ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Italo Ataide
Notaro E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 31/05/95.
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Desenvolvimento de Sistema Topográfico a Laser

Autor: **Italo Ataide Notaro**
Orientador: **Carlos Amadeu Pallerosi**
Co-orientador: **Elnatan C. Ferreira**

N843d
35731/BC

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO

Desenvolvimento de Sistema Topográfico a Laser

Autor: **Italo Ataide Notaro**
Orientador: **Carlos Amadeu Pallerosi**
Co-orientador: **Elnatan Chagas Ferreira**

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Projeto Mecânico

Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas maio de 1995
SP - Brasil

UNIC
BIBLIOTECA

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

Notaro, Italo Ataide
N844d Desenvolvimento de sistema topográfico a laser /
Italo Ataide Notaro - Campinas, SP: 80p, 1995.

Orientador: Carlos Amadeu Pallerosi.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Agrimensura. 2. *Topografia a laser. I. Pallerosi,
Carlos Amadeu. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

UNIDADE BC
NºCHAMADA:
T/UNICAMP
N844d
V. Ex.
TOMBO BC/35731
PROC. 395/98
C D X
PREÇO R$ 11,00
DATA 05/11/98
Nº CPD

CM-00118042-6

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO

TESE DE DOUTORADO

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA TOPOGRÁFICO A LASER APLICADO À AGRICULTURA

Aprovada por :

Prof. Dr. Carlos Amadeu Pallerosi

Prof. Dr. Luiz Roberto Lopes

Prof. Dr. Walter Politano

Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabro

Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini

A memória de meu pai José Notaro;
A minha mãe Vanila;
A minha Esposa Juçara e meus filhos Aline,
Thiago e Breno;
Aos meus sogros Arnaldo Gibson e Lourdes.

Agradecimentos

- Ao Prof.Dr. Carlos Amadeu Pallerosi que além de orientador sempre apoiou e soube, ser amigo;
- Ao Prof.Dr. Elnatan Chagas Ferreira orientador de toda parte eletrônica, uma participação inigualável;
- Ao Departamento de Engenharia Agrícola(DEAg)/CCT/UFPb pela oportunidade oferecida para realizar esse Doutorado;
- À CAPES e ao CNPQ pelo apoio financeiro;
- Ao Departamento de Projeto Mecânico(DPM)/FEM/UNICAMP, por todas as facilidades colocadas à disposição;
- Ao Prof. Carlos Fernandes e usa esposa Mosma pelo grande apoio e amizade;
- Aos Profs. Dr. Carlos Minor e Dr. José Geraldo Aires pelo apoio e amizade;
- Aos Profs. Acires Dias e Ruy Casão por sua amizade, companheirismo e disposição em colaborar;
- Aos amigos Profs.: Dr.João Plaza, Dr.Hans R. Gheyi, Manassés, Bernadino, Dr. José A. Portella, Leopoldo Rosas, Paulo Leal, Mário Ynoue, Ruiz, Assis e David pela colaboração e amizade demonstrada;
- À Aldaniza G. Morais e o apoio de todos os amigos que fazem o DEAg;
- Aos Profs. Dr. Fausto Rodrigues e Auteliano Santos por terem colocado a disposição o laboratório ferroviário;
- À Jonatas por sua eficiência na execução dos circuitos eletrônicos;
- Ao Sr Luiz Morelli por suas habilidades na mecânica;
- Aos amigos Almiro (Miro) e Fernamdo Pinelli pelas valiosas colaborações, principalmente no início deste trabalho ;
- Ao amigo e procurador José Maria Vergueiro Costa;
- Aos Amigos Adolfo, Beth e Fred pelo grande apoio e sincera amizade;
- Aos amigos Roberto Gandara, Carlson, Marcelo Pierossi, Rosangela, Belquis, Chico, Rodnei, Henrique, Nelson, Geraldo, Ferreira, Ely, Raquel, Luzia, Claudete e Alexandre pelo companheirismo demonstrado nestes anos;
- À acadêmica Leônia Leão pela revisão do texto;
- À minha esposa, meus filhos e familiares pelo inestimável apoio.

Lista de Figuras

2.1 Intensidade espectral do laser em relação a outras fontes de luz [26]. 4

2.2 Arranjo das emissões estimuladas ao longo do eixo da barra laser [26]. 4

2.3 Cavidade ótica [26]. 5

2.4 Laser a gás HeNe [20]. 6

2.5 Laser de diodo "AsGa" [20]. 7

2.6 Uso de lente convergente para colimar o laser. 8

2.7 Expansor de laser. 9

3.1 Funcionamento do sistema compensador ótico [13]. 12

3.2 O Sistema Laserplane [27]. 13

3.3 O Funcionamento do sistema LSS [16]. 14

3.4 Vista do sistema receptor do LSS [16]. 15

3.5 Mecanismo do LSS para projeção do laser [16]. 16

3.6 Prisma e transmissões do LSST [16]. 16

3.7 Nível fotoelétrico laser [14]. 17

3.8 O nível laser Ni-OO7 [14]. 18

3.9 Arranjo dos sensores fotoelétricos do detector de centro integrado, e correspondente circuito elétrico [05]. 20

3.10 Detector integrado tipo *Scanning* [05]. 21

3.11 Mira de centragem integrada [14]. 21

3.12 Diagrama de bloco para integração das dezesseis fotocélulas da mira de centragem integrada [05]. 22

3.13 Detector diferencial *Zeroing* [14]. 23

3.14 Diagrama de bloco do detector de centro auto- alinhado [05]. . . 24

3.15 Protótipo do detector de centro auto- alinhado [04]. 27

3.16 Malha do detector quadrante com eixos a 45° em relação ao contorno da célula [27]. 29
3.17 Malha do detector, com ponte de resistores [27]. 30

4.1 Princípio de medida utilizado nos EDM [12]. 32
4.2 Exemplo de valores de fase de onda [12]. 33
4.3 Visualização da onda viajando entre as estações [12]. 34

5.1 Componentes do mecanismo emissor. 37
5.2 Pentaprisma e reflexões nas suas faces. 38
5.3 Conjunto montado do sistema emissor desenvolvido. 39
5.4 Protótipo do sistema emissor laser construido. 40
5.5 Laser de diodo utilizado. 40
5.6 Circuito eletrônico para controle da operação do laser de diodo. 41
5.7 Componentes do nível construido. 42
5.8 Protótipo do nível desenvolvido. 43
5.9 Diagrama de blocos da parte eletrônica do nível eletromecânico. 43
5.10 Sistema sinalizador do nível eletromecânico 45
5.11 Sistema detector e de identificação do desnível. 45
5.12 Mecanismo de funcionamento do sensor. 46
5.13 Representação do acionamento de várias células sensoras. 46
5.14 Diagrama de bloco para determinação do desnível. 47
5.15 Ilustração do bloco *Reset*. 47
5.16 Desenho esquemático do princípio de medição da distância. . . . 48
5.17 Protótipo do detector desenvolvido. 50

6.1 Detalhe do posicionamento dos marcos de nível de referência. . . 52
6.2 Ilustração do procedimento de coleta das medidas de desnível. . 53
6.3 Gráfico dos desníveis médios em relação à distância de referência para cada uma das medições. 55
6.4 Gráfico da dispersão do erro do desnível em relação à distância para a primeira análise de regressão. 60
6.5 Ilustração da inclinação entre o plano horizontal e o plano gerado pelo sistema emissor. 60
6.6 Gráfico da dispersão do erro do desnível em relação à distância para a segunda análise de regressão. 63

7.1 Gráfico da dispersão do erro da distância estimada em relação à distância de referência. 68

7.2 Gráfico da dispersão do erro da distância estimada pela E.G.D. em relação ao tempo Δt. 73

Lista de Tabelas

5.1 Principais características do laser de diodo. 41

6.1 Valores referentes ao posicionamento dos marcos. 52
6.2 Valores da diferença de nível (ΔH) rearranjados em seqüência. . 54
6.3 Desvio padrão amostral do erro de nível $\sigma(\Delta H)$ em relação à distância de referência. 56
6.4 Resultados da primeira análise de regressão. 56
6.5 Valores calculados a partir da primeira análise de regressão. . . 59
6.6 Resultados da segunda análise de regressão. 62
6.7 Valores calculados a partir da segunda análise de regressão. . . . 62
6.8 Valores originais para os desníveis estimados e seus mínimos e máximos. 63

7.1 Valor médio do tempo Δt a partir de 50 medições para cada distância de referência com três repetições. 66
7.2 Valor médio da distância calculada LM1 a partir dos tempos Δt para cada distância de referência com três repetições. 66
7.3 Resultados da análise de regressão entre as distâncias calculadas e de referência. 67
7.4 Valores calculados a partir da análise de regressão entre as distânsias calculadas e de referência. 68
7.5 Resultados da análise dos dados dos tempos e distâncias de referência feita pelo PLOTRAX. 70
7.6 Resultados da aplicação dos logaritmos neperianos às médias dos tempos Δt e às distâncias de referências (LM). 71
7.7 Resultados da análise de regressão para as medidas do ln do tempo e da distância. 71
7.8 Valores calculados pela E.G.D. para a distância estimada, o raio do intervalo de confiança e os valores máximos e mínimos para a distância. 72

7.9 Valores corrigidos para a distância estimada, calculadas pela E.G.D., o tempo Δt e os valores máximos e mínimos para à distância. 73

Resumo

NOTARO, Italo Ataide, *Desenvolvimento de sistema topográfico a laser*, Campinas, : Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1995. 80p . Tese (Doutorado).

O principal objetivo deste estudo consistiu no desenvolvimento de nova metodologia para nivelamento e medida de distâncias, por meio de emissores rotativos laser e detectores eletrônicos. O feixe laser rotativo gera um plano horizontal em torno do eixo vertical de rotação, e os sensores eletrônicos detectam o desnível (cota) em relação ao plano gerado. Um nível eletromecânico, de nova concepção, posiciona o eixo vertical do emissor com excelente precisão e rapidez, superior aos níveis convencionais. O novo sistema detector permite a medida da distância por comparação direta do tempo decorrido pelo feixe laser entre dois sensores consecutivos no detector, posicionados a uma distância conhecida. Os circuitos eletrônicos, de concepção original, permitem excelente controle do sistema e são alimentados por bateria de pequena potência. As medidas de desníveis e distâncias são independentes da incidência de raios solares e da divergência natural do laser. Os resultados experimentais obtidos foram avaliados quantitativamente, e a metodologia proposta considerada promissora.

Palavras Chaves

Agimensura, Topográfia a laser

Abstract

NOTARO, Italo Ataide, *Desenvolvimento de sistema topográfico a laser,* Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1995. 80p . Tese (Doutorado).

The principal objective of this study consisted of the development of a new methodology for leveling and distance measurement by means of rotating laser emitters and eletronic detectors. The rotating laser beam moves on a horizontal plane around a vertical axis of rotation and the electronic sensors detect the level difference in relation to the covered plane. A conceptually new electromecanical level positions the vertical emitter axis with excellent precision and speed, superior to conventional levels. The new detecting system permits the measurement of distance by direct comparison of lapsed time between two consecutive sensors of the detector separated by a known distance. The electronic circuits are of original conception, permit excellent system control, and are powered by low-power batteries. The measurement of level difference and distance are independent of solar ray incidence and laser beam divergence. The obtained experimental results were evaluated quantitatively and the proposed methodology considered promising.

Key Words

-Agrimensura, Topography the laser

Conteúdo

1 Introdução 1

1.1 A situação atual 1

1.2 A nova metodologia proposta 2

2 Fatores que influenciam no projeto do sistema a laser 3

2.1 Características do laser 3

2.1.1 Pureza espectral 3

2.1.2 Divergência angular 5

2.1.3 Intensidade de potência 5

2.2 Principais tipos de laser 6

2.2.1 Laser de estado sólido 6

2.2.2 Laser a gás 7

2.2.3 Laser de semicondutor 7

2.3 Óticas para o laser 8

2.4 Sistemas de nivelamento usados nos equipamentos a laser 10

2.5 Precisão requerida 10

2.5.1 Precisão dos instrumentos de medida 10

2.6 Alcance 11

3 Sistemas de alinhamento e nivelamento 11

3.1 Níveis automáticos 11

3.2 Sistemas a laser 11

3.2.1 Sistema Laserplane 13

3.2.2 Sistema LSS 17

3.2.3 Nível fotoelétrico laser 18

3.2.4 Nível laser Ni-OO7 18

3.3 Detectores do centro de energia do laser 19
3.3.1 Detectores de centro integrado 19
3.3.2 Detector de centro auto-alinhado 23
3.3.3 Cálculo do centro de energia 26

4 Medição eletrônica de distância **31**
4.1 Histórico 31
4.2 Princípio de medida utilizado nos EDMs 32
4.3 Outros sistemas para medição de distâncias 35

5 Sistemas desenvolvidos **37**
5.1 O Sistema emissor 37
5.1.1 Tipo de laser utilizado 38
5.2 Nível eletromecânico de precisão 41
5.3 Sistema detector 44
5.3.1 Sistema detector do laser 46
5.3.2 Sistema detector do desnível 46
5.3.3 Sistema medidor da distância 48

6 Medições de desníveis **51**
6.1 Metodologia empregada 51
6.1.1 Procedimentos de coleta dos dados 51
6.2 Processamento dos resultados 53
6.2.1 Avaliação da primeira análise regressão 55
6.2.2 Avaliação da segunda análise de regressão 61
6.3 Conclusão 64

7 Avaliação da metodologia desenvolvida para medições de distâncias 65
7.1 Metodologia empregada 65
7.1.1 Procedimento de coleta dos dados. 65
7.2 Processamento dos resultados 66
7.2.1 Avaliação da análise de regressão 67
7.3 Determinação da Equação Geral para Me-dições de Distâncias . 69
7.3.1 Avaliação da E.G.D. 69

7.3.2 Generalização da E.G.D. 72

8 Conclusões 75

9 Sugestões para futuros trabalhos 77

Simbologia utilizada

- A = Área das placas condutoras;
- A/h = Amperes por hora;
- a_o = Coeficiente linear;
- a_1 = Coeficiente angular;
- C = Capacitância;
- c = Velocidade da luz;
- DC = Circuíto oscilador;
- dx = Precisão requerida na centralização;
- dA = Área diferencial;
- ds = Precisão da sensibilidade dos fotosensores;
- D_1 = Denomidador;
- D = Diâmetro;
- $\overline{E}$ = Intensidade média de luz;
- e, e_2, e^* = Voltagem;
- E_i = Centroíde de energia do Laser;
- E(y) = Raio do intervalo de confiança;
- E_o, E_1, E_2, E_3, E_4 = Energia incidente;
- F = Farad;
- f = Frequência;

- HS = Altura entre a primeira célula sensora do detector e o solo;
- HD = Distância entre o solo e o ponto de incidência do feixe Laser no detector;
- HL = Altura do feixe Laser na saída do emissor;
- HM = Altura do marco de referência;
- I = Intensidade da luz;
- K = Constante dielétrica;
- L = Distância entre duas estações de medição;
- l = Distância entre dois sensores das células sensoras do sistema detector;
- L_i = Distância entre as placas do capacitor;
- LM = Distância entre o sistema emissor e os marcos (Distância de Referência);
- LM_e = Distância estimada pela equação 2.1;
- LM'_e = Distância estimada pela equação 2.5;
- $LM_{e'}$ = Valor corrigido (e^x) para a distância LM'_e;
- LM' = Logaritmo neperiano da distância de referência;
- LM1 = Distância calculada através do período T e do tempo Δt;
- L_o = Distância entre dois pontos de identificação do ciclo de uma onda;
- n = Número de sensores fotoelétricos;
- N_1 = Numerador;
- OP_1, OP_2, OP_3, OP_4 = Amplificador operacional;
- pF = Picofarads;

- P_r = Probabilidade de integração do circuito integrador;
- P = Ponto focal;
- RC = Circuito Integrador;
- R = Raio do ponto Laser;
- RF = Região de rádio-frequência;
- $R_1, R_2, R_3, R_4, R'_1, R'_2, R'_3, R'_4$ = Potenciômetros;
- S_{xx} = Variância;
- S_ϵ = Desvio padrão do erro;
- s = Segundos;
- S = Sensitividade dos fotosensores;
- $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$ = Sensores;
- T = Período de tempo;
- T_o = Período relativo ao comprimento de onda;
- TEM_{oo} = Distribuição gaussiana da intensidade;
- t_o = Intervalo de tempo;
- $t\nu$ = Fator de distribuição $t - student$;
- V = Velocidade linear;
- $V_{xy}, V_{ac}, V_{bc}, V_{ab}, V_{a'b'}$ = Voltagem entre os pontos;
- w = Velocidade angular;
- W = Diferença da intensidade em relação ao centro do Laser;
- $\overline{x}$ = Valor médio da variável;
- x, x_i, x_o = Coordenadas cartezianas;

- y, y_i, y_o = Coordenadas cartezianas;
- Δt = Tempo que o Laser leva para passar entre dois sensores da célula do sistema detector;
- $\Delta H_{(c)}$ = Desnível estimado;
- ΔH = Erro da diferença de nível;
- ΔH_i = Logaritmo neperiano do erro da diferença de nível;
- Δx = Média do desvio;
- $\Delta \lambda$ = Fração de um dado comprimento de onda;
- ΔE = Diferença de energia;
- σa_i = Desvio padrão dos coeficientes;
- $\sigma(\Delta H)$ = Desvio padrão amostral dos erros dos desníveis;
- γ = Ângulo de inclinação da reta que representa o erro do desnível;
- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ = Erro acidental das medidas de distâncias utilizando réguas, trenas de aço e correntes;
- ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 = Fase da onda;
- ξ , η = Eixos de medições da diferença de energia;
- βL = Erros constante das medidas de distâncias utilizando réguas, trenas de aço e correntes;
- ν = Graus de liberdade;

Capítulo 1

Introdução

1.1 A situação atual

O conhecimento detalhado da topografia do terreno é de fundamental importância para a agricultura moderna, onde técnicas conservacionistas devem ser incorporadas e novas formas de cultivo implementadas. Modernizando-se a agricultura e, conseqüentemente, aumentando-se a produção agrícola, sem comprometimento das condições produtivas do solo.

Os sistemas atualmente disponíveis para a execução dos levantamentos topográficos geralmente são muito dispendiosos, demorados ou imprecisos, devido principalmente à qualidade dos equipamentos situar-se em extremos (rudimentares ou muito sofisticados) serem de custo elevado e necessitarem de mão-de-obra especializada. Além disso, nos levantamentos topográficos deve haver estreita correlação entre as medidas de ângulo e de distância que devem ter o mesmo grau de precisão.

Os avanços tecnológicos implementados aos teodolitos, aumentaram a precisão das leituras apenas nas medidas de ângulo. Isso foi conseguido através do aprimoramento dos recursos óticos de leitura do *vernier*. Porém, os recursos óticos disponíveis não foram suficientes para aprimorar as medidas de distância, pois é necessário a ampliação ótica para possibilitar a visualização do traço horizontal na mira ou régua graduada, onde há perda na precisão, devido a esse traço aumentar excessivamente de espessura. Isso dificulta a comparação quando da sobreposição das linhas dos retículos para que as medidas sejam efetuadas. Com esse sistema convencional é quase impossível a leitura com precisão de milímetros, a distâncias maiores que cem metros.

A fórmula encontrada para resolver esse problema foi a utilização dos EDM (medidores eletrônicos de distância) mais conhecidos como distanciômetros, acoplados aos teodolitos óticos. Assim, mais um equipamento foi adicionado ao sistema de levantamento topográfico, encarecendo os serviços.

A possibilidade de mudança desse quadro ocorreu com a descoberta do LASER *(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)* por volta

de 1960, e sua conseqüente utilização nos equipamentos de nivelamento, principalmente a partir de 1971. Essa possibilidade foi devido principalmente à geração de uma linha de referência estável e claramente visível, e ainda por gerar planos horizontais, verticais ou inclinados. Suas aplicações em instrumentos topográficos concentraram-se em dois sistemas: o de nivelamento e o de medida de distância (distanciômetros). Essas duas aplicações diferem-se principalmente pelas características do tipo de laser utilizado. Os sistemas de nivelamento utilizam os laser de baixa divergência (geralmente laser visível) enquanto os distanciômetros, devido às características de seu funcionamento, usam laser de grande divergência. Portanto, cada equipamento limita-se a executar apenas uma única operação, dependendo do tipo de laser utilizado.

1.2 A nova metodologia proposta

Os principais objetivos da pesquisa efetuada foram:

- Desenvolvimento de um novo sistema de medição de distância, utilizando-se o mesmo tipo de laser aplicado em sistemas de nivelamento, possibilitando-o de ser utilizado em levantamentos topográficos, barateando os custos e aumentando a confiabilidade do processo;
- Desenvolvimento de novo tipo de nível eletromecânico, tipo capacitivo que permita a redução do tempo de ajuste e apresente excelente precisão;
- Desenvolvimento de um sistema de emissão do laser com características próprias e com tecnologia nacional.

Essas novas metodologias permitirão também novas aplicações, principalmente nas técnicas de implantação de culturas irrigadas em curvas de nível, nivelamento do solo, além de guiar máquinas agrícolas no campo.

As naturais limitações na construção de um protótipo foram devido às atuais dificuldades de obtenção de recursos financeiros, à falta de laboratórios específicos e à importação de equipamentos. No capítulo seis e sete dessa publicação serão apresentados os principais resultados obtidos e no capítulo nove as sugestões para os futuros desenvolvimentos.

Capítulo 2

Fatores que influenciam no projeto do sistema a laser

Os fatores que influenciam no projeto de um sistema de medição topográfico, utilizando o laser são: suas características, tipos de laser disponíveis, sub-sistemas envolvidos, além da precisão e alcance necessários.

2.1 Características do laser

De acordo com WILSON & HAWKES [28] a principal característica do laser é o tipo de luz que produz, sendo única e completamente diferente de outras fontes convencionais. As principais propriedades que o distingue para aplicações em sistemas para levantamento topográfico são sua pureza espectral, baixa divergência angular e alta intensidade de potência.

2.1.1 Pureza espectral

O laser produz luz altamente monocromática e tem largura espectral muito menor que outras fontes de luz. Como mostrado na figura 2.1, uma fonte incandescente de luz tem saída, cobrindo uma grande banda de comprimentos de onda, enquanto que o laser tem largura de banda muito estreita.

2.1.2 Divergência angular

Do ponto de vista topográfico, uma das mais importantes características do laser é sua baixa divergência angular. Em uma fonte convencional a luz é emitida em todas as direções, dificultando a produção de feixes paralelos. Isso resulta, segundo VERDEYEN [29] que a intensidade de luz decresce em proporção ao quadrado da distância. O laser, entretanto, tem divergência baixa, pois o acúmulo de emissões estimuladas ocorre apenas ao longo da barra Laser,

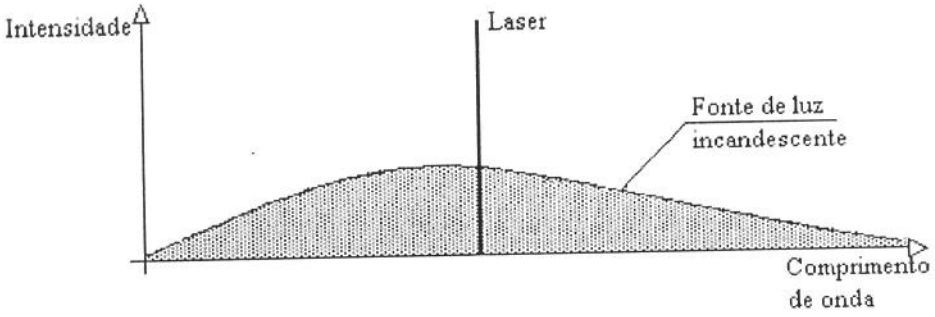

Figura 2.1: Intensidade espectral do laser em relação a outras fontes de luz [26].

onde os espelhos da cavidade ótica estão alinhados de maneira que apenas luz muito próxima ao eixo do laser se concentra. Como conseqüência parte desta irradiação emerge por um dos lados da cavidade ótica, produzindo feixes paralelos. As figuras 2.2 e 2.3 ilustram este processo. A baixa divergência do laser é, conseqüentemente estabelecida pelo processo e não pelos componentes externos. O que é uma grande vantagem sobre outras fontes de luz. Valores típicos para a divergência de um laser são medidas em miliradianos. Por exemplo: se um Laser tem divergência de 1 mrad, a 10 m o laser terá um diâmetro de 10 mm, e em 100 m o diâmetro será 100 mm.

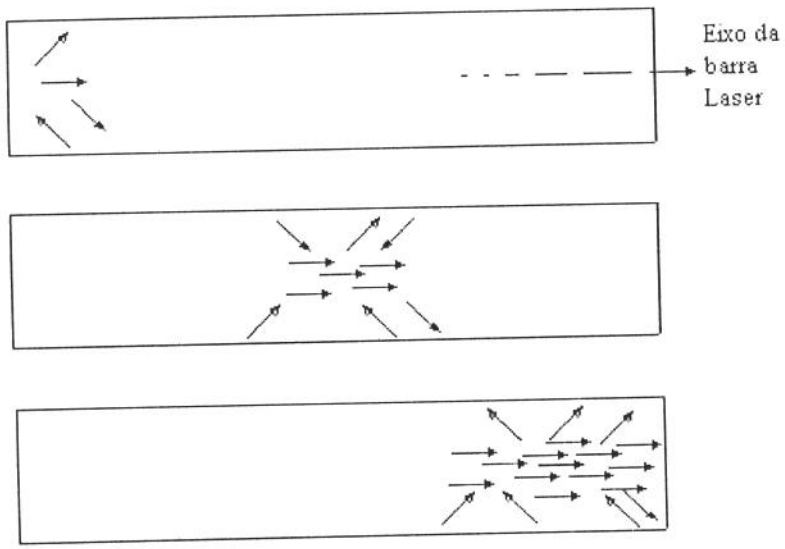

Figura 2.2: Arranjo das emissões estimuladas ao longo do eixo da barra laser [26].

A divergência pode ser reduzida pela expansão e colimação do laser. À medida em que o laser se propaga, converge a um diâmetro mínimo, relativamente próximo à saída do laser chamado de cintura, e a partir desse ponto, se

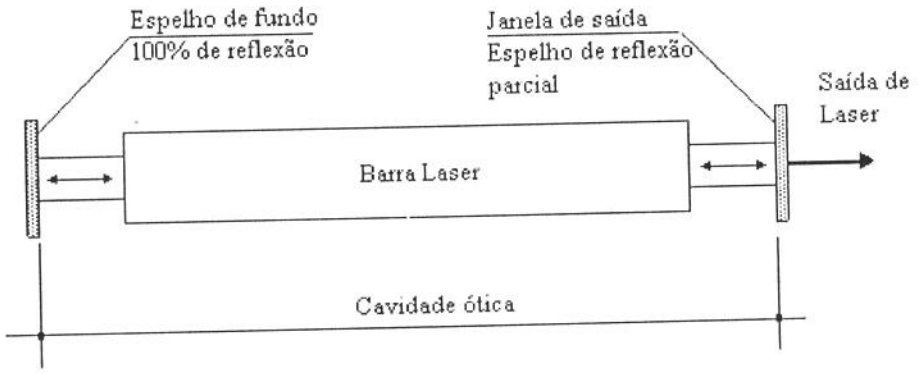

Figura 2.3: Cavidade ótica [26].

expande simetricamente. Segundo VERDEYEN [29] a divergência angular é inversamente proporcional à cintura. Logo, usando- se óticas de expansão para aumentar o tamanho da cintura, consegue-se divergência mais baixa.

Sua baixa divergência e alta intensidade, capacita-o a ser transmitido como feixe de luz estreito, através de grandes distâncias. Isto é muito útil nos instrumentos laser de alinhamento e de nivelamento topográfico, principalmente pelo fato da detecção precisa do centro do laser até distâncias de centenas de metros, ser necessário.

2.1.3 Intensidade de potência

Comparando-se com as fontes de luz convencionais, o laser produz saída de alta potência com feixes de luz paralelos e de secção transversal pequena. De acordo com WILSON & HAWKES [28] isso resulta em um feixe de luz de grande intensidade. A potência de saída de um laser é função da energia associada às transições ocorridas no material utilizado no laser, do comprimento e diâmetro da barra, do ganho ótico da cavidade (o qual é uma função da intensidade da radiação emitida) e das perdas de absorção e refletividade dos espelhos da cavidade ótica. (Ver figura 2.3).

2.2 Principais tipos de laser

Quanto ao tipo, os laser são classificados, segundo WILSON & HAWKES [28] de acordo com o material utilizado e a da ação "laser". Apesar da existência de muitos tipos, os que oferecem condições para os trabalhos topográficos são classificados como de estado sólido, a gás e de semicondutor.

2.2.1 Laser de estado sólido

Os laser de estado sólido usam material hospedeiro na forma de barra. São usados tubos de jatos eletrônicos para excitar estes laser, os quais são caracterizados por terem alta potência de saída, podendo ser pulsada ou contínua. Os únicos materiais hospedeiros usados comercialmente para os laser de estado sólido são o rubi, neodímio em vidro (Nd:vidro) e neodímio em yttrium aluminium garnet (Nd:YAG). Em topografia, os laser Nd:YAG e Nd:vidro são usados no modo pulsado em medidores de distância.

2.2.2 Laser a gás

Laser a gás utilizam alguma forma de mistura gasosa pressurizada, como meio ativo para gerar o feixe. A excitação é dada pela aplicação de alta voltagem a essa mistura. O mais barato e mais comumente gás utilizado é o hélio-neônio (HeNe) embora outros gases como o argônio(Ag) e dióxido de carbono (CO_2) também sejam utilizados. O laser HeNe é uma fonte de luz monocromática de onda contínua, brilhante, visível, vermelha, que tem baixa divergência e boa coerência. Essas propriedades tornam-no particularmente útil em topografia para medir longas distâncias. As desvantagens do laser HeNe são que é relativamente caro, o tubo é robusto e pesado, e para sua operação é necessário uma bateria externa de 12 V, com grande capacidade. Para funcionamento contínuo de 8h é necessário que tenha capacidade de 35 A/h. A figura 2.4 mostra um laser de HeNe com capacidade de 1 mW de potência.

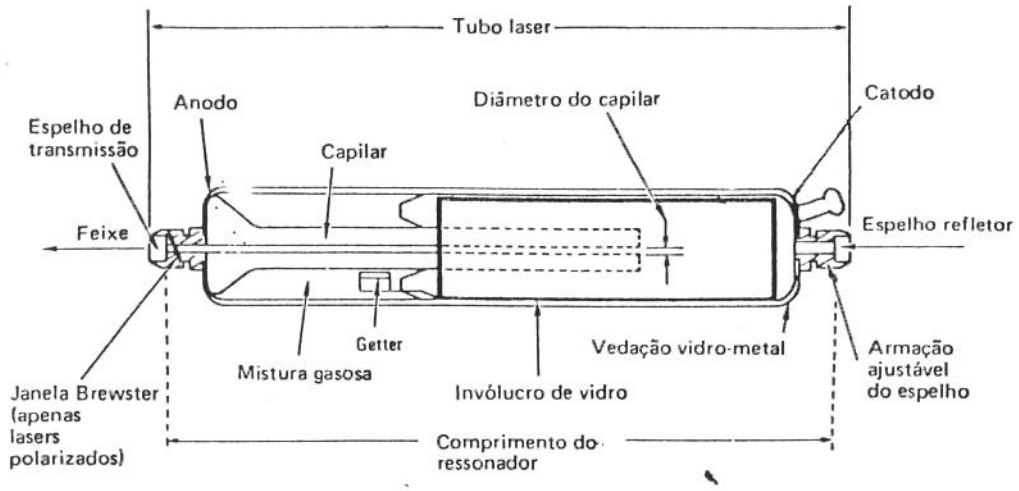

Figura 2.4: Laser a gás HeNe [20].

2.2.3 Laser de semicondutor

Os laser de semicondutor utilizam uma forma de material semicondutor como meio ativo para gerar o laser, e são freqüentemente chamados de laser de injeção. Esse tipo de laser é similar ao convencional diodo semicondutor. O material semicondutor mais comumente utilizado é o arsenieto de gálio "AsGa", o qual é capaz da ação "laser" à temperatura ambiente. Esse laser tem a forma de um transistor, e se comparado com os do tipo de estado sólido e a gás, é bem menor, mais eficiente e de menor custo de produção. Conseqüentemente, instrumentos topográficos incorporando o laser semicondutor são mais compactos, leves e econômicos que os instrumentos HeNe.

Sua principal desvantagem é que produz laser invisível na parte infravermelha do espectro eletromagnético, o qual só pode ser localizado com ajuda de detectores eletrônicos. Além disso, suas propriedades são muito diferentes dos outros tipos de laser, visto que não é monocromático; tem pequena coerência e divergência muito maior que as dos demais laser. Porém, já foram desenvolvidos mini-colimadores óticos que, acoplados a esses diodos, diminuem sua divergência e os torna visíveis. Portanto, com esses melhoramentos, o laser de diodo, principalmente o diodo "AsGa", tornou-se ideal para uso em aplicações que requeram equipamentos portáteis e que necessitem de serem alimentados com baterias portáteis e recarregáveis. A figura 2.5 mostra o laser de diodo "AsGa".

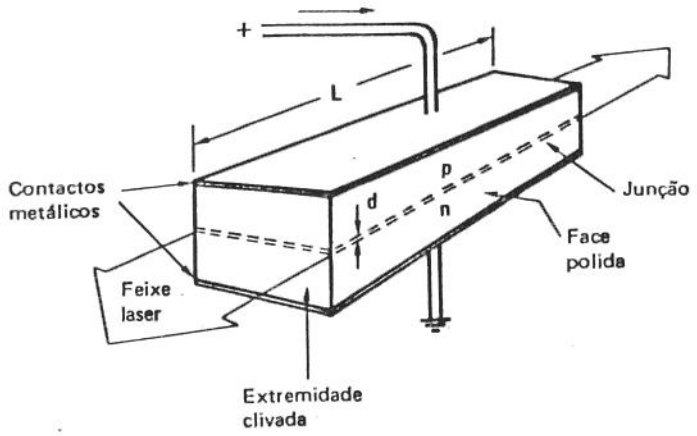

Figura 2.5: Laser de diodo "AsGa" [20].

2.3 Óticas para o laser

Para a utilização do laser em instrumentos topográficos é necessário melhorar algumas de suas características, principalmente sua divergência. Essa pode ser corrigida com recursos óticos de colimação do feixe. Isso pode ser

obtido, colocando-se uma lente convergente a determinada distância do espelho de saída, como mostrado na figura 2.6. A desvantagem desse sistema é que o comprimento focal "f" da lente, tem que ser muito longo para obter-se um feixe que tenha o diâmetro "D". Um sistema que consegue resolver a dificuldade é mostrado da figura 2.7, no qual o propósito da lente expansora é focalizar o feixe na posição "P".

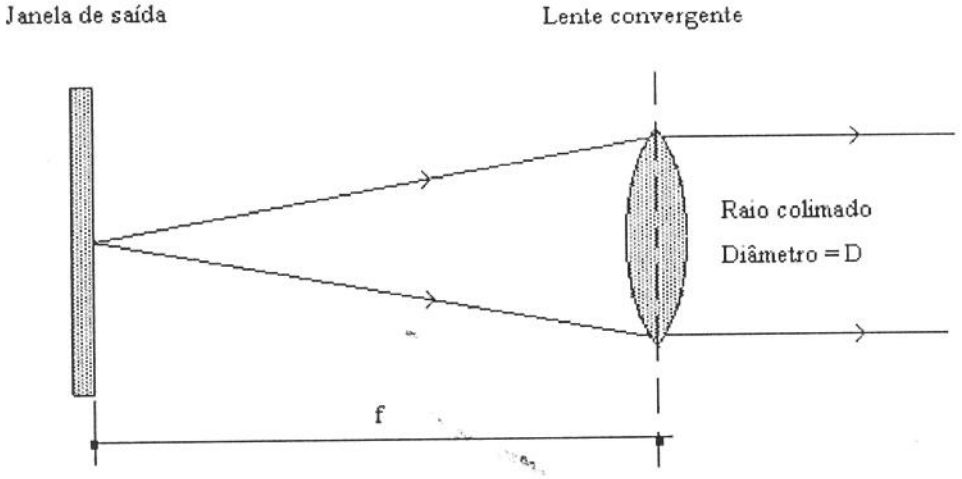

Figura 2.6: Uso de lente convergente para colimar o laser.

Devido a seu alto grau de coerência, o feixe pode ser focalizado em um ponto muito pequeno e , se a lente convergente é colocada de tal maneira que seu ponto focal esteja em "P" (ver figura 2.7) será obtido um feixe de saída de lados paralelos. Esse arranjo de lentes é chamado de expansor, tendo como efeito principal aumentar gradualmente a colimação do feixe e seu diâmetro.

Nos instrumentos que utilizam o laser HeNe, o expansor deve ser posicionado a uma dada distância do tubo laser para efetiva colimação. Se aplicado axialmente, o expansor do feixe resultaria numa longa peça que não seria fácil de utilizar e de difícil manipulação. Para fazer essas unidades menores e mais aceitáveis, o laser é dobrado em si mesmo, o que reduz seu comprimento, mas mantém as distâncias requeridas entre os vários componentes.

2.4 Sistemas de nivelamento usados nos equipamentos a laser

A maioria dos instrumentos de topografia precisam ser posicionados em um plano, geralmente horizontal ou vertical. Basicamente, três sistemas de nivelamento são utilizados: manual, compensados óticamente e de autonivelamento.

O sistema manual de nivelamento, utilizando parafusos de regulagem e frascos de nível, são conhecidos nos instrumentos convencionais de topografia. Os instrumentos laser não utilizaram esse sistema devido a sua precisão não ser

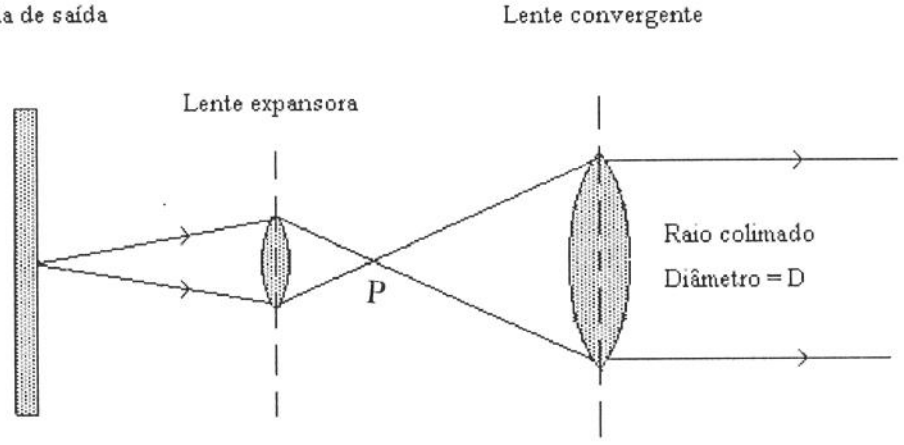

Figura 2.7: Expansor de laser.

suficiente para garantir emissões precisas, só permitindo nivelamentos em torno de doze minutos.

Atualmente, os instrumentos laser de nivelamento topográfico utilizam sistemas óticos. Os fabricantes produzem um tipo de pêndulo ótico ou espelhos suspensos, que se nivelam automaticamente e corrigem os desvios pela ação da gravidade.

Estes sistemas são muito sensíveis e extremamente delicados, com uma faixa de correção muito estreita (na ordem de quinze minutos) e necessitam ser umedecidos para evitar oscilações bruscas e choques. Além disso, precisam ser freqüentemente checados, pois com pequenas vibrações ou choques o sistema necessita ser renivelado manualmente para dentro da faixa de operação dos compensadores óticos.

Os sistemas de autonivelamento eletrônico foram introduzidos pela companhia americana *Spectra Physics* em 1974. Neste sistema o laser é montado em duas plataformas, as quais são capazes de se inclinarem sobre dois diferentes eixos. A inclinação de cada eixo é medida por um nivelador eletrônico de frasco que mede a resistência do líquido no tubo de nível. Cada frasco é conectado a circuitos eletrônicos que fazem com que um motor incline a plataforma até que as resistências em cada ponta do tubo sejam iguais. Quando isto for conseguido a plataforma estará nivelada.

Esse sistema de autonivelamento de duas plataformas usa estrutura *gimbal* que é um aparelho composto de um par de anéis pivotados em eixos de ângulos retos entre si, de maneira que um deles é livre para se mover dentro do outro. A estrutura é muito grande e, por tal razão foi pouco usada.

PRICE & UREN [22] comparando os sistemas de autonivelamento com os de compensadores óticos, concluiram que os sistemas de autonivelação tendem a ser maiores e mais caros. Porém, podem suportar mais choques e se autonivelam ao plano requerido dentro de uma extensão de mais ou menos oito graus para a horizontal ou vertical. Embora o compensador ótico não seja ro-

busto e possa somente ser nivelado manualmente no plano horizontal, é mais preciso e pode produzir um plano de desnível de 0,024 mm/m da horizontal, comparado com 0,024 a 0,048 mm/m do sistema de autonivelamento eletrônico.

2.5 Precisão requerida

De acordo com GARCIA & PIEDADE [11] a precisão requerida nos nivelamentos topográficos variam de acordo com o tipo de serviço e, se classificam em:

a. Alta precisão - erro médio admitido de mais ou menos 0,015 mm/m, correspondendo a uma classe muito especial;

b. Primeira ordem ou nivelamento de precisão - erro médio admitido de mais ou menos 0,025 mm/m;

c. Segunda ordem - erro médio admitido de 0,01 mm/m;

d. Terceira ordem - erro médio admitido de 0,03 mm/m;

e. Quarta ordem - erro médio admitido de 0,10 mm/m.

Os trabalhos comuns de topografia exigem precisão de segunda ordem que segundo GARCIA E PIEDADE [11] são facilmente conseguidos comercialmente com os aparelhos disponíveis.

2.5.1 Precisão dos instrumentos de medida

Segundo LELIS [18] o erro médio acidental das medidas de distância varia com a raiz quadrada da distância medida ou seja, $L = \alpha_i \cdot \sqrt{L}$ e α_i assume os seguintes valores médios:

a. Para medidas efetuadas com réguas (mira) $\alpha_1 = 0,003$;

b. Para medidas com fitas e trenas de aço $\alpha_2 = 0,005$;

c. Para medidas com correntes $\alpha_3 = 0,008$;

Há ainda a acrescentar, como erro constante, o fator $\beta L = \pm 0,03\%$. Portanto, o erro médio será a soma do erro acidental mais o erro constante e, o erro máximo ou tolerável será calculado como sendo até três vezes o erro médio.

2.6 Alcance

De acordo com KAVANAGH [13] os estudos mostraram que mais de 90 % de todas as medidas da distância envolvem valores menores que 1000 m e, destas, mais de 95 % são menores que 400 m.

Capítulo 3

Sistemas de alinhamento e nivelamento

No desenvolvimento da aplicação do laser aos sistemas de levantamento topográfico destacam-se os assuntos descritos a seguir.

3.1 Níveis automáticos

A incorporação dos níveis automáticos, segundo KARREM [12] foi a mudança mais significativa introduzida aos equipamentos óticos de alinhamento nos últimos quinze anos anteriores a sua publicação. Essa inovação, o sistema compensador automático, incorporado aos níveis *Zeiss Ni2*, consta basicamente de um prisma suspenso por quatro arames. A figura 3.1 ilustra o funcionamento desse sistema compensador que tem por finalidade a correção da linha de visada, mantendo-a horizontal e independente de pequenas inclinações do instrumento.

3.2 Sistemas a laser

Seis anos após a invenção do laser , BICKEST [2] já mencionava que devido ao alto grau de colimação do feixe, este seria útil para projetos de mapeamento topográfico. Dentre os sistemas desenvolvidos destacam-se o sistema *Laserplane* e o LSS *(Laser Surveying System)*.

3.2.1 Sistema Laserplane

O Sistema Laserplane mostrado na figura 3.2, descrito por STUDEBAKER [26] tem como finalidade localizar elevações para levantamento de movimentação de terra. No sistema Laserplane, um laser de gás HeNe de 1 mW de potência de saída, gera a projeção de um plano de luz de laser em uma área

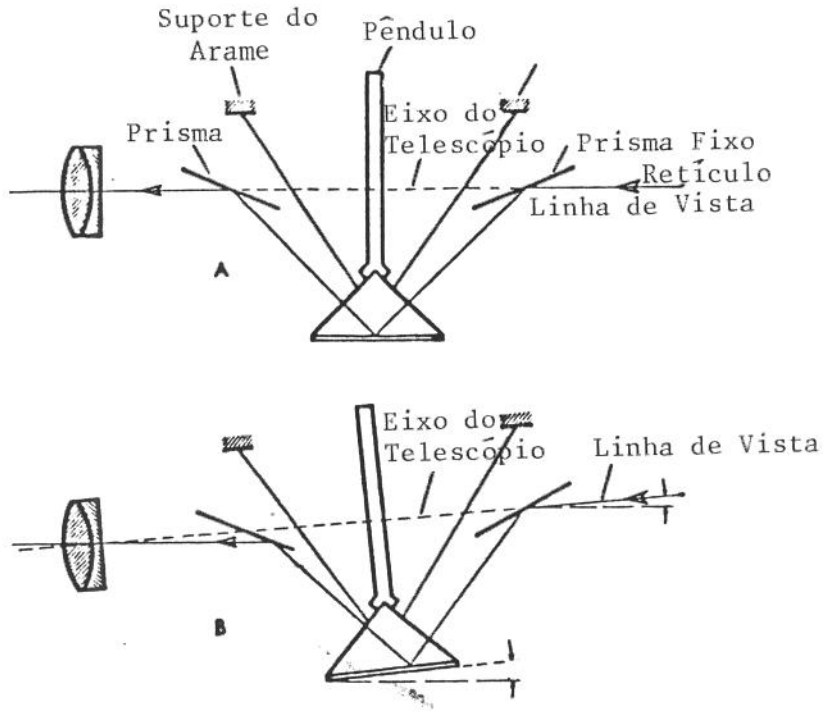

Figura 3.1: Funcionamento do sistema compensador ótico [13].

de mais ou menos 600 m de diâmetro. Essa projeção é usada como plano de referência que pode estar no nível horizontal ou inclinado. A detecção deste plano de referência por um receptor eletrônico, montado em uma haste móvel, capacita seu operador a identificar diferenças de nível.

O uso desse sistema, segundo a Laser Alignment Co. of Austrá-lia [17] tornou-se imediatamente útil para irrigantes e firmas que prestavam serviços de nivelamento de terra em áreas irrigadas. O artigo menciona as grandes vantagens do nivelamento de terra a laser e mostra o método para sua utilização . Em particular, quando se busca o uso eficiente da água, e evitar-se os problemas da salinização dos solos devido ao excesso de água.

Uma análise econômica desse sistema utilizado para nivelamento de campos de arroz na Louisiana, foi feita por McMANUS et alii [21] com a finalidade de estipular os benefícios esperados no nivelamento do campo. Para tanto foi utilizado equipamento de movimentação de terra acoplado a um trator, controlado automaticamente pelo sistema a laser, composto de um transmissor, receptor principal, caixa de controle e sistema hidráulico. O transmissor, montado em um tripé, estacionado dentro da área de trabalho, emite feixe laser, gerando um declive predeterminado. O receptor principal, montado na lamina do equipamento, detecta o sinal e envia a informação para a caixa de controle. Essa usa uma válvula hidráulica para suspender ou abaixar a lâmina para a posição correta. Em pesquisa realizada com distribuidores de equipamentos e

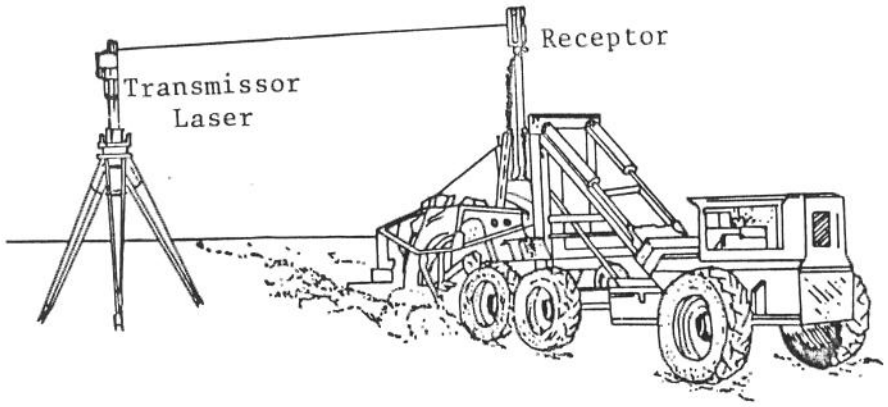

Figura 3.2: O Sistema Laserplane [27].

produtores de arroz que tiveram campos nivelados com o sistema laser, foi constatado aumento significativo da produção. O custo do sistema de nivelamento era da ordem de 24.500 dolares para o conjunto de movimentação de terra e equipamentos laser.

Os benefícios para os fazendeiros que cultivam o arroz, corresponderam ao aumento na produção, decréscimo na quantidade de água aplicada na irrigação e aumento das áreas cultivadas, como resultado do nivelamento do campo. Entretanto, os resultados dessa análise econômica indicaram que para os campos de arroz descritos, a economia no custo de irrigação e o aumento na produção, não foram suficientes para cobrir os custos do sistema a laser. Como forma de viabilizar a aplicação do sistema, foi proposto um significativo aumento da área cultivada.

3.2.2 Sistema LSS

O sistema LSS *(Laser Surveying System)* proposto por KOK et alii [15] fundamenta-se em uma proposta para determinação das coordenadas espaciais de determinada área. O LSS consiste de um transmissor (LSST) e um receptor (LSSR). Seu funcionamento, mostrado na figura 3.3 é baseado no princípio de que dois feixes, separados por um pequeno ângulo conhecido, são emitidos pelo transmissor e ao chocar-se com o receptor, indicará a diferença em elevação e a distância entre os dois sistemas. Informações adicionais relativas à posição do LSST e do LSSR para manter as duas unidades alinhadas, são obtidos com os ângulos horizontais e verticais entre os dois sistemas.

No sistema receptor (LSSR) os arranjos dos sensores luminosos são protegidos por um filtro de luz. O filtro permite que apenas uma única freqüência de luz emitida pelo LSST penetre no arranjo dos sensores, limitando, assim, a interferência da luz ambiente e, promovendo proteção física aos sensores. A figura 3.4 mostra onde estão montados os sensores e filtros do LSSR.

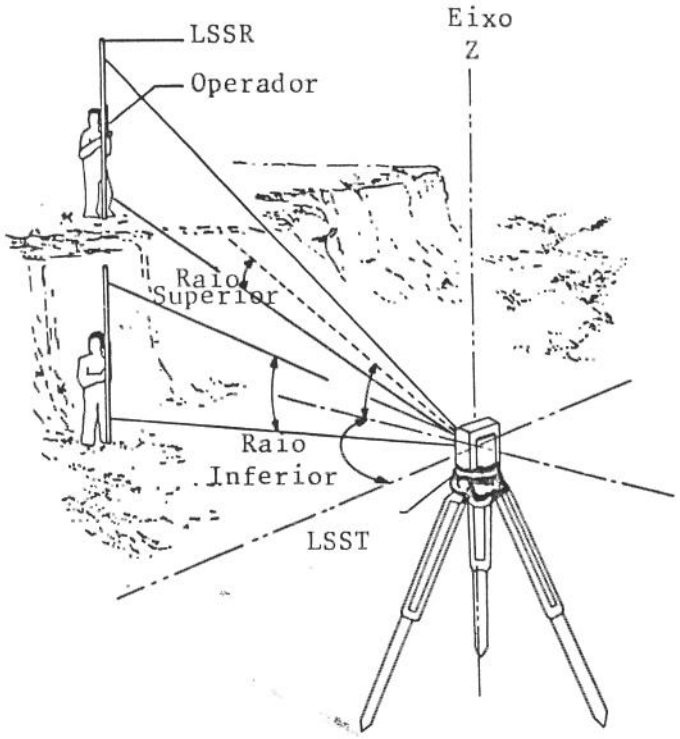

Figura 3.3: O Funcionamento do sistema LSS [16].

No sistema transmissor LSST, um laser HeNe é colimado para um diâmetro de saída de 5mm. Um mecanismo para a projeção de dois feixes é mostrado na figura 3.5 que consiste de um prisma rotativo no qual são montados dois espelhos com inclinações diferentes. O prisma é acionado por um excêntrico que alternadamente muda a posição do prisma e, por conseguinte, dois feixes de inclinações diferentes são produzidos alternadamente. Como o ângulo entre os dois é conhecido, a distância entre os feixes, no instante da colisão, será indicativo da distância entre os sistemas.

Um sistema de rasteamento acoplado ao LSST consiste de uma antena de rastreio, circuitos eletrônicos e três transmissões mecânicas. A transmissão horizontal gira a cabeça do LSST e a antena de rastreio com a finalidade de manter o LSSR dentro de um raio de ação de 90^{o} . A transmissão vertical gira a antena para mantê-la apontada continuamente ao ponto de origem do LSSR. A segunda transmissão vertical gira o prisma através da metade do ângulo vertical da antena de rastreamento. Assim, os dois feixes irão sempre incidir nos sensores do LSSR. A figura 3.6 mostra os prismas e as transmissões montadas na cabeça do LSST.

Um protótipo simplificado do LSS foi construído para testar o método de medição de distância descrito. O protótipo do LSSR, constitui-se de um arranjo de cinqüenta fotodiodos espaçados entre si de 5,08mm. A indicação dos fotodiodos superior e inferior, ativados pelo feixe, são mostrados simultaneamente em um mostrador numérico.

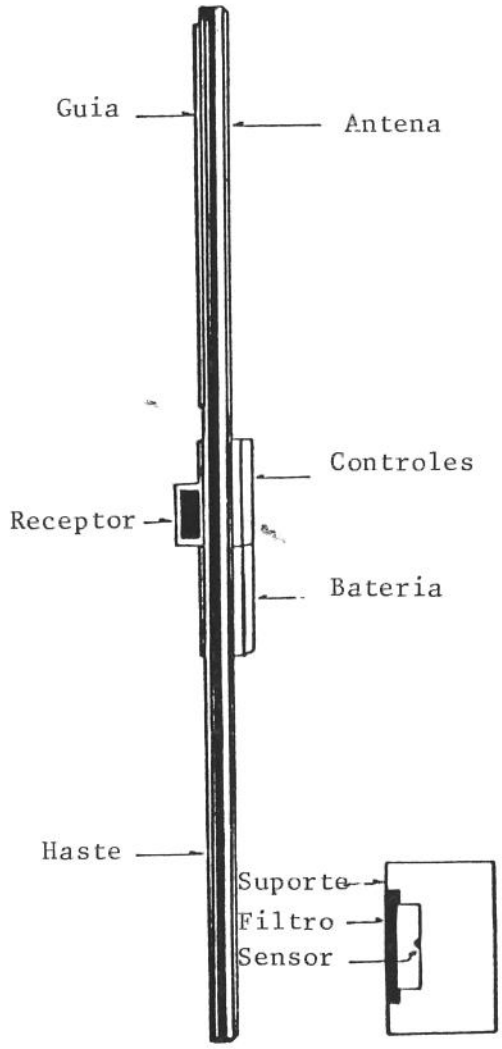

Figura 3.4: Vista do sistema receptor do LSS [16].

Para o protótipo do LSST foi usado um laser HeNe e um mecanismo para emissão de dois feixes. Nesse mecanismo, dois prismas montados em base rotativa foram alternadamente posicionados para que o feixe incidisse apenas em um dos prismas. Como esses foram fixados em ângulos diferentes, foram produzidos dois feixes com inclinações diferentes.

Dos dados obtidos pelo autor, concluiu-se que os valores das distâncias medidas em relação à diferença das distâncias entre dois sensores, comportaram-se linearmente.

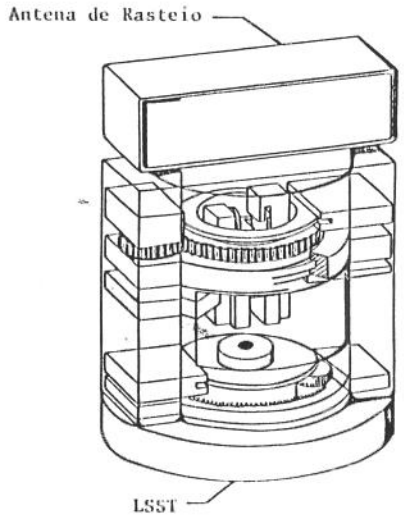

Figura 3.5: Mecanismo do LSS para projeção do laser [16].

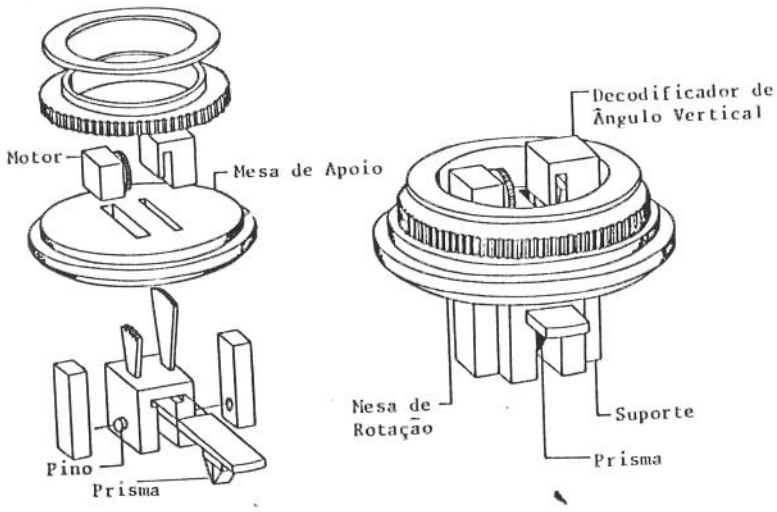

Figura 3.6: Prisma e transmissões do LSST [16].

Outros desenvolvimentos bastante significativos foram conseguidos pelo

programa de pesquisa criado na UNB *(University of New Brunswick)* Canadá em 1969, tendo à frente o Dr. ADAN CHRZANOWSKI,[3],[6],[10]. Este programa teve como objetivo principal desenvolver sistemas de nivelamento, nos quais a linha ótica de visão dos níveis convencionais seria substituída por um laser HeNe de feixe estreito, visível e de baixa potência. Detectores fotosensitivos especialmente projetados, acoplados a uma barra de nivelamento, dariam a leitura automática do centro do feixe. Com isso, era esperado que apenas uma pessoa com pouca habilidade, fosse capaz de realizar nivelamentos com a mesma precisão de leitura daquelas obtidas com métodos convencionais.

Como forma de alcançar esse objetivo foram desenvolvidos instrumentos para nivelamento, utilizando-se o laser e detectores do centro da energia do feixe emitido. Dentre os instrumentos de nivelamento, os que apresentaram maior contribuição foram o nível fotoelétrico laser e o nível laser Ni-OO7, a seguir descritos.

3.2.3 Nível fotoelétrico laser

O princípio de funcionamento e os componentes básicos do instrumento são mostrados esquematicamente na figura 3.7. Observa-se que parte do feixe produzido pelo tubo laser montado verticalmente, passa através do divisor, e é refletido na superfície de um espelho flutuante em mercúrio, e finalmente em um detector de centro fotoelétrico. A calibração do instrumento é feita ajustando-se a posição do tubo laser até que o feixe refletido esteja centralizado no fotodetector. Quando isso acontecer, o feixe que sai do instrumento estará nivelado horizontalmente, ou levemente inclinado, dependendo da inclinação da superfície de referência e da posição do fotodetector de centragem.

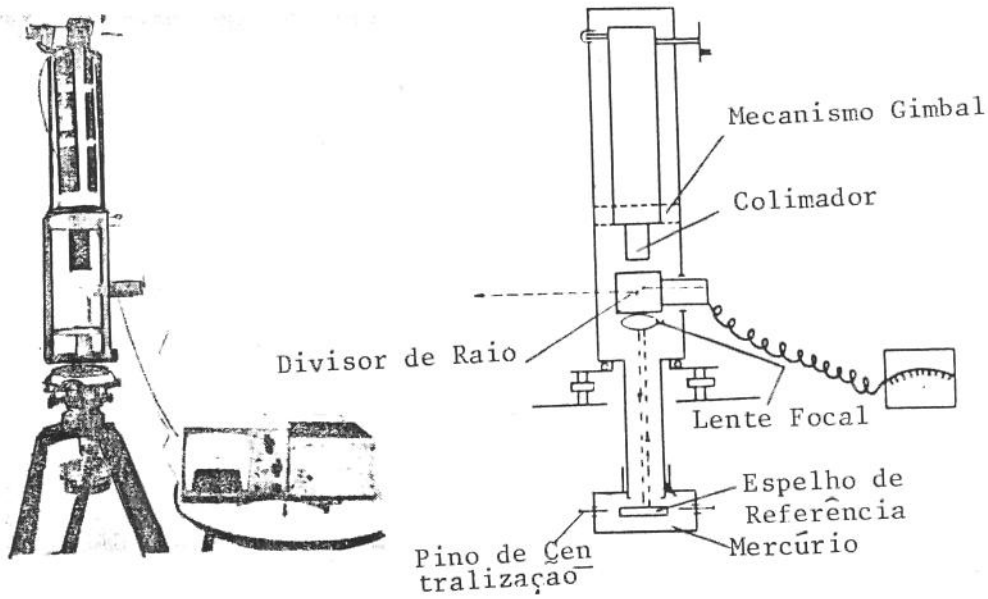

Figura 3.7: Nível fotoelétrico laser [14].

Um protótipo preliminar do nível laser usava a própria superfície do mercúrio como superfície de referência, mas testes práticos mostraram que seu uso como espelho gravitacional não era eficiente, principalmente para o amortecimento das vibrações. A precisão instrumental dependia da sensibilidade desse fotodetector de centragem e da distância do divisor do feixe ao espelho de referência.

Fila (1971) citado por CHRZANOWSKI & JANSSEN [9] encontrou um erro de nivelamento de 0,03mm entre dois alvos afastados de 50m, correspondendo a uma precisão melhor do que aquela alcançada com níveis convencionais equipados com placas de vidro paralelas de precisão micrométrica.

3.2.4 Nível laser Ni-OO7

O nível Ni-OO7 é uma adaptação de um laser HeNe a um nível geodético convencional *Zeiss-Jena Ni-OO7*. A figura 3.8 ilustra essa adaptação como mostrado na vista em corte. O laser é adaptado de modo que a linha de visão do telescópio do nível seja substituída pelo laser.

Testes realizados por CHRZANOWSKI & JANSSEN [4] mostraram que a saída do laser na objetiva do telescópio é horizontal devido ao compensador tipo pêndulo, existente no nível Ni-OO7. Além disso , o eixo de entrada do laser deve coincidir com o eixo ótico do instrumento. O ajuste da centralização do tubo emissor do feixe é uma operação crítica, e os componentes óticos do nível Ni-OO7 absorvem até 70 % da energia do laser.

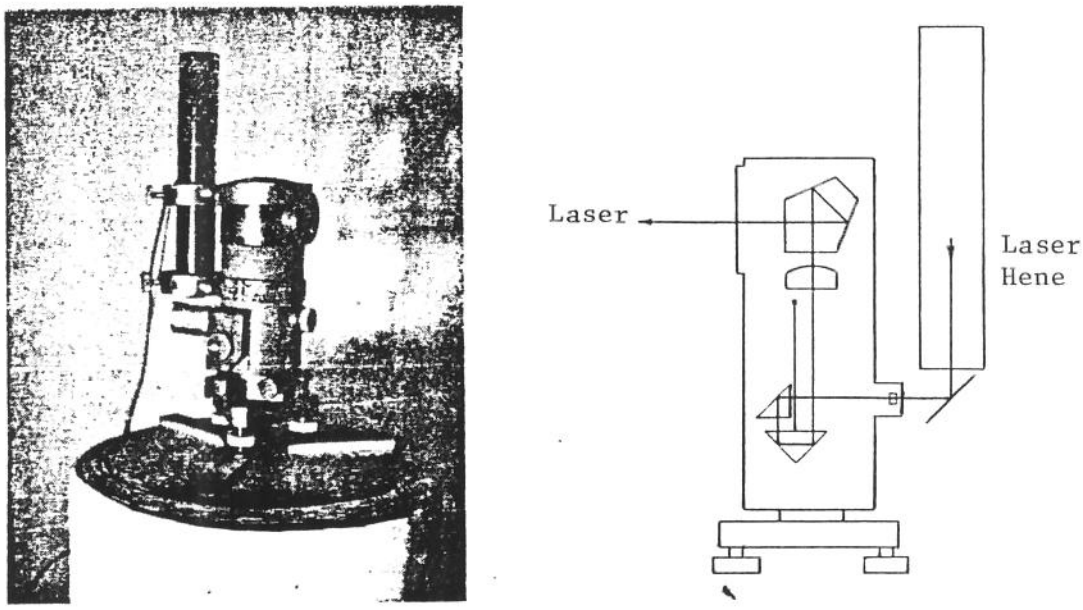

Figura 3.8: O nível laser Ni-OO7 [14].

3.3 Detectores do centro de energia do laser

Com o desenvolvimento dos sistemas de alinhamento e nivelamento, o uso do laser colimado como fonte de referência em substituição à linha de visão dos telescópios convencionais que equipam os teodolitos e níveis, tornaram-se conhecidos em várias tarefas topográficas. Com isso, as tarefas ficaram mais fáceis, mais simples e melhoraram sensivelmente o conforto no trabalho.

Entretanto, segundo CHRZANOWSKI & JANSSEN [4] para conseguir-se precisão de primeira ordem nas medidas de alinhamento e nivelamento , seria necessário desenvolver um detector com capacidade de determinar precisamente o centro de energia de incidência do feixe, em extensões, variando de centenas de metros a até poucos quilômetros.

No estágio inicial deste programa de pesquisa foram realizadas investigações no comportamento do laser em atmosfera turbulenta. Os principais resultados dessa pesquisa descritos por CHRZANOWSKI & AHMED [7] foram:

- A curva de distribuição da intensidade da luz de um laser HeNe, com modo de saída TEM_{oo} (distribuição Gaussiana da intensidade) é simétrica em um alvo distante, se integrado sobre um intervalo de tempo de no mínimo cinco segundos;
- O ponto laser deve ser integrado por inteiro durante o processo de centralização, isto é, tanto o tempo como o espaço devem ser integrados.

Com essas conclusões CHRZANOWSKI et alii [5] propuseram dois tipos de detectores de centro do laser: o integrado e o auto-alinhado.

3.3.1 Detectores de centro integrado

Nesse tipo de detector, determina-se o centro do laser através da integração da energia do feixe em sua seção transversal. Para determinar-se o centro da energia de um ponto de incidência, foi usado um arranjo de "n" sensores fotoelétricos mostrados na figura 3.9, de mesmo tamanho e mesma sensibilidade à luz. Se a área de cada sensor é bastante pequena em comparação com o tamanho da área de incidência no ponto, pode-se assumir, com boa aproximação que cada sensor com coordenada X_i e Y_i é homogeneamente iluminado com uma intensidade de luz E_i, a cada instante da medida. Conhecendo-se E_i, pode-se calcular as coordenadas instantâneas X_o e Y_o do centroíde de energia do laser a partir de:

$$X_o = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i \cdot E_i}{\sum_{i=1}^{n} E_i} \; ; \; Y_o = \frac{\sum_{i=1}^{n} Y_i \cdot E_i}{\sum_{i=1}^{n} E_i} \, . \tag{3.1}$$

Devido à turbulência do ar, a intensidade de luz E_i incidente em cada sensor muda em função do tempo. As investigações descritas no parágrafo anterior no comportamento do laser têm mostrado que a intensidade média, quando integrada sob um intervalo de tempo "t_o" suficientemente longo, é constante para cada ponto da secção transversal do laser, dada por:

$$\overline{E_i} = \int_o^{t_o} E_i.dt \tag{3.2}$$

Se substituirmos $\overline{E_i}$ na equação 3.1, então as coordenadas X_o e Y_o representam a posição mais provável do centro de energia do laser em uma atmosfera turbulenta.

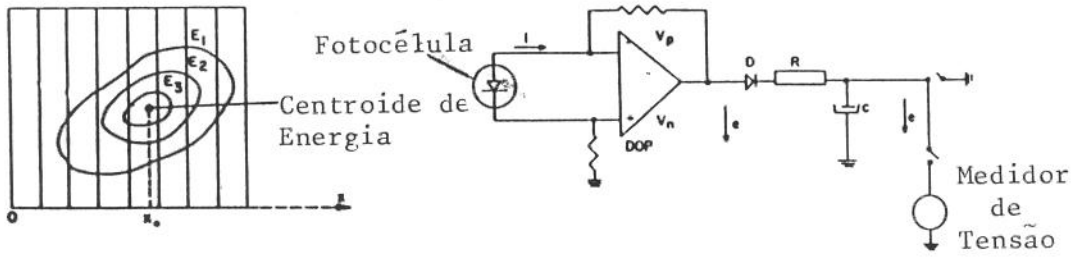

Figura 3.9: Arranjo dos sensores fotoelétricos do detector de centro integrado, e correspondente circuito elétrico [05].

Para a integração eletrônica do sinal dos sensores foi necessário a amplificação do sinal emitido pelo sensor no momento da incidência do laser. Um diagrama esquemático do circuito é mostrado na figura 3.9. A corrente elétrica produzida pelo sensor, quando exposto à luz laser, é amplificada por um amplificador operacional diferencial (DOP) e essa voltagem de saída "e" é linearmente proporcional à corrente. A integração de "e" é feita por um circuito RC, via um diodo de silício. A saída integrada e^*, a partir do capacitor, é linearmente proporcional à intensidade média $\overline{E}$ da luz. O sinal e^* é mostrado em um voltímetro e seus valores E_i são usados diretamente nos cálculos de X_o e Y_o.

Como forma de comprovar o princípio descrito, os autores construíram um protótipo denominado Detector de centro integrado de varredura (*Scanning*). A ilustração da figura 3.10, mostra o detector construido. Uma fotocélula de silício com dimensões de 10mm x 18mm foi montada em um sistema mecânico que se desloca em duas direções perpendiculares, X e Y. Investigações em diferentes sensores mostraram que a proporção de 1 : 4 da largura do sensor em relação ao diâmetro do ponto laser, é uma proporção aceitável do ponto de vista da precisão.

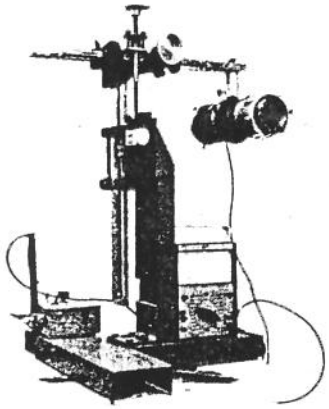

Figura 3.10: Detector integrado tipo *Scanning* [05].

Testes de campo do detector realizados por CHRZANOWSKI [10] apresentaram diferentes perfórmances a partir de 100 até 1500 m de distância, usando-se um laser HeNe com potência de saída de 1 mW e diferentes tipos de telescópios colimadores. O intervalo de tempo de integração foi de 5 s em todas as medições. Cinco repetições foram feitas para cada distância, e o desvio padrão angular médio obtido foi de 0,2 s de arco.

Uma das dificuldades do método é que a integração da energia transversal não é simétrica para todo o diâmetro no ponto laser. Para estipular a integração, os autores desenvolveram o detector conhecido como mira de centragem integrada. A figura 3.11 mostra um protótipo do detector que é formado por dezesseis fotocélulas enfileiradas de 10 mm x 20 mm.

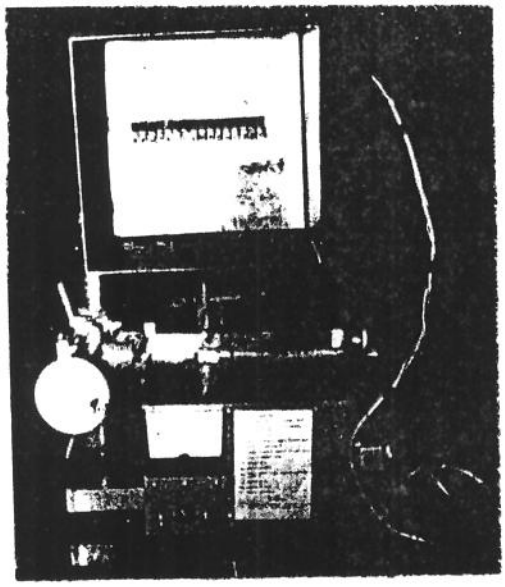

Figura 3.11: Mira de centragem integrada [14].

A tensão elétrica gerada em cada fotocélula é medida com um medidor FET, e os dezesseis valores de saída são usados para o cálculo do valor do centroíde de energia X_o, por meio da equação 3.1. O protótipo mostrou possibilidades de centragem do ponto laser, apesar das dificuldades em ajustar-se os dezesseis circuitos integrados para obter-se o mesmo sinal de saída quando expostos à mesma intensidade de luz. Na tentativa de superar a dificuldade e evitar-se a possibilidade de saturação dos amplificadores, CHRZANOWSKI et alii [3] propuseram o projeto baseado na equação 3.1, mas na nova forma:

$$X_o = \frac{\int_o^{t_o} \sum_{i=1}^{n} X_i \,.\, E_i.dt}{\int_o^{t_o} \sum_{i=1}^{n} E_i.dt} = \frac{N_o}{D_o}. \tag{3.3}$$

Para a implementação da equação 3.3 seguem-se dois passos: primeiro, é necessário fazer o somatório dos sinais de todos os sensores, separadamente, tanto para o numerador N_o como para o denominador D_o, e os dois somatórios são integrados no tempo sobre o período Δt. Esses passos são mostrados no diagrama de bloco da figura 3.12.

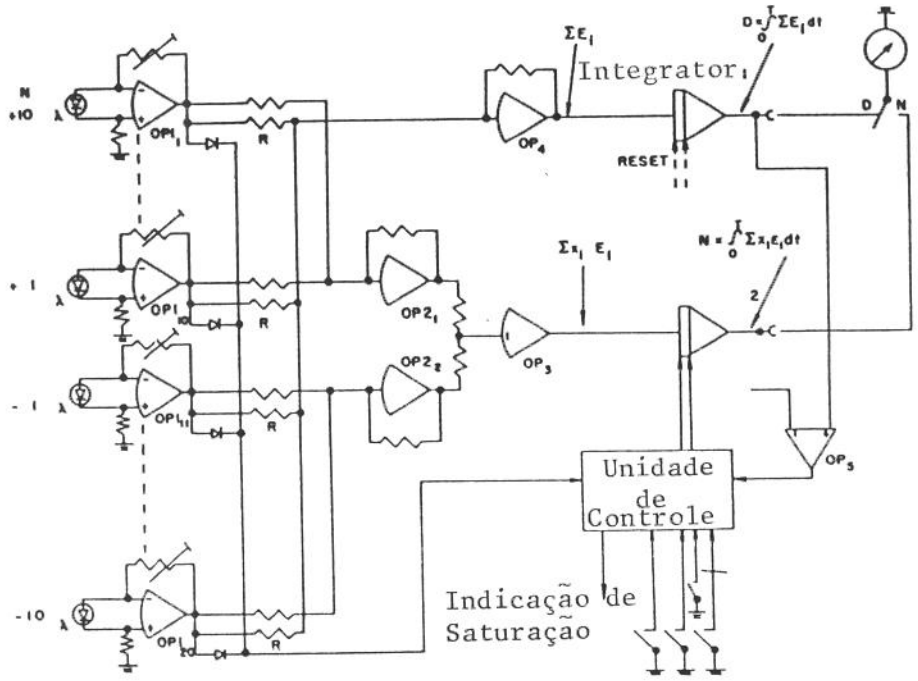

Figura 3.12: Diagrama de bloco para integração das dezesseis fotocélulas da mira de centragem integrada [05].

Nota-se que dois únicos integradores são necessários, independentemente do número de fotocélulas na mira. Cada fotosensor tem sua corrente amplificada para alcançar sensibilidade comum à luz. Outra característica desse novo detector foi o modo automático de regulagem. Iniciando-se manualmente a operação,

o detector estará no modo de integração até que a voltagem integrada de saída, correspondente a D_o, atinja um nível de espera pré-especificado.

Ambos os integradores são desviados, dentro do modo de apoio pela unidade de controle lógico. Portanto, o tempo de integração conveniente para as condições relativas à intensidade do laser será obtido automaticamente.

Desde que a voltagem correspondente a D_o é sempre maior que aquela correspondente a N_o, as saturações dos integradores serão evitadas. Se isso ocorrer, outro circuito de controle análogo-digital indicará a saturação e cessará a operação.

3.3.2 Detector de centro auto-alinhado

O detector de centro auto-alinhado utiliza o mesmo princípio de centralização do laser empregado nos detectores conhecidos como detectores diferenciais (*Zeroing*) como mostrado a figura 3.13, que estavam comercialmente disponíveis na época dos ensaios efetuados.

Nos detectores diferenciais (*Zeroing*) a operação de centralização do ponto laser é feita manualmente durante o procedimento de centralização. Seus componentes básicos são duas fotocélulas com 3 cm de diâmetro que se movem transversalmente ao sentido do laser até que a corrente em ambos os sensores estejam balanceadas.

Filtros opacos colocados na frente das fotocélulas permitem seu uso com maior diâmetro do feixe laser além de servir como integrador da luz. A sensitividade e o tempo de resposta (integração de tempo) do alvo mudam. Com isso, podem ser usados para grandes distâncias, diferentes condições de turbulência do ar e, em uma faixa maior de densidade de potência (de 0,001 a 70 mW/cm^2) do ponto laser.

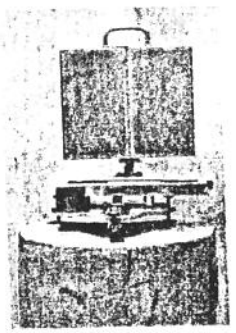

Figura 3.13: Detector diferencial *Zeroing* [14].

O diagrama de bloco da figura 3.14 descreve o funcionamento do detector de centro auto alinhado. A automação para o detector centralizar o ponto laser é feita com motor de passo, conectado ao detector por meio de engrenagem de precisão.

Dois sensores S_{11} e S_{12}, com área relativamente grande, operam em modo de curto-circuito e a diferença entre suas correntes é uma média do desvio Δx entre o centro do ponto laser e a linha que separa os dois fotosensores. A diferença de corrente é convertida linearmente em um sinal de saída e_2 e através de amplificador operacional OP_3 aplicado ao integrador. O sinal e_2 gerado pelo laser quando está fora do centro, produz um sinal e_3 no terminal de saída do integrador que aumenta com o tempo até um nível limite. Quando isso ocorre, um sinal lógico é transmitido ao controlador do motor de passo que move o detector um passo em direção ao centro do laser. Quando o centro é alcançado nenhuma diferença de corrente é detectada pelo amplificador OP_3, e o motor não produz mais nenhum movimento.

O ganho do amplificador OP_3 e a constante de tempo do integrador determinam o desempenho e a perfórmance do detector. Um tempo constante no integrador determinará o tempo de integração entre dois movimentos consecutivos do motor de passo. Logo, para uma constante de tempo pequena tem-se uma rápida resposta do detector.

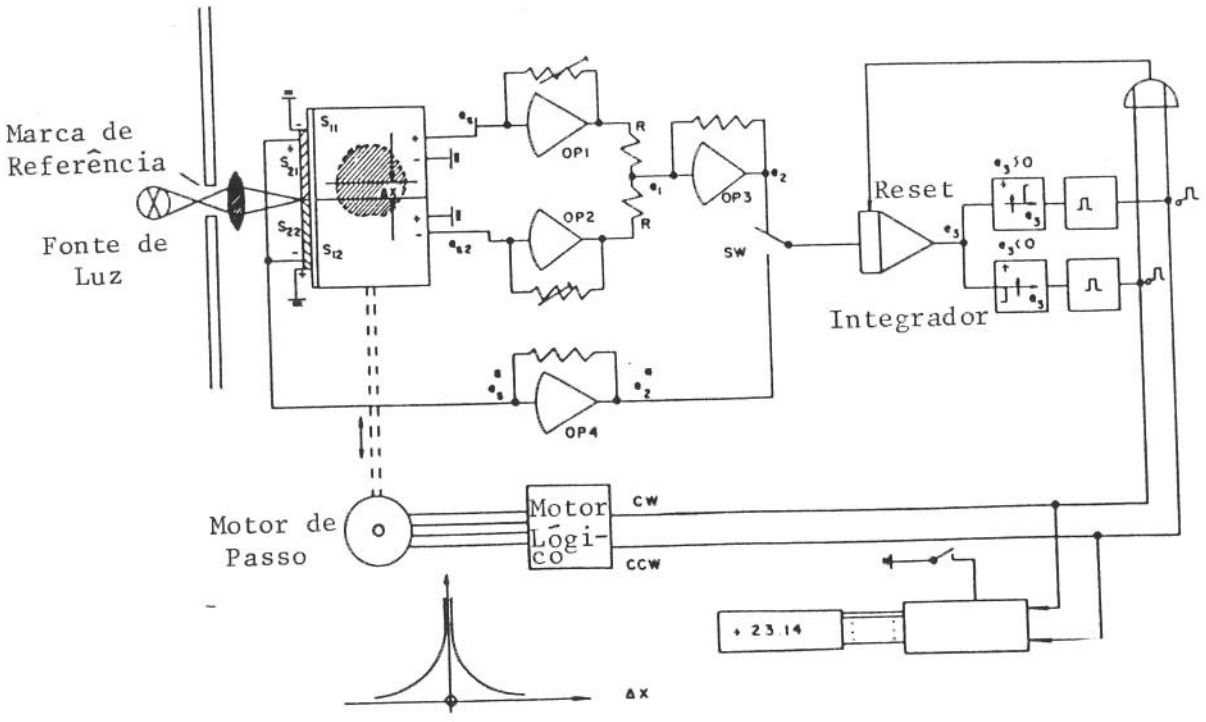

Figura 3.14: Diagrama de bloco do detector de centro auto- alinhado [05].

Outro par de fotosensores S_{21} e S_{22}, com um amplificador operacional OP_4, é usado para centralizar automaticamente o detector nos orifícios. A centralização é iniciada em uma marca de referência, onde o mostrador será

zerado. O contador registra o número de passos do motor até que o detector encontre o centro do laser. Com isso, é possível proceder-se à leitura do valor absoluto do desvio Δx entre a marca de referência e o centro do ponto laser.

Na análise da precisão do detector feita por CHRZANOWSKI et alii [4] foi constatado que, se o ganho do amplificador operacional OP_3 for adequadamente ajustado e a constante de tempo selecionada de acordo com as condições no campo, a precisão de centralização dependerá principalmente das seguintes condições operacionais:

1) resolução do motor de passo (número de passos por rotação);

2) combinação da sensibilidade dos fotosensores S_{11} e S_{12};

3) homogeneidade da sensibilidade dentro da área do sensor;

4) influência da luz ambiente.

Janssen, citado por CHRZANOWSKI et alii [5] analisou a influência da não-homogeneidade da sensibilidade dos fotosensores. De acordo com sua análise, a combinação da sensitividade "S" dos fotosensores deveria ser feita com precisão relativa dada por:

$$\frac{ds}{s} = \frac{32}{3.\pi} \cdot \frac{dx}{R} \ , \tag{3.4}$$

onde "dx" é a precisão requerida na centralização, e "R" o raio do ponto laser no momento da incidência do feixe no fotosensor. A equação 3.4 foi obtida para uma iluminação simétrica e circular dos sensores, como é o caso dos laser HeNe operando no modo TEM_{oo}. O valor de "R" depende da divergência do laser e do tipo de telescópio usado para sua colimação. Por exemplo: para um laser HeNe colimado com telescópio de amplificação 40 vezes o valor de "R" seria da ordem de 25 mm para um distância de 1 km, se a precisão requerida "dx" for de 0,1 mm ou 10^{-7} como precisão relativa. Comparando-se com a precisão da sensibilidade do fotosensor, resulta:

$$\frac{ds}{s} \leq 0,0136\,(1,4\%) \tag{3.5}$$

A equação 3.6 corresponde à relação entre a homogeneidade relativa requerida $(ds/s)^*$ da sensitividade da área diferencial "dA" dentro de cada fotosensor, e à precisão requerida na centralização, ou seja,

$$\frac{ds}{s^*} = \frac{4}{3} \cdot \frac{R}{dA} \cdot dx \ . \tag{3.6}$$

Assumindo-se $dA = 100\ mm^2$ como área máxima, R = 25 mm e dx $\leq$ 0,1 mm, resulta o valor $\frac{ds}{s^*} = 0{,}033$, que corresponde a um valor inferior a 3,3 %.

O projeto do detector alto-alinhado (como mostrado no diagrama de bloco da figura 3.14) não oferece condições para operação à luz ambiente, pois qualquer luz que esteja dentro do espectro da sensibilidade dos sensores S_{11} e S_{12} podem produzir sinais com diferença e_2. Segundo CHRZANOWSKI et alii [9] há duas possibilidades para resolver o problema: 1) introdução de filtro ótico de espessura de banda estreita, cobrindo todo o sensor para suprimir todos os outros comprimentos de onda da luz que não seja a do laser; 2) utilizando-se laser de intensidade modulada por meio de corrente de curto-circuito, cujo produto é um sinal de saída que depende da iluminação detectada. Adicionalmente, a freqüência ótima da modulação precisaria ser determinada em função da capacidade de modulação do laser, freqüência de resposta das fotocélulas e intensidade da iluminação ambiente.

Um protótipo do detector, mostrado na figura 3.15, foi construído com dois sensores de 16 cm^2 de área total, cada sensor com oito fotocélulas de 2 cm^2, conectados em paralelo. O material fotosensitivo utilizado foi silício em forma de células fotovoltaicas.

O desempenho do detector foi testado por CHRZANOWSKI et alii [9] em distâncias variáveis entre 10 e 700 m, efetuando-se leituras repetidas da posição do detector na marca de referência e no centro detectado do laser. Analisando-se os resultados obtidos foram constatados desvios-padrões da centralização menores que 10^{-6} da distância em 80 % das medidas efetuadas.

3.3.3 Cálculo do centro de energia

BENNETT & GATES [1] obtiveram as expressões para o sinal obtido quando células fotoelétricas, divididas em duas ou quatro partes, são utilizadas como detectores de sensibilidade da posição em sistemas de alinhamento.

Para identificar precisamente a distribuição de energia incidente sobre uma célula fotoelétrica é necessário a divisão da frente de onda em dois ou mais segmentos, e fazer a soma da energia localizada nos segmentos. O valor dessa energia é menor nas extremidades da célula fotovoltaica e sua intensidade (I) é dada por:

$$I(x,y) = I_o \exp -2(\frac{(x^2+y^2)}{W^2}), \tag{3.7}$$

onde "I(x,y)" é a intensidade em um ponto na frente de onda de coordenadas retangulares do centro (x,y) no ponto de coordenada (o,o). A intensidade I_o e W correspondem ao tamanho do ponto e a sua distância do centro, na qual a intensidade decresce para $1/e^2$ do seu valor máximo. Se a frente de onda é

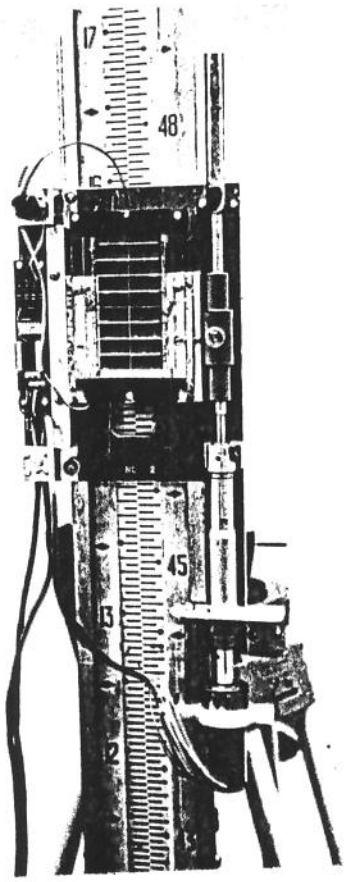

Figura 3.15: Protótipo do detector de centro auto- alinhado [04].

dividida em duas partes na linha $x = X$, onde a diferença de energia (ΔE) decresce em um dos dois lados dessa linha, resulta a expressão:

$$\Delta E = \int_{-\infty}^{x}\int_{-\infty}^{\infty} I_o \exp\frac{-2(x^2+y^2)}{W^2}dy.dx - \int_{x}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} I_o \exp\frac{-2(x^2+y^2)}{W^2}dy.dx\,. \tag{3.8}$$

Os limites de integração infinitos implicam que toda a energia da luz decresce na célula, correspondendo, então, à condição:

$$\Delta E = 2\int_{o}^{x}\int_{-\infty}^{\infty} I_o \exp\frac{-2(x^2+y^2)}{W^2}dy.dx = \frac{\pi.W^2}{2}.I_o.P_r(\frac{2.x}{W})\,, \tag{3.9}$$

onde $P_r(\frac{2x}{W})$ é a probabilidade de que a integração foi normalmente efetuada pelo circuito integrador, dada por:

$$P_r(\frac{2x}{W}) = 2\pi^{\frac{-1}{2}}\int_{-\frac{2x}{W}}^{\frac{2x}{W}} \exp\frac{-t^2}{2}dt\,. \tag{3.10}$$

O espaço que certamente existirá entre as placas do detector, modificará os limites de integração das expressões anteriormente apresentadas. Considerando-se que esses espaços estão centralizados em torno da linha x=X, estabelecendo-se uma largura $2\Delta x$ a diferença de energia será:

$$\Delta E = \int_{-\infty}^{\overline{x-\Delta x}}\int_{-\infty}^{\infty} I_o \exp\frac{-2(x^2+y^2)}{W^2}dy.dx - \int_{\overline{x+\Delta x}}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} I_o \exp\frac{-2(x^2+y^2)}{W^2}dy.dx =$$

$$= \int_{o}^{\overline{x-\Delta x}}\int_{-\infty}^{\infty} I_o \exp\frac{-2(x^2+y^2)}{W^2}dy.dx + \int_{o}^{\overline{x+\Delta x}}\int_{-\infty}^{\infty} I_o \exp\frac{-2(x^2+y^2)}{W^2}dy.dx =$$

$$= \frac{\pi.W^2}{4}I_o\{P_r(\frac{2.\overline{x+\Delta x}}{W}) + P(\frac{2.\overline{x\Delta x}}{W})\} \tag{3.11}$$

Para o caso de um detector quadrante (Figura 3.16) a diferença de energia decrescente na diagonal oposta aos quadrantes será:

$$\Delta E = \int_{-\infty}^{x}\int_{-\infty}^{y} I_o \exp\frac{-2(x^2+y^2)}{W^2}dy.dx - \int_{x}^{\infty}\int_{y}^{\infty} I_o \exp\frac{-2(x^2+y^2)}{W^2}dy.dx =$$

$$= 2\int_{o}^{x}\int_{o}^{\infty} I_o \exp\frac{-2(x^2+y^2)}{W^2}dy.dx + \int_{o}^{\infty}\int_{o}^{y} I_o \exp\frac{-2(x^2+y^2)}{W^2}dy.dx =$$

$$= \frac{\pi.W^2}{4} I_o\{P_r(\frac{2x}{W}) + P_r(\frac{2y}{W})\} \tag{3.12}$$

Caso os eixos de medição (ξ, η) estejam a 45^o do eixo do detector (x,y), resultam as coordenadas de posição:

$$x = \frac{\xi - \eta}{\sqrt{2}},$$

$$y = \frac{\xi + \eta}{\sqrt{2}}.$$

que corresponde à diferença de energia:

$$\Delta E = \frac{\pi.W^2}{4} I_o\{P_r[\frac{\sqrt{2}.(\xi - \eta)}{W}] + P_r[\frac{\sqrt{2}.(\xi + \eta)}{W}]\}\,. \tag{3.13}$$

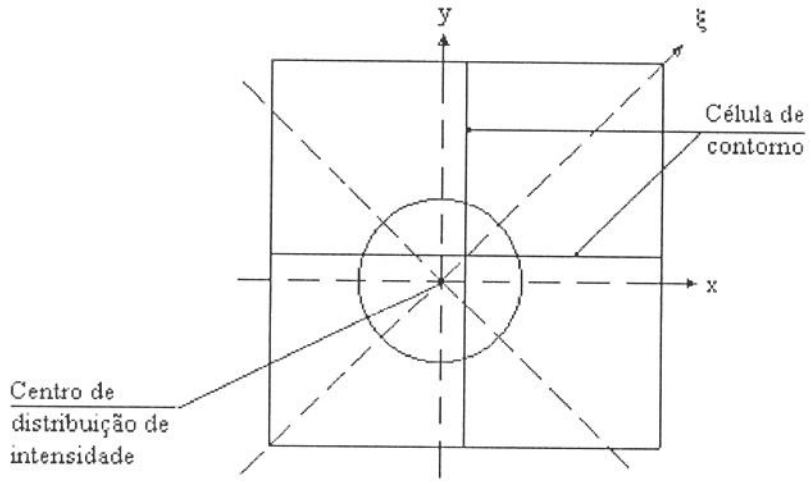

Figura 3.16: Malha do detector quadrante com eixos a 45^o em relação ao contorno da célula [27].

Para avaliação prática do método, foi estabelecido um detector quadrante como mostrado na figura 3.17. As notações $V_{xy}(E_1, E_2, E_3, E_4)$ foram usadas para representar a voltagem entre os dois pontos X e Y, quando a energia incidente nas células 1 a 4 correspondem a E_1, E_2, E_3 e E_4 respectivamente. A partir da incidência do laser, os potenciômetros R_1, R_2, R_3 e R_4 foram regulados para

$$V_{ae}(E_o, 0, 0, 0) = V_{ae}(0, E_o, 0, 0)\,;$$

$$V_{be}(0,0,E_o,0) \;=\; V_{be}(0,0,0,E_o)\,.$$

Pode-se demostrar que:

$$V_{ab}(E_1,E_2,E_3,E_4) \;\cong\; (E_1+E_2)-(E_3+E_4) \tag{3.14}$$

Semelhante dedução pode ser feita para os potenciômetros (R_1', R_2', R_3', R_4') resultando:

$$V_{a'b'}(E_1,E_2,E_3,E_4) \;\cong\; (E_1+E_4)-(E_2+E_3). \tag{3.15}$$

As voltagens V_{ab} e $V_{a'b'}$, portanto, representam os sinais independentes requeridos.

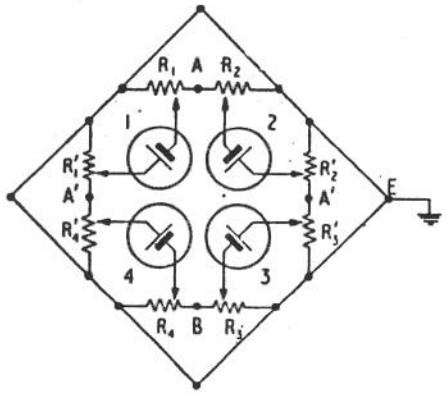

Figura 3.17: Malha do detector, com ponte de resistores [27].

Nas investigações da performance do método em montagem simples de dois detectores posicionados adjacentes, foram conseguidos deslocamentos menores que 0,6 W, isto é, menor que 30% do diâmetro do ponto laser, o que representa um erro no desvio do diâmetro do ponto da ordem de 1%.

A sensibilidade estabelecida foi de 0,1% em relação ao diâmetro do ponto, correspondendo à sensibilidade angular de 10^{-8} radianos.

Capítulo 4

Medição eletrônica de distância

4.1 Histórico

A medição eletrônica de distância EDM *(Eletronic Distance Measurement)* teve início, segundo LAURILA [16] quando em 1941 o geodesista sueco Erik Bergstrond desenvolveu um sistema capaz de medir a velocidade da luz com alta precisão. Em 1947 foi construído o primeiro instrumento usando esse princípio, e sua industrialização ocorreu quando a companhia sueca AGA, licenciou o processo em 1953, e lançou o instrumento comercialmente chamado de Geodímetro. Foram usadas ondas de luz moduladas produzidas por lâmpadas de vapor de tungstênio e mercúrio.

Esse equipamento funcionava pelo princípio da transmissão contínua de ondas dirigidas para uma estação refletora, localizada na posição onde se desejava medir a distância, que retornavam para um sistema receptor ótico, localizado no transmissor do Geodímetro. Dentro do instrumento eram comparadas as ondas de luz transmitidas e recebidas e o valor da distância calculado matematicamente.

Em 1957, Woldey,T.L. citado por LAURILA [16] projetou o primeiro sistema de EDM que utilizava microondas (ondas de rádio). O sistema diferencia-se dos demais porque requer um transmissor e um receptor localizados em ambas as extremidades da linha a ser medida. A produção comercial dessa série, chamada de MRA, foi iniciada no mesmo ano pela *Tellurometer* (Ptl) Ltd. da África do Sul.

Usando também microondas, a *Corporation Cubic*, de San Diego, California, colocou o *Eletrotape DM*-20 no mercado em 1962 e, neste mesmo ano, a *Albiswerke Zurich Ltd.* fabricou o primeiro *Distomat*, o qual mais tarde foi distribuído pela *Wild Heerbrugg*, Ltd, da Suissa. Atualmente, os instrumentos são freqüentemente utilizados em topografia militar e hidrográfica com alcance de até 50 km.

Como aconteceu com os instrumentos de alinhamento de eixos e máquinas e nivelamento topográfico, quando da introdução do laser, os sistemas EDM

também tiveram seu grande avanço. Já em 1966 a *Spectra-Phisics* da Califórnia, lançou comercialmente o Geodolito 3G, sendo o primeiro instrumento EDM para medir operacionalmente distâncias o qual usava um laser HeNe modulado como fonte de luz . Os laser HeNe foram ainda utilizados nos *Laser Ranger* produzidos pela *Laser Systems and Eletronics*, Inc, em Tullahoma, Tennessee.

Com o aprimoramento dos laser de semi-condutores (laser de diodo) os laser de HeNe foram gradativamente substituídos. Atualmente, quase todos os instrumentos eletro-óticos disponíveis usam esse tipo de laser que é infravermelho, e não mais laser de HeNe que são visíveis. A razão para o grande número de instrumentos usando, laser de diodo correntemente em EDM, deve-se ao desenvolvimento do diodo emissor infravermelho "AsGa". Esses diodos que oferecem um meio mais simples e barato de medir distâncias, fazem com que os instrumentos EDM possam ser fabricados em menores dimensões, e bem mais leves que aqueles que usam fontes de luz visíveis ou microondas.

Mas, mesmo com a predominância de sistemas de laser infravermelho, o equipamento laser de HeNe ainda é fabricado, geralmente, para medir longas distâncias (até 100 km com grande precisão) ou, onde for necessário equipamento especializado para a medida de distância de alta precisão.

4.2 Princípio de medida utilizado nos EDMs

Os instrumentos EDM são compostos de dois sistemas: um emissor com a finalidade de enviar uma onda eletromagnética em direção a outro sistema, e outro de recepção para captar parte dessa onda e retransmiti-la de volta para o sistema emissor. No sistema emissor as ondas são comparadas, e o valor da medida de distância é calculado. Portanto, o sistema emissor deve estar posicionado no início da linha a ser medida, e o sistema refletor colocado na outra extremidade da linha, de forma que a linha de visada entre os dois sistemas, não esteja obstruída como mostrado na figura 4.1.

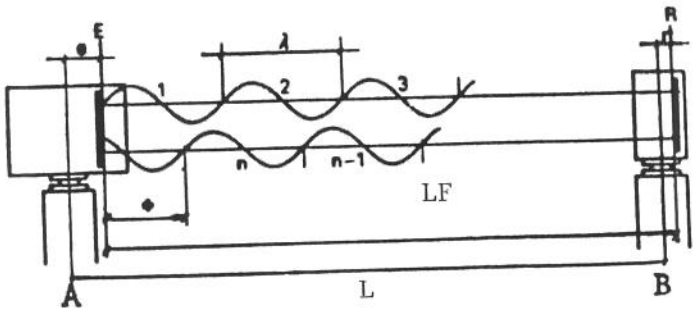

Figura 4.1: Princípio de medida utilizado nos EDM [12].

As ondas eletromagnéticas utilizadas nos EDM são caracterizadas por possuirem uma forma senoidal e, com suas propriedades predeterminadas pelas

quais todas as radiações eletromagnéticas são definidas. A figura 4.2 mostra uma onda de forma senoidal com uma freqüência "f" dada por:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{1}{T_o}; \tag{4.1}$$

O ciclo de uma onda é descrito como o movimento a partir dos pontos identificados na figura 4.2, por exemplo, de A para E ou de D para H.

A velocidade de uma onda eletromagnética depende do meio através do qual viaja. Quando esse meio é o vácuo, a velocidade é representada pelo símbolo "c", denominada velocidade da luz, e é igual a 299.792.458 m/s.

O comprimento de onda "λ", é a distância que separa dois pontos idênticos de uma mesma onda, ou o comprimento de um ciclo. O tempo para a onda viajar através desse ciclo (ou comprimento de onda) é denominado de período T_o.

Os valores da freqüência, comprimento de onda e período variam de acordo com o distúrbio elétrico que produz a onda, enquanto a velocidade "c" depende do meio de propagação da onda.

Nos instrumentos EDM para se conseguir precisão nas medidas, é necessário conhecer frações do comprimento de onda. Esse termo é conhecido como "fase da onda" ϕ, freqüêntemente cotado em graus que podem variar de 0 a 360, como mostrado na tabela da figura 4.2.

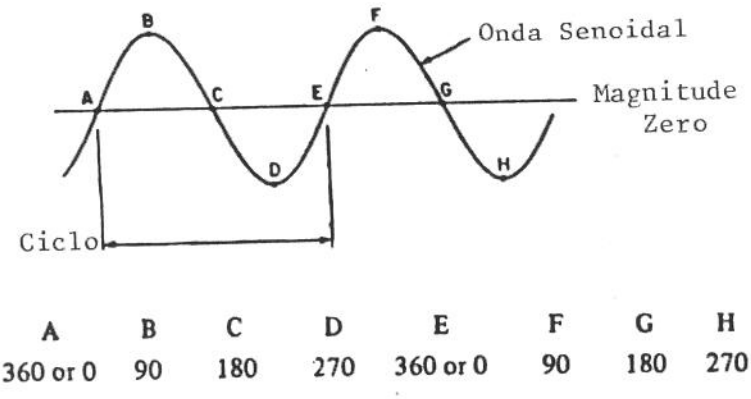

Figura 4.2: Exemplo de valores de fase de onda [12].

Nos sistemas EDM a distância é determinada pela medição da diferença de fase entre os sinais transmitidos e recebidos. Essa diferença de fase é usualmente expressa como uma fração de um ciclo, o qual pode ser convertido para identificar a distância quando a freqüência e a velocidade da onda são conhecidas.

O método para medição por comparação de fase, descrito por UREN & PRICE [27] é apresentado a seguir.

Na figura 4.1 um instrumento EDM está montado no ponto A e um refletor em B, para que a distância $AB = L_o$ possa ser medida. Nesse, a onda é transmitida a partir de A para B, instantaneamente refletida em B e recebida de volta em A.

Para maior compreensão, a mesma seqüência é mostrada na figura 4.3, mas o retorno da onda foi posicionado seqüencialmente nos pontos A e A', visto que o transmissor e o receptor estão colocados lado a lado em A.

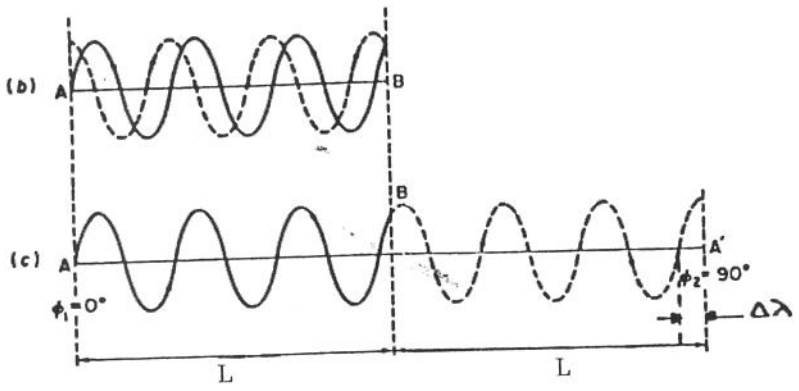

Figura 4.3: Visualização da onda viajando entre as estações [12].

A partir da figura 4.3, é possível visualizar que a distância coberta pela onda, viajando de A para A' é dada por:

$$2L_o = n\lambda + \Delta\lambda \tag{4.2}$$

onde "L_o" é a distância entre A e B, "n" o número inteiro de comprimentos de onda e $\Delta\lambda$ a fração de um dado comprimento de onda λ.

Assim, a distância L_o é conseguida por dois valores distintos, e determinada por dois diferentes processos.

1. A comparação de fase (ou a medição de $\Delta\lambda$) é conseguida, usando-se detectores de fase. Considere-se o detector de fase estacionado na unidade A, o qual detecta ou mede a fase de onda eletromagnética ϕ_1 (em graus) transmitida de A. Assumindo-se que o mesmo detector também mede a fase de onda ϕ_2 retornada de A', estes dois valores podem ser comparados, resultando a medida $\Delta\lambda$ dada pela relação:

$$\Delta\lambda = \frac{(\phi_2 - \phi_1)}{360}.\lambda, \tag{4.3}$$

onde $\phi_2 - \phi_1$ é a diferença de fase em graus.

Em alguns casos, o valor de fase ϕ_2 pode representar um comprimento de onda que entrou em A'. Neste caso, a comparação de fase determina o quanto a onda ultrapassou um número inteiro de seu comprimento.

2. Para a determinação de "$n\lambda$", conhecida como "resolvendo ambiguidades" da comparação de fase, pode-se resolver, aumentando-se a dimensão do comprimento de onda em múltiplos de 10, de modo a permitir uma medição grosseira de L_o, e conseqüentemente de "n".

4.3 Outros sistemas para medição de distâncias

Recentemente uma nova categoria de sistemas de medida de distância, baseada no laser, tem-se tornado popular em topografia. Esses sistemas são conhecidos como encontradores de grande extensão (*Rangefinders*) ou sistemas de medida de distância por tempo pulsado. Nesses, o tempo medido para que o pulso laser atravesse ou viaje do instrumento ao alvo e retorne, é medido pela velocidade do pulso. As fontes laser comumente usadas são o laser de *Neodymium-doped* e os diodos de AsGa, ambos com saída infravermelha. Uma vantagem desse instrumento é a possibilidade da medida de distância sem refletores como foi comprovado por SETA & OH'ISHI [23] que desenvolveram um método para medição de distâncias sem refletores. No método, o laser de diodo é operado com corrente de alta freqüência em uma região de rádio-freqüência (RF) de algumas centenas de MHz para obter-se um comprimento de onda pequeno da modulação da amplitude do laser. Neste medidor foi introduzido novo método (heterodimeo) baseado na modulação do ganho. O método foi testado, medindo a distância de 5 m e apresentou variação de $\pm 16cm$.

Outra forma para medir distância na topográfia é o método interferométrico. Esse processo de medida é utilizado onde é necessário grande precisão, mas apenas pequenas distâncias podem ser medidas. KIKUTA et alii [14] desenvolveram um método para medir distâncias, usando essa técnica. O método foi baseado no princípio de que o comprimento de onda da luz emitida por um laser de diodo varia proporcionalmente com a corrente de alimentação. A diferença de fase entre os dois laser tem variação senoidal do comprimento de onda. Essa variação de fase é detectada pelo método heterodímeo e a variação de magnitude é proporcional à distância. Consegue-se determinar distâncias com grande precisão, mas com alcance de poucos centímetros.

O mesmo foi feito por MATSUMOTO [20] que desenvolveu um método interferométrico para medir distâncias. O novo método usa dois comprimentos de onda simultaneamente produzidos por dois laser de CO_2. O procedimento de medida é baseado na medição de fase, assim como é feito com instrumentos convencionais para modulação da luz. Sua perfórmance foi comparada com o interferômetro Hp laser, medindo distâncias em um túnel ótico NRLM de 300 m de comprimento. O sistema obteve precisão de $1\ x\ 10^{-7}$ e pode ser usado

para medir distâncias acima de 100 m.

Capítulo 5

Sistemas desenvolvidos

Para o desenvolvimento do sistema topográfico a laser foram desenvolvidos dois sistemas principais: um sistema emissor e outro detector.

No sistema emissor destaca-se o mecanismo de emissão do laser e o sistema de nivelamento eletromecânico de precisão. No do detector eletrônico foi construído o sistema para identificação direta do desnível.

5.1 O Sistema emissor

O sistema emissor foi projetado para gerar um plano de referência, o qual emite energia do laser em um nível de referência plano. Esse plano é tipicamente estabelecido pelo feixe laser, o qual é projetado radialmente pelo emissor que gira continuamente (360 °) em torno do seu próprio eixo com rotação constante.

Neste sistema o mecanismo responsável pela geração do plano de referência é composto de base suporte para o pentaprisma, eixo de acionamento apoiado em rolamentos de precisão, motor síncrono de corrente alternada, polia e correia de acionamento como mostrado na figura 5.1.

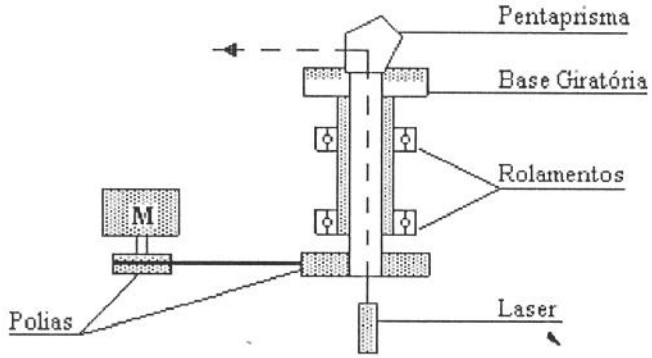

Figura 5.1: Componentes do mecanismo emissor.

Na parte superior do emissor está posicionado o pentaprisma que será

responsável pela mudança de direção do feixe laser em 90 °. Esse pentaprisma, mostrado em detalhes no desenho da figura 5.2, tem duas propriedades importantes. A primeira é que a imagem não é invertida nem reversa quando desviada de 90 °. A segunda é que é um prisma de desvio constante, significando que os mesmos exatos 90 ° de ângulo de desvio é aplicado para todos os feixes transmitidos independentemente do ângulo entre esses e o eixo ótico, ou seja, entre as faces normais de entrada e saída. Portanto, o desvio é constante e independente da orientação do prisma. Isso é especialmente importante, visto que seria quase impossível controlar a orientação do prisma para obter um sistema preciso e confiável.

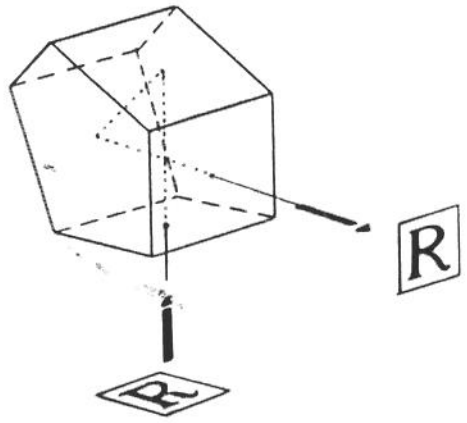

Figura 5.2: Pentaprisma e reflexões nas suas faces.

No corpo do emissor (figura 5.3) está localizada a base do laser de diodo. A forma como a base foi projetada, permitiu o alinhamento do laser em relação ao eixo ótico do mecanismo de geração do plano de referência. É fator determinante na precisão do sistema de emissão.

Na parte inferior do emissor é acoplado o sistema de nivelamento eletromecânico de precisão, de forma que a superfície de referência do nível serve de suporte para a base do emissor, simplificando e protegendo todo o conjunto emissor e de nivelamento. A foto da figura 5.4, mostra o protótipo do sistema emissor laser desenvolvido.

5.1.1 Tipo de laser utilizado

O laser utilizado é do tipo diodo AsGa de 1 mw de potência, operando com corrente de 76 mA. Possui um minicolimador ótico acoplado (ver figura 5.5) com a finalidade de diminuir a divergência natural desse laser (ver capítulo 2) para uma faixa de 0,3 mrad em um sentido e 0,9 mrad no sentido perpendicurar. A divergência está especificada em dois diferentes valores devido a sua forma de frente de onda ser retangular. O conjunto opera com um comprimento de onda de 675 nm (ver tabela 5.1).

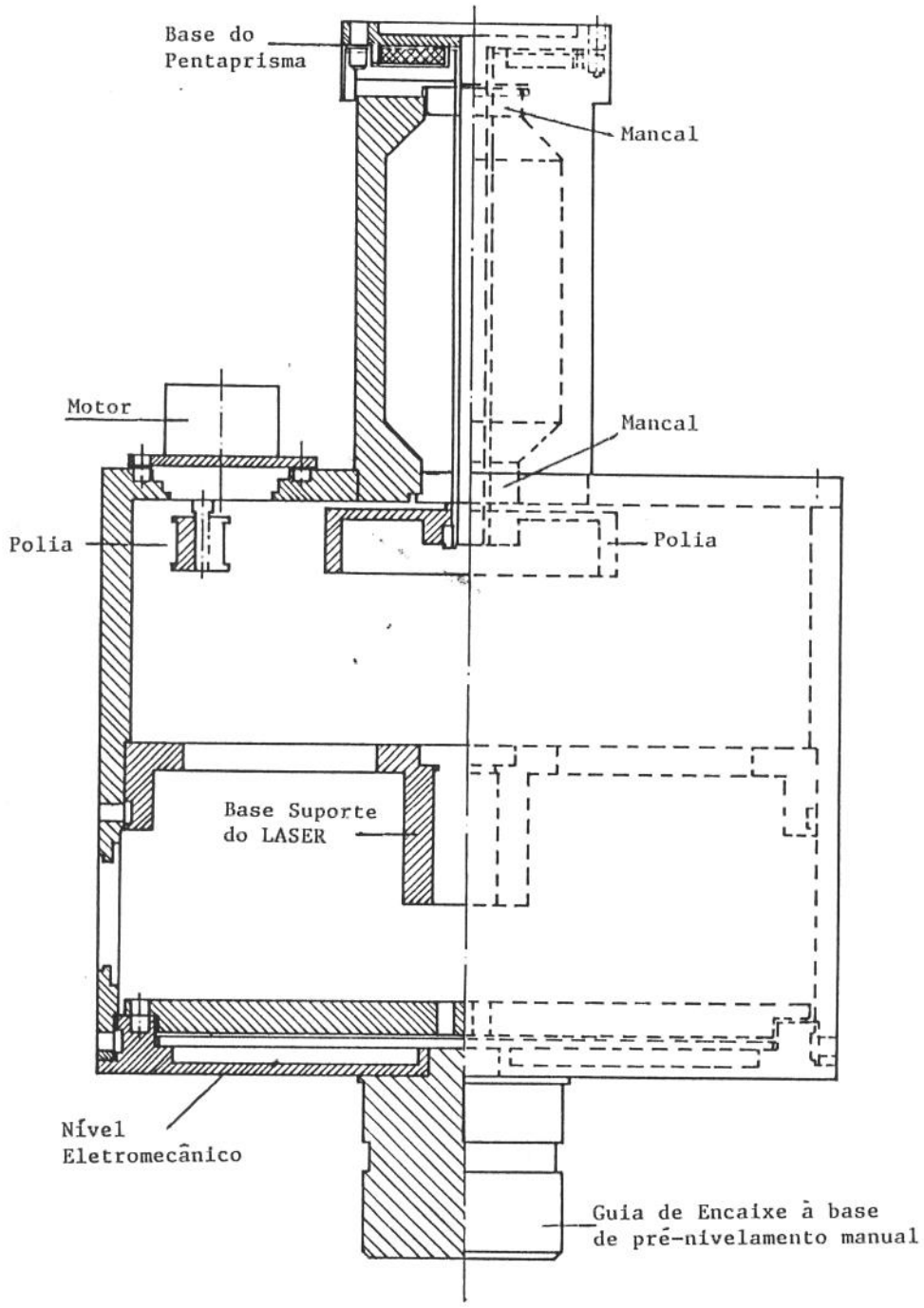

Figura 5.3: Conjunto montado do sistema emissor desenvolvido.

UNIC
BIBLIOTECA

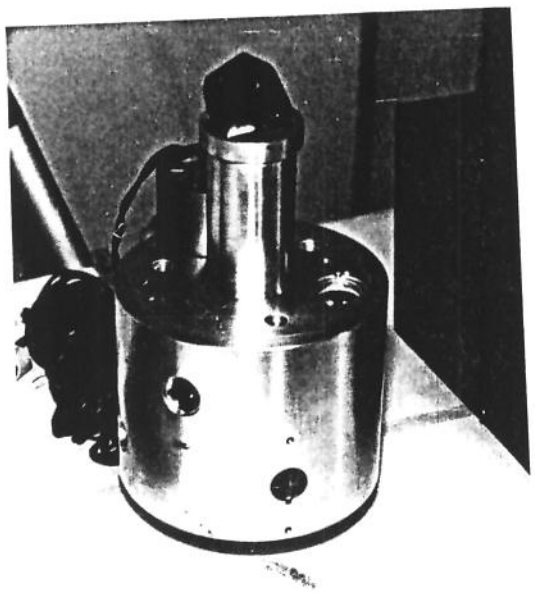

Figura 5.4: Protótipo do sistema emissor laser construido.

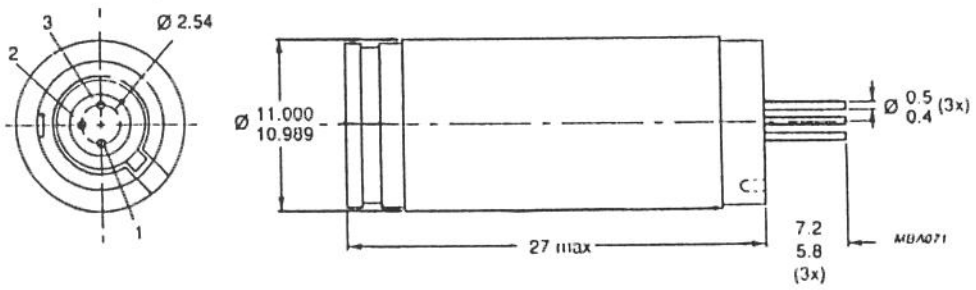

Figura 5.5: Laser de diodo utilizado.

SIMBOLO	PARAMETRO	CONDICAO	TIPICO	MAX	UNIDADE
Po	Potencia otica de operacao	=	=	1.2	mW
Iop	Corrente de operacao	Po = 1 mW	75	=	mA
P	Comprimento de onda				
	para pico de emissao		675	680	nm
ICOL	Colimacao	*	0.3	=	mrad
ICOD	Colimacao	*	0.9	=	mrad
d	Diametro do raio	=	4.5	=	mm
d	Diametro do raio	=	1	=	mm
m	Massa	=	13	=	g
l	Comprimento do cartucho	=	=	27	mm
D	Diametro do cartucho	=	=	11	mm

* - Inclusive divergencia natural de 0.4 mrad.

Tabela 5.1: Principais características do laser de diodo.

Devido à grande eficiência, alto rendimento e, operação contínua há necessidade do controle de sua temperatura de operação, para não danificar as lentes do colimador. Esse controle é feito através do circuito eletrônico mostrado na figura 5.6.

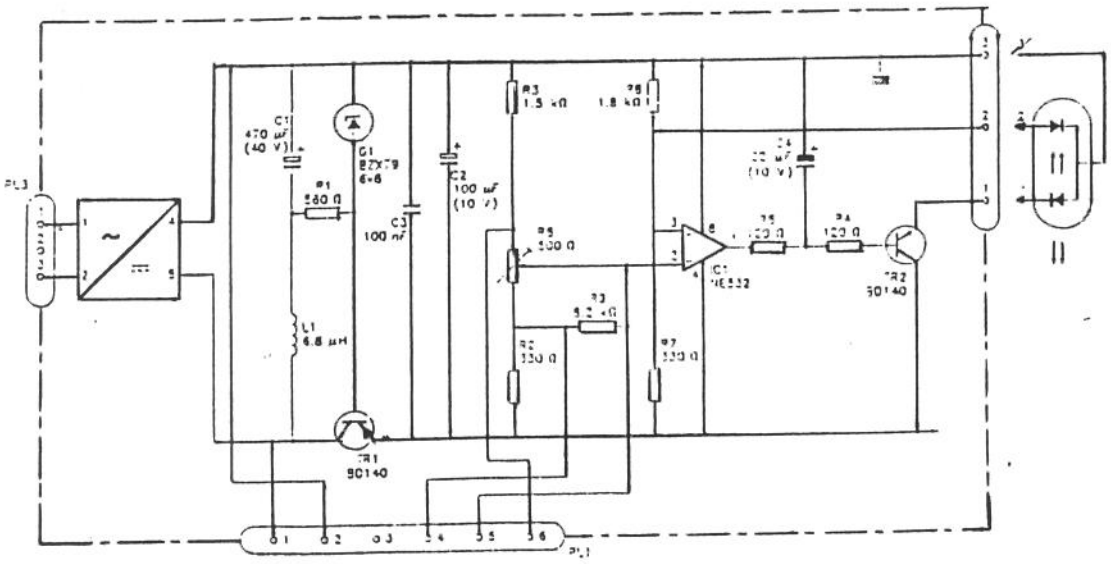

Figura 5.6: Circuito eletrônico para controle da operação do laser de diodo.

5.2 Nível eletromecânico de precisão

Seu funcionamento baseia-se em dois princípios. Primeiro, o de que um líquido sempre reproduz uma superfície horizontal praticamente perfeita e, se-

gundo, de que uma capacitância é formada entre dois condutores elétricos separados por um dielétrico ou isolante.

Foi idealizado um sistema em que o líquido é o mercúrio (Hg). Esse foi acondicionado em um reservatório cilíndrico e sobre ele foi colocado uma placa dividida em quatro partes iguais. Cada uma dessas partes é feita de um material condutor, isoladas entre si, como mostrado na figura 5.7. Portanto , o nível funciona pela comparação dos valores da capacitância dos quatro capacitores que são formados entre a parte condutora da placa do nível e o mercúrio. Quando o sistema estiver nivelado, o espaço existente entre o líquido e as placas será igual. Conseqüentemente, se as áreas de cada placa forem iguais, o valor de cada capacitor também será igual.

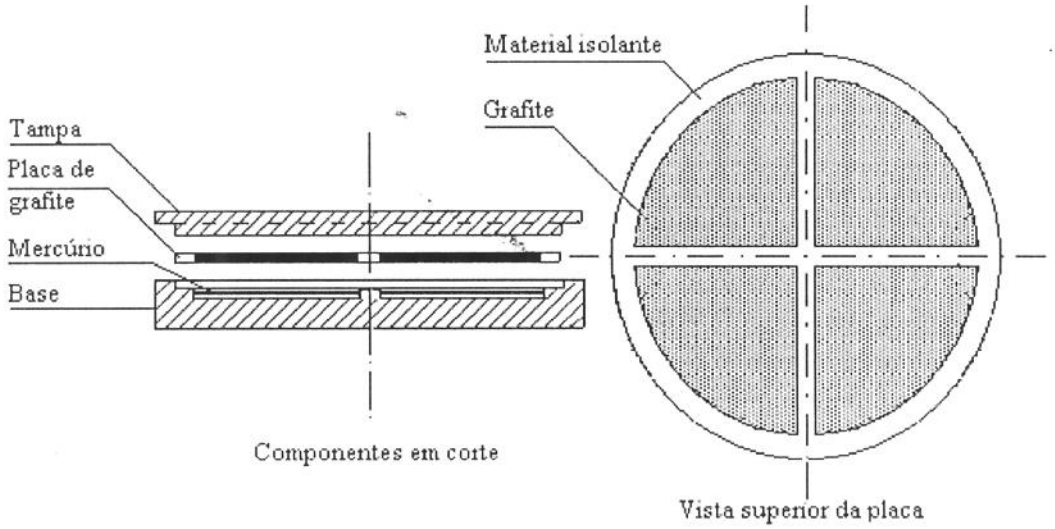

Figura 5.7: Componentes do nível construido.

No capacitor, o material dielétrico utilizado é o ar que fica armazenado entre as duas superfícies condutoras. O material condutor utilizado nas placas foi o grafite, devido às suas características inertes em relação ao mercúrio. O reservatório para acondicionamento do mercúrio foi confeccionado em aço inox pelas mesmas razões.

O funcionamento do sistema está relacionado diretamente com a precisão alcançada na confecção das partes mecânicas, porque os valores dos capacitores (criados para identificação do nivelamento) são relacionados com a área de cada parte condutora da placa de nível. Portanto, suas áreas devem ter a menor variação possível para não influírem no valor dos capacitores que devem ser influenciados apenas pela variação do deslocamento do líquido (mercúrio) dentro do nível. A foto da figura 5.8, mostra o protótipo do nível desenvolvido.

O circuito eletrônico foi dividido em três blocos, como mostrado na figura 5.9.

O Circuito Comparador baseia-se em um circuito RC, onde a capacitância "C" varia. A capacitância de placas paralelas é calculada como a

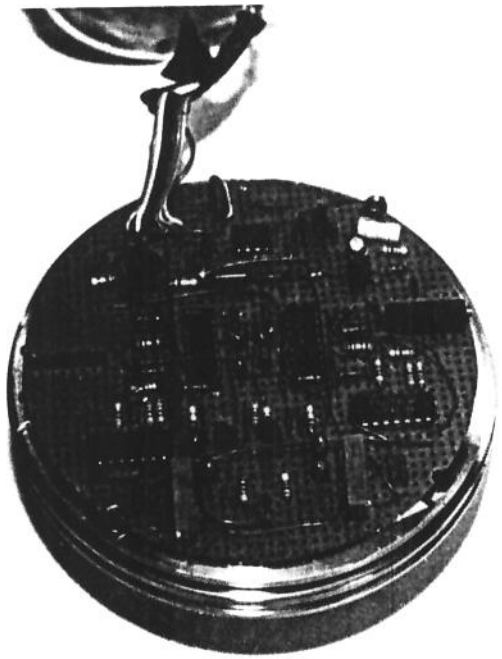

Figura 5.8: Protótipo do nível desenvolvido.

Figura 5.9: Diagrama de blocos da parte eletrônica do nível eletromecânico.

permissividade multiplicada pela área, dividida pela distância entre as placas, ou seja:

$$C = \frac{K.A}{L_i}; \tag{5.1}$$

onde:

C = capacitância (picofarads);

K = constante dielétrica (permissividade F/m);

A = área das placas condutoras (mm^2);

L_i = distância entre as placas (mm).

As dimensões do nível foram estabelecidas de tal forma a evitar que o valor das capacitâncias parasitas fossem relevantes , ao ponto de comprometerem o bom funcionamento do Circuito Comparador, correspondendo aos valores de projeto

A = 1.800 mm^2;

K = $8,854.10^{-12}$ $\frac{F}{m}$;

L_i = 0.5 mm;

resultando no valor calculado C = 31,87 pf, maior que as capacitâncias parasitas, que ficaram em torno de 5 a 10 pf.

O Circuito Oscilador, também conhecido como ponte de *Wien*, e o Circuito Conversor DC/DC +12/±5 V, são circuitos consagrados pelo uso, dispensando descrição detalhada.

O Circuito Sinalizador tem a finalidade de indicar quando o sensor está em nível ou próximo dele. Constitui-se basicamente de lâmpadas *LED* dispostas em forma de cruz, como mostrado na foto da figura 5.10. Quando o *LED* do centro está aceso indica o nivelamento do sistema, e quando são os das extremidades que ficam acesos, significa que o sistema está muito fora da posição de nível. Para auxiliar no nivelamento foi adaptado um nível de bolha circular.

5.3 Sistema detector

Neste sistema o feixe laser é detectado eletronicamente, independente dos raios solares de mesma freqüência e da divergência natural do feixe, indicando diretamente o desnível entre as estações emissora e detectora.

Para tanto, o sistema detector (figura 5.11) foi dividido em duas partes: a) detecção do feixe; b) identificação do desnível.

Figura 5.10: Sistema sinalizador do nível eletromecânico

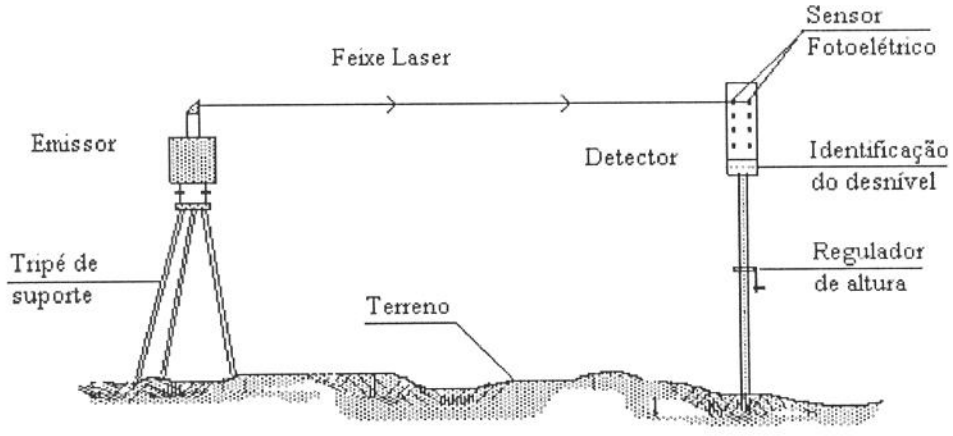

Figura 5.11: Sistema detector e de identificação do desnível.

5.3.1 Sistema detector do laser

Para detecção do feixe laser foi construído uma célula sensora que funciona como um *Flip-Flop* biestável, controlado pelo laser. Como mostrado na figura 5.12 o sensor "1" funciona como sinal de *reset* e o sensor "2" como sinal de *set*. Foi projetada e construída uma placa com vinte células com capacidade de detectar um feixe com diâmetro da frente de onda de até 160 mm. Foram utilizados fototransistores da marca Motorola referência MRD 300.

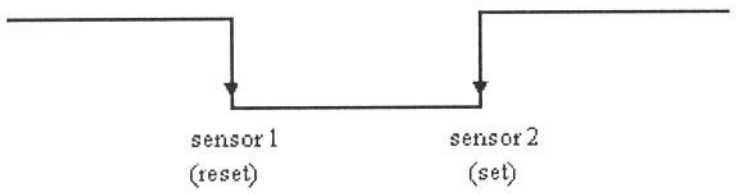

Figura 5.12: Mecanismo de funcionamento do sensor.

5.3.2 Sistema detector do desnível

Como o laser possui divergência natural, incidirá em várias células sensoras ao mesmo tempo (figura 5.13) sendo preciso identificar qual delas foi acionada pelo ponto mais central do laser que será o seu ponto de maior intensidade. A forma utilizada para isso, foi a de identificar nas células acionadas na placa sensora, qual a superior e a inferior que foram atingidas pelo laser, e fazer a média entre elas.

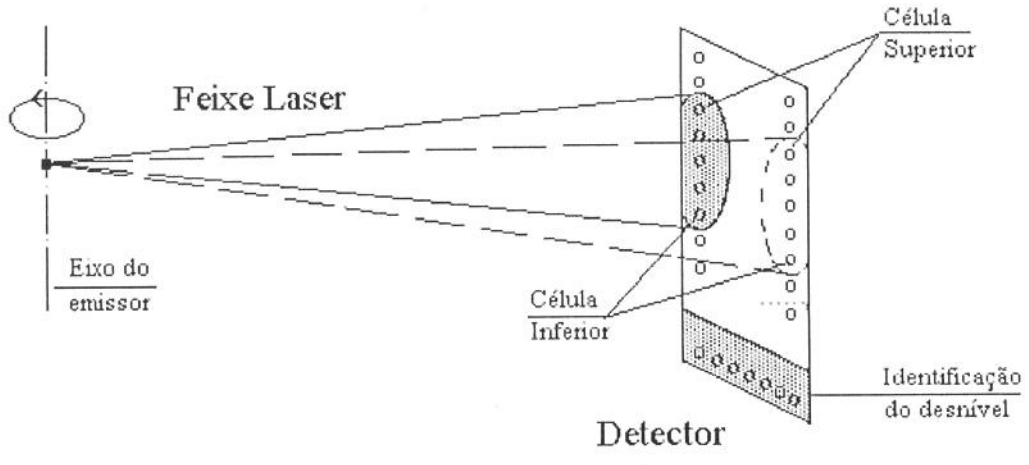

Figura 5.13: Representação do acionamento de várias células sensoras.

O diagrama de blocos da figura 5.14 ilustra o procedimento utilizado. Inicialmente, o sinal da placa dos sensores entra em um conjunto de portas AND, identificado por A, de tal modo que, quando o laser incide sobre uma das células o seu nível de saída vai a zero. O sinal dispara um monoestável do bloco *reset* que irá *setar* a placa dos sensores. A principal função desse *reset* é

identificar os casos onde o laser incide apenas sobre um dos sensores, *resetanto* a célula, porém não a *setando* novamente, como mostrado na figura 5.15.

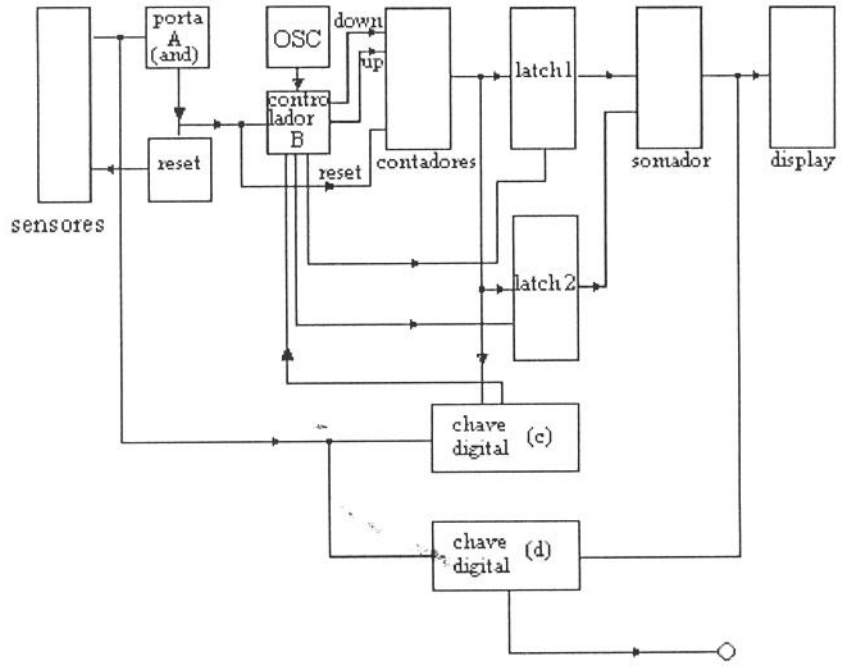

Figura 5.14: Diagrama de bloco para determinação do desnível.

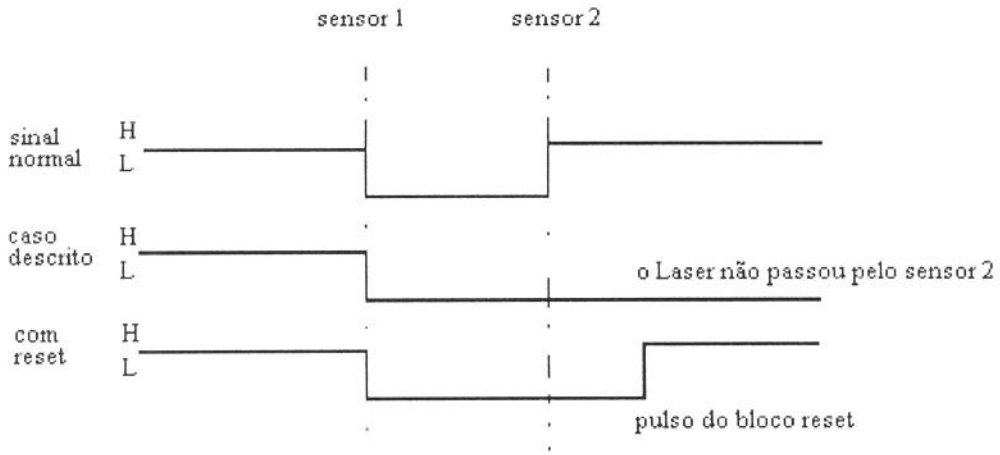

Figura 5.15: Ilustração do bloco *Reset*.

O período de tempo deve ser grande o suficiente para não ser confundido com o pulso do sinal normal. Outra finalidade desse sinal é recompor os contadores, fazendo com que suas saídas iniciem do zero.

O circuito do bloco de controle B é disparado pelo sinal das portas A. As células sensoras estão dispostas enfileiradas na vertical, de forma que o controle é iniciado comandando a contagem em uma direção, de cima para baixo, por

exemplo. O sinal dos contadores endereça as chaves digitais C, de forma que a saída de cada célula sensora seja inspecionada pelo controle. Quando esse encontra a primeira célula com sinal igual a zero, manda a memória 1 (*Latch 1*) (E) guardar seu endereço, e em seguida inverte o sentido da contagem, de forma a procurar a outra célula que definirá o diâmetro da frente de onda do feixe laser. Quando o controle encontra essa nova saída igual a zero, manda um sinal para que o novo endereço seja armazenado na memória 2 (*Lacth 2*) (F). O passo seguinte é a soma dos endereços armazenados nas memórias 1 e 2.

A soma em binário, desprezando-se o *bit* menos significativo (LSB) é como uma divisão por dois da soma dos números. Esse *bit* LSB, desprezado inicialmente, irá indicar que apenas parte do feixe laser incide sobre uma das células sensoras ativadas. Nesse caso, o valor será dado pela média dos *bits* mais significativos, somados 5 mm ao valor indicado pelos *bits*. Esse valor (5 mm) é a metade do espaçamento entre as células do detector.

De posse do valor médio, a chave digital 2 (D) é endereçada para que seu sinal seja utilizado na medida do desnível.

5.3.3 Sistema medidor da distância

A medição da distância é baseada no princípio de que o laser leva um determinado tempo Δt para passar entre os dois sensores da célula sensora, e que esse tempo varia de acordo com a distancia "D" entre as duas estações (emissora e receptora). A figura 5.16 mostra o princípio estabelecido, onde:

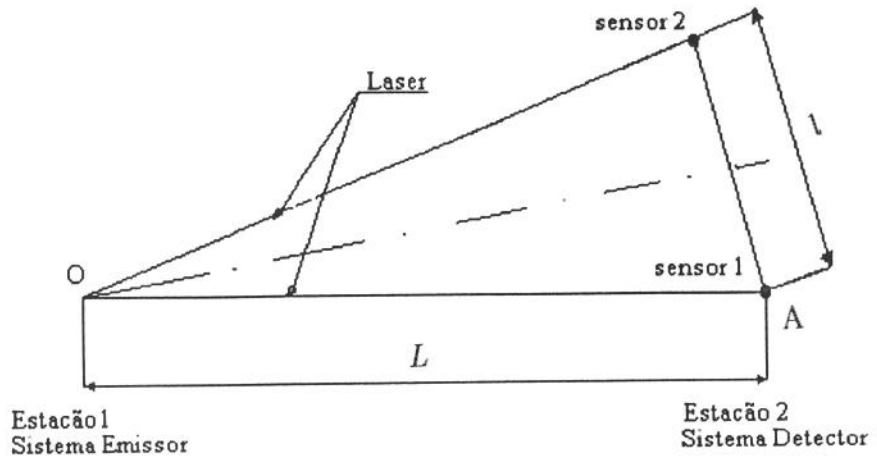

Figura 5.16: Desenho esquemático do princípio de medição da distância.

O = ponto de estacionamento do sistema emissor;

A = ponto de estacionamento do sistema detector;

L = distância a ser medida;

l = distância entre dois sensores das células do Sistema detector;

Δt = tempo que o Laser leva entre os dois sensores;

T = período;

w = velocidade angular;

V = velocidade linear.

Considerando-se que:

$$V = \frac{l}{\Delta t} \ , \ V = w.L \, , \tag{5.2}$$

onde:

$$w = \frac{2.\pi}{T} \, , \tag{5.3}$$

resulta

$$L = \frac{l}{2.\pi} . \frac{T}{\Delta t} \tag{5.4}$$

Sendo a distância estabelecida entre os dois sensores $l = 6,28 \, . \, 10^{-2}$ m, resulta:

$$L = 10^{-2} \, . \, \frac{T}{\Delta t} [m]. \tag{5.5}$$

Portanto, a distância "L" é função do tempo "Δt" que o laser percorre entre os sensores, e do período "T". Como o período ,estabelecido pelo emissor é constante para conhecer a distância entre o emissor e o detector, basta medir o tempo Δt. A foto da figura 5.17, mostra o protótipo do detector desenvolvido.

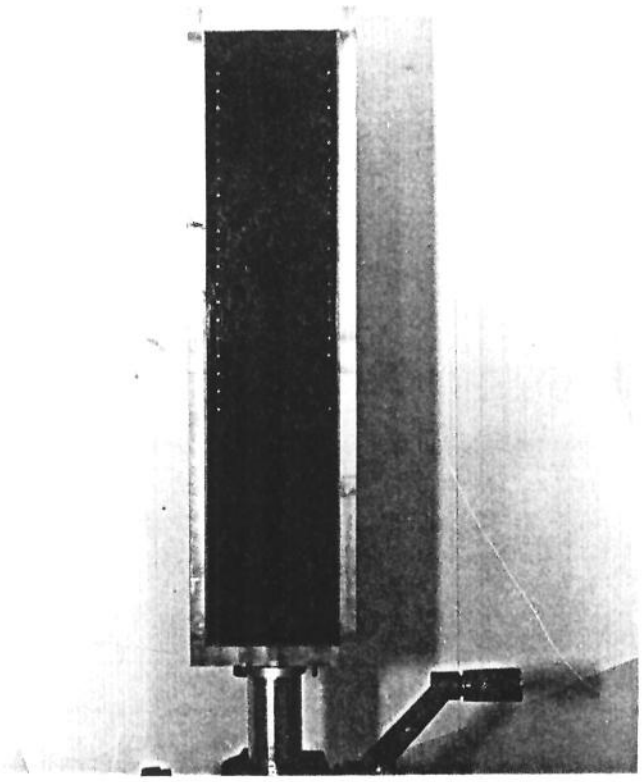

Figura 5.17: Protótipo do detector desenvolvido.

Capítulo 6

Medições de desníveis

A avaliação dos sistemas desenvolvidos para medições de desníveis, permitiu avaliar, também, o nível eletromecânico de precisão, o sistema emissor e o sistema detector, já que esses são interdependentes.

6.1 Metodologia empregada

Para a avaliação dos sistemas nas medições de desníveis foram feitos marcos de referência. O nível desses marcos situam-se no mesmo plano horizontal do feixe laser no ponto de sua saída do emissor. No procedimento da marcação desses níveis de referência foi utilizado um nível de mangueira. A figura 6.1 ilustra este procedimento, onde HL representa a altura do laser, mantida constante em 120,5 cm, HM a altura do marco de referência e LM a distância entre o sistema emissor e os marcos. Na tabela 6.1 são apresentados os valores medidos das alturas e das distâncias referentes ao posicionamento dos marcos.

A figura 6.2 ilustra o procedimento de coleta dos dados onde, HS representa a altura entre a primeira célula sensora do detector e o solo e HC a distância entre a primeira célula sensora e a célula acionada pelo feixe laser; esse valor é registrado pelo próprio sistema de detecção. Portanto, a altura(HD) é a distância entre o solo e o ponto de incidência do feixe laser no detector, ou seja DH = HS + HC.

6.1.1 Procedimentos de coleta dos dados

No procedimento de coleta dos dados foram estabelecidas seqüências de caminhamentos entre os marcos, ao acaso. Foram feitas quatro medições com três repetições para cada uma. Neste procedimento foi adotada a seguinte seqüência:

- Nivelamento do sistema emissor com o nível eletromecânico;

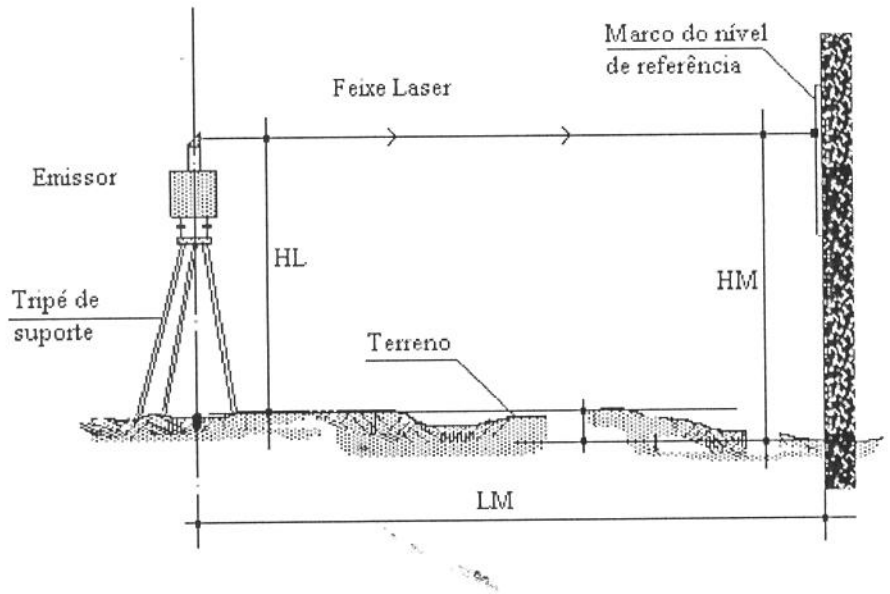

Figura 6.1: Detalhe do posicionamento dos marcos de nível de referência.

Marco de referência	Distância LM(cm)	Altura HM(cm)
A	500	118.9
B	1000	118.7
C	1500	120.3
D	2000	120.1
E	2500	120.3
F	3000	121.0
G	3500	121.3
H	4000	121.1
I	4500	121.4
J	5000	121.6
L	5500	120.6
M	6000	120.4

Tabela 6.1: Valores referentes ao posicionamento dos marcos.

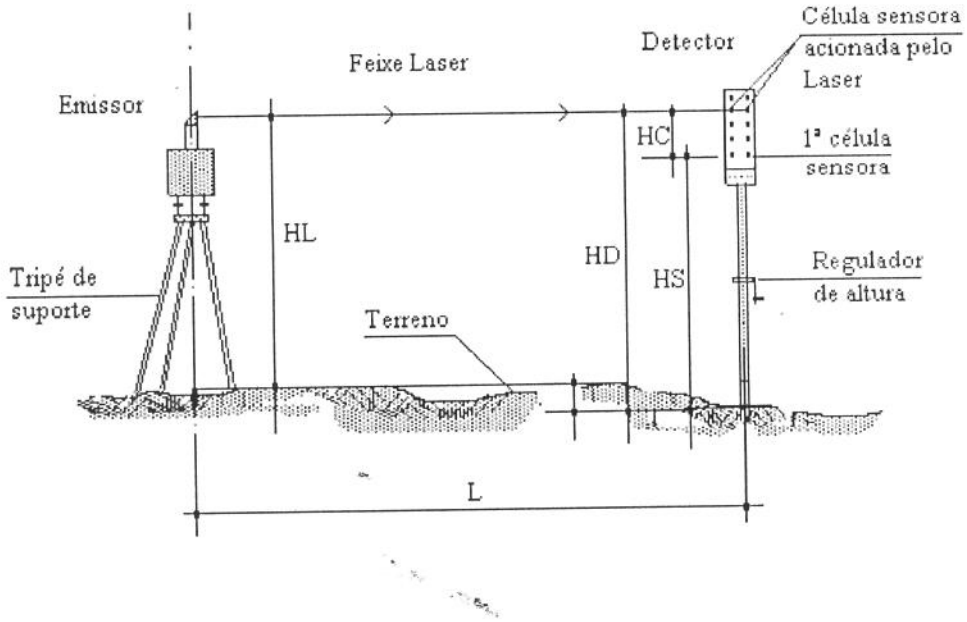

Figura 6.2: Ilustração do procedimento de coleta das medidas de desnível.

- Posicionamento do sistema detector em um dos 12 marcos de referência;
- Regulagem da altura do detector (HS) até que um dos sensores detectasse o feixe laser;
- Esta regulagem foi repetida três vezes, a fim de garantir a detecção do feixe laser em diferentes posições do detector;
- Medição da altura HS, e registro do valor de HC, identificado pelo detector;
- Tabulação dos dados (tabelas 1 a 4 do anexo 1) de HS e HC;
- Este procedimento de coleta dos dados foi realizado quatro vezes sendo que antes de cada medição o sistema emissor era desnivelado.

6.2 Processamento dos resultados

Os dados das alturas(HM) dos marcos de referência registrados na tabela 6.1 e das alturas(HD) encontradas pelos sistemas desenvolvidos (cálculados pela expressão HD = HS + HC e mostrados nas tabelas 1 a 4 do anexo 1) foram utilizados para se calcular o erro da diferença de nível (ΔH) entre as medidas encontradas com os sistemas desenvolvidos e os níveis de referência de cada marco. Esses erros das diferenças de níveis (ΔH) foram obtidos, efetuando-se

a diferença $HD - HM$. Seus valores foram anexados às tabelas 1 a 4 (anexo 1).

Para melhor compreensão do comportamento dos valores de ΔH em relação às distâncias de referência (LM) para cada uma das medições, seus valores foram rearranjados em seqüência (A a M) e tabulados na tabela 6.2 junto com suas médias correspondentes. Estes valores médios foram plotados no gráfico (ΔH x LM) mostrado na figura 6.3. Alguns dados da tabela 6.2 (seis de um total de cento e quarenta e quatro) foram descartados, tendo em vista caracterizarem-se como erros de anotações. Estes estão mostrados em destaque.

Marco de	Primeira medição				Segunda medição			
Referência	1a	2a	3a	média	1b	2b	3b	média
A	-0.20	-0.20	0.00	-0.133	-0.60	-0.50	0.40	- 0.550
B	0.30	0.30	0.50	0.366	-0.70	- 0.90	-0.90	-0.833
C	0.20	0.70	0.70	0.533	-1.30	-1.30	-1.00	-1.200
D	0.60	0.60	0.50	0.566	-1.40	-1.30	-0.40	-1.350
E	0.40	0.30	0.40	0.360	-2.20	-2.00	-2.10	- 2.100
F	1.00	0.80	1.00	0.930	-2.20	- 2.20	-2.20	-2.200
G	0.50	0.50	0.60	0.530	-2.50	-2.80	-2.60	-2.630
H	0.70	0.60	0.70	0.660	-2.50	-2.80	-2.30	-2.530
I	1.40	1.40	1.10	1.360	-2.70	-2.30	-3.10	- 2.700
J	1.30	1.00	1.20	1.160	-3.60	- 3.50	-3.80	-3.630
L	2.10	1.90	2.10	2.030	-3.80	-3.80	-4.20	-3.930
M	1.40	1.30	1.30	1.330	-4.90	-4.60	-4.60	-4.700

Marco de	Terceira medição				Quarta medição			
Referência	1c	2c	3c	média	1d	2d	3d	média
A	-0.10	-0.10	-0.40	-0.200	0.10	0.10	0.10	0.100
B	-0.30	-0.30	-0.20	-0.270	0.50	3.30	0.30	0.400
C	-0.50	-0.60	-0.50	-0.530	0.70	0.50	0.70	0.630
D	0.20	-0.30	-0.80	-0.300	1.10	1.40	1.40	1.300
E	0.00	-1.00	0.00	-1.000	1.20	1.10	-2.00	1.150
F	-0.60	-2.20	-0.70	-0.650	2.50	2.00	1.80	1.900
G	-1.00	-1.10	-1.10	-1.060	2.20	2.20	1.50	1.960
H	-0.90	-1.00	-0.90	-0.930	2.30	2.30	2.20	2.270
I	-1.40	-1.40	-1.40	-1.400	2.60	2.80	2.80	2.730
J	-1.70	-1.70	-1.70	-1.700	2.40	2.60	3.60	2.860
L	-1.30	-1.40	-1.40	-1.370	3.00	3.20	3.10	3.100
M	-1.90	-2.20	-2.20	-2.100	3.10	3.20	3.10	3.130

Tabela 6.2: Valores da diferença de nível (ΔH) rearranjados em seqüência.

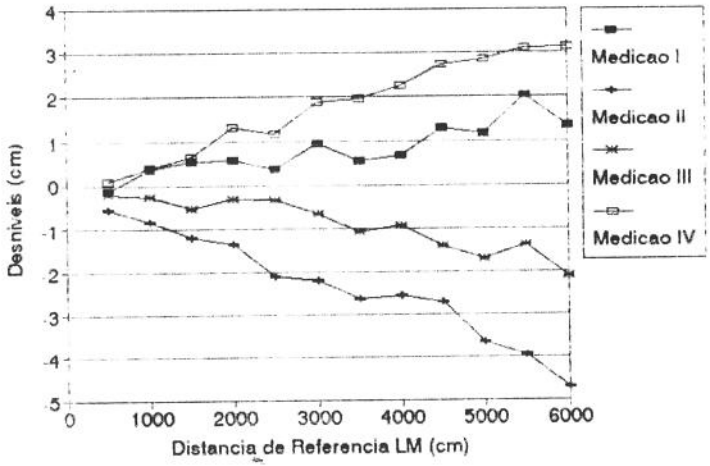

Figura 6.3: Gráfico dos desníveis médios em relação à distância de referência para cada uma das medições.

A fim de se estimar o melhor valor para a medida do desnível relativo a cada distância dentre as quatro medições com três repetições para cada uma, e, ainda determinar seu intervalo de confiança, foi feita análise de regressão dos dados de ΔH em relação à distância de referência (LM).

Esta análise de regressão constou inicialmente em se determinar o desvio padrão amostral dos erros $\sigma(\Delta H)$ (tabela 6.3) e obter a equação que melhor se ajustasse a esses desvios padrões em relação à distância (LM) bem como, construir seu intervalo de confiança e dos seus coeficientes linear e ângular.

Para se determinar essa equação utilizaram-se os dados do desvio padrão amostral e da distância de referência e através do *software* QUATRO PRO calculou-se a análise de regressão. A tabela 6.4 mostra os resultados desta análise.

6.2.1 Avaliação da primeira análise regressão

A avaliação desta regressão foi feita a partir da análise da equação:

$$y = a_0 + a_1 \, . \, x. \tag{6.1}$$

Dist de Referência	Desvio Padrão
500	0.246060
1000	0.540538
1500	0.811797
2000	1.007788
2500	1.262033
3000	1.669364
3500	1.808565
4000	1.871962
4500	2.248973
5000	2.639947
5500	2.913747
6000	3.167113

Tabela 6.3: Desvio padrão amostral do erro de nível $\sigma(\Delta H)$ em relação à distância de referência.

Resultado da Regressão	
Coeficiente linear	-0,01
Desvio padrão do estimador de (y)	0,085873
R^2	0,99245
Número de observações	12
Graus de liberdade	10
Coeficiente angular	0,000521
Desvio padrão do coeficiente angular	$1,44\,x\,10^{-5}$

Tabela 6.4: Resultados da primeira análise de regressão.

onde:

y = erro do desnível ΔH;

x = distância de referência LM;

a_0 = coeficiente linear equivalente a $-0,01$;

a_1 = coeficiente angular equivalente a $0,000521$.

Colocando-se esta equação (6.1) em função da distância, do erro do desnível e dos coeficientes resulta:

$$\Delta H = -0,01 + 0,000521 \, . \, LM. \tag{6.2}$$

O quadrado da correlação sendo $R^2 = 0,99245$, indica que a regressão obtida explica $99,24\%$ da variação de ΔH;

O intervalo de confiança para os coeficientes a_0 e a_1 foram determinados através da expressão:

$$a_i \pm t\nu \, . \, \sigma a_i. \tag{6.3}$$

onde:

a_i = coeficiente linear ou angular;

$t\nu$ = fator de distribuição deteminado através da tabela *t-student* em função do número de graus de liberdade;

ν = número de graus de liberdade;

σa_i = desvio padrão dos coeficientes.

Considerando-se um intervalo de confiança de 95 %, consultando a tabela da distribuição *t-Student*, e levando-se em consideração o número de graus de liberdade, $\nu = n - 2$, ou seja $\nu = 10$ (para "n" número de elementos da amostra equivalente a 12) encontra-se $t\nu = 2,228$, que resulta:

$$-0,01 \pm 2,228 \, . \, \sigma a_0$$

$$0,000521 \pm 2,228 \, . \, \sigma a_1$$

O desvio padrão (σa_1) para o coeficiente angular a_1 foi determinado pelo QUATRO PRO sendo equivalente a 0,0000144. Para se calcular o desvio padrão para o coeficiente linear a_0 (σa_o) utilizou-se a equação:

$$\sigma a_0 = \left(\frac{\sum x^2}{N.S_{xx}}\right)^{\frac{1}{2}}. \tag{6.4}$$

onde:

$\sum x^2$ = somatório das distâncias de referência ao quadrado, equivalente a $(\sum LM^2)$;

S_{xx} = variância dos valores das distâncias de referências (LM) calculado pela expressão:

$$S_{xx} = \sum LM^2 - (\sum LM)^2/N. \tag{6.5}$$

Fazendo-se os cálculos obtém-se:

$\sigma a_0 = 0{,}6155.$

De onde pode-se concluir que:

$$a_0 \pm t\nu \,.\, \sigma a_0 = -0{,}01 \pm 2{,}228 \,.\, 0{,}6155 = -0{,}01 \pm 1{,}3713$$

$$a_1 \pm t\nu \,.\, \sigma a_1 = 0{,}000521 \pm 2{,}228 \,.\, 0{,}0000144 = 0{,}000521 \pm 0{,}000032$$

Significa dizer que há 95 % de probabilidade que o intervalo de confiança obtido para a_0 seja (-1,3813 ; 1,3613) emquanto que para a_1 foi (0,0005 ; 0,0006);

Para se encontrar o raio do intervalo de confiança para a medida do erro do desnível em relação a qualquer valor específico da distância LM, utilizou-se a equação:

$$E_{(y)} = \pm t\nu S_\varepsilon \left[\frac{1}{N} + \frac{(x_i - \overline{x})^2}{s_{xx}}\right]^{\frac{1}{2}}. \tag{6.6}$$

onde;

$E_{(y)}$ = raio do intervalo de confiança ou a variação do erro do desnível;

S_ε = desvio padrão do erro determinado pelo QUATRO PRO e equivalente a 0,085873;

x_i = distância LM;

$\overline{x}$ = média da distância LM.

Portanto, a partir dos valores de LM, substituindo-se na equação 6.2 calcula-se os valores do erro do desnível estimado $\Delta H_{(c)}$ e através das equações 6.5 e 6.6 obtém-se o raio do intervalo de confiança ($E_{(y)}$) ambos estão mostrados na tabela 6.5. Nesta mesma tabela estão mostrados os valores máximos e mínimos para o erro do desnível, calculados através da relação $\Delta H \pm E_{(y)}$. Estes resultados estão apresentados no gráfico da figura 6.4.

LM	ΔH	ΔH_c	E(y)	ΔH - E(y)	ΔH + E(y)
500	0.246	0.250	0.104	0.142	0.350
1000	0.541	0.510	0.091	0.450	0.631
1500	0.812	0.770	0.079	0.733	0.890
2000	1.008	1.030	0.068	0.940	1.076
2500	1.262	1.290	0.060	1.202	1.322
3000	1.669	1.550	0.056	1.614	1.725
3500	1.809	1.810	0.056	1.753	1.864
4000	1.872	2.070	0.060	1.812	1.932
4500	2.249	2.330	0.068	2.181	2.317
5000	2.640	2.590	0.079	2.561	2.719
5500	2.914	2.850	0.091	2.823	3.004
6000	3.167	3.110	0.104	3.063	3.271

Tabela 6.5: Valores calculados a partir da primeira análise de regressão.

Embora o coeficiente angular estimado tenha sido pequeno (próximo de zero) é significativo, indicando pequena alteração (acréscimo) em função da distância.

Com relação à largura do intervalo de confiança (distância vertical entre dois pontos no gráfico) nota-se que varia para diferentes valores de LM. O desnível ΔH pode ser estimado com maior precisão na região central dos pontos. O distanciamento das curvas do intervalo de confiança que ocorre na extremidade dos pontos, indica que não é recomendado extrapolar (estimar valores para o desnível) além da região experimental.

A partir do coeficiente angular (a_1) que está associado ao ângulo de inclinação da reta representada pala equação de correlação, pode-se afirmar que este ângulo é o erro de desnível das medidas efetuadas com o sistema desenvolvido, medido pela inclicação ($\gamma = arctan\, a_1$) entre o plano horizontal e o plano gerado pelo sistema emsissor e a variação deste ângulo é medida pelo intervalo de confiança do coeficiente. A figura 6.5 ilustra esta inclinação.

Para se verificar a precisão obtida na determinação da equação (6.1) procedeu-se a um estudo a partir de uma equação diferente da equação linear adotada nesta primeira análise.

Esta segunda análise de regressão adotou uma equação do tipo:

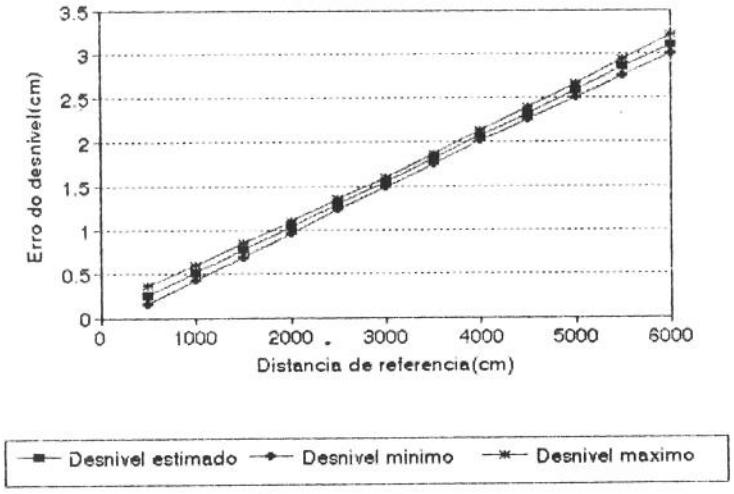

Figura 6.4: Gráfico da dispersão do erro do desnível em relação à distância para a primeira análise de regressão.

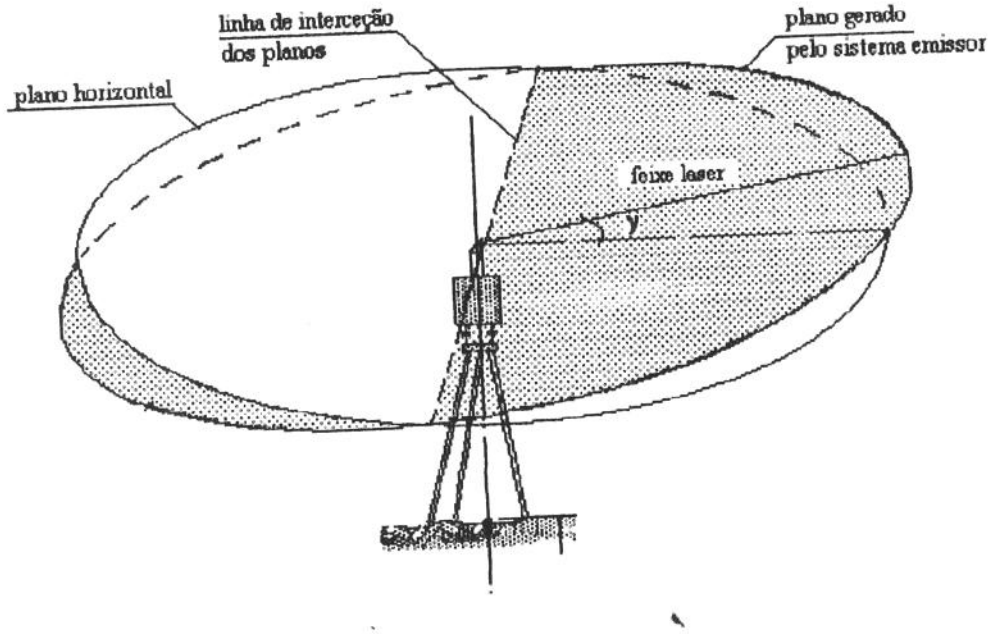

Figura 6.5: Ilustração da inclinação entre o plano horizontal e o plano gerado pelo sistema emissor.

$$y = a_o \,.\, x^{a_1} \tag{6.7}$$

Colocando-se esta equação em função do erro do desnível (ΔH) e da distância (LM) resulta:

$$\Delta H = a_o \,.\, LM^{a_1} \tag{6.8}$$

A fim de melhorar a interpretação desta equação fêz-se sua linearização. Para isso aplicou-se logaritmo neperiano a ambos os membros da mesma. Desta aplicação obtem-se:

$$\ln \Delta H = \ln(a_o \,.\, LM^{a_1})$$

$$\ln \Delta H = \ln a_o + a_1 \,.\, \ln LM$$

Associando-se o $\ln \Delta H$ à $\Delta H'$; $\ln a_o$ à a_o' e $\ln LM$ à LM' resulta:

$$\Delta H' = a_o' + a_1 \,.\, LM' \tag{6.9}$$

Portanto, esta segunda análise, constou inicialmente em se determinar os logaritmos neperianos dos desvios padrões amostrais do erro do desnível (ΔH) e das distâncias de referências (LM). A partir destes valores foi calculada, através do mesmo *software* a análise de regressão. A tabela 6.6 mostra os dados de saída desta segunda análise.

Os demais valores foram calculados, adotando-se os mesmos procedimentos empregados na primeira análise.

6.2.2 Avaliação da segunda análise de regressão

Para análise destes dados foi adotado o mesmo procedimento da primeira análise e, obteveram-se os seguintes resultados:

- A equação resultante foi:

$$\Delta H' = -7,5923 + 1,0031 \,.\, LM'; \tag{6.10}$$

Resultado da Regressão	
Coeficiente linear	-7,5923
Desvio padrão do estimador de (y)	0,050616
R^2	0,995965
Número de observações	12
Graus de liberdade	10
Coeficiente angular	1,003122
Desvio padrão do coeficiente angular	0,020191

Tabela 6.6: Resultados da segunda análise de regressão.

- O quadrado da correlação sendo $R^2 = 0,9959$, indica que a regressão obtida explica 99,59% da variação de ΔH;

- O intervalo de confiança obtido para a_0' foi (-14,6292 ; -0,5554), ou calculando o valor para a_0 tem-se (4,43 x 10^{-7} ; 0,5738) enquanto que para a_1 foi (0,9581 ; 1,0481);

- Os valores estimados do erro de desnível $\Delta H_c'$, o raio do intervalo de confiança E_y' e os valores máximos e mínimos para o erro do desnível estão mostrados na tabela 6.7, e plotados no gráfico da figura 6.6.

- Os valores originais para o desnível estimado ΔH e seus valores míminos e máximos estão mostrados na tabela 6.8.

LM'	$\Delta H'$	$E'(y)$	$\Delta H_c'$	$\Delta H'$ - $E'(y)$	$\Delta H'$ + $E'(y)$
6.215	-1.402	0.082	-1.358	-1.484	-1.320
6.908	-0.615	0.055	-0.663	-0.670	-0.561
7.313	-0.209	0.041	-0.256	-0.250	-0.167
7.601	0.008	0.035	0.032	-0.027	0.043
7.824	0.233	0.033	0.256	0.200	0.265
8.006	0.512	0.033	0.439	0.479	0.545
8.161	0.593	0.035	0.594	0.558	0.627
8.294	0.627	0.038	0.727	0.589	0.664
8.412	0.810	0.040	0.846	0.770	0.851
8.517	0.971	0.043	0.951	0.927	1.014
8.613	1.069	0.046	1.047	1.023	1.116
8.700	1.153	0.049	1.134	1.104	1.202

Tabela 6.7: Valores calculados a partir da segunda análise de regressão.

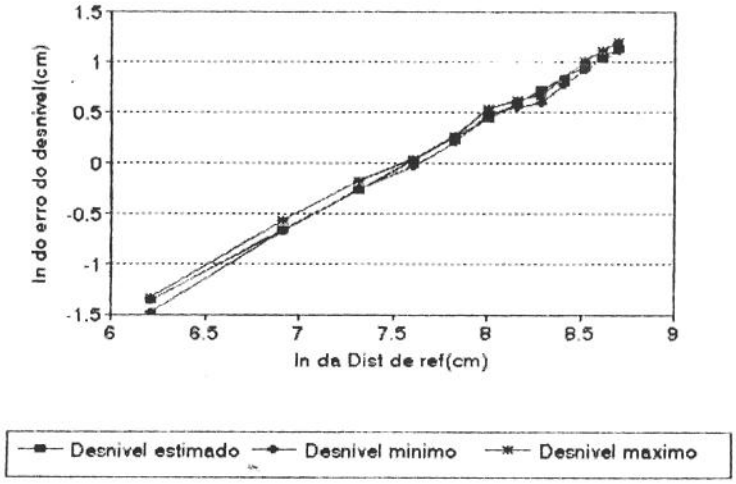

Figura 6.6: Gráfico da dispersão do erro do desnível em relação à distância para a segunda análise de regressão.

LM	ΔH	ΔH_c	ΔH - E(y)	ΔH + E(y)
500	0.246	0.257	0.227	0.267
1000	0.541	0.515	0.512	0.571
1500	0.812	0.774	0.779	0.846
2000	1.008	1.033	0.973	1.044
2500	1.262	1.292	1.221	1.304
3000	1.669	1.551	1.615	1.725
3500	1.809	1.810	1.747	1.873
4000	1.872	2.070	1.803	1.943
4500	2.249	2.329	2.160	2.342
5000	2.640	2.589	2.528	2.757
5500	2.914	2.849	2.782	3.052
6000	3.167	3.109	3.015	3.327

Tabela 6.8: Valores originais para os desníveis estimados e seus mínimos e máximos.

Comparando-se os resultados destas duas análises de regressão constata-se que não houve divergência entre os resultados obtidos, comprovando a eficácia dos métodos adotados.

6.3 Conclusão

O objetivo principal da construção do sistema de medição do desnível é a detecção precisa do feixe laser, independente da divergência natural do laser e da influência dos raios solares. Analisando o processo construtivo e os resultados dos testes efetuados, verifica-se:

- Esta técnica de medição mostra-se apropriada e eficiente para medição de desníveis;
- O detector dispensa movimento de posicionamento para identificar o centro do feixe laser;
- Os resultados obtidos para os desníveis, constataram que o erro encontrado medido pela inclinação do plano (γ) foi causado pelo sistema de nivelamento, somado à imprecisão na fabricação do sistema emissor. Enquanto a variação deste erro medido pelo intervalo de confiança está associada ao sistema de detecção eletrônico;
- Avalia-se que esta dispersão tem origem no processo de fabricação dos componentes mecânicos, como problemas de planicidade, rugosidade, alinhamento e centralização, tanto para o sistema emissor quanto para o nível eletromecânico;
- A metodologia desenvolvida para a construção do detector, usando células sensoras, mostrou-se eficiente. Isto pode ser constatado nas tabelas 1 a 4 do anexo 1, onde os valores das alturas (HD) mantiveram-se praticamente constantes para as três repetições.

Capítulo 7

Avaliação da metodologia desenvolvida para medições de distâncias

Inicialmente a metodologia para medições de distâncias foi avaliada e em seguida determinada, a partir dos dados experimentais, a Equação Generalizada da Distância baseada na metodologia proposta.

7.1 Metodologia empregada

Na avaliação da metodologia desenvolvida para medições das distâncias, foram utilizados osciloscópio digital de 100 mHz, protótipo do sistema detector desenvolvido (apresentado no capítulo 5.3.3.) além do sistema emissor. Em uma das células do sistema detector que possui dois fototransistores, foram conectadas as pontas de prova do osciloscópio. Quando estes sensores são acionados pelo feixe laser, geram dois pulsos na tela do osciloscópio. Medindo-se o tempo Δt entre estes pulsos, obtém-se o tempo que o feixe gastou para passar entre os sensores.

7.1.1 Procedimento de coleta dos dados.

O sistema detector foi posicionado a uma distância conhecida, chamada de distância de referência LM, entre 5,00 e 45,00 m espaçadas de 5,00 m. Para cada distância de referência foram medidos 50 tempos Δt, sendo esse processo repetido três vezes, totalizando 150 medições para cada distância. Estes dados estão apresentados nas tabelas 5 a 7 do anexo 1. Para cada repetição foi feita a média entre as medidas e, a partir destes valores montada a tabela 7.1.

Para se determinar o valor do período T utilizaram-se os mesmos recursos empregados para as medições dos tempos Δt, apenas com uma diferença: só

	Distância de referência								
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Repetição I	1.176	0.591	0.393	0.294	0.240	0.200	0.170	0.148	0.131
Repetição II	1.168	0.590	0.394	0.293	0.239	0.199	0.168	0.148	0.131
Repetição III	1.174	0.592	0.392	0.294	0.240	0.200	0.171	0.148	0.131

Tabela 7.1: Valor médio do tempo Δt a partir de 50 medições para cada distância de referência com três repetições.

foram utilizados um sensor e um canal do osciloscópio. Medindo-se o tempo entre os dois pulsos formados na tela do osciloscópio tem-se o valor do período T. Essa medição foi repetida 50 vezes. O valor médio encontrado foi T = 587,62 $[10^{-3}s]$ o qual apresentou um erro padrão de $\pm$ 6,44 x 10^{-6} ou $\pm$ 0,0001 % com 99 % de confiança. Na tabela 11 do anexo 1, encontram-se os dados levantados para este cálculo.

7.2 Processamento dos resultados

Com os dados registrados para o tempos Δt (tabelas 5 a 7 do anexo 1) e o valor médio do período T, foram calculados as distâncias LM1 através da equação (5.1) demonstrada na secção 5.3.3. Os dados calculados estão mostrados nas tabelas 8 a 10 do anexo 1. Os valores médios para cada distância de referência com as três repetições estão registrados na tabela 7.2.

Com a finalidade de analisar estes dados e ainda, estimar o melhor valor para a distância, bem como seus valores máximo e mínimo foi feita a análise de regressão, entre as distâncias calculadas e de referência. Para isso foi utilizado o software QUATRO PRO. A tabela 7.3 mostra os resultados desta análise de regressão.

	Distância de referência								
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Repetição I	4.998	9.949	14.90	19.95	24.49	29.30	34.59	39.92	44.93
Repetição II	5.032	9.953	14.93	20.03	24.50	29.49	34.83	39.77	44.90
Repetição III	5.007	9.938	15.00	20.02	24.49	29.35	34.39	39.79	44.95

Tabela 7.2: Valor médio da distância calculada LM1 a partir dos tempos Δt para cada distância de referência com três repetições.

Resultado da Regressão	
Coeficiente linear	0,039423
Desvio padrão do estimador de (y)	0,225406
R^2	0,999718
Número de observações	27
Graus de liberdade	25
Coeficiente angular	1,006520773
Desvio padrão do coeficiente angular	0,003382549

Tabela 7.3: Resultados da análise de regressão entre as distâncias calculadas e de referência.

7.2.1 Avaliação da ânálise de regressão

Por tratar-se de uma análise de regressão linear, o procedimento adotado para avaliação foi idêntico ao descrito detalhadamente na primeira análise de regressão das medições de desníveis, secção 6.2.1.

Adotando-se o mesmo intervalo de confiança (95 %) obteveram-se os seguintes resultados:

- A equação resultante foi:

$$LM1 = 0,039423 + 1,0065 \, . \, LM; \tag{7.1}$$

- O quadrado da correlação sendo $R^2 = 0,9997$, indica que a regressão obtida explica 99,97% da variação de LM1;
- O intervalo de confiança obtido para a_0 foi (-0,8237 ; 0,9025) enquanto que para a_1 foi (0,9995 ; 1,0135);
- Os valores estimados para as distância (LM1) calculadas através da equação 7.1 chamada de LM_e, o raio do intervalo de confiança e os valores máximos e mínimos para estas distâncias estão mostrados na tabela 7.4, e plotados no gráfico da figura 7.1;
- Como o coeficiente linear obtido, igual a 0,03942, não difere de zero significativamente com 95% de confiança, e o coeficiente angular, igual a 1,00652, não difere de um significativamente com 95% de confiança, pode-se concluir que a reta estimada não difere da bissetriz significativamente. Isto indica que a distância estimada por esta metodologia não difere significativamente da distância de referência.

LM1	LM	LM_e	E(y)	LM1 - E(y)	LM1 + E(y)
4.997	5	5.049	0.157	4.841	5.154
9.943	10	10.042	0.130	9.813	10.073
14.926	15	15.073	0.107	14.819	15.034
19.987	20	20.182	0.091	19.896	20.078
24.476	25	24.713	0.085	24.391	24.561
29.319	30	29.603	0.090	29.229	29.410
34.550	35	34.882	0.107	34.443	34.657
39.769	40	40.151	0.131	39.637	39.900
44.843	45	45.273	0.158	44.685	45.001

Tabela 7.4: Valores calculados a partir da análise de regressão entre as distânsias calculadas e de referência.

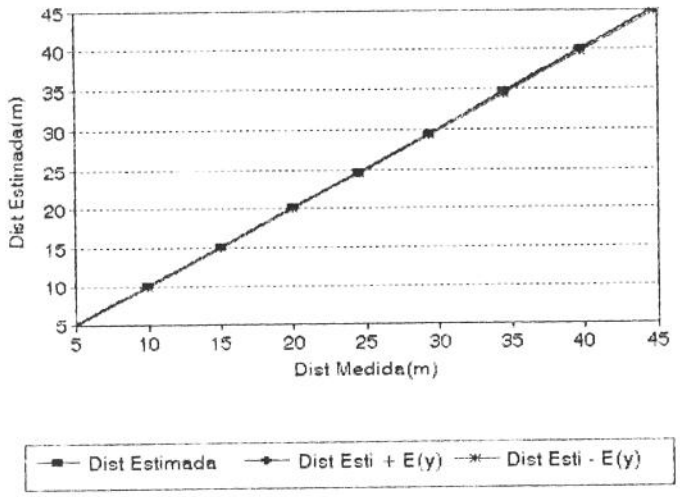

Figura 7.1: Gráfico da dispersão do erro da distância estimada em relação à distância de referência.

7.3 Determinação da Equação Geral para Medições de Distâncias

O objetivo em determinar uma equação geral para medições de distância baseada nesta nova técnica desenvolvida, foi permitir que, se conhecendo apenas o tempo Δt seja possível estimar a distância entre os sistemas emissor e receptor, além de generalizar a metodologia, possibilitando a construção de novos sistemas com dados de projeto (T e l) diferentes dos estabelecidos neste trabalho.

Portanto, através dos dados experimentais dos tempos Δt e das distâncias de referência LM foi determinado a E.G.D. (Equação Geral da Distância).

Os dados da média do tempo Δt (tabela 7.1) em relação à distância de referência foram analisados, usando-se o *software* PLOTRAX que determinou a equação que melhor se ajustou aos mesmos. A tabela 7.5 mostra os resultados desta análise, onde se observa o resultado de todos os tipos de equações analisadas e o resumo da análise de variância para a equação que apresentou melhor ajuste.

A partir desta análise pode-se afirmar que:

- A equação que apresentou melhor ajuste foi:

$$y = a_o \cdot x^{a_1} \tag{7.2}$$

- Colocando-se esta equação em função da distância (LM) e do tempo Δt resulta:

$$LM = a_o \cdot \Delta t^{a_1} \tag{7.3}$$

- Os valores encontrados para a_o e a_1 foram respectivamente 5,881031 e -1,0058;
- O quadrado da correlação sendo $R^2 = 0,99988$, indica que a regressão obtida explica 99,98% da variação de Δt, demonstrando a excelente precisão alcançada na obtenção desta equação;

7.3.1 Avaliação da E.G.D.

Para comprovar a precisão desta equação em estimar a distância, foi feita uma análise de regressão. Esta análise constou inicialmente em se linearizar a equação 7.3 para facilitar sua interpretação. Nesta linearização foi aplicado logaritmo neperiano a ambos os membros da equação e seguido o mesmo procedimento adotado no item 6.2.2.. Desta aplicação obteve-se:

```
FILE: DISTF.DAT                    DATE: 12-19-1994                    TIME: 20:48:01
                                           SN M. R. DALESSANDRO
                    ********************************************
                    *                STATISTICS MENU               *
                    ********************************************
          selections                           b0              b1              r^2

 1 - Linear regression y=b0+b1x          37.56084        -33.85098         0.68090
 2 - Exponential fit   y=b0e^b1x         44.42255        -2.053248         0.90793
 3 - Power function    y=b0x^b1          5.881031        -1.0058           0.99988
 4 - Logarithmic       y=b0+b1 log(x)    2.063145        -18.30753         0.91402
 5 - Inverse x         y=(b0x+b1)/x      6.430757E-03     5.931435         0.99974
 6 - Inverse y         y=1/(b0+b1x)     -5.337283E-04     .1708597         0.99995
 7 - Inverse x & y     y=x/(b0x+b1)      .1483571        -2.028862E-02     0.67427
 8 - Polynomial        y=b0+b1x+b2x^2+...
 9 - (Reserved)
 0 - Screen selections (1-7) for best fit

      Enter selection :
```

```
FILE: DISTF.DAT                    DATE: 12-19-1994                    TIME: 20:51:26
                                           SN M. R. DALESSANDRO
Regression coefficients ************ ANALYSIS OF VARIANCE ********************
b0=  5.881031           *                                                        *
b1= -1.0058             * SOURCE OF   SUMS OF      DEGREES OF      MEAN          *
                        * VARIATION   SQUARES       FREEDOM        SQUARE        *
                        *                                                        *
                        * regression  12.41463         1           12.41463      *
                        *    error    1.476355E-03    25           5.90542E-05   *
                        *    total    12.41611        26                         *
                        *                                                        *
                        *                  f test= (MSR/MSE)=  210224.3          *
                        *     coefficient of determination r^2=  .9998811        *
                        *                          adjusted r^2=  .9998763        *
                        *     coefficient of correlation    r= -.9999405         *
                        *                  number of data points=  27            *
                        **********************************************************

EQUATION:   y= 5.881031 x^-1.0058

ENTER:  S(ave for plotting) or R(esiduals save) or P(redict for new Yp):
```

Tabela 7.5: Resultados da análise dos dados dos tempos e distâncias de referência feita pelo PLOTRAX.

$$LM' = a_o' + a_1 \cdot \Delta t' \tag{7.4}$$

onde:

LM' = ao logaritmo neperiano da distância de referência;

$\Delta t'$ = ao logaritmo neperiano do tempo Δt;

a_o' = ao logaritmo neperiano da constante a_o.

Portanto, os logaritmos neperianos da média dos tempos Δt e das distâncias de referências (LM) foram determinados. O resultado destes cálculos estão mostrados na tabela 7.6. A partir destes valores foi calculada, através do *software* QUATRO PRO a análise de regressão. A tabela 7.7 mostra os dados do resultado desta análise.

Os demais valores foram calculados, adotando-se os mesmos procedimentos empregados na primeira análise de regressão das medições de desníveis, descrita detalhadamente no capítulo 6 secção 6.2.1.

	ln da distância de referência								
	1.609	2.302	2.708	2.995	3.218	3.401	3.555	3.688	3.806
Repetição I	0.162	-0.525	-0.932	-1.224	-1.426	-1.607	-1.771	-1.911	-2.032
Repetição II	0.155	-0.526	-0.932	-1.225	-1.427	-1.612	-1.778	-1.908	-2.031
Repetição III	0.160	-0.525	-0.936	-1.224	-1.426	-1.607	-1.765	-1.909	-2.032

Tabela 7.6: Resultados da aplicação dos logaritmos neperianos às médias dos tempos Δt e às distâncias de referências (LM).

Resultado da Regressão	
Coeficiente linear	1,771732
Desvio padrão do estimador de (y)	0,007685
R^2	0,999881
Número de observações	27
Graus de liberdade	25
Coeficiente angular	-1,0058
Desvio padrão do coeficiente angular	0,002194

Tabela 7.7: Resultados da análise de regressão para as medidas do ln do tempo e da distância.

Analisando-se os dados desta análise de regressão onde foi adotado o mesmo intervalo de confiança (95 %) obteveram-se os seguintes resultados:

- A equação resultante foi a seguinte:

$$LM' = 1,7717 - 1,0058 \,.\, \Delta t'; \tag{7.5}$$

- O quadrado da correlação sendo $R^2 = 0,9998$, indica que a regressão obtida explica 99,98% da variação de Δt;

- O intervalo de confiança obtido para a_0 foi (1,6900 ; 1,8535) enquanto que para a_1 foi (-1,0013 ; -1,0103);

- Os valores do logaritmo neperiano da distância estimada (LM'_e), o raio do intervalo de confiança e os valores máximos e mínimos para a distância estão mostrados na tabela 7.8.

- Os valores corrigidos dos logaritmos neperianos (e^x) para a distância estimada, o tempo Δt e os valores máximos e mínimos para a distância estão mostrados na tabela 7.9, e plotados no gráfico (ln x ln) figura 7.2.

- Pode-se concluir que o modelo adotado ajustou-se de forma satisfatória aos dados.

Δt	LM'_e	LM'	E(y)	LM' - E(y)	LM' + E(y)
0.16203	1.60873	1.60944	0.00440	1.60504	1.61384
-0.52594	2.30069	2.30259	0.00340	2.29919	2.30599
-0.93267	2.70978	2.70805	0.00310	2.70495	2.71115
-1.22418	3.00298	2.99573	0.00300	2.99273	2.99873
-1.42670	3.20667	3.21888	0.00310	3.21578	3.22198
-1.60744	3.38846	3.40120	0.00310	3.39810	3.40430
-1.77137	3.55334	3.55535	0.00330	3.55205	3.55865
-1.91190	3.69469	3.68888	0.00340	3.68548	3.69228
-2.03256	3.81605	3.80666	0.00350	3.80316	3.81016

Tabela 7.8: Valores calculados pela E.G.D. para a distância estimada, o raio do intervalo de confiança e os valores máximos e mínimos para a distância.

7.3.2 Generalização da E.G.D.

Generalizando-se a equação 7.3, para projetos de sistemas de medição de distâncias através dessa metodologia obtém-se:

$LM_{e'}$	Δt	LM - E(y)	LM + E(y)
4.99650	1.17590	4.97810	5.02210
9.98110	0.59100	9.96610	10.03410
15.02600	0.39350	14.95360	15.04660
20.14550	0.29400	19.94000	20.06000
24.69670	0.24010	24.92270	25.07770
29.62030	0.20040	29.90720	30.09320
34.92980	0.17010	34.88480	35.11580
40.23310	0.14780	39.86430	40.13630
45.42440	0.13100	44.84270	45.15770

Tabela 7.9: Valores corrigidos para a distância estimada, calculadas pela E.G.D., o tempo Δt e os valores máximos e mínimos para à distância.

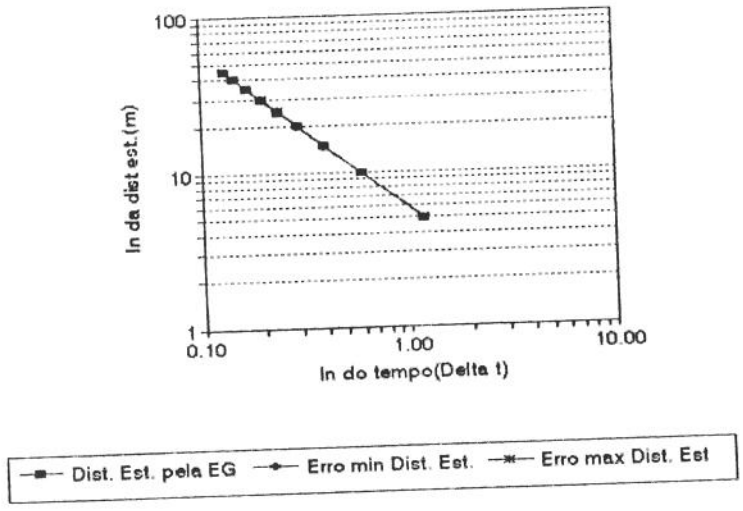

Figura 7.2: Gráfico da dispersão do erro da distância estimada pela E.G.D. em relação ao tempo Δt.

$$L = f(T, l) = b \,.\, \Delta t^c \tag{7.6}$$

Nesta equação chamada **Equação Generalizada da Distância** observa-se que as constantes características "b" e "c", específicas de cada projeto, estão relacionadas diretamente ao período (T) e à distância (l) entre os sensores.

O período T por sua vez, está relacionado com a precisão da rotação do sistema emissor. Pode-se afirmar que quanto mais precisa for a rotação do sistema emissor, mais precisa será a distância medida (L). A distância "l" entre os sensores , está relacionada às características dos fotodetectores. Por exemplo para fotodetectores com menor tempo de resposta de detecção do feixe laser, será necessária uma menor distância "l", resultando em detectores mais compactos.

Portanto para cada novo aparelho desenvolvido, deve-se determinar os valores das constantes "b","c" características do aparelho.

Após a análise destes resultados e com a experiência adquirida no desenvolvimento deste trabalho, conclui-se que:

- A metodologia desenvolvida apresenta coerência entre os resultados encontrados na medição de distâncias e que o intervalo entre as distâncias máximas e minimas é função direta do erro da média dos tempos Δt.

Como este tempo Δt é função direta da precisão da rotação do sistema emissor, pode-se concluir também que:

- Quanto mais preciso for esta rotação menor será o erro da média dos tempos Δt e por conseguinte maior será a precisão na medição de distâncias.

Capítulo 8

Conclusões

A partir dos resultados obtidos, durante o desenvolvimento deste trabalho, chegou-se as seguintes conclusões:

- O protótipo do sistema emissor funcionou satisfatoriamente, confirmando a praticidade do método utilizado para emissão do feixe laser. Pelos aspectos construtivos observa-se que é possível obter-se resultados precisos da emissão do feixe em todo campo de atuação (360^o em torno do seu eixo). Os problemas identificados na emissão do feixe estão vinculados, tão somente, à precisão na fabricação dos componentes, principalmente, quanto ao posicionamento do feixe em relação ao centro ótico do pentaprisma;

- O nível eletromecânico eliminou a necessidade de correção dos erros óticos que normalmente é obrigatória nos equipamentos de precisão a laser comercialmente disponíveis. Isso representa uma significativa contribuição para a simplificação, sem comprometimento da precisão, dos instrumentos de medição utilizados em levantamentos topográficos;

- O dispositivo de detecção funcionou satisfatoriamente quanto aos seus pressupostos de detectar e identificar o centro do feixe laser. Isto representa, também, uma contribuição significativa para a atividade de levantamento topográfico;

- Os resultados obtidos com as medidas de desnível apresentaram resultados apropriados em relação a precisão exigida, comprovando que o método proposto é perfeitamente viável para executar essa atividade.

- Os resultados obtidos na avaliação da metodologia para medições de distâncias comprovaram a eficácia do novo método com o desenvolvimento da **Equação Generalizada da Distância**.

- Finalmente conclui-se que os objetivos propostos foram alcançados e que o trabalho apresentado representa uma contribuição para o processo de

medição não somente pelo aspecto inovativo, mas, principalmente, pela simplificação dos equipamentos utilizados em levantamentos topográficos.

Capítulo 9

Sugestões para futuros trabalhos

A experiência adquirida com a construção, avaliação e testes deste sistema, permite afirmar que estas metodologias de medição de desnível e distância apresentaram resultados promissores que motivam sugerir futuros desenvolvimentos para aperfeiçoamento do sistema como um todo. Neste sentido, faz-se algumas recomendações para futuros trabalhos:

- Construir um sistema eletrônico de medida de distância aplicando a metodologia desenvolvida, com o processamento automático do cálculo da distância;
- Prover o nível eletromecânico de sistema para nivelamento automático, por meio de microprocessadores e motores de passo;
- Melhorar a precisão mecânica na construção do sistema emissor, principalmente para garantir que o feixe laser incida no centro ótico do pentaprisma.
- Detectar o grau de influência dos fatores externos como temperatura, luz solar, vento e pressão atmosférica na transmissão do laser.

Referências Bibliográficas

[1] BENNETT,S.,J.;GATES,J.,W.,C. The Design of Detector Arrays for Laser Alignment Systems. *Journal of Physics e Scintific* Instruments, v.3, p.65-68, January, 1970.

[2] BICKERT,W.G. Laser : Theory and Application. *Agricultural Engineering*, p.592-605, November, 1966.

[3] CHRZANOWSKI,A. Pre-analysis and design of surveying projects. *Northpoint - The Journal of the Association of Certified Survey Technicians and Tecnologists of Ontario*, p.6-16, 1974.

[4] CHRZANOWSKI,A.,JANSSEN,H.,KURZ,B. Self aligning Laser detector - new tool in surveying. *Conferencias, Tel-Aviv,* p.01-13, June, 1972.

[5] CHRZANOWSKI,A.,AHMED,F.,KURZ,B. New Laser Applications in Geodetic and Engineering Surveys. *Applied Optics*, v.11, n.02, p.319-326, February, 1972.

[6] CHRZANOWSKI,A. Precision Alignment Surveys Using Laser. *XIV International Congress of Surveyors (FIG) Washington*, p.6013-6015, 1974.

[7] CHRZANOWSKI,A.,AHMED,F. Alignment Surveys. *XIII Intenational Congress of Surveyors (FIG) Wiesbsden*, p.494-513, September, 1971.

[8] CHRZANOWSKI,A.,JARZYMOWSKI,A.,KASPAR,M. A Comparison of Precision Alignment Methods. *Canadian Surveyor*, v.30, n.2, p.81-96, June,1976.

[9] CHRZANOWSKI,A.,JANSSEN,H. Use of Laser in Presicion Leveling. *Canadian Surveyor*, v.26, n.4, p.369-383, 1972.

[10] CHRZANOWSKI,A. Development of New Laser Instruments for Precision Surveys. *XIII International Congress of Surveyor (FIG) Wiesbaden*, p.1-19, September, 1971.

[11] GARCIA,G.J,;PIEDADE.G.C.R. *Topografia Aplicada às Ciências Agrárias*. São

Paulo: Nobel, 1984, 256 p.

[12] KARREN,R.,J. Recent Studies of Leveling Instrumentation and Procedures. *Surveing and Mapping*, v.24, p.383, 1964.

[13] KAVANAGH,B.,F. Surveying with Construction Applications. New Jersey: Prentice Hall, 1989, 411 p.

[14] KIKUTA,H.;IWATA,K.;NAGATA,R. Distance measurement by the wavelength shift of laser diode light. *Applied Optics*, v.25, n.17, p.2976-2980, September, 1986.

[15] KOK.R.;LANGLOIS,R.;NORRIS,E.,R.;BROUGHTON,R.,S. An Automated Topographic Surveying Method Suitable for Use in Drainage Work- A Design Concept. *Transactions of the ASAE*, v.12, n.5, p.931- 936, 1978.

[16] LAURILA,S.,H. *Eletronic Surveying in Practice*. New York: John Wiley \& Sons, 1983, 388 p.

[17] LASER ALIGNMENT CO OF AUSTRALIA. What the Laser Can do for you.". *Power Farming Magazine*, v.90, n.7, p.30-31, 1981.

[18] LELIS,S. *Curso de Topografia*. São Paulo: Editora Globo, 1975, 655p.

[19] MAILLET,H. *O Laser - Principios e Técnicas de Aplicação*. São Paulo: Editora Manole, 1987, 538 p.

[20] MATSUMOTO,H. Synthetic Interferometric Distance-Measuring System Using a CO_2 Laser. *Applied Optics*, v.25, n.4, p. 493-498, February, 1986.

[21] MCMANUS,B.,E.;LINSCOMBE,S.D.;ZACHARIAS,T.,P. Laser Beam Land Leveling of Rice Fields In Louisiana. *Louisiana Agriculture*, v.32, p.3 e 24, 1989.

[22] PRINCE,W,F. \& UREN,J. *Laser surveying*, Cambridge: Van Nostrand Reinhold, 1989, 254 p.

[23] SETA,K.,OH'ISHI,T. Distance Measurement Using a Pulse Train Emitted from a Laser de Diode. *Japanese Journal of Applied Physics*, v.26, n.10, p.1690-1692, October, 1987.

[24] SETA,K.,OHISHI,T.,SEINO,S. Optical Distance Measurement Using Inter-Mode Beat of Laser. *Japanese Journal of Applied Physics*, v.24, n.10, p.1374-1375, 1985.

[25] SETA,K.,O'ISHI,T. Distance Meter Utilizing the Intermode Beat of a He-Ne Laser. *Applied Optics*, v.29, n.3, p.354-359, January, 1990.

[26] STUDEBAKER,D.,C. The Laserplane System. *Agricultural Engineering*, v.53, n.8, p.418-419, August, 1971.

[27] UREN,J., PRICE,W.F. *Surveying for Engineers*. London: Macmillan Education LTD, 1991, 391 p.

[28] WILSON,J.;HAWKES,J.,F.,B. *Lasers Principles and Applications*, New York: Prentice Hall, 1987, 308 p.

[29] VERDEYEN,J.,T. *Laser Electronics*, New Jersey: Prentice Hall, 1981, 251 p.

Anexo 1

Marco de Referencia	Repeticao I		HD		DeltaH1a	Repeticao II		HD		DeltaH2a	Repeticao III		HD		DeltaH3a
	HS1	HC1	HS1+HC1	HM	HD - HM	HS2	HC2	HS2+HC2	HM	HD - HM	HS3	HC3	HS2+HC2	HM	HD - HM
A1	111.7	7.0	118.7	118.9	-0.20	112.7	6.0	118.7	118.9	-0.20	113.4	5.5	118.9	118.9	0.00
B1	112.0	7.0	119.0	118.7	0.30	113.5	5.5	119.0	118.7	0.30	111.2	8.0	119.2	118.7	0.50
C1	114.5	6.0	120.5	120.3	0.20	112.0	9.0	121.0	120.3	0.70	113.5	7.5	121.0	120.3	0.70
D1	111.7	9.0	120.7	120.1	0.60	110.7	10.0	120.7	120.1	0.60	109.6	11.0	120.6	120.1	0.50
E1	113.7	7.0	120.7	120.3	0.40	110.6	10.0	120.6	120.3	0.30	111.7	9.0	120.7	120.3	0.40
F1	115.5	6.5	122.0	121.0	1.00	116.3	5.5	121.8	121.0	0.80	112.0	10.0	122.0	121.0	1.00
G1	117.8	4.0	121.8	121.3	0.50	111.8	10.0	121.8	121.3	0.50	112.9	9.0	121.9	121.3	0.60
H1	111.8	10.0	121.8	121.1	0.70	110.7	11.0	121.7	121.1	0.60	109.8	12.0	121.8	121.1	0.70
I1	112.3	10.5	122.8	121.4	1.40	112.8	10.0	122.8	121.4	1.40	115.5	7.0	122.5	121.4	1.10
J1	111.9	11.0	122.9	121.6	1.30	113.6	9.0	122.6	121.6	1.00	110.8	12.0	122.8	121.6	1.20
L1	112.7	10.0	122.7	120.6	2.10	114.5	8.0	122.5	120.6	1.90	112.7	10.0	122.7	120.6	2.10
M1	113.3	8.5	121.8	120.4	1.40	111.7	10.0	121.7	120.4	1.30	114.2	7.5	121.7	120.4	1.30

Tabela 1: Medidas do desnível(cm) para a primeira medição.

Marco de Referencia	Repeticao I		HD		DeltaH1b	Repeticao II		HD		DeltaH2b	Repeticao III		HD		DeltaH3b
	HS1	HC1	HS1+HC1	HM	HD - HM	HS2	HC2	HS2+HC2	HM	HD - HM	HS3	HC3	HS3+HC3	HM	HD - HM
B2	114.5	3.5	118.0	118.7	-0.70	114.8	3.0	117.8	118.7	-0.90	111.8	6.0	117.8	118.7	-0.90
A2	111.8	6.5	118.3	118.9	-0.60	114.4	4.0	118.4	118.9	-0.50	116.3	3.0	119.3	118.9	0.40
C2	112.0	7.0	119.0	120.3	-1.30	115.0	4.0	119.0	120.3	-1.30	115.8	3.5	119.3	120.3	-1.00
E2	111.6	6.5	118.1	120.3	-2.20	113.3	5.0	118.3	120.3	-2.00	111.7	6.5	118.2	120.3	-2.10
D2	114.7	4.0	118.7	120.1	-1.40	115.8	3.0	118.8	120.1	-1.30	112.7	7.0	119.7	120.1	-0.40
F2	111.8	7.0	118.8	121.0	-2.20	113.8	5.0	118.8	121.0	-2.20	114.8	4.0	118.8	121.0	-2.20
H2	115.6	3.0	118.6	121.1	-2.50	117.3	1.0	118.3	121.1	-2.80	115.8	3.0	118.8	121.1	-2.30
G2	115.3	3.5	118.8	121.3	-2.50	115.5	3.0	118.5	121.3	-2.80	113.7	5.0	118.7	121.3	-2.60
I2	115.2	3.5	118.7	121.4	-2.70	113.6	5.5	119.1	121.4	-2.30	114.3	4.0	118.3	121.4	-3.10
L2	111.8	5.0	116.8	120.6	-3.80	113.8	3.0	116.8	120.6	-3.80	114.4	2.0	116.4	120.6	-4.20
J2	114.0	4.0	118.0	121.6	-3.60	112.6	5.5	118.1	121.6	-3.50	111.8	6.0	117.8	121.6	-3.80
M2	114.5	1.0	115.5	120.4	-4.90	112.8	3.0	115.8	120.4	-4.60	111.8	4.0	115.8	120.4	-4.60

Tabela 2: Medidas do desnível(cm) para a segunda medição.

Marco de Referencia	Repeticao I		HD		DeltaH1o	Repeticao II		HD		DeltaH2o	Repeticao III		HD		DeltaH3o
	HS1	HC1	HS1+HC1	HM	HD - HM	HS2	HC2	HS2+HC2	HM	HD - HM	HS3	HC3	HS3+HC3	HM	HD - HM
C3	113.3	6.5	119.8	120.3	-0.50	111.7	8.0	119.7	120.3	-0.60	110.8	9.0	119.8	120.3	-0.50
B3	112.4	6.0	118.4	118.7	-0.30	113.4	5.0	118.4	118.7	-0.30	111.5	7.0	118.5	118.7	-0.20
A3	113.3	5.5	118.8	118.9	-0.10	111.8	7.0	118.8	118.9	-0.10	113.5	5.0	118.5	118.9	-0.40
F3	112.4	8.0	120.4	121.0	-0.60	110.8	8.0	118.8	121.0	-2.20	113.3	7.0	120.3	121.0	-0.70
E3	115.3	5.0	120.3	120.3	0.00	113.3	6.0	119.3	120.3	-1.00	112.8	7.5	120.3	120.3	0.00
D3	112.3	7.0	120.3	120.1	0.20	113.3	6.5	119.8	120.1	-0.30	114.3	5.0	119.3	120.1	-0.80
I3	112.0	8.0	120.0	121.4	-1.40	113.5	6.5	120.0	121.4	-1.40	115.0	5.0	120.0	121.4	-1.40
H3	113.2	7.0	120.2	121.1	-0.90	112.6	7.5	120.1	121.1	-1.00	111.2	9.0	120.2	121.1	-0.90
G3	114.3	6.0	120.3	121.3	-1.00	113.2	7.0	120.2	121.3	-1.10	117.2	3.0	120.2	121.3	-1.10
M3	108.5	10.0	118.5	120.4	-1.90	110.2	8.0	118.2	120.4	-2.20	113.2	5.0	118.2	120.4	-2.20
L3	115.3	4.0	119.3	120.6	-1.30	114.2	5.0	119.2	120.6	-1.40	113.2	6.0	119.2	120.6	-1.40
J3	116.9	3.0	119.9	121.6	-1.70	115.9	4.0	119.9	121.6	-1.70	113.4	6.5	119.9	121.6	-1.70

Tabela 3: Medidas do desnível(cm) para a terceira medição.

Marco de Referencia	Repeticao I		HD		DeltaH1d	Repeticao II		HD		DeltaH2d	Repeticao III		HD		DeltaH3d
	HS1	HC1	HS1+HC1	HM	HD - HM	HS2	HC2	HS2+HC2	HM	HD - HM	HS3	HC3	HS3+HC3	HM	HD - HM
C4	115.0	6.0	121.0	120.3	0.70	115.8	5.0	120.8	120.3	0.50	118.0	3.0	121.0	120.3	0.70
A4	116.0	3.0	119.0	118.9	0.10	115.0	4.0	119.0	118.9	0.10	113.0	6.0	119.0	118.9	0.10
B4	112.2	7.0	119.2	118.7	0.50	114.0	8.0	122.0	118.7	3.30	116.0	3.0	119.0	118.7	0.30
F4	115.5	8.0	123.5	121.0	2.50	113.0	10.0	123.0	121.0	2.00	118.8	11.0	122.8	121.0	1.80
D4	118.2	3.0	121.2	120.1	1.10	116.5	5.0	121.5	120.1	1.40	114.5	7.0	121.5	120.1	1.40
E4	114.5	7.0	121.5	120.3	1.20	113.4	8.0	121.4	120.3	1.10	108.8	9.5	118.3	120.3	-2.00
I4	113.5	10.5	124.0	121.4	2.60	112.2	12.0	124.2	121.4	2.80	116.2	8.0	124.2	121.4	2.80
G4	114.5	9.0	123.5	121.3	2.20	113.5	10.0	123.5	121.3	2.20	115.3	7.5	122.8	121.3	1.50
H4	116.4	7.0	123.4	121.1	2.30	115.4	8.0	123.4	121.1	2.30	113.3	10.0	123.3	121.1	2.20
M4	114.0	9.5	123.5	120.4	3.10	115.6	8.0	123.6	120.4	3.20	114.5	9.0	123.5	120.4	3.10
J4	117.0	7.0	124.0	121.6	2.40	118.2	6.0	124.2	121.6	2.60	117.2	8.0	125.2	121.6	3.60
L4	115.1	8.5	123.6	120.6	3.00	113.8	10.0	123.8	120.6	3.20	111.7	12.0	123.7	120.6	3.10

Tabela 4: Medidas do desnível(cm) para a quarta medição.

No	Distancia LM(m)			Repeticao I					
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
1	1.203	0.565	0.393	0.299	0.244	0.206	0.164	0.144	0.140
2	1.203	0.601	0.393	0.309	0.236	0.198	0.182	0.144	0.132
3	1.170	0.601	0.405	0.288	0.236	0.204	0.172	0.144	0.124
4	1.166	0.587	0.393	0.299	0.236	0.206	0.168	0.160	0.128
5	1.166	0.574	0.393	0.295	0.236	0.201	0.168	0.156	0.136
6	1.177	0.583	0.393	0.295	0.236	0.198	0.164	0.152	0.140
7	1.177	0.583	0.393	0.299	0.232	0.204	0.164	0.160	0.140
8	1.177	0.587	0.417	0.292	0.240	0.195	0.166	0.148	0.124
9	1.177	0.555	0.378	0.292	0.240	0.201	0.180	0.132	0.140
10	1.177	0.596	0.399	0.292	0.244	0.207	0.166	0.156	0.124
11	1.177	0.574	0.399	0.292	0.248	0.189	0.176	0.152	0.132
12	1.177	0.587	0.402	0.295	0.244	0.201	0.174	0.156	0.136
13	1.155	0.596	0.396	0.292	0.244	0.214	0.162	0.120	0.132
14	1.155	0.592	0.396	0.295	0.240	0.207	0.166	0.148	0.128
15	1.155	0.623	0.387	0.288	0.236	0.186	0.174	0.144	0.136
16	1.199	0.574	0.393	0.282	0.252	0.180	0.166	0.140	0.132
17	1.177	0.587	0.393	0.285	0.228	0.186	0.162	0.148	0.132
18	1.155	0.578	0.393	0.295	0.242	0.207	0.172	0.160	0.136
19	1.177	0.587	0.393	0.295	0.241	0.195	0.168	0.140	0.128
20	1.155	0.583	0.393	0.305	0.237	0.201	0.158	0.144	0.124
21	1.221	0.583	0.393	0.305	0.247	0.195	0.170	0.156	0.124
22	1.177	0.592	0.393	0.299	0.234	0.195	0.162	0.160	0.132
23	1.166	0.596	0.381	0.299	0.237	0.211	0.164	0.144	0.136
24	1.177	0.587	0.387	0.282	0.241	0.198	0.174	0.136	0.124
25	1.177	0.583	0.387	0.292	0.247	0.211	0.170	0.152	0.128
26	1.144	0.583	0.375	0.299	0.231	0.207	0.172	0.152	0.128
27	1.254	0.596	0.399	0.292	0.231	0.207	0.178	0.148	0.140
28	1.199	0.601	0.384	0.302	0.254	0.195	0.162	0.148	0.124
29	1.177	0.628	0.384	0.295	0.234	0.198	0.162	0.144	0.124
30	1.188	0.592	0.399	0.302	0.234	0.201	0.182	0.160	0.132
31	1.199	0.596	0.384	0.302	0.244	0.195	0.168	0.168	0.136
32	1.177	0.569	0.399	0.295	0.237	0.195	0.166	0.136	0.124
33	1.166	0.592	0.396	0.288	0.241	0.195	0.170	0.136	0.128
34	1.166	0.596	0.396	0.282	0.247	0.201	0.166	0.148	0.144
35	1.144	0.592	0.384	0.295	0.234	0.192	0.176	0.144	0.136
36	1.166	0.623	0.417	0.288	0.237	0.204	0.164	0.136	0.128
37	1.188	0.596	0.408	0.278	0.247	0.211	0.184	0.148	0.128
38	1.166	0.614	0.396	0.305	0.244	0.201	0.172	0.144	0.136
39	1.166	0.601	0.396	0.299	0.244	0.211	0.168	0.144	0.136
40	1.199	0.587	0.372	0.285	0.247	0.211	0.172	0.152	0.136
41	1.144	0.587	0.396	0.295	0.241	0.198	0.182	0.156	0.124
42	1.177	0.583	0.396	0.295	0.244	0.207	0.174	0.148	0.128
43	1.177	0.614	0.390	0.288	0.237	0.195	0.164	0.140	0.124
44	1.166	0.587	0.390	0.295	0.251	0.204	0.174	0.160	0.124
45	1.166	0.587	0.384	0.282	0.247	0.201	0.186	0.156	0.136
46	1.177	0.578	0.399	0.299	0.234	0.201	0.178	0.140	0.128
47	1.177	0.596	0.399	0.299	0.241	0.201	0.168	0.140	0.120
48	1.166	0.596	0.393	0.295	0.237	0.201	0.164	0.160	0.128
49	1.188	0.587	0.393	0.292	0.237	0.192	0.170	0.140	0.136
50	1.166	0.614	0.402	0.292	0.231	0.201	0.170	0.144	0.136
M	1.176	0.591	0.393	0.294	0.240	0.200	0.170	0.148	0.131

Tabela 5: Valores do Tempo $\Delta t[10^{-3}s]$ em relação as distâncias para a primeira repetição.

No	Distancia LM(m) Repeticao II								
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
1	1.175	0.587	0.399	0.302	0.241	0.201	0.164	0.144	0.136
2	1.199	0.587	0.384	0.288	0.241	0.195	0.170	0.136	0.124
3	1.188	0.623	0.399	0.288	0.247	0.189	0.174	0.136	0.124
4	1.175	0.574	0.384	0.295	0.247	0.198	0.162	0.166	0.124
5	1.177	0.578	0.399	0.305	0.244	0.201	0.170	0.160	0.128
6	1.203	0.592	0.393	0.302	0.237	0.216	0.172	0.148	0.140
7	1.166	0.587	0.396	0.295	0.234	0.207	0.158	0.136	0.144
8	1.177	0.587	0.393	0.288	0.244	0.195	0.168	0.144	0.128
9	1.199	0.596	0.393	0.295	0.241	0.207	0.178	0.144	0.136
10	1.177	0.583	0.393	0.302	0.236	0.195	0.164	0.148	0.128
11	1.203	0.592	0.396	0.299	0.244	0.195	0.172	0.148	0.140
12	1.166	0.583	0.408	0.292	0.237	0.201	0.162	0.144	0.124
13	1.166	0.587	0.396	0.299	0.242	0.186	0.162	0.136	0.128
14	1.144	0.596	0.393	0.299	0.247	0.192	0.162	0.148	0.132
15	1.175	0.587	0.405	0.292	0.236	0.201	0.166	0.144	0.124
16	1.177	0.583	0.408	0.285	0.244	0.186	0.162	0.166	0.136
17	1.166	0.583	0.396	0.282	0.236	0.195	0.182	0.144	0.132
18	1.155	0.587	0.396	0.295	0.228	0.195	0.174	0.148	0.128
19	1.155	0.574	0.393	0.295	0.244	0.186	0.172	0.152	0.124
20	1.144	0.596	0.372	0.295	0.236	0.211	0.162	0.152	0.128
21	1.221	0.601	0.396	0.282	0.236	0.204	0.168	0.156	0.136
22	1.155	0.565	0.393	0.299	0.240	0.207	0.166	0.152	0.128
23	1.177	0.596	0.396	0.288	0.234	0.195	0.172	0.156	0.136
24	1.177	0.592	0.393	0.288	0.242	0.198	0.182	0.136	0.128
25	1.155	0.596	0.393	0.299	0.236	0.201	0.162	0.148	0.140
26	1.155	0.559	0.393	0.282	0.234	0.198	0.174	0.160	0.124
27	1.177	0.601	0.393	0.299	0.244	0.211	0.162	0.144	0.124
28	1.155	0.592	0.384	0.288	0.241	0.201	0.172	0.152	0.140
29	1.166	0.587	0.399	0.295	0.237	0.211	0.172	0.140	0.128
30	1.166	0.587	0.415	0.292	0.251	0.195	0.162	0.160	0.136
31	1.166	0.601	0.393	0.305	0.237	0.201	0.162	0.166	0.132
32	1.155	0.596	0.378	0.285	0.236	0.195	0.162	0.140	0.136
33	1.177	0.592	0.402	0.288	0.251	0.198	0.174	0.140	0.132
34	1.155	0.587	0.393	0.288	0.244	0.206	0.176	0.160	0.136
35	1.144	0.596	0.399	0.292	0.247	0.195	0.168	0.156	0.140
36	1.177	0.614	0.393	0.278	0.234	0.207	0.182	0.148	0.128
37	1.155	0.596	0.387	0.295	0.237	0.195	0.168	0.152	0.124
38	1.144	0.587	0.399	0.295	0.247	0.204	0.166	0.156	0.132
39	1.166	0.574	0.393	0.292	0.240	0.211	0.166	0.132	0.124
40	1.155	0.601	0.393	0.305	0.234	0.198	0.168	0.144	0.136
41	1.144	0.623	0.381	0.299	0.240	0.204	0.170	0.156	0.124
42	1.166	0.601	0.396	0.292	0.241	0.192	0.180	0.140	0.128
43	1.166	0.587	0.402	0.292	0.231	0.198	0.166	0.152	0.136
44	1.175	0.587	0.387	0.295	0.231	0.198	0.164	0.156	0.132
45	1.177	0.583	0.387	0.282	0.237	0.192	0.176	0.160	0.121
46	1.144	0.587	0.396	0.292	0.244	0.195	0.164	0.148	0.128
47	1.144	0.587	0.375	0.299	0.247	0.211	0.166	0.128	0.136
48	1.177	0.583	0.399	0.305	0.237	0.206	0.184	0.140	0.136
49	1.142	0.596	0.384	0.295	0.248	0.198	0.164	0.148	0.124
50	1.177	0.614	0.396	0.295	0.231	0.195	0.172	0.144	0.144
M	1.168	0.591	0.394	0.293	0.240	0.199	0.169	0.148	0.131

Tabela 6: Valores do Tempo $\Delta t[10^{-3}s]$ em relação as distâncias para a segunda repetiçao.

No	Distancia LM(m)			Repeticao III					
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
1	1.177	0.587	0.375	0.299	0.247	0.201	0.172	0.152	0.128
2	1.166	0.583	0.387	0.292	0.241	0.201	0.170	0.152	0.140
3	1.203	0.596	0.381	0.282	0.234	0.201	0.164	0.152	0.124
4	1.177	0.583	0.396	0.292	0.244	0.195	0.178	0.136	0.124
5	1.155	0.565	0.399	0.299	0.237	0.206	0.164	0.148	0.132
6	1.155	0.592	0.393	0.305	0.237	0.195	0.162	0.148	0.136
7	1.203	0.596	0.393	0.305	0.244	0.214	0.168	0.156	0.124
8	1.199	0.601	0.387	0.302	0.236	0.195	0.176	0.140	0.140
9	1.177	0.583	0.384	0.295	0.236	0.198	0.178	0.148	0.128
10	1.170	0.583	0.396	0.295	0.241	0.201	0.170	0.140	0.144
11	1.155	0.614	0.378	0.302	0.237	0.207	0.162	0.160	0.136
12	1.166	0.587	0.384	0.285	0.236	0.201	0.172	0.148	0.132
13	1.166	0.587	0.399	0.282	0.236	0.207	0.164	0.144	0.124
14	1.221	0.587	0.417	0.295	0.247	0.198	0.162	0.146	0.124
15	1.166	0.587	0.378	0.288	0.231	0.201	0.164	0.148	0.124
16	1.177	0.601	0.393	0.305	0.231	0.204	0.168	0.144	0.124
17	1.166	0.592	0.384	0.295	0.250	0.198	0.182	0.160	0.132
18	1 177	0.587	0.393	0.288	0.244	0.207	0.168	0.140	0.124
19	1.155	0.596	0.393	0.282	0.234	0.192	0.168	0.156	0.136
20	1.155	0.596	0.399	0.295	0.234	0.195	0.164	0.160	0.140
21	1.144	0.587	0.378	0.282	0.236	0.198	0.168	0.166	0.136
22	1.177	0.601	0.405	0.299	0.236	0.195	0.178	0.156	0.136
23	1.155	0.592	0.396	0.295	0.236	0.201	0.182	0.140	0.124
24	1.201	0.592	0.378	0.295	0.237	0.201	0.166	0.140	0.140
25	1.177	0.623	0.396	0.295	0.244	0.195	0.164	0.148	0.128
26	1.177	0.574	0.393	0.282	0.240	0.195	0.172	0.136	0.128
27	1.199	0.596	0.378	0.288	0.237	0.192	0.186	0.156	0.146
28	1.177	0.587	0.378	0.295	0.240	0.195	0.166	0.140	0.128
29	1.188	0.623	0.393	0.278	0.241	0.201	0.182	0.152	0.136
30	1.199	0.592	0.393	0.302	0.247	0.198	0.176	0.160	0.124
31	1.177	0.592	0.384	0.292	0.244	0.198	0.164	0.136	0.128
32	1.166	0.574	0.393	0.305	0.248	0.207	0.174	0.144	0.124
33	1.166	0.614	0.402	0.292	0.234	0.211	0.182	0.144	0.140
34	1.144	0.601	0.396	0.299	0.244	0.204	0.164	0.144	0.136
35	1.155	0.596	0.417	0.288	0.237	0.198	0.164	0.144	0.132
36	1.188	0.583	0.402	0.295	0.244	0.201	0.166	0.148	0.124
37	1.177	0.587	0.408	0.285	0.247	0.201	0.182	0.144	0.136
38	1.166	0.587	0.396	0.295	0.240	0.211	0.174	0.144	0.124
39	1.199	0.596	0.396	0.295	0.236	0.192	0.180	0.152	0.132
40	1.141	0.583	0.396	0.299	0.244	0.207	0.184	0.144	0.128
41	1.177	0.596	0.393	0.295	0.252	0.196	0.166	0.144	0.124
42	1.177	0.574	0.399	0.299	0.244	0.207	0.182	0.156	0.136
43	1.166	0.614	0.396	0.282	0.244	0.201	0.176	0.160	0.124
44	1.188	0.587	0.393	0.302	0.228	0.201	0.174	0.156	0.128
45	1.166	0.587	0.384	0.299	0.247	0.195	0.162	0.138	0.132
46	1.177	0.596	0.372	0.288	0.241	0.198	0.168	0.152	0.136
47	1.177	0.587	0.390	0.295	0.242	0.207	0.166	0.160	0.128
48	1.177	0.596	0.396	0.299	0.241	0.198	0.174	0.132	0.128
49	1.166	0.601	0.390	0.295	0.244	0.198	0.166	0.148	0.136
50	1.155	0.555	0.396	0.295	0.231	0.198	0.172	0.148	0.132
M	1.174	0.592	0.392	0.294	0.240	0.200	0.171	0.148	0.131

Tabela 7: Valores do Tempo $\Delta t[10^{-3}s]$ em relação as distâncias para a terceira repetição.

No	Distancia L(m)		Repeticao I						
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
1	4.885	10.400	14.952	19.653	24.0828	28.525	35.830	40.807	41.973
2	4.885	9.777	14.952	19.017	24.8992	29.678	32.287	40.807	44.517
3	5.022	9.777	14.509	20.403	24.8992	28.805	34.164	40.807	47.389
4	5.040	10.011	14.952	19.653	24.8992	28.525	34.977	36.726	45.908
5	5.040	10.237	14.952	19.919	24.8992	29.235	34.977	37.668	43.207
6	4.993	10.079	14.952	19.919	24.8992	29.678	35.830	38.659	41.973
7	4.993	10.079	14.952	19.653	25.3284	28.805	35.830	36.726	41.973
8	4.993	10.011	14.092	20.124	24.4842	30.134	35.399	39.704	47.389
9	4.993	10.586	15.546	20.124	24.4842	29.235	32.646	44.517	41.973
10	4.993	9.859	14.727	20.124	24.0828	28.387	35.399	37.668	47.389
11	4.993	10.237	14.727	20.124	23.6944	31.091	33.388	38.659	44.517
12	4.993	10.011	14.617	19.919	24.0828	29.235	33.771	37.668	43.207
13	5.088	9.859	14.839	20.124	24.0828	27.459	36.273	48.968	44.517
14	5.088	9.926	14.839	19.919	24.4842	28.387	35.399	39.704	45.908
15	5.088	9.432	15.184	20.403	24.8992	31.592	33.771	40.807	43.207
16	4.901	10.237	14.952	20.838	23.3183	32.646	35.399	41.973	44.517
17	4.993	10.011	14.952	20.618	25.7728	31.592	36.273	39.704	44.517
18	5.088	10.166	14.952	19.919	24.2818	28.387	34.164	36.726	43.207
19	4.993	10.011	14.952	19.919	24.3826	30.134	34.977	41.973	45.908
20	5.088	10.079	14.952	19.266	24.7941	29.235	37.191	40.807	47.389
21	4.813	10.079	14.952	19.266	23.7903	30.134	34.566	37.668	47.389
22	4.993	9.926	14.952	19.653	25.112	30.134	36.273	36.726	44.517
23	5.040	9.859	15.423	19.653	24.7941	27.849	35.830	40.807	43.207
24	4.993	10.011	15.184	20.838	24.3826	29.678	33.771	43.207	47.389
25	4.993	10.079	15.184	20.124	23.7903	27.849	34.566	38.659	45.908
26	5.137	10.079	15.670	19.653	25.4381	28.387	34.164	38.659	45.908
27	4.686	9.859	14.727	20.124	25.4381	28.387	33.012	39.704	41.973
28	4.901	9.777	15.303	19.458	23.1346	30.134	36.273	39.704	47.389
29	4.993	9.357	15.303	19.919	25.112	29.678	36.273	40.807	47.389
30	4.946	9.926	14.727	19.458	25.112	29.235	32.287	36.726	44.517
31	4.901	9.859	15.303	19.458	24.0828	30.134	34.977	34.977	43.207
32	4.993	10.327	14.727	19.919	24.7941	30.134	35.399	43.207	47.389
33	5.040	9.926	14.839	20.403	24.3826	30.134	34.566	43.207	45.908
34	5.040	9.859	14.839	20.838	23.7903	29.235	35.399	39.704	40.807
35	5.137	9.926	15.303	19.919	25.112	30.605	33.388	40.807	43.207
36	5.040	9.432	14.092	20.403	24.7941	28.805	35.830	43.207	45.908
37	4.946	9.859	14.402	21.137	23.7903	27.849	31.936	39.704	45.908
38	5.040	9.570	14.839	19.266	24.0828	29.235	34.164	40.807	43.207
39	5.040	9.777	14.839	19.653	24.0828	27.849	34.977	40.807	43.207
40	4.901	10.011	15.796	20.618	23.7903	27.849	34.164	38.659	43.207
41	5.137	10.011	14.839	19.919	24.3826	29.678	32.287	37.668	47.389
42	4.993	10.079	14.839	19.919	24.0828	28.387	33.771	39.704	45.908
43	4.993	9.570	15.067	20.403	24.7941	30.134	35.830	41.973	47.389
44	5.040	10.011	15.067	19.919	23.4112	28.805	33.771	36.726	47.389
45	5.040	10.011	15.303	20.838	23.7903	29.235	31.592	37.668	43.207
46	4.993	10.166	14.727	19.653	25.112	29.235	33.012	41.973	45.908
47	4.993	9.859	14.727	19.653	24.3826	29.235	34.977	41.973	48.968
48	5.040	9.859	14.952	19.919	24.7941	29.235	35.830	36.726	45.908
49	4.946	10.011	14.952	20.124	24.7941	30.605	34.566	41.973	43.207
50	5.040	9.570	14.617	20.124	25.4381	29.235	34.566	40.807	43.207
M	4.998	9.949	14.941	19.997	24.491	29.357	34.599	39.921	44.932

Tabela 8: Valores calculados da distancia para a primeira repetiçao.

No	Distancia L(m)		Repeticao II						
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
1	5.001	10.011	14.727	19.458	24.383	29.235	35.830	40.807	43.207
2	4.901	10.011	15.303	20.403	24.383	30.134	34.566	43.207	47.389
3	4.946	9.432	14.727	20.403	23.790	31.091	33.771	43.207	47.389
4	5.001	10.237	15.303	19.919	23.790	29.678	36.273	35.399	47.389
5	4.993	10.166	14.727	19.266	24.083	29.235	34.566	36.726	45.908
6	4.885	9.926	14.952	19.458	24.794	27.205	34.164	39.704	41.973
7	5.040	10.011	14.839	19.919	25.112	28.387	37.191	43.207	40.807
8	4.993	10.011	14.952	20.403	24.083	30.134	34.977	40.807	45.908
9	4.901	9.859	14.952	19.919	24.383	28.387	33.012	40.807	43.207
10	4.993	10.079	14.952	19.458	24.899	30.134	35.830	39.704	45.908
11	4.885	9.926	14.839	19.653	24.083	30.134	34.164	39.704	41.973
12	5.040	10.079	14.402	20.124	24.794	29.235	36.273	40.807	47.389
13	5.040	10.011	14.839	19.653	24.282	31.592	36.273	43.207	45.908
14	5.137	9.859	14.952	19.653	23.790	30.605	36.273	39.704	44.517
15	5.001	10.011	14.509	20.124	24.899	29.235	35.399	40.807	47.389
16	4.993	10.079	14.402	20.618	24.083	31.592	36.273	35.399	43.207
17	5.040	10.079	14.839	20.838	24.899	30.134	32.287	40.807	44.517
18	5.088	10.011	14.839	19.919	25.773	30.134	33.771	39.704	45.908
19	5.088	10.237	14.952	19.919	24.083	31.592	34.164	38.659	47.389
20	5.137	9.859	15.796	19.919	24.899	27.849	36.273	38.659	45.908
21	4.813	9.777	14.839	20.838	24.899	28.805	34.977	37.668	43.207
22	5.088	10.400	14.952	19.653	24.484	28.387	35.399	38.659	45.908
23	4.993	9.859	14.839	20.403	25.112	30.134	34.164	37.668	43.207
24	4.993	9.926	14.952	20.403	24.282	29.678	32.287	43.207	45.908
25	5.088	9.859	14.952	19.653	24.899	29.235	36.273	39.704	41.973
26	5.088	10.512	14.952	20.838	25.112	29.678	33.771	36.726	47.389
27	4.993	9.777	14.952	19.653	24.083	27.849	36.273	40.807	47.389
28	5.088	9.926	15.303	20.403	24.383	29.235	34.164	38.659	41.973
29	5.040	10.011	14.727	19.919	24.794	27.849	34.164	41.973	45.908
30	5.040	10.011	14.160	20.124	23.411	30.134	36.273	36.726	43.207
31	5.040	9.777	14.952	19.266	24.794	29.235	36.273	35.399	44.517
32	5.088	9.859	15.546	20.618	24.899	30.134	36.273	41.973	43.207
33	4.993	9.926	14.617	20.403	23.411	29.678	33.771	41.973	44.517
34	5.088	10.011	14.952	20.403	24.083	28.525	33.388	36.726	43.207
35	5.137	9.859	14.727	20.124	23.790	30.134	34.977	37.668	41.973
36	4.993	9.570	14.952	21.137	25.112	28.387	32.287	39.704	45.908
37	5.088	9.859	15.184	19.919	24.794	30.134	34.977	38.659	47.389
38	5.137	10.011	14.727	19.919	23.790	28.805	35.399	37.668	44.517
39	5.040	10.237	14.952	20.124	24.484	27.849	35.399	44.517	47.389
40	5.088	9.777	14.952	19.266	25.112	29.678	34.977	40.807	43.207
41	5.137	9.432	15.423	19.653	24.484	28.805	34.566	37.668	47.389
42	5.040	9.777	14.839	20.124	24.383	30.605	32.646	41.973	45.908
43	5.040	10.011	14.617	20.124	25.438	29.678	35.399	38.659	43.207
44	5.001	10.011	15.184	19.919	25.438	29.678	35.830	37.668	44.517
45	4.993	10.079	15.184	20.838	24.794	30.605	33.388	36.726	48.564
46	5.137	10.011	14.839	20.124	24.083	30.134	35.830	39.704	45.908
47	5.137	10.011	15.670	19.653	23.790	27.849	35.399	45.908	43.207
48	4.993	10.079	14.727	19.266	24.794	28.525	31.936	41.973	43.207
49	5.146	9.859	15.303	19.919	23.694	29.678	35.830	39.704	47.389
50	4.993	9.570	14.839	19.919	25.438	30.134	34.164	40.807	40.807
M	5.032	9.954	14.932	20.033	24.507	29.499	34.836	39.774	44.904

Tabela 9: Valores calculados da distância para a segunda repetição.

No	Distancia L(m)		Repeticao III						
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
1	4.993	10.011	15.670	19.653	23.790	29.235	34.164	38.659	45.908
2	5.040	10.079	15.184	20.124	24.383	29.235	34.566	38.659	41.973
3	4.885	9.859	15.423	20.838	25.112	29.235	35.830	38.659	47.389
4	4.993	10.079	14.839	20.124	24.083	30.134	33.012	43.207	47.389
5	5.088	10.400	14.727	19.653	24.794	28.525	35.830	39.704	44.517
6	5.088	9.926	14.952	19.266	24.794	30.134	36.273	39.704	43.207
7	4.885	9.859	14.952	19.266	24.083	27.459	34.977	37.668	47.389
8	4.901	9.777	15.184	19.458	24.899	30.134	33.388	41.973	41.973
9	4.993	10.079	15.303	19.919	24.899	29.678	33.012	39.704	45.908
10	5.022	10.079	14.839	19.919	24.383	29.235	34.566	41.973	40.807
11	5.088	9.570	15.546	19.458	24.794	28.387	36.273	36.726	43.207
12	5.040	10.011	15.303	20.618	24.899	29.235	34.164	39.704	44.517
13	5.040	10.011	14.727	20.838	24.899	28.387	35.830	40.807	47.389
14	4.813	10.011	14.092	19.919	23.790	29.678	36.273	40.248	47.389
15	5.040	10.011	15.546	20.403	25.438	29.235	35.830	39.704	47.389
16	4.993	9.777	14.952	19.266	25.438	28.805	34.977	40.807	47.389
17	5.040	9.926	15.303	19.919	23.505	29.678	32.287	36.726	44.517
18	4.993	10.011	14.952	20.403	24.083	28.387	34.977	41.973	47.389
19	5.088	9.859	14.952	20.838	25.112	30.605	34.977	37.668	43.207
20	5.088	9.859	14.727	19.919	25.112	30.134	35.830	36.726	41.973
21	5.137	10.011	15.546	20.838	24.899	29.678	34.977	35.399	43.207
22	4.993	9.777	14.509	19.653	24.899	30.134	33.012	37.668	43.207
23	5.088	9.926	14.839	19.919	24.899	29.235	32.287	41.973	47.389
24	4.893	9.926	15.546	19.919	24.794	29.235	35.399	41.973	41.973
25	4.993	9.432	14.839	19.919	24.083	30.134	35.830	39.704	45.908
26	4.993	10.237	14.952	20.838	24.484	30.134	34.164	43.207	45.908
27	4.901	9.859	15.546	20.403	24.794	30.605	31.592	37.668	40.248
28	4.993	10.011	15.546	19.919	24.484	30.134	35.399	41.973	45.908
29	4.946	9.432	14.952	21.137	24.383	29.235	32.287	38.659	43.207
30	4.901	9.926	14.952	19.458	23.790	29.678	33.388	36.726	47.389
31	4.993	9.926	15.303	20.124	24.083	29.678	35.830	43.207	45.908
32	5.040	10.237	14.952	19.266	23.694	28.387	33.771	40.807	47.389
33	5.040	9.570	14.617	20.124	25.112	27.849	32.287	40.807	41.973
34	5.137	9.777	14.839	19.653	24.083	28.805	35.830	40.807	43.207
35	5.088	9.859	14.092	20.403	24.794	29.678	35.830	40.807	44.517
36	4.946	10.079	14.617	19.919	24.083	29.235	35.399	39.704	47.389
37	4.993	10.011	14.402	20.618	23.790	29.235	32.287	40.807	43.207
38	5.040	10.011	14.839	19.919	24.484	27.849	33.771	40.807	47.389
39	4.901	9.859	14.839	19.919	24.899	30.605	32.646	38.659	44.517
40	5.150	10.079	14.839	19.653	24.083	28.387	31.936	40.807	45.908
41	4.993	9.859	14.952	19.919	23.318	29.981	35.399	40.807	47.389
42	4.993	10.237	14.727	19.653	24.083	28.387	32.287	37.668	43.207
43	5.040	9.570	14.839	20.838	24.083	29.235	33.388	36.726	47.389
44	4.946	10.011	14.952	19.458	25.773	29.235	33.771	37.668	45.908
45	5.040	10.011	15.303	19.653	23.790	30.134	36.273	42.581	44.517
46	4.993	9.859	15.796	20.403	24.383	29.678	34.977	38.659	43.207
47	4.993	10.011	15.067	19.919	24.282	28.387	35.399	36.726	45.908
48	4.993	9.859	14.839	19.653	24.383	29.678	33.771	44.517	45.908
49	5.040	9.777	15.067	19.919	24.083	29.678	35.399	39.704	43.207
50	5.088	10.588	14.839	19.919	25.438	29.678	34.164	39.704	44.517
M	5.008	9.938	15.002	20.015	24.490	29.350	34.396	39.759	44.955

Tabela 10: Valores calculados da distância para a terceira repetição.

NO.	T	NO.	T	NO.	T	NO.	T	NO.	T
1	5.87638	11	5.87602	21	5.87604	31	5.87624	41	5.87619
2	5.87654	12	5.87594	22	5.87601	32	5.87622	42	5.87625
3	5.87668	13	5.87607	23	5.87607	33	5.87626	43	5.87624
4	5.87642	14	5.87598	24	5.87606	34	5.87636	44	5.87628
5	5.87630	15	5.87577	25	5.87608	35	5.87632	45	5.87626
6	5.87625	16	5.87582	26	5.87608	36	5.87636	46	5.87633
7	5.87626	17	5.87599	27	5.87611	37	5.87640	47	5.87646
8	5.87618	18	5.87591	28	5.87621	38	5.87633	48	5.87639
9	5.87612	19	5.87600	29	5.87632	39	5.87628	49	5.87633
10	5.87616	20	5.87612	30	5.87627	40	5.87621	50	5.87620

Tabela 11: Medidas do período T $[10^{-3}s]$.