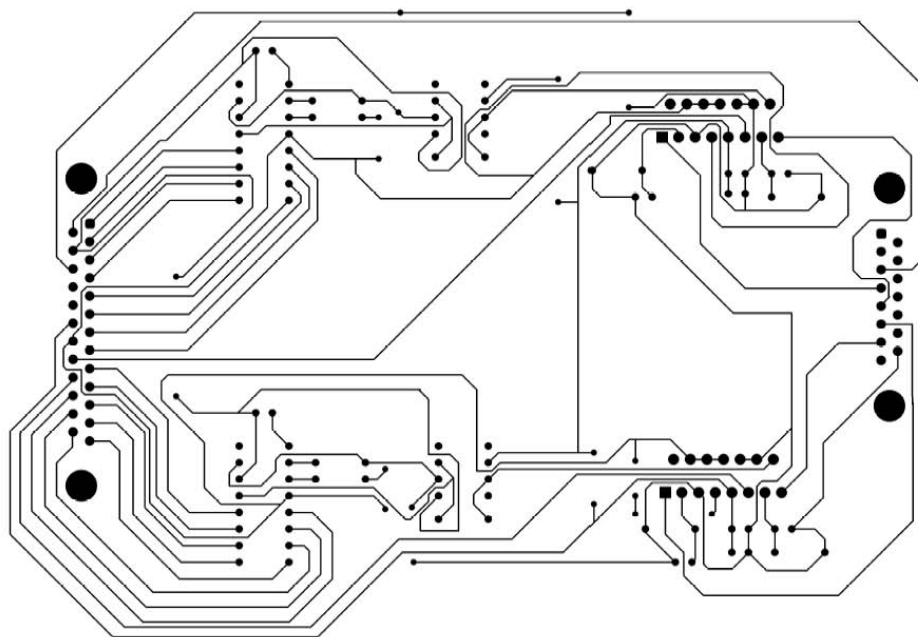


Figura 2.28 – Projeto da placa de circuito impresso do Acionador do Motor de Passo.

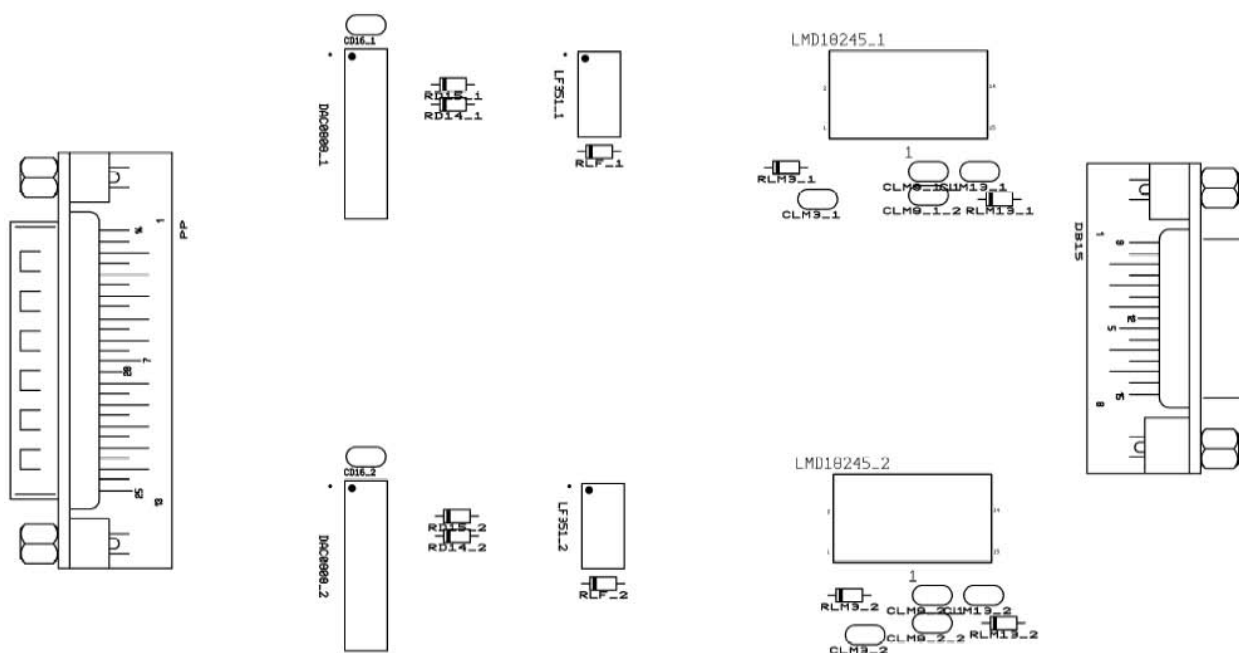


Figura 2.29 – Posicionamento dos componentes do Acionador de Motor de Passo.

A fabricação da placa de circuito impresso foi realizada através de um serviço especializado, que garante a boa produção da mesma com a menor possibilidade de defeitos. A Figura 2.30 apresenta uma fotografia da placa produzida.

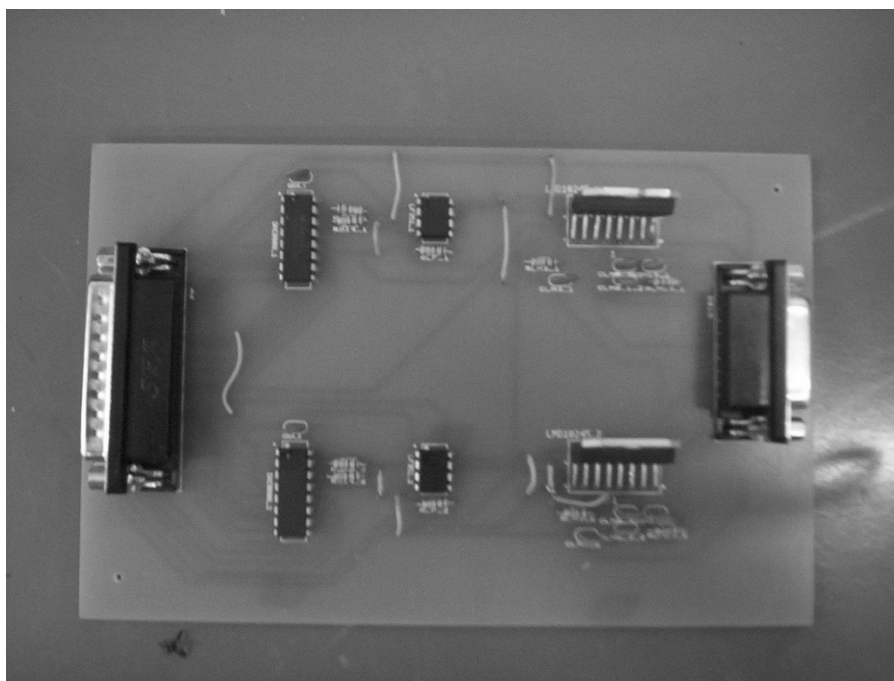


Figura 2.30 – Fotografia do Acionador de Motor de Passo desenvolvido.

2.8. Integração dos circuitos de controle e acionamento

Depois de apresentado o desenvolvimento do Circuito de Comunicação e o Acionador de Motor de Passo, esta seção mostra a integração dos circuitos para prover a solução esperada. Através das placas integradas, é possível controlar os motores de passo através da porta paralela do computador, assim como monitorar o sensor de fim de curso do movimentador micrométrico. A Figura 2.31 mostra a fotografia das partes integradas, com o computador pessoal, o Circuito de Comunicação e dois Acionadores de Motor de Passo. Vale ressaltar que o Circuito de Comunicação pode controlar de um a três acionadores, não necessitando existir três placas conectadas. Um comando para movimentar o motor de passo consiste em enviar um estado para os buffers que controlam os conversores digital-analógico a outro estado para os pinos de direção do respectivo motor. Os detalhes relacionados aos procedimentos de envio serão abordados no próximo capítulo.

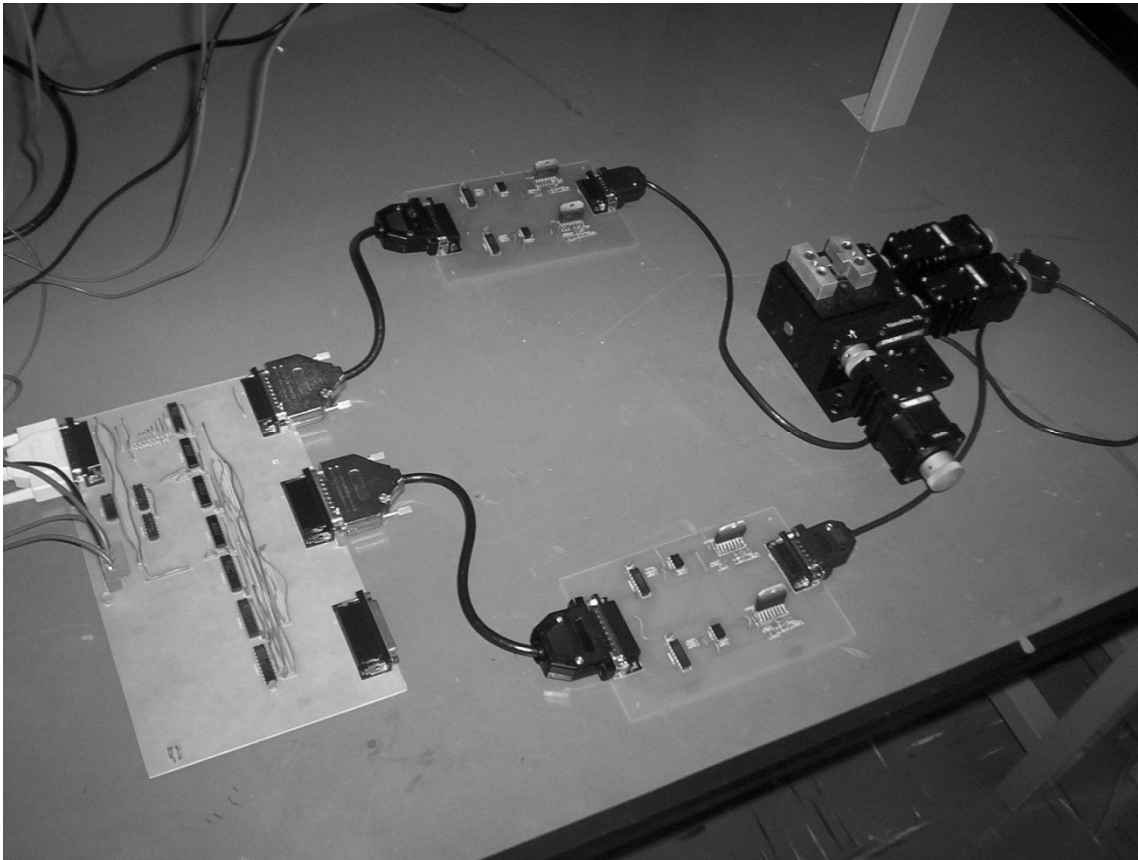


Figura 2.31 – Fotografia da Integração dos circuitos de controle e acionamento.

3. Desenvolvimento do *software* de controle

Após a apresentação detalhada do *hardware* que permite o computador pessoal enviar comandos de movimentação aos motores de passo, este capítulo apresenta o programa desenvolvido para controlar e monitorar o funcionamento do posicionador micrométrico. A Primeira Seção apresenta o ambiente de desenvolvimento utilizado. A Segunda Seção apresenta a lógica de envio de comandos através do Circuito de Comunicação. A Terceira Seção explica a interface de controle e suas funcionalidades.

3.1. Ambiente de desenvolvimento

A escolha de um ambiente de desenvolvimento de *software* adequado para a solução proposta é importante para que o sistema tenha um bom desempenho na comunicação com os dispositivos e troca de mensagens com o usuário. Observando que o sistema de controle do caracterizador trabalha com processos concorrentes, o ambiente de desenvolvimento LabVIEW, da National Instruments, contém os requisitos suficientes para oferecer a qualidade de serviço necessária [43,44]. Muitos laboratórios de pesquisa e instituições de ensino optam por desenvolver programas usando o LabVIEW. Isso é devido a sua interface amigável, facilidade de implementação e ferramentas de interfaceamento de *hardware* eficientes [45-56].

O LabVIEW é um ambiente de desenvolvimento dedicado a soluções que envolvem automação e controle de processos concorrentes ou em tempo real. Toda a programação é feita graficamente através de blocos chamados de instrumentos virtuais. Estes instrumentos podem representar desde operações de interfaceamento, até o encapsulamento da entrada e saída de programas em um só bloco. A Figura 3.1 mostra o ambiente de programação em blocos, chamado de *block diagram*.

Em relação à interface gráfica, o LabVIEW oferece bibliotecas específicas que possibilitam criar um painel de controle para que o usuário atue sobre o sistema e receba os resultados de diversas maneiras. Além disso, existem ferramentas para criação de relatórios e geração de arquivos de troca para outros aplicativos. A Figura 3.2 mostra o ambiente de desenvolvimento de interface gráfica, chamado de *control panel*.

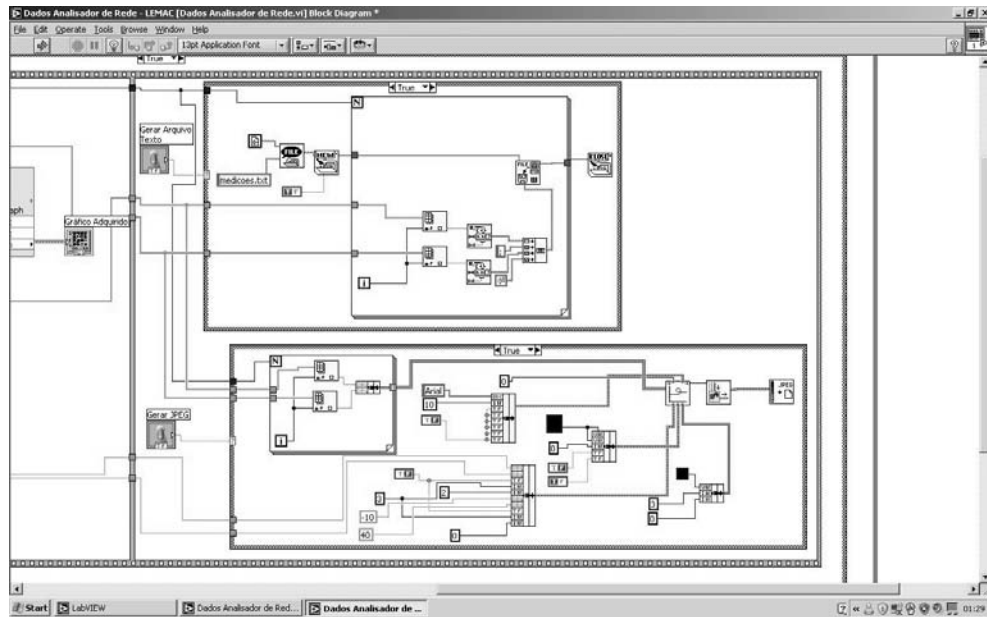


Figura 3.1 – Painel de desenvolvimento em blocos do LabVIEW.

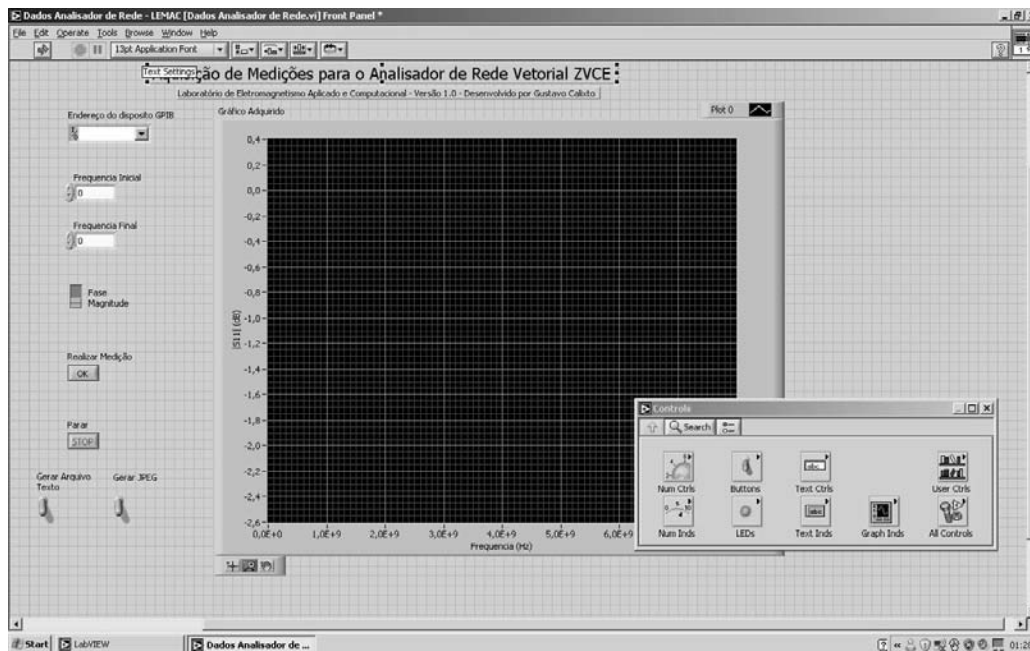


Figura 3.2 – Painel de desenvolvimento de interface do LabVIEW.

As versões recentes do ambiente de desenvolvimento estão munidas de ferramentas para controle de instrumentos virtuais a longa distância através da Internet ou uma rede de alta velocidade. O computador onde estão conectados todos os dispositivos do experimento é considerado o “servidor”. Através desta ferramenta, o usuário pode assumir o controle do

experimento a distância utilizando um navegador de todos os sistemas operacionais suportados (Windows e Linux, por exemplo). A Figura 3.3 mostra um exemplo deste controle.

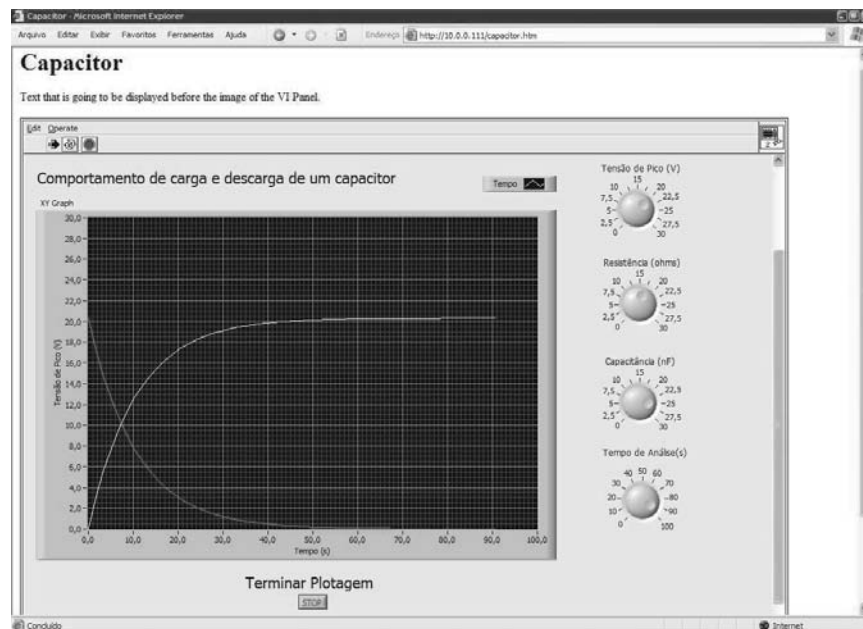


Figura 3.3 – Exemplo de controle remoto de aplicação em LabVIEW.

3.2. Lógica de envio de comandos

Para que os estados nos pinos de entrada do circuito de controle dos motores de passo sejam ajustados conforme o esperado pelo usuário, uma lógica de controle foi desenvolvida para que seja possível escolher o motor a ser acionador, a precisão que se deseja obter, o número de passos a serem executados e o sentido de giro do motor (horário ou anti-horário).

Antes de detalhar os possíveis comandos a serem enviados para o circuito de controle, é necessário abordar o funcionamento da expansão do registrador de dados da porta paralela e, assim, entender a lógica de atualização dos *buffers*.

Cada *buffer*, conforme descrito anteriormente contém oito *bits* de entrada provenientes do registrador de dados da porta paralela. Porém, cada um deve receber sua respectiva palavra sem interferir na saída dos outros. Assim, independente da palavra existente no registrador de dados da porta paralela, as saídas dos *buffers* sempre permanecem com o estado anterior. Ao escrever uma palavra em um *buffer*, a mesma é atualizada no registrador de dados da

porta paralela, depois o registrador de controle é atualizado com a palavra de três bits que seleciona o *buffer* alvo, a palavra é liberada para o respectivo *buffer* e, então, a configuração retorna para o estado inicial. A Figura 3.4 ilustra um fluxograma que mostra os procedimentos de escrita em um *buffer* escolhido.

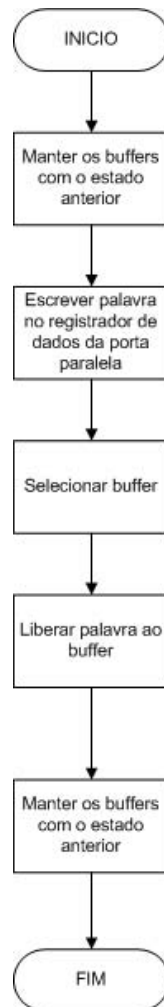


Figura 3.4 – Fluxograma de funcionamento de atualização de *buffer*.

Na inicialização do posicionador, é preciso estabelecer o estado inicial do *buffer* quando o acionador é alimentado e o *software* de controle é inicializado. Os pinos dos *buffers* relacionados à direção devem estar em estado baixo e todos os pinos de buffers relacionados aos conversores digital-analógico devem estar em estado alto. Além disso, os sensores de fim de curso, lidos a partir do registrador de *status* da porta paralela devem apontar os motores em que o respectivo eixo se encontra na origem. A Tabela 3.1 apresenta uma distribuição do que é

controlado em cada *buffer*, ou seja, o que se controla com a alteração de estado em cada *buffer*. A Tabela 3.2 mostra o estado final que os *buffers* e os sensores de fim de curso devem permanecer quando o equipamento é inicializado. O procedimento de inicialização consiste em movimentar cada eixo de posicionamento para a origem em passo completo, ou seja, enviar comandos de movimentação para cada eixo até que o sensor de fim de curso identifique que o mesmo se encontra na origem. A Figura 3.5 apresenta o fluxograma do procedimento de inicialização.

Tabela 3.1 – Relação dos pinos dos *buffers* com o controle dos acionadores de motor de passo.

Buffer	Objeto de controle	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
1	DAC A – Motor X	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
2	DAC B – Motor X	B8	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1
3	DAC A – Motor Y	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
4	DAC B – Motor Y	B8	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1
5	DAC A – Motor Z	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
6	DAC B – Motor Z	B8	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1
7	DIRECAO	DIR AX	DIR BX	DIR AY	DIR BY	DIR AZ	DIR BZ	NC	NC

Tabela 3.2 – Estado final dos *buffers* quando o posicionador é inicializado.

Buffer	Objeto de controle	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
1	DAC A – Motor X	1	1	1	1	1	1	1	1
2	DAC B – Motor X	1	1	1	1	1	1	1	1
3	DAC A – Motor Y	1	1	1	1	1	1	1	1
4	DAC B – Motor Y	1	1	1	1	1	1	1	1
5	DAC A – Motor Z	1	1	1	1	1	1	1	1
6	DAC B – Motor Z	1	1	1	1	1	1	1	1
7	DIRECAO	0	0	0	0	0	0	NC	NC

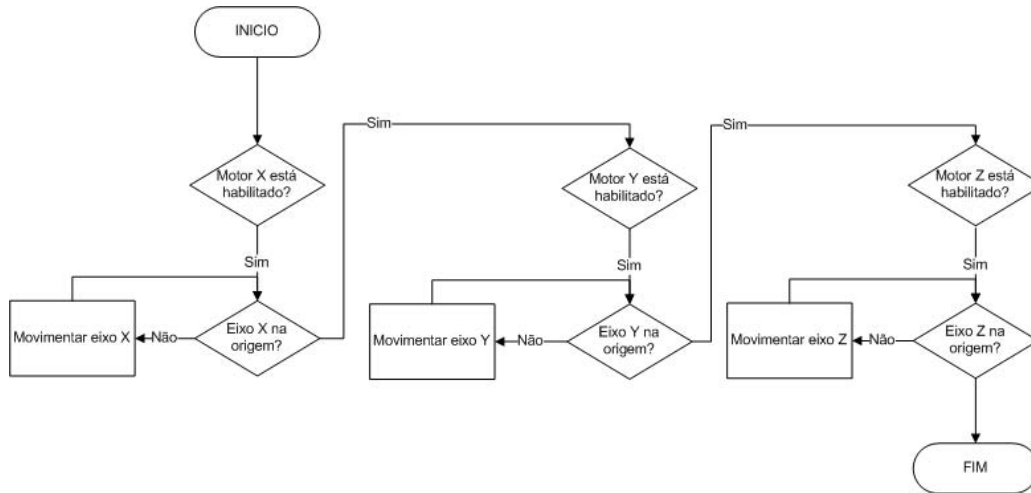


Figura 3.5 – Fluxograma de funcionamento do procedimento de inicialização.

Para realizar a movimentação de objetos através do posicionador eletrônico, o mesmo pode ser efetuado passo a passo para um determinado eixo. Deve-se informar também para que direção os passos devem ser efetuados e com qual precisão (passo completo, dois micropassos por passo, quatro micropassos por passo, e assim por diante). Sabendo-se da precisão, o programa armazena uma tabela de dados para movimentar um eixo com as seqüências de atualizações dos pinos de direção e conversores digital-analógico.

Para construir a tabela de dados para um período completo de deslocamento (0-360 graus), o programa efetua, primeiramente, o cálculo do deslocamento de corrente para cada passo. Para movimento em passo completo, sabe-se que o deslocamento é de 90 graus. Para dois micropassos por passo, o deslocamento é de 45 graus, segundo a equação 3.1

$$D = \frac{90}{P} \quad (3.1)$$

onde D é o deslocamento em graus e P é o numero de micropassos por passo.

Depois deve ser calculada a palavra de entrada no conversor digital-analógico para prover a tensão de referência em cada *driver*. Para a primeira bobina do motor, o nível corrente a ser aplicada é dado pela equação 3.2

$$PA_{ref} = (2^n - 1)|\cos(D)| \quad (3.2)$$

e para a segunda bobina, através da equação 3.3

$$PB_{ref} = (2^n - 1)|\text{sen}(D)| \quad (3.3)$$

onde PA_{ref}/PB_{ref} é a palavra que deve ser escrita no conversor digital-analógico, n é o número de bits do conversor digital-analógico e D é o deslocamento de corrente calculado. A cada 90 graus percorridos, a seqüência deve alterar as direções de corrente da bobina. Com a tabela de dados construída, é possível acionar os motores atualizando repetidamente e seqüencialmente, todos os passos da tabela de dados. Para girar o motor no sentido contrário, basta também percorrer a tabela seqüencialmente em sentido contrário. Para cada passo, o sensor de fim de curso é verificado para saber se o eixo deslocado se encontra na origem. A Tabela 3.3 mostra um exemplo de tabela de dados configurada para quatro micropassos por passo. A Figura 3.6 mostra o fluxograma de movimentação de um eixo.

Tabela 3.3 – Fluxograma de funcionamento do procedimento de inicialização.

Deslocamento (α)	Referencia entrada A DAC A	Sentido corrente A DIR A	Referencia entrada B DAC B	Sentido corrente B DIR B
0	255	1	0	1
22.5	235	1	97	1
45	180	1	180	1
67.5	97	1	235	1
90	0	0	255	1
112.5	97	0	235	1
135	180	0	180	1
157.5	235	0	97	1
180	255	0	0	0
202.5	235	0	97	0
225	180	0	180	0
247.5	97	0	235	0
270	0	1	255	0
292.5	97	1	235	0
315	180	1	180	0
337.5	235	1	97	0
REPETIR				

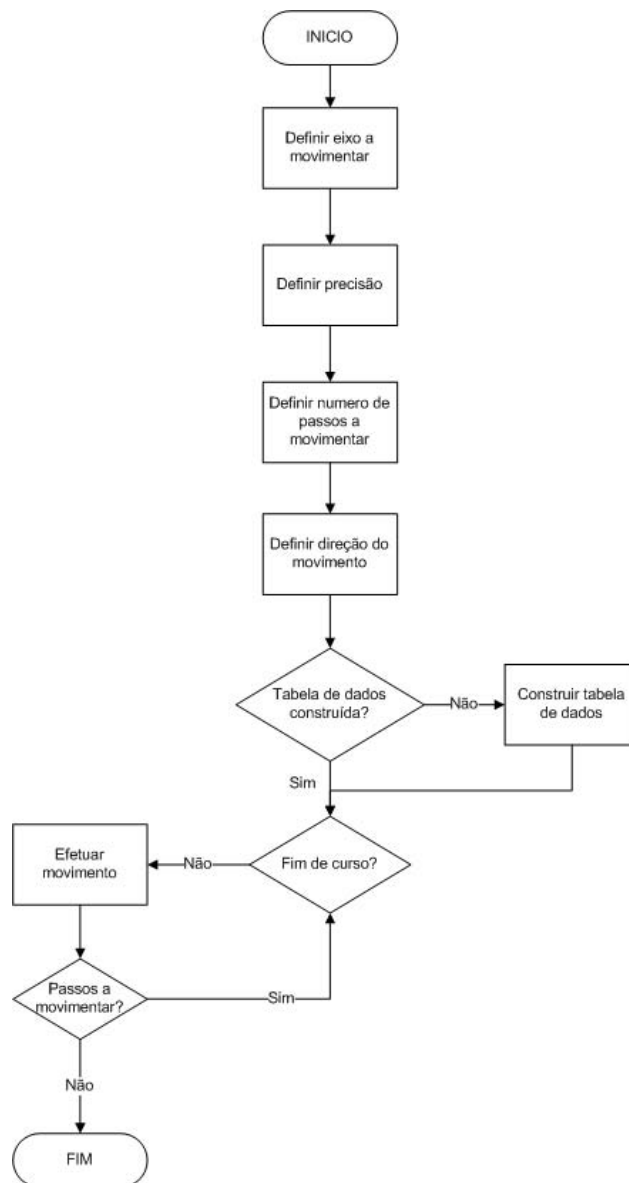


Figura 3.6 – Fluxograma de movimentação do motor de passo.

3.3. Interface de operação do software

Depois de apresentado o ambiente de desenvolvimento utilizado e a lógica de controle envolvida, a interface de interação com o usuário é apresentada. A Figura 3.7 mostra a interface de controle do posicionador micrométrico.

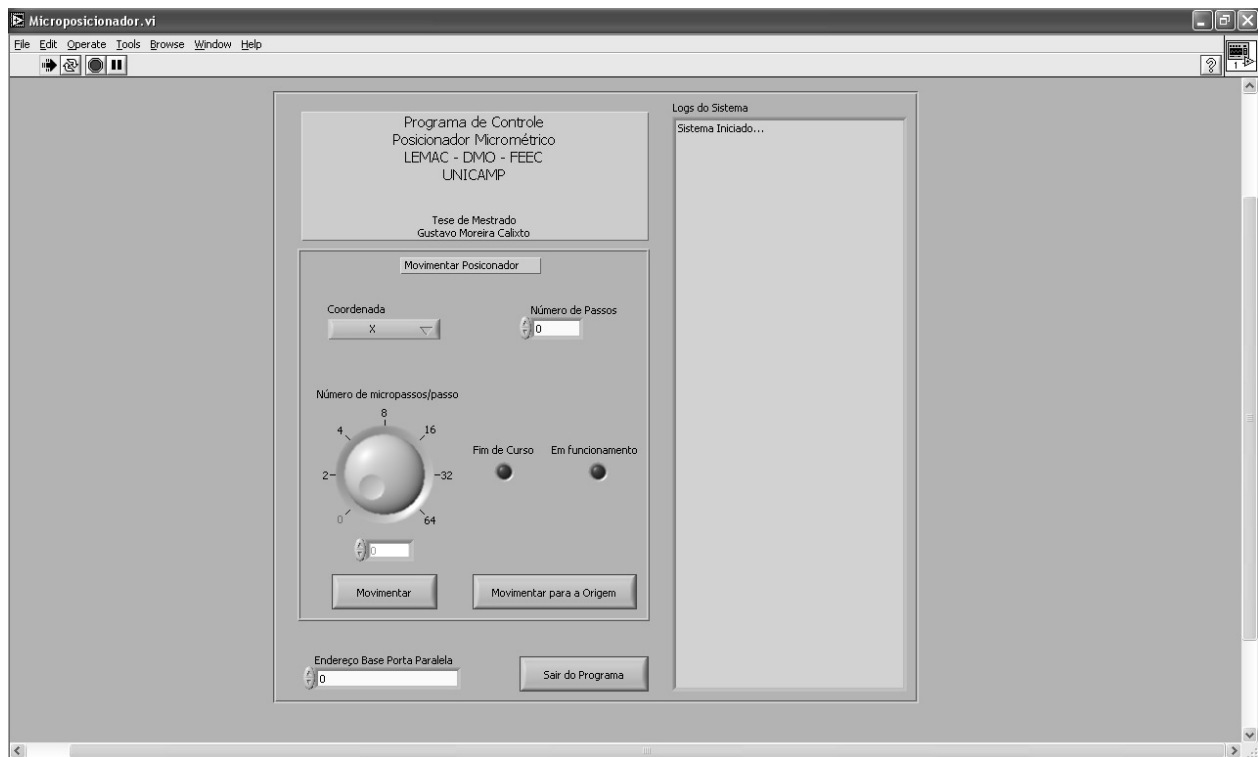


Figura 3.7 – Interface com o usuário do movimentador micrométrico.

A interface ilustrada na Figura 3.7 tem por objetivo enviar comandos para o *hardware* desenvolvido e monitorar o funcionamento do mesmo. No quadro “Movimentar Posicionador”, pode ser escolhido o eixo a ser movimentado, o número de passos e o número de micropassos por passo (limitado entre zero e 64, o menor quando pretende o acionamento com passo completo). Os comandos que podem ser enviados são o de movimentar o motor em uma quantidade de passos e, também, movimentar um eixo diretamente para a origem. O endereço base da porta paralela também é configurado para acionar o *hardware* desenvolvido. Uma janela de *log* recebe mensagens de movimentação do motor, início do sistema, problemas de identificação da porta paralela, inicialização e movimentação do eixo para a origem.

4. Verificação e validação

Após a apresentação de toda a solução de *hardware* e *software* desenvolvida neste trabalho, este capítulo trata, especificamente, dos testes realizados com o equipamento, desde a verificação do funcionamento até a validação dos resultados obtidos com o esperado.

O método de verificação consistiu em acionar os motores de passo nos respectivos eixos e realizar medidas dos movimentos realizados, desde o passo completo até micropassos que atingissem precisões micrométricas. Os instrumentos para medir o deslocamento efetuado pela mesa de movimentação em um eixo é o paquímetro digital, com precisão de medição em 10 micrômetros. A Figura 4.1 apresenta uma fotografia do paquímetro. Além disso, foram utilizados dados de configuração da mesa de movimentação.

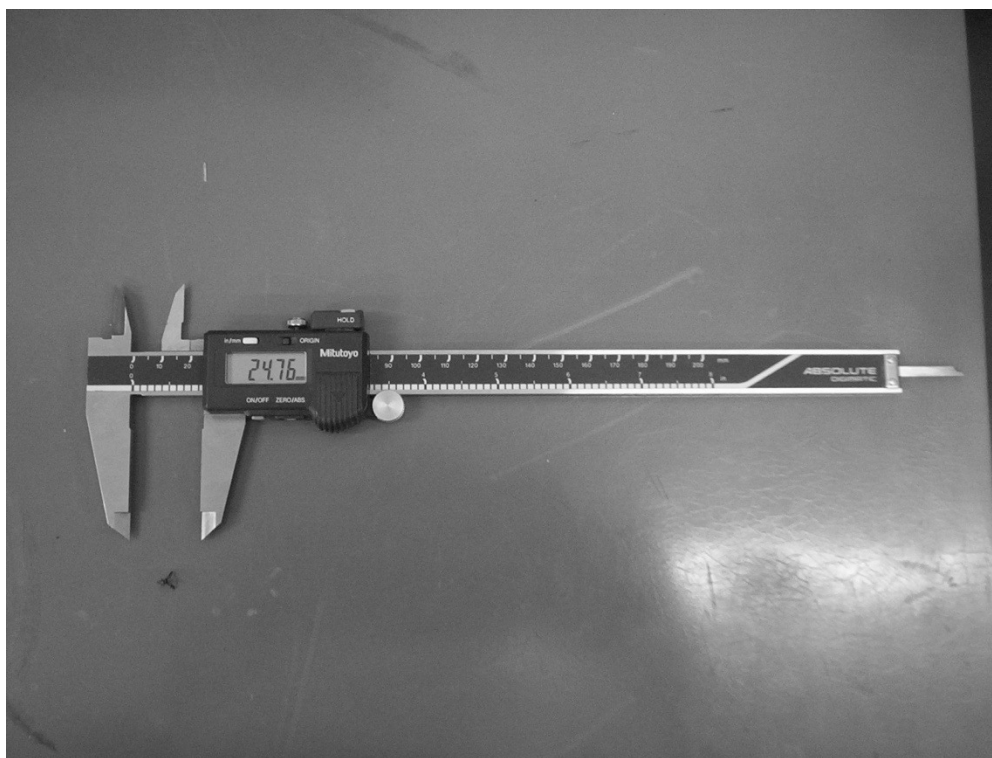


Figura 4.1 – Paquímetro digital utilizado nos teste.

Para se chegar ao deslocamento da mesa por passo completo, efetuaram-se medidas onde se contavam os número de passos completos e medidas eram efetuadas utilizando o paquímetro digital. Na primeira amostra recolhida, foi observado que 1000 passos completos

efetuavam um deslocamento de 2 milímetros em qualquer eixo da mesa de movimentação. A partir dessa informação, pode se concluir que cada passo completo é referente ao movimento da mesa em, aproximadamente, 2 micrômetros. Estas medidas foram efetuadas três vezes para confirmar a precisão. Então, para aumentar a precisão de deslocamento, bastava aumentar o número de micropassos por passo. O mesmo experimento foi repetido para maiores precisões. Por exemplo, para percorrer 2 milímetros em dois micropassos por passo, 2000 passos eram necessários e assim por diante para maiores precisões. A Tabela 4.1 mostra as medidas efetuadas desde o passo completo até 64 micropassos por passo.

Tabela 4.1 – Medidas realizadas durante os testes.

Micropassos por passo	Passos a serem efetuados	Deslocamento esperado	Primeiro teste	Segundo teste	Terceiro teste	Média dos testes	Deslocamento por passo
Passo completo	1000	2mm	2mm	2mm	2mm	2mm	2 μ m
2	2000	2mm	1,93mm	1,97mm	2,01mm	1,97mm	0,985 μ m
4	4000	2mm	1,90mm	1,87mm	1,95mm	1,97mm	0,476 μ m
8	8000	2mm	1,85mm	1,79mm	1,90mm	1,85mm	0,23 μ m
16	16000	2mm	1,71mm	1,79mm	1,80mm	1,76mm	0,110 μ m
32	32000	2mm	1,70mm	1,89mm	1,67mm	1,75mm	0,054 μ m
64	64000	2mm	1,60mm	1,71mm	1,66mm	1,65mm	0,025 μ m

A partir dos dados obtidos, é possível observar que em passo normal, existe uma confiabilidade na movimentação do posicionador micrométrico. À medida que o número de micropassos é aumentado, as medidas se afastam do deslocamento esperado, diminuindo assim a confiabilidade. Este comportamento pode estar relacionado a diversos fatores, tais como a precisão das medições e possíveis interferências eletromagnéticas no Acionador do Motor de Passo, acarretando algumas inconsistências do nível de corrente e sentido de polarização nos motores de passo [57].

É importante observar o *offset* obtido em cada conjunto de medições. A Tabela 4.2 apresenta o *offset* em relação ao valor médio de deslocamento nos testes realizados. À medida que o número de micropassos é aumentado, o *offset* apresenta um comportamento gradual. Existem técnicas de correção de *backlash* (acionamento do motor de passo aplicando a margem de erro esperada) já patenteadas e conhecidas. O *software* de controle pode ser aperfeiçoado

aplicando estas técnicas para movimentar o posicionador. Com isso, é possível obter melhores resultados e alcançar precisões próximas da esperada [58,59].

Tabela 4.2 – *Offset* médio encontrado em relação ao número de passos executados.

Micropassos por passo	Primeiro teste	Segundo teste	Terceiro teste	Média dos testes	<i>Offset</i> encontrado (média)
Passo completo	2mm	2mm	2mm	2mm	0mm
2	1,93mm	1,97mm	2,01mm	1,97mm	0,03mm
4	1,90mm	1,87mm	1,95mm	1,97mm	0,03mm
8	1,85mm	1,79mm	1,90mm	1,85mm	0,15mm
16	1,71mm	1,79mm	1,80mm	1,76mm	0,24mm
32	1,70mm	1,89mm	1,67mm	1,75mm	0,25mm
64	1,60mm	1,71mm	1,66mm	1,65mm	0,35mm
Média dos <i>Offsets</i> nos Micropassos					0,17mm

A precisão do posicionador, a partir dos testes realizados, pode chegar a precisões micrométricas e nanométricas. Para posicionamento nanométrico, o sistema desenvolvido não se mostra satisfatório para atender esta precisão. Além disso, para grandes precisões, a vibração do eixo do motor de passo pode variar o posicionamento atual para algumas aplicações.

5. Propostas de experimentos

Com o posicionador micrométrico desenvolvido e testado, algumas aplicações foram estudadas para atender necessidades do grupo de pesquisa do CePOF. Dentre elas, se aplicam o experimento com acoplamento lateral de fibras e a colimação de feixes de onda através de técnicas de *end-fire*. Este capítulo apresenta o projeto de experimentos que envolvem o posicionador micrométrico. A Primeira Seção apresenta o experimento sobre acoplamento lateral. A Segunda Seção apresenta o experimento para colimação de feixes de onda através de técnicas de *end-fire*.

5.1. Experimento do acoplamento lateral

O experimento proposto tem o objetivo de realizar um acoplamento direcional entre duas fibras de cristais fotônicos com a menor perda de sinal luminoso e menor espalhamento possível. Para atingir este propósito, o experimento utilizará ferramentas de automação para encontrar a melhor disposição e estabilidade ambiental da fibra. Além disso, este experimento é referenciado ao aperfeiçoamento de técnicas apresentadas em um artigo e uma patente internacional de *Herbert J. Shaw* sobre a fabricação de acopladores direcionais [28,29,60]. A Figura 5.1 apresenta o diagrama básico, que apresenta o propósito de modular um sinal luminoso em uma fibra, receber a saída de sinal na fibra acoplada e verificar as perdas de inserção existentes.

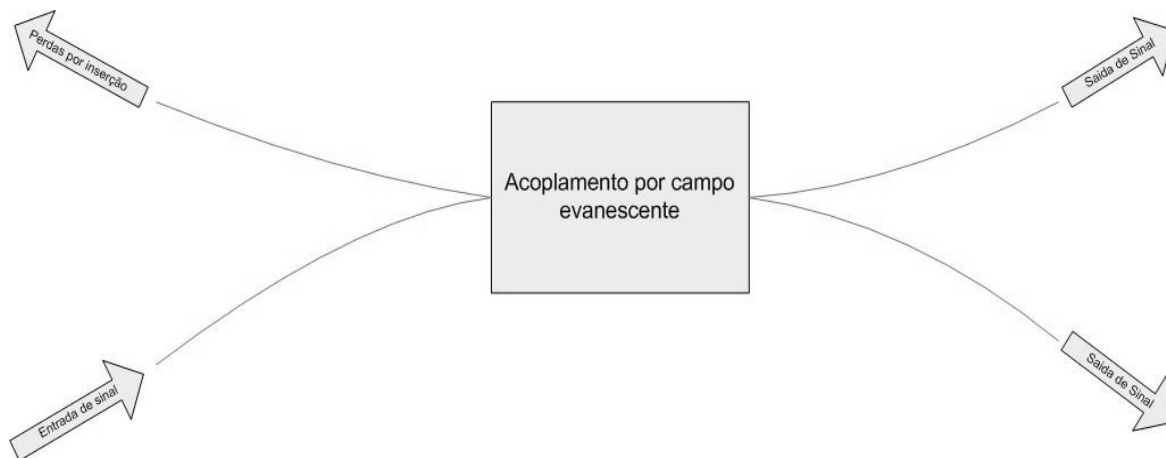


Figura 5.1 – Acoplamento por campo evanescente.

5.1.1. Especificação e disposição dos periféricos

Para que os periféricos colaborem efetivamente com os procedimentos a serem apresentados, os mesmos serão organizados como mostra a Figura 5.2.

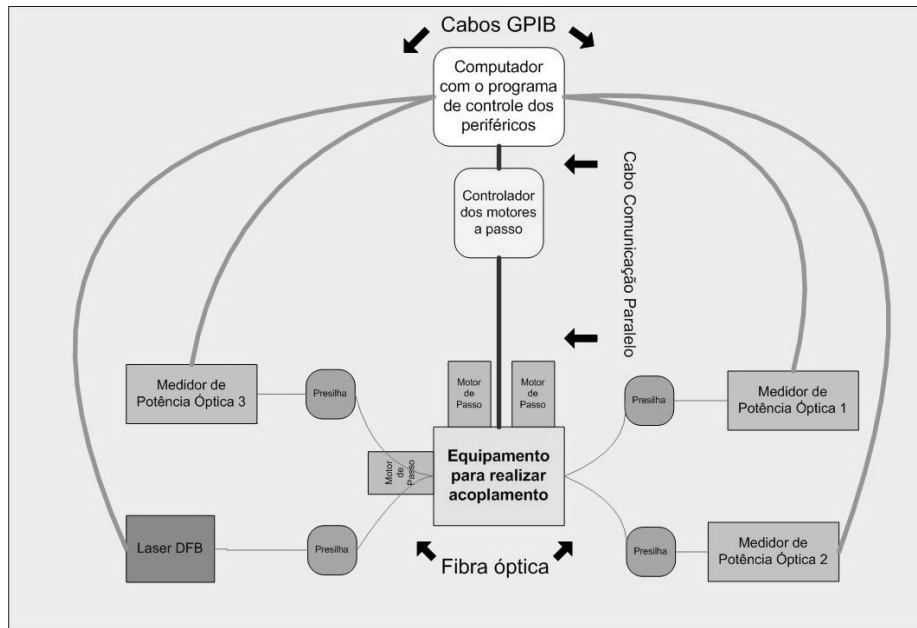


Figura 5.2 – Disposição dos equipamentos para o experimento com campo evanescente.

O experimento é composto de equipamentos de medição, atuação e controle. Os equipamentos para medição do sinal de saída e das perdas por inserção são os medidores de potência óptica indicados nas caixas em azul. Eles estão conectados ao computador através de uma interface GPIB, onde esta se comunica com o programa de controle.

Os equipamentos para atuação são o laser DFB e o equipamento para realizar acoplamento. O laser DFB, representado pela caixa em vermelho e controlado por uma interface GPIB, emite o sinal luminoso para fibra com a modulação desejada. O equipamento para realizar acoplamento, representado pela caixa amarelo-escura, ajusta o posicionamento ótimo entre os núcleos das fibras utilizando os motores de passo, apresentados através das caixas em marrom. Os detalhes sobre o equipamento para acoplamento e o polimento na região de acoplamento serão abordados nas próximas seções.

O equipamento de controle é composto pelo computador, representado pela caixa branca, e pelo controlador dos motores de passo, representado pela caixa amarelo-claro. O computador controla todos os procedimentos de atuação e medição, além de analisar as informações recebidas. O controlador dos motores de passo contém circuitos eletrônicos para o controle dos micropassos dos motores. O aperfeiçoamento do controle e suas modificações serão apresentados mais adiante.

Além disso, a Figura 5.2 apresenta quatro presilhas, mostradas através das caixas em verde, que acondicionam as fibras para serem conectadas nos equipamentos de atuação e medição.

5.1.2. Equipamento de acoplamento

Para um melhor entendimento das técnicas a serem utilizadas neste experimento, é importante estudar alguns equipamentos separadamente. No caso do equipamento para realizar o acoplamento através do campo evanescente, é importante estudar suas propriedades físicas e, principalmente, quais as ferramentas para realizar o ajuste fino de posicionamento entre os núcleos.

O desenvolvimento das peças e dispositivos para acomodamento e ajuste das fibras foi feito por um aluno de doutorado do departamento, onde seu trabalho envolve o estudo aprofundado das técnicas teóricas e experimentais de acoplamento em fibras de cristais fotônicos [58]. As informações apresentadas são relativas ao dimensionamento e às possibilidades de controle.

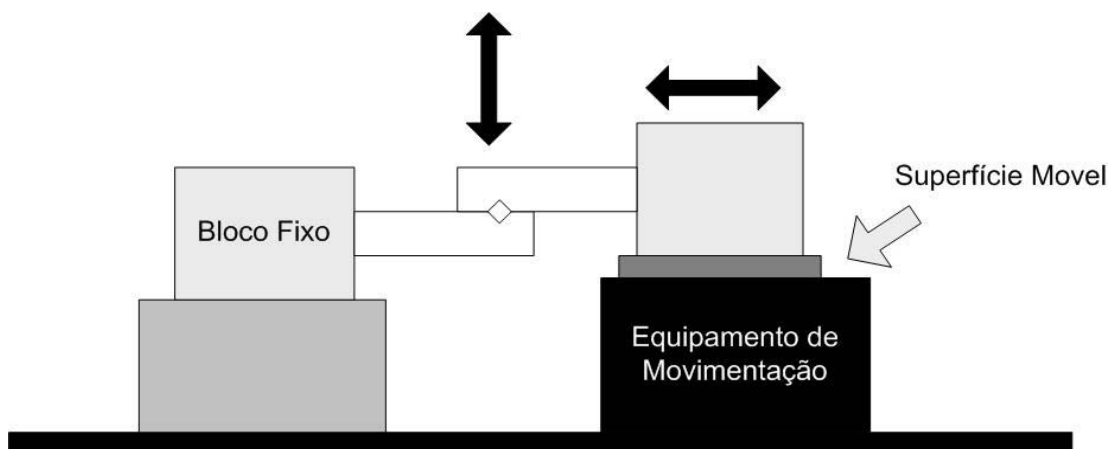


Figura 5.3 – Perfil transversal do equipamento de acoplamento.

A Figura 5.3 mostra o perfil transversal do equipamento para realizar o acoplamento. Através dela é possível obter uma melhor visualização sobre o dimensionamento. Ao lado esquerdo da Figura 5.3, é mostrado um bloco fixo que acomoda a fibra polida que propaga o sinal luminoso de entrada. Ao lado direito da Figura 5.3, encontra-se um bloco apoiado sobre uma superfície móvel do equipamento de movimentação. Neste dispositivo encontra-se a fibra que se deseja acoplar. Os possíveis movimentos para ajuste dos núcleos das fibras são apontados pelas setas. O movimento vertical ajusta a aproximação entre os núcleos. O movimento horizontal ajusta a posição relativa do núcleo a ser acoplado em relação ao núcleo que propaga o sinal luminoso. Ao centro da Figura 5.4, é mostrada a região onde as fibras são inseridas.

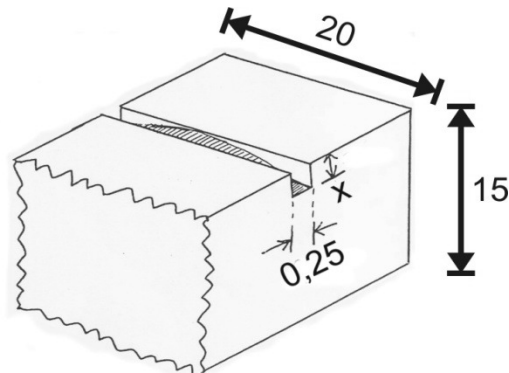


Figura 5.4 – Detalhes da acomodação da fibra polida para acoplamento.

A Figura 5.4 apresenta com detalhes a região que acomoda a fibra polida para realizar o acoplamento. O bloco onde está a fibra que propaga o sinal luminoso contém as mesmas dimensões do bloco onde é inserida a fibra a ser acoplada. As dimensões apresentadas na Figura 5.4 estão em milímetros. É possível observar que a cavidade onde a fibra é inserida possui uma curvatura que colabora para um bom acoplamento. A dimensão da espessura da cavidade, apontada pela variável “x”, depende do raio de curvatura. O experimento poderá utilizar cavidades com diferentes curvaturas, o que justifica a variação do valor de “x”.

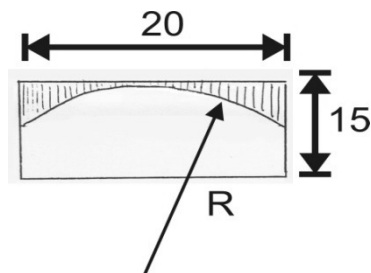


Figura 5.5 – Detalhes da curvatura de acomodamento da fibra.

A Figura 5.5 apresenta o corte transversal no bloco da Figura 5.4 que mostra com maior detalhamento a curvatura existente na cavidade de inserção do núcleo da fibra. As dimensões apresentadas estão em milímetros. A variável “R” representa o raio de curvatura da fibra. Conforme discutido, ele está relacionado com a espessura da cavidade que varia com o valor de “x”. A relação de valores entre “x” e “R” é abordada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Relação entre a espessura e o raio de curvatura da cavidade.

x[mm]	R[cm]
0,025	200
0,04	125
0,05	100
0,08	62,5
0,1	50
0,2	25

5.1.3. Procedimentos do experimento

Os procedimentos para se realizar o acoplamento de fibras de cristais fotônicos através dos modos dos campos evanescentes são semelhantes às técnicas de acoplamento já desenvolvidas pela comunidade científica [28,29]. Entretanto, os procedimentos devem ser mais cuidadosos.

Primeiramente, deverão existir cuidados relativos ao polimento da região para acoplamento nas fibras. Devido a grande sensibilidade das fibras de cristais fotônicos, o polimento deve ser preciso. A Figura 5.6 mostra um corte transversal de uma fibra de cristais

fotônicos. É possível observar que a relação entre o raio do núcleo e o raio da fibra é pequena, da ordem de $1\mu\text{m}$ [61].

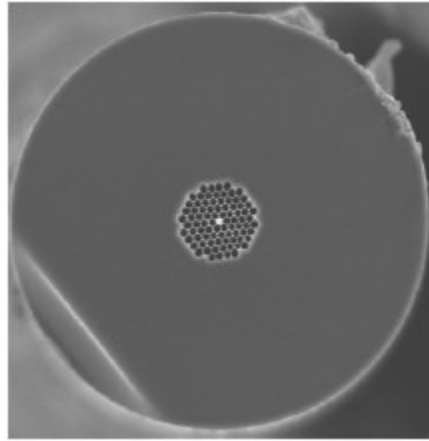


Figura 5.6 – Fibra de cristais fotônicos.

A Figura 5.7 apresenta a superfície da região de acoplamento com o polimento aplicado e a Figura 5.8 apresenta um corte transversal com as fibras polidas e acopladas. Através das ilustrações existentes nas patentes sobre acopladores direcionais, é possível observar que o polimento não deve atingir o núcleo da fibra, ou seja, uma sensível camada de casca deve ser preservada. Para diminuir o atrito entre os núcleos durante o experimento pode-se usar um líquido casador.

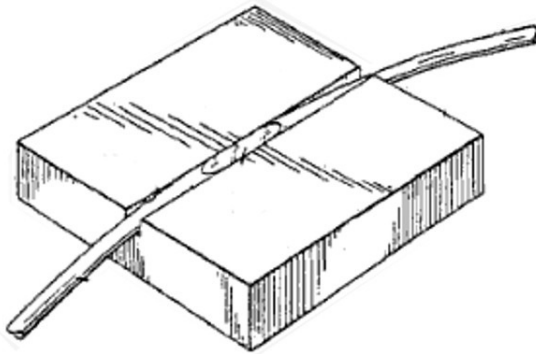


Figura 5.7 – Fibra óptica com polimento.

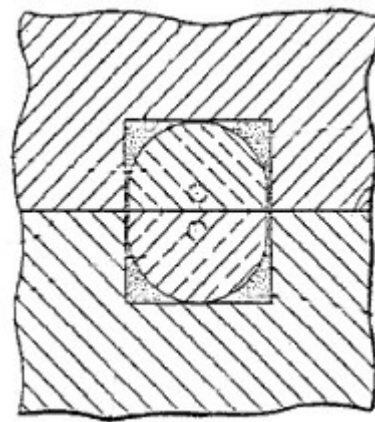


Figura 5.8 – Corte transversal com as fibras acopladas.

Depois do polimento e casamento dos núcleos, o próximo passo é realizar a calibração dos equipamentos. O programa de controle, através de operações programadas, auxiliará a calibração de cada equipamento de atuação e medição com configurações personalizadas ao experimento. Depois de calibrado, a próxima tarefa consiste em realizar as medições desejadas para cada posicionamento proposto.

A princípio, o experimento está projetado para trabalhar com medições de potência luminosa e analisar perdas por inserção e retroespalhamento. Para um maior conjunto de resultados, os modos de propagação podem ser analisados através de um medidor de espectro óptico.

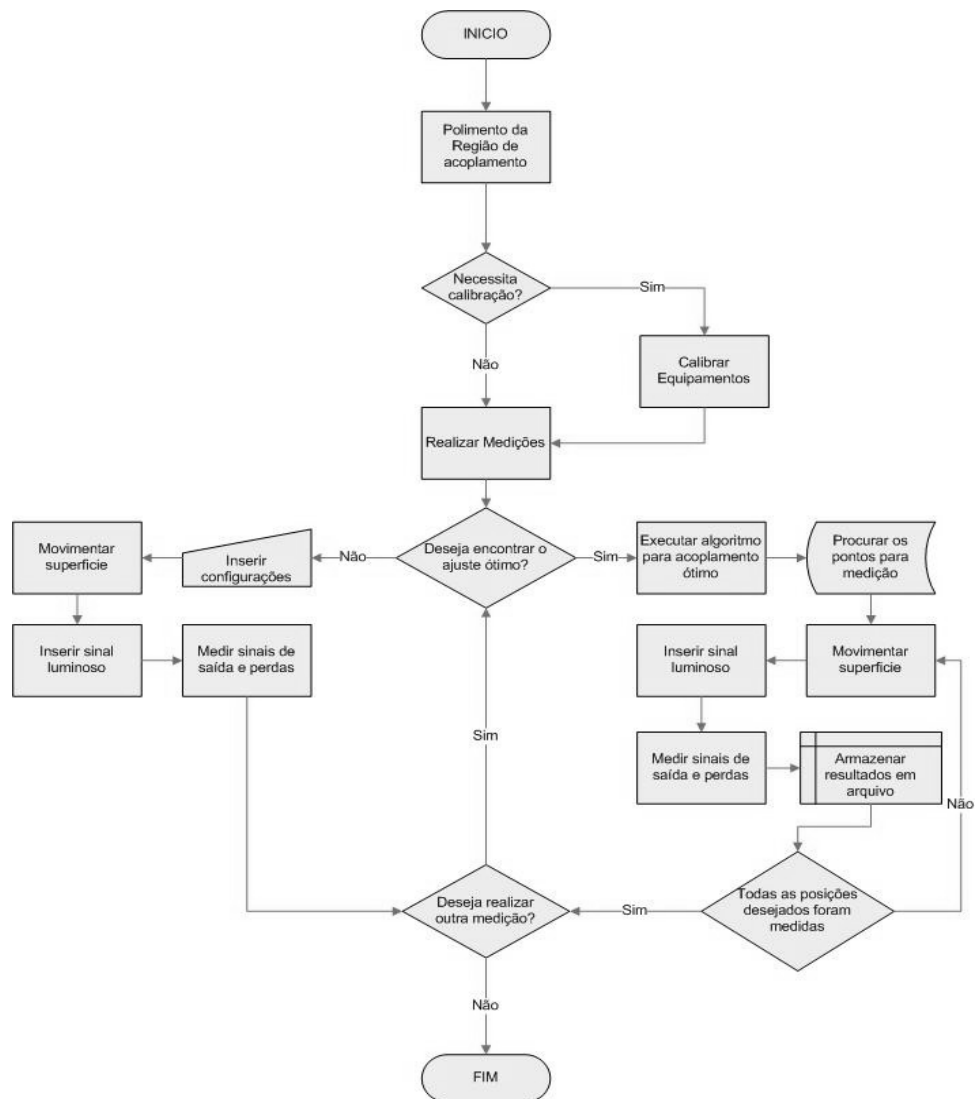


Figura 5.9 – Fluxograma de operações para o experimento com o acoplador direcional.

A Figura 5.9 apresenta o fluxograma de operações. Depois dos procedimentos de polimento e calibração, o programa de controle poderá realizar medições isoladas e, também, executar um algoritmo para tentar encontrar um acoplamento ótimo buscando obter a menor perda de sinal luminoso.

No caso das medições isoladas, o usuário deve inserir as regiões de acoplamento que deve escolher. Os resultados são retornados após o ajuste dos núcleos, modulação do sinal luminoso e medições de saída e perdas.

Na escolha da busca pelo acoplamento ótimo, o programa necessita de um arquivo de entrada com as regiões a serem analisadas. O algoritmo executa medições nas regiões inseridas e retorna todas as informações referentes ao melhor acomodamento entre os núcleos. Além disso, as medições do experimento e todos os posicionamentos percorridos podem ser armazenados em arquivo para futuras análises.

5.2. Experimento através de técnicas end-fire

As técnicas baseadas na micro-óptica, ou seja, com acoplamentos baseados em lentes, espelhos e outros componentes passivos, necessitam de ajustes finos para a propagação de sinal luminoso em uma fibra. Já existem no mercado equipamentos específicos para o acoplamento de luz em fibras do tipo monomodo [61,62]. Entretanto, são raros os dispositivos que auxiliem o acoplamento baseado em micro-óptica nas PCF.

Este experimento tem por objetivo fabricar um divisor de luz semelhante aos existentes, mas com configurações personalizadas para as PCF, além de aperfeiçoar os experimentos existentes no Laboratório de Comunicações Ópticas dos CePOF. A superfície de movimentação automatizada poderá colaborar no ajuste dos feixes de luz colimados para que os mesmos sejam propagados na fibra de maneira eficiente. A Figura 5.10 mostra um exemplo do experimento onde o posicionador micrométrico pode ser aplicado.

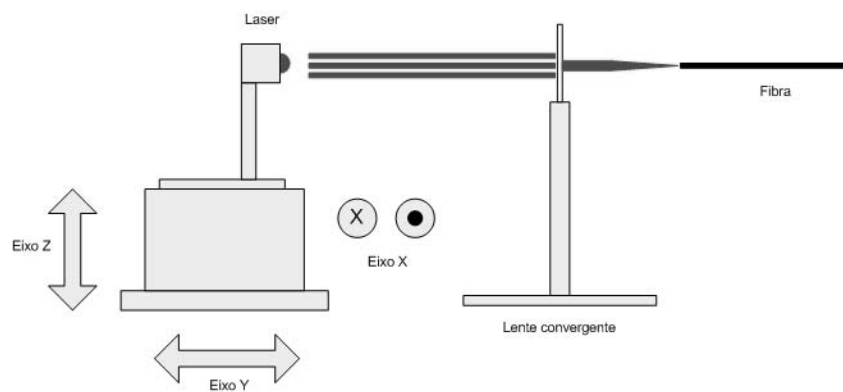


Figura 5.10 – Ilustração do experimento para auxílio em técnicas de *end-fire*.

6. Resultados obtidos e conclusões

A partir de todo desenvolvimento para verificar e validar os objetivos propostos é possível afirmar que os resultados obtidos são satisfatórios e atenderam a maioria das metas esperadas.

O desenvolvimento do posicionador micrométrico contribuiu com os conhecimentos relacionados à solução de automação e controle para experimentos e procedimentos existentes no Departamento de Microonda e Óptica (DMO) da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC). Os equipamentos foram desenvolvidos com ferramentas e componentes de baixo custo, além de utilizar métodos de desenvolvimento com foco educacional, ou seja, a contribuição deste trabalho também é voltada para a motivação de estudantes da área de computação e engenharia elétrica a desenvolver soluções personalizadas para aperfeiçoar os resultados. Vale ressaltar que este trabalho não foca o desenvolvimento de um produto para mercado, mas visa contribuir com a comunidade de ensino e pesquisa.

A porta paralela do computador foi escolhida como interface de comunicação entre o computador e o *hardware* de controle, devido à facilidade de operar os registradores e também possibilitar a utilização de computadores de laboratórios de ensino e pesquisa onde os recursos são escassos.

A utilização do ambiente de desenvolvimento LabVIEW colaborou na implementação da lógica de controle e interface do usuário final. Conforme estudado anteriormente, a ferramenta utiliza conceitos de programação em fluxo de dados, mais conhecido como programação em *dataflow*. A maneira de utilizar o ambiente familiariza os profissionais que não estão acostumados à ambientes de programação baseadas em códigos.

O uso dos motores de passo para controlar equipamentos de alta precisão é uma alternativa viável, mas está sujeita a algumas variações. Quanto mais precisão se pretende atingir utilizando micropassos, maiores são as possibilidades de interferências eletromagnéticas e vibrações provenientes das irregularidades da energia elétrica fornecida [63]. Existem alternativas de acionadores, tais como as células piezo-elétricas, onde a variação de tensão em sua estrutura resulta em um movimento mais preciso que os motores de passo. Entretanto, é uma solução que necessita de um maior investimento. A correção dos movimentos refinados através de métodos estatísticos pode colaborar para uma maior confiabilidade do equipamento [58,59].

Enfim, conclui-se que este trabalho colaborou com as atividades do grupo de pesquisa do Prof. Hugo Figueroa, assim como contribuiu para motivar estudantes a realizar estudos voltados para a automação de experimentos. Futuramente, os conhecimentos desenvolvidos podem ser aperfeiçoados e integrados com outras tecnologias que auxiliem outras aplicações. A produção de um programa que utilize o posicionador micrométrico juntamente com instrumentos de medição, pode colaborar com uma melhor obtenção de resultados. Além disso, células piezo-elétricas podem ser obtidas para refinar, ainda mais, a precisão dos movimentos do acionador. A implementação de ferramentas de interatividade a distância nestes experimentos pode ser eficiente para que laboratórios com recursos reduzidos possam utilizar ou visualizar os ensaios realizados.

Referências Bibliográficas

- [1] PRESSMAN, R.S., *Software Engineering: A Practitioner's Approach*, 5ª edição, McGraw Hill. 2002.
- [2] SOMMERVILLE, I., *Software Engineering*. 6ª edição, Addison-Wesley, 2001.
- [4] NIELSEN, P. M., LE GRICE, I. J., SMAILL, B. H., HUNTER P. J., *Mathematical model of geometry and fibrous structure of the heart* Department of Engineering Science, School of Engineering, University of Auckland, New Zealand, AJP - Heart and Circulatory Physiology, 1991.
- [5] BERNARDI, D. M., VERBRUGGE, M. W., *A Mathematical Model of the Solid-Polymer-Electrolyte Fuel Cell*, J. Electrochem. Soc., Volume 139, Issue 9, pp. 2477-2491, 1992.
- [6] KERN, R., HARGREAVES, J.B., WANG, J.F., CLELAND, D.J., *Modelo matemático de un cilindro acumulador de agua caliente estratificada para usar con calentador de agua caliente con bomba de calor*, Frío-calor y aire acondicionado, ISSN 0210-0665, N° 393, 2007, pags. 40-47.
- [7] SANTOS, C. H. S., FIGUEROA, H. E. H., *Computação paralela aplicada a problemas eletromagneticos utilizando o metodo FDTD*, Dissertação de mestrado apresentado a Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp, 2005.
- [8] KIKUCHI, T. KENJO, T., FUKUDA, S., *Developing an Educational Simulation Program for the PM Stepping Motor*, IEEE Transactions on Education, Vol. 45, 2002.
- [9] ALLEN, E., LaWhite, N., YOON, Y., CHAPMAN, J., ILIĆ, M., *Interactive Object-Oriented Simulation of Interconnected Power Systems Using SIMULINK*, IEEE Transactions on Education, Vol. 44, 2001.
- [10] HSUEH, Y., YANG, M., CHANG, H., *Three-Dimensional Noniterative Full-Vectorial Beam Propagation Method Based on the Alternating Direction Implicit Method*, Journal of Lightwave Technology of IEEE, Vol. 17, 1999.
- [11] HOLMEVIK, J. R., *Compiling SIMULA: A Historical Study of Technological Genesis*, IEEE Annals of the History of Computing, Vol 16., 1994.
- [12] CUNHA, M. C. C., *Métodos Numéricos*, Campinas, Editora da Unicamp, 2003.
- [13] PENCIER, I. B. *The History of the Laboratory Schools: The University of Chicago*, Quadrangle Books, 1967.
- [14] SARKOZI, L., *The effects of total laboratory automation on the management of a clinical chemistry laboratory*, Center for Clinical Laboratories, Department of Pathology, Mount Sinai Medical Center, Mount Sinai School of Medicine, New York, USA, 2002.

-
- [15] WHELAN, K. E. KING, R. D., Intelligent software for laboratory automation, Department of Computer Science, University of Wales, Aberystwyth, Penglais Campus, Aberystwyth, Ceredigion, UK, 2004.
- [16] BELLMUNT, O.G. MIRACLE, D.M. ARELLANO, S.G. SUMPER, A. ANDREU, A.S., *A distance PLC programming course employing a remote laboratory based on a flexible manufacturing cell*, IEEE Transactions on Education, Vol. 49, Issue 2, pg. 278-284, 2006.
- [17] PARK, M., KANG, B., JIN, S.J. LUO, S., *Computer aided diagnosis system of medical images using incremental learning method*, Communication and Information Technology, Faculty of Science and Information Technology, The University of Newcastle, Australia, 2008.
- [18] PAKHOMOV, S. V. S., BUNTROCK, J. D., CHUTE, C. G., *Automating the Assignment of Diagnosis Codes to Patient Encounters Using Example-based and Machine Learning Techniques*, Elsevier, 2006.
- [19] BORGES, M. A. SALLES, M. T., Programa de análise de produtos do INMETRO: Impacto na qualidade da indústria Nacional, Revista Produção Online, Vol. 8, Numero 2, 2008.
- [20] KISHIMOTO, E.T., MORAES, J.C.T.B., Melhoria de Qualidade e Produtividade Através de um Sistema Informatizado em um Laboratório de Ensaios, IFMBE Proceedings, 2008.
- [21] SUGIMOTO, Y., NAKAMURA, H., TANAKA, Y., IKEDA, N., ASAKAWA, K., INOUE K., *High-precision optical interference in Mach-Zehnder-type photonic crystal waveguide*, Optics Express, Vol. 13, Issue 1, pp. 96-105, 2005.
- [22] PIRES, G. P., TAGIAFERRI, A. A., THAUMATURGO C., Interferometria Óptica Para Ensaios Não Destrutivos, Revista Matéria, Rio de Janeiro, 2006.
- [23] GAO, G. R., BIC L., GAUDIOT, J., *Advanced Topics in Dataflow Computing and Multithreading*, IEEE Computer Society Press, 1995.
- [24] KAULER, B., *Windows Assembly Language & Systems Programming: 16- and 32-bit Low-level Programming for the PC and Windows*, Focal Press, 1997.
- [25] GIOZZA, W. F., CONFORTI, E., WALDMAN, H., Fibras Ópticas – Tecnologia e Projeto de Sistemas, Rio de Janeiro, EMBRATEL; São Paulo, Makron Books, McGraw-Hill, 1991.
- [26] AGRAWAL, G. P., *Fiber-Optic Communication Systems*, 3ª edição, Widley-Interscience, 2002.
- [27] YEB, C., BROWN, W. P., *On Multimode Optical Fiber Couplers*, IEEE AP-Session, 1978.

-
- [28] DIGONNET, M. J. F., SHAW, H. J., *Analysis of a Tunable Single Mode Optical Fiber Coupler*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-30, 1982.
- [29] SHAW, H.J. et al, *Method of manufacturing a fiber optic directional coupler*, Patente registrada nos Estados Unidos 4,536,058, 1985.
- [30] NanoMax TS 3-Axis Flexure Stage, Thorlabs Inc., 2004.
- [31] The Power Behind the DRV Actuators, Thorlabs Inc, 2004.
- [32] AXCELSION, J., Parallel Port Complete, Lakeview Research, 1996.
- [33] CALIXTO, G. M., ARNOLD, F. J., FIGUEROA, H. E. H., Automação inteligente de dispositivos através de técnicas de interfaceamento, Trabalho de Graduação Interdisciplinar apresentado ao Centro Superior de Educação Tecnológica da UNICAMP, 2004.
- [34] CALIXTO, G. M., ARNOLD, F. J., Técnica de demultiplexação do registrador de dados da porta paralela, III Workshop do Centro Superior de Educação Tecnológica da Unicamp, Limeira, 2004.
- [35] CALIXTO, G. M., ARNOLD, F. J., Simulação de uma casa inteligente, XII Congresso Interno de Iniciação Científica da UNICAMP, Campinas, 2004.
- [36] CALIXTO, G. M., ARNOLD, F. J., Controle de dispositivos de uma casa inteligente, 12º Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP, São Paulo, 2004.
- [37] *MS9710B Optical Spectrum Analyzer Operation Manual*, 14a Edição, Anritsu, 2007.
- [38] *Datasheet - Optical Power Meter ML9001A*, Encontrado na URL <http://www.eu.anritsu.com/products/default.php?p=41&model=ML9001A>, 10 de Julho de 2008, 14h30min.
- [39] *GPIO-USB-HS Installation Guide*, National Instruments, 2008.
- [40] *Stepper Motor Basics*, Industrial Circuits Application Note, The BEAM Reference Library, 2008.
- [41] ACARNLEY, P. P., *Stepping Motors: A Guide to Theory and Practice*, IET, 2002.
- [42] *LMD18245 - 3A, 55V DMOS Full-Bridge Motor Driver*, National Semiconductors, 2006.
- [43] TRAVIS, J., *LabVIEW for Everyone*, Prentice Hall, 2002.
- [44] MIHURA, B., *LabVIEW for Data Acquisition*, Prentice Hall, 2001.
- [45] VENTO, J. A., Application of LabVIEW in Higher Education Laboratories, 1998 IEEE Frontiers in Education Conference Proceedings, pg. 444-447.
-

-
- [46] STEGAWSKI, J. A., SCHAUMANN, R., A New Virtual-Instrumentation-Based Experimenting Environment for Undergraduate Laboratories with Application in Research and Manufacturing, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, pg. 1418-1421, 1997.
- [47] POEDESTÀ, L., Hypertext and Virtual Instrumentation for Practical Electrical Measurements Exercises, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, pg. 1432-1434, 1997.
- [48] SHAHEEN, M., Remote Laboratory Experimentation, Proceedings of the American Control Conference, IEEE, pg. 1326-1329, 1998.
- [49] ETXEBARRIA, A., et al., Power Electronics and Basic Electronics Real Experiments through the World Wide Web, IEEE Frontiers in Education Conference Proceedings, pg. 11, 2001.
- [50] SHAHEEN, M., Remote Laboratory Experimentation, Proceedings of the American Control Conference, IEEE, pg. 1326-1329, 1998.
- [51] O'BRIEN, E. M., et al., Measurement of Thermocouple Time Constants Using LabVIEW as Part of an Engineering Recruiting Weekend for High School Seniors, IEEE, pg. 246-248, 2001.
- [52] STRANDMAN, J.O., et al., LAB-on-WEB: Performing Device Characterization via Internet using modern Web Technology, Fourth IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems, pg. 1-6, 2002.
- [53] HENRY, J., Virtual Attendance in Real Engineering Labs, IEEE, pg. 61-65, 2002.
- [54] ARSALAN, Q.H., et al., Application of Virtual Instrumentation in a Power Engineering Laboratory, IEEE, pg. 675-678, 2002.
- [55] SALAM, A. O. A., et al., Multimedia Methods for Web-based Engineering Labs, 4th EURASIP Conference, pg. 759-764, 2002.
- [56] VENTURA, J., NI ELVIS has Entered the Lab, IEEE, pg. 670-678, 2005.
- [57] *UC3717 and L-C Filter Reduce EMI and Chopping Losses in Step Motor*, Unitrode Application Note, 1999, Texas Instruments.
- [58] *Backlash compensation*, United States Patent 4042869, encontrado na URL <http://www.freepatentsonline.com/4042869.html> em 6 de janeiro de 2009, 01h40min.
- [59] *Backlash correction apparatus and method of numerical controller*, United States Patent 5767645, encontrado na URL <http://www.freepatentsonline.com/4042869.html> em 6 de janeiro de 2009, 01h40min.
-

-
- [60] GONZÁLES, R. E. R., FIGUEROA, H. E. H., “Técnicas Eficientes para a Caracterização Experimental e Computacional de Fibras de Cristais Fotônicos”, tese de doutorado em andamento financiada pelo CNPq.
- [61] Highly nonlinear PCF, Blaze Photonics Catalog, 2007.
- [62] HSU, H. P., MILTON, H. F., Flip-chip approach to endfire coupling between single-mode optical fibres and channel waveguides, IEEE Electronics Letters, Volume 12, Issue 16, pg 404-405, 1976.
- [63] *3-Axis Piezo Block*, Thorlabs, Encontrado na URL <http://www.thorlabs.com> em 2 de dezembro de 2008, 12h23min.